3-6
septiembre
2019

Escuela Politécnica Superior - Huesca
Universidad Zaragoza

Secção Especializada de Engenharia Rural - SCAP

AGRO Ingeniería



X Congreso Ibérico de Agroingeniería

X Congresso Ibérico de Agroengenharia

Libro de actas - Livro de atas

X Congreso Ibérico de Agroingeniería

X Congresso Ibérico de Agroengenharia



LIBRO DE ACTAS · LIVRO DE ATAS

Editado por

F. Javier García-Ramos

Pablo Martín-Ramos

Servicio de Publicaciones

Universidad Zaragoza

Título: Proceedings of the 10th Iberian Agroengineering Congress

(Libro de actas del X Congreso Ibérico de Agroingeniería)
(Livro de atas del X Congresso Ibérico de Agroengenharia)

Editores: F. Javier García-Ramos Universidad de Zaragoza, España
Pablo Martín-Ramos Universidad de Zaragoza, España

Maquetado: Eva Manso Cano

© F. Javier García Ramos, Pablo Martín-Ramos
1ª Edición. Huesca, 2019
Edita: Escuela Politécnica Superior. Universidad de Zaragoza
ISBN: 978-84-16723-79-9
URL: http://dx.doi.org/10.26754/uz.978-84-16723-79-9

Format for citation:
Author(s). (2019) Title. In: García-Ramos, F.J.; Martín-Ramos, P. (Ed.). Proceedings of the 10th Iberian Agroengineering Congress. Huesca, Spain: Universidad de Zaragoza, pp. xxx-xxx.



Documento elaborado bajo licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

SPONSORS · PATROCINADORES

Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Agrícolas de Aragón

Consejo General de Colegios Oficiales de Ingenieros Agrónomos

Prologue

In 2017, the Food and Agriculture Organization (FAO) issued a report on the challenges that Agriculture is facing and will face into the 21st century, which can be summarized in one question: will we be able to sustainably and effectively feed everyone by 2050 and beyond, while meeting the additional demand for agricultural commodities due to non-food uses? Agricultural engineers can contribute in this process by releasing the biological and technical constraints on crop and animal productivity, reducing the contribution of the agricultural sector to environmental degradation, and enabling agricultural practices to adapt to environmental changes. To achieve optimal results for agribusiness and the society, the expertise of agricultural engineers must be integrated with expertise from other sciences: breakthrough technologies are needed for agricultural enterprises to meet the increasing list of standards and norms in the areas of energy, animal welfare, product quality, water, and volatile emissions. Recognition of trends in society and networking and participation in debates have thus become important activities for agricultural engineers.

The Iberian Agroengineering Congress series brings together Spanish and Portuguese engineers, researchers, educators and practitioners to present and discuss innovations, trends, and solutions to the aforementioned challenges in the interdisciplinary field of Agricultural and Biosystems Engineering. This biennial congress, jointly organized by the Spanish Society of Agroengineering and the Specialized Section of Rural Engineering of the Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal, has proven to be an excellent opportunity to network and discuss future developments. In its 10th edition, the Congress has been held from 3-6 September in Huesca (Spain), at the Escuela Politécnica Superior, located on the Huesca Campus of the University of Zaragoza. The topics of the Congress have included the main areas of Agricultural Engineering: mechanization; soils and water; animal production technology and aquaculture; rural constructions; energy; information technologies and process control; projects, environment, and territory; postharvest technology; and educational innovation in agroengineering.

The Congress has received 123 participants, who have submitted 144 papers, 86 oral communications and 58 poster. 22 universities, 4 research centers and 8 companies/professional associations have been represented. The quality of the papers presented to the congress is endorsed not only by the long trajectory of the Iberian Agroengineering Congress, but also by the edition of a Special Issue of Agronomy journal (ISSN 2073-4395) entitled "Selected Papers form 10th Iberian Agroengineering Congress".

COMITÉ ORGANIZADOR / COMISSÃO ORGANIZADORA

Presidente: F. Javier García Ramos

Vicepresidente: José Casanova Gascón

Secretario / Secretário: Pablo Martín Ramos

Vocales / Vogais:

Ayuga Téllez, Francisco
Batista, Fátima
Barbosa, José Carlos
Boné Garasa, Antonio
Cuchí Oterino, José Antonio
Jiménez Jiménez, Ángel
Malón Litago, Hugo
Pérez Ruiz, Manuel
Silva, Luis Leopoldo
Vidal Cortés, Mariano
Videgain Marco, María

COMITÉ CIENTÍFICO / COMISSÃO CIENTIFICA

Sociedad Española de Agroingeniería

Aguado Rodríguez, Pedro - Universidad de León
Antolín Rodríguez, Juan Manuel - Universidad de Valladolid
Arazuri Garín, Silvia - Universidad Pública de Navarra
Ayuga Téllez, Esperanza - Universidad Politécnica de Madrid
Ayuga Téllez, Francisco - Universidad Politécnica de Madrid
Barrasa Rioja, Martín - Universidad de Santiago de Compostela
Barreiro Elorza, Pilar - Universidad Politécnica de Madrid
Blasco Ivars, José - Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias
Brasa Ramos, Antonio - Universidad de Castilla - La Mancha
Bueno Lema, Javier - Universidad de Santiago de Compostela
Calvet Sanz, Salvador - Universidad Politécnica de Valencia
Camacho Poyato, Emilio - Universidad de Córdoba
Casanova Gascón, José - Universidad de Zaragoza
Castro Abengoza, Rosario - Universidad de León
Correa Guimaraes, Adriana - Universidad de Valladolid
Cuchí Oterino, José Antonio - Universidad de Zaragoza
Flores Yepes, José Antonio - Universidad Miguel Hernández de Elche
García Fernández, José Luis - Universidad Politécnica de Madrid
García García, Ana Isabel - Universidad Politécnica de Madrid
García Ramos, Francisco Javier - Universidad de Zaragoza
Moya, Emilio Gil - Universidad Politécnica de Cataluña
Grande Ortíz, María Ángeles - Universidad Politécnica de Madrid
Gutiérrez Colomer, Rosa Penélope - Universidad Politécnica de Valencia

Malón Litago, Hugo - Universidad de Zaragoza
Martí de Olives, Ana - Universidad Miguel Hernández
Martín Gil, Jesús - Universidad de Valladolid
Martín Gorriz, Bernardo - Universidad Politécnica de Cartagena
Martín Ramos, Pablo - Universidad de Zaragoza
Martínez Álvarez, Victoriano - Universidad Politécnica de Cartagena
Martínez Rodríguez, Andrés - Universidad de Valladolid
Melgarejo Moreno, Pablo - Universidad Miguel Hernández
Molina Martínez, José Miguel - Universidad Politécnica de Cartagena
Moreno Hidalgo, Miguel Ángel - Universidad de Castilla-La Mancha
Moya Ignacio, Manuel - Universidad de Extremadura
Navas Gracia, Luis Manuel - Universidad de Valladolid
Ortíz Sánchez, Coral - Universidad Politécnica de Valencia
Pérez Ruiz, Manuel - Universidad de Sevilla
Ramírez Gómez, Álvaro - Universidad Politécnica de Madrid
Relea Gangas, Enrique - Universidad de Valladolid
Rocamora Osorio, Carmen - Universidad Miguel Hernández de Elche
Rodríguez Díaz, Francisco - Universidad de Almería
Rovira Más, Francisco - Universidad Politécnica de Valencia
Ruiz Altisent, Margarita - Universidad Politécnica de Madrid
Ruiz Canales, Antonio - Universidad Miguel Hernández de Elche
Suarez de Cepeda Martínez, Mariano - Universidad de Castilla-La Mancha
Suay Cortés, Ricardo - Institut National de la Recherche Agronomique, Sophia-Antipolis, Francia
Tarjuelo Martín-Benito, José María - Universidad de Castilla-La Mancha
Torregrosa Mira, Antonio - Universidad Politécnica de Valencia
Valero Ubierna, Constantino - Universidad Politécnica de Madrid

Secção Especializada de Engenharia Rural de la Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal

Baptista, Fátima - Universidade de Évora
Barbosa, José Carlos - Instituto Politécnico de Bragança
Castro Ribeiro, António - Instituto Politécnico de Bragança
Dias, António - Universidade de Évora
dos Santos, Fernando Augusto - Universidade de Tras-os-Montes e Alto Douro
dos Santos, Francisco Lúcio - Universidade de Évora
Ferreira de Almeida, Arlindo - Instituto Politécnico de Bragança
Fitas da Cruz, Vasco - Universidade de Évora
Gonçalves, José Manuel - Escola Superior Agrária de Coimbra
Martínez Ferreira, Luis Jorge - Agência Nacional de Inovação
Santos, Ana Cristina - Universidade de Évora
Serrano, João Manuel - Universidade de Évora
Silva, Luis Leopoldo - Universidade de Évora
Silva, José Rafael - Universidade de Évora
Sousa, Adélia - Universidade de Évora

CONTENIDO

Construcciones e infraestructuras rurales

Aditivo para fabricación de ladrillos de yeso: macizos, huecos o semihuecos mediante vibrocompresión 2

Análisis de la rigidez a distintas profundidades de la unión pilar-zapata tipo cáliz de superficies lisas en estructuras prefabricadas de hormigón, mediante modelización por el Método de los Elementos Finitos 8

Análisis de los requisitos de seguridad contra incendios en las industrias agroalimentarias 17

Análisis de vigas metálicas utilizadas en correas de cubierta en industrias agroindustriales 25

Análisis del coste constructivo de salas de crianza aéreas para vino tinto 35

Análisis resistente de viales de jabre estabilizados con los cementos: CEM II B-L 32,5N y CEM II A-V 42.5N 45

Avaliação do comportamento térmico de pavilhões de produção de frangos em Moçambique 56

Caracterización de tableros de partículas sin adhesivos elaborados con rizoma de caña común 65

Determinación de la influencia del contenido de humedad en el coeficiente de rozamiento interno de microesferas de cristal mediante ensayos de corte directo 76

Determinación de los coeficientes de rozamiento en piezas de madera de castaño de procedencia española y su aplicación estructural 88

Estratificación en "bodegas catedral" para la crianza de vinos generosos. 99

Estudio de la mejora de la durabilidad de hormigones reciclados con biopolímeros 106

Estudio de la valorización de residuos de almendra para paneles de bajo coste 112

Estudio de los costes de construcción y climatización en bodegas: tipologías constructivas de la sala de barricas respecto a la cota del terreno 122

Estudio del comportamiento de silos de chapa corrugada mediante modelos de elementos discretos 127

Evaluación experimental de un nuevo composite de caña común *(Arundo donax L)* utilizando ácido cítrico como ligante natural 135

Metodología y aplicación práctica para la inspección de edificios agroindustriales mediante drones 144

Presiones normales sobre tolvas oblicuas en silos de acero 149

Energía

Análisis del impacto ambiental y económico vinculado a la energía fotovoltaica frente al uso de energías convencionales en el regadío 158

Indicadores clave de rendimiento (KPIs) sobre eficiencia energética en la industria agroalimentaria 166

Integración de modelos hidráulicos y fotovoltaicos en bombeo solar 172

Mejoras en los sistemas de aprovechamiento de la energía térmica de los efluentes residuales 182

Modelado de producción, consumo y almacenamiento de recursos heterogéneos de un distrito agroindustrial con energías renovables 190

Predicción de la irradiación solar global diaria horizontal mediante redes neuronales artificiales en la región de Castilla y León, España 199

Simulación del uso compartido del terreno agrícola por paneles solares fotovoltaicos y cultivo 218

Sostenibilidad ambiental del riego con agua marina desalinizada y reutilización de drenajes en tomate bajo invernadero 225

Uso de energía solar fotovoltaica aplicada a la refrigeración de un invernadero 233

Innovación educativa en Agroingeniería

Apps como vehículo de aprendizaje en naturación urbana y campos deportivos 240

Diseño de mecanismos de línea recta mediante software de Geometría dinámica 246

Gamificación como instrumento para mejorar los indicadores docentes en asignaturas de ingeniería agroforestal 254

Huertos académicos como herramientas de innovación docente en el Campo de prácticas de la ETSIAM de Albacete de la Universidad de Castilla-La Mancha 260

Las exposiciones interactivas para escolares como herramienta de motivación de los estudiantes de Ingeniería Forestal y del Medio Natural 267

Mejorando la formación en nuevas tecnologías para una agricultura digital: Proyecto Sparkle 280

Proyecto H2020 - INNOSETA - Cómo acercar la investigación al campo a través de la formación 288

Sustainable farming best practices for MSc programmes 296

Mecanización

Accidentes mortales en el sector agrario en los últimos 15 años 307

Análisis de la influencia de la poda mecanizada sobre la incidencia de plagas en mandarinos de la variedad `Clemenules´ 316

Análisis de la técnica de laboreo en bandas (*Strip Till*) en ensayos de campo reales 322

Análisis del aclareo mecánico de mandarinas durante el desarrollo del fruto a través de los videos de desprendimiento en laboratorio 331

Análisis del sistema implantado en España para el control de equipos de aplicación de productos fitosanitarios: entidades inspectoras, control de la calidad de la inspección y gestión de datos 342

Análisis y optimización del diseño inicial de las barras de un pulverizador hidráulico suspendido de 26 metros mediante el Método de los Elementos Finitos 349

Avaliação da influência da poda no desempenho da máquina de colheita em pomares superintensivos de amendoeira 360

Comparación de los sistemas de formación en seto y en vaso libre con la variedad de almendro 'Soleta' 373

Comprobación de un sistema de aplicación variable basado en mapas de vegetación obtenidos con un vehículo aéreo no tripulado (UAV) 382

Deteção remota aplicada aos espaços verdes urbanos do Mediterrâneo 390

Diseño y primeros resultados de una plataforma móvil eléctrica de registro de datos para agricultura de precisión 398

Estudio de la agitación en tanques de pulverizadores agrícolas mediante simulaciones informáticas 407

Estudio sobre la clasificación de la eficiencia energética de los tractores agrícolas 418

Instalación de secado de residuos por medio de intercambiador de calor de superficie rascada 429

Mechanical mandarin thinning related to fruitlet developing stage 439

Patrones de desprendimiento de cítricos y respuesta del árbol bajo recolección mecanizada con sistemas sacudidores de copa 448

Proceso de acompañamiento a la innovación para el hilerado, triturado y gestión de los restos de poda en olivar. 459

Riesgos de incendio asociados a cosechadoras de cereales: análisis de zonas críticas en la maquinaria 466

Tres años de ensayos de poda mecánica y manual en limonero 'Fino 95' 475

Validación de CitrusVol para el ajuste de volúmenes de caldo en tratamientos contra araña roja en cítricos 485

Proyectos, medio ambiente y territorio

Análisis de las diferencias en la elección de valor económico de árboles urbanos de Madrid cuando se muestran al natural y en fotografía 493

Análisis en tiempo real del funcionamiento de la cadena de alimentación de las máquinas deshuesadoras de aceitunas mediante diagnosis por visión artificial y redes neuronales 502

Caracterización del viñedo mediante análisis de datos LIDAR aerotransportado 509

Comportamiento de variedades de vid resistentes a enfermedades fúngicas en la comarca del Somontano 517

Desarrollo de prototipo de membrana para la captación de gas amoniaco en la atmósfera de las granjas 527

Dimensión social del paisaje como herramienta para la gestión de espacios naturales en entornos agrícolas 535

Estudio de la actividad antifúngica *in vitro* de materiales compuestos basados en complejos de inclusión de polifenoles contra *Phytophthora cinnamomi* 547

Estudio de un proceso de compostaje de estiércol de conejo mediante técnicas espectroscópicas y análisis de ácidos húmicos y fúlvicos 554

Estudio de valorización de la jara pringosa en los municipios de la Sierra Norte Madrileña 563

Evaluación de la iluminación fotosintética mediante LEDs en Jardinería Vertical 572

Implantación de un visor GIS con software libre en la Comunidad de Regantes del Trasvase Tajo-Segura de Totana, Murcia 578

Interferometría diferencial como herramienta para el estudio localizado de la erosión por escorrentía 595

Promover o desenvolvimento sustentável do território pela inovação agrícola. Desafios da agricultura biológica no Vale do Lis, Portugal 606

Proyecto LIFE Ammonia Trapping: planta piloto para la captura de amoniaco del purín 623

TERR@ENO - Terroir e zonagem agro-ecológica como fator crítico de competitividade e inovação dos Vinhos Verdes 629

Uso de herramientas de geoproceso de los SIG sobre datos LIDAR para el análisis territorial 634

Suelos y aguas

Análisis de la velocidad de infiltración del agua en el suelo saturados mediante lisímetros de pesada 642

Apoio à gestão do regadio coletivo. Estudo de caso de monitorização da água no Aproveitamento Hidroagrícola do Vale do Lis, Portugal 649

App para la programación del riego y la fertilización del olivar regado con agua regenerada 661

Concentración, distribución y procedencia de metales y metaloides en suelos bajo diferentes sistemas de cultivo 672

Determinación del consumo de agua en lechuga (*Lactuca sativa* L CV Neruda) mediante lisimetría de pesada compacta y sondas de humedad 680

Efecto de diferentes diseños de drenajes de filtros de arena en la obturación de goteros utilizando aguas residuales regeneradas 686

Efecto de la altura de medio filtrante y la velocidad de filtración en el comportamiento de distintos modelos de filtro de arena en instalaciones de riego por goteo con aguas regeneradas 697

El cultivo asociado de melón-caupí puede mejorar la producción del melón, productividad del terreno y reducir el uso de fertilizantes 706

Empleo simultáneo de la fotografía digital y medidas en campo para el seguimiento del estado fenológico en lechuga (*Lactuca sativa* L CV Neruda) con distintos tratamientos de suelo 710

Estrategias para la búsqueda de bacterias degradadoras de atrazina en la laguna salada de Pétrola (SE Albacete) 718

Evaluación agronómica del riego con agua marina desalinizada en cítricos.

Resultados del primer año de ensayo 724

Evaluación de diferentes sustancias químicas como repelentes del crecimiento radicular para su uso en mantas de riego subsuperficial 731

Evaluación de los efectos de la aplicación de biochar como enmienda orgánica en un cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) bajo condiciones de invernadero 744

Evaluación de prototipos de jardines verticales confeccionados a partir de material reciclable 758

Evaluación de sondas capacitivas comerciales y bajo coste para estimar la humedad 765
Evolución de prototipos de depósitos de drenaje para lisímetros de pesada 773
Fitorremediación de aguas residuales industriales mediante humedales artificiales para uso agrícola 778
Gestión del agua marina desalinizada en parcela: adaptación de la fertirrigación y uso conjunto con otras fuentes de agua 785
Implementación de depósitos de muestreo en lisímetros de pesada y sus necesidades 795
Influencia de diferentes manejos ecológicos y de las rotaciones en el suelo, así como su repercusión en el control de malas hierbas y en el rendimiento del cultivo 800
Modelação da rega deficitária em vinha com o MOHID-Land 807
Nitratos en aguas subterráneas de acuíferos del Somontano occidental de la Hoya de Huesca 816
O sistema IrrigaSys de apoio à gestão da rega no vale do Sorraia 825
Predicción de la dinámica del carbono orgánico en suelos agrícolas del Cerrato Palentino (España) aplicando el modelo RothC 832
Primer balance de agua, sales y nitrógeno en la cuenca de la Clamor Vieja, Castelflorite, Santalecina, Alcolea de Cinca (Huesca). Drenaje de un regadío modernizado 843
Reescribir los retos del agua con una amplia base social. Grupo Operativo: Partenariado del Agua de la Cuenca del Ebro-Aragón. 856
Resultados preliminares del estudio de la influencia de adición de harina de pórfido en la nutrición de un cultivo aplicado al caso de la lechuga (*Lactuca Sativa* L CV Neruda) 863
Transferencia y acumulación de metales y metaloides tanto en lechuga como en plantas silvestres en suelos afectados por la minería metálica 870
Uso combinado de harina de pórfido y materia orgánica para la mejora de las condiciones nutricionales e hídricas del suelo. Caso de estudio en el cultivo de lechuga (*Lactuca Sativa* L CV Neruda) 879
Uso da água e produtividade do trigo mole sob diferentes estratégias de rega e fertilização azotada 884
Utilização de técnicas de termografia para a avaliação do estado hídrico da *Vitis vinifera* cv Loureiro 899

Tecnología de la información / Control de procesos / Automatización

Análisis del consumo de agua de *Hordeum vulgare* L. mediante un equipo de lisimetría de pesada 906
Automatización de pequeños jardines con Sonoff 4CH Pro R2 y EWelink 911
Caracterización del porcentaje de aceitunas mal posicionadas en máquinas deshuesadoras, rodajadoras y relleno de aceitunas de mesa (DRR) 917
Detección de características de cultivo a través de sensores ópticos en un sistema orgánico de tipo *strip-cropping* 925

Dispositivo de captura y envío de imágenes a un servidor remoto para monitorizar trampas para insectos en el campo 934
Electrónica y automática de bajo coste aplicada al huerto urbano 940
Empleo de sumadores electrónicos en lisímetros de pesada de varías células de carga..... 953
Estimación de parámetros biofísicos de interés para la mejora de trigo usando inteligencia artificial 959
Estimación de producción en cítricos usando técnicas de aprendizaje automático 967
Estudio de la evolución de la calidad de granada 'Mollar de Elche' durante su maduración usando sistemas de visión artificial..... 974
Evaluación de los descriptores organolépticos de subproductos productos durante la fermentación alcohólica de la cerveza..... 984
GreenBook: App híbrida para el seguimiento y control de explotaciones agrarias intensivas 998
Herramienta para la generación de mapas de rendimiento en cítricos usando los datos de una plataforma de asistencia a la recolección con sistema de clasificación 1004
Integração da condutividade eléctrica do solo e índices obtidos por imagens de satélite para gestão diferenciada da fertilização em pastagens 1012
Nebulizador Tecnovid Qi H_3O: Inteligente y conectado 1022
Olivar en superintensivo; la máxima rentabilidad en un cultivo tradicional..... 1038
RICA (Red de Intercambio de Conocimiento Agroalimentario): un nuevo modo de trasferir conocimiento usando medios digitales (ricagroalimentacion.es) 1044
Robot de campo para detectar enfermedades en cultivos hortícolas mediante imágenes multiespectrales 1049
Sistema LIDAR para evaluar la deriva.
Medidas con diferentes tipos y calibres de boquilla 1055
Tecnologias para monitorização da interacção entre solo – pastagem – árvores – animais no ecossistema montado 1061
Uso de la herramienta *boundar -detection* para la detección de malas hierbas en el cultivo 1071
Uso de redes neuronales convolucionales para la detección remota de frutos con cámaras RGB-D 1081
Utilización de modelos mixtos lineales generalizados en el análisis de la velocidad del fluido en el interior de un pulverizador agrícola 1088
XF-ROVIM, un robot para la detección de enfermedades en campo mediante teledetección. Aplicación a la detección de *Xylella fastidiosa* 1096

Tecnología de la producción animal / Acuicultura

Evolución de la concentración de NH_3 en función de la temperatura de consigna en alojamientos porcinos de transición..... 1103
Mejoras zootécnicas orientadas a la rentabilización de la utilización de corderos de razas lecheras en el mercado cárnico..... 1117
Supervisión en continuo de porcino en cebo mediante sistema multi-sensor: patrones de comportamiento 1127

Tecnología poscosecha

Actividad antifúngica contra *Fusarium culmorum* de los extractos de hojas de *Stevia rebaudiana* y sus combinaciones con extractos de semillas de *Silybum marianum* y *Lycium barbarum* 1139

Biodeterioro microbiológico en shiitake *(Lentinula edodes)* 1147

Desarrollo de procedimientos de evaluación rápida de calidad de aceites basados en técnicas espectroscópicas 1161

Desarrollo de un sistema para la administración de cosechas de café 1169

Determinación de precursores de acrilamida en patata por NIRS 1176

Diferentes aplicaciones de la imagen hiperespectral para garantizar la calidad de nectarina 1181

Efectos del recubrimiento con sulfato de zinc sobre tasas de germinación y niveles de isoenzimas en semillas de algodón 1188

Efectos inmediatos y tras almacenaje del recubrimiento con boro de semillas de algodón 1199

El sistema APPCC como herramienta para reducir el riesgo de aparición de *Listeria monocytogenes* en vegetales congelados 1209

Evaluación de las pérdidas en patata durante su almacenamiento por punción y tecnología NIRS 1221

Evaluación metrológica de dos dispositivos comerciales para la estimación espectrofotométrica de la calidad interna en uvas 1227

Frutas de hueso listas para consumo en punto de venta: instrumentación para la evaluación de la jugosidad 1238

Identificación de la presencia de oídio (*Erysiphe necator*) en racimos de uva mediante imágenes hiperespectrales 1248

Identificación optimizada de las longitudes de onda relevantes en espectros NIR de aceituna 1255

Obtención y caracterización de aceites de frutos secos vírgenes 1260

Área temática:

Construcciones e infraestructuras rurales



Aditivo para fabricación de ladrillos de yeso: macizos, huecos o semihuecos mediante vibrocompresión

Flores Yepes, José A[1]. Berná Serna, Juan Manuel[2]. Gimeno Blanes, Francisco Javier[1]. Pastor Perez, Joaquín[1]. Martínez Gabarrón, Antonio[1]. Luis M. Serna Jara[3]

[1] Profesor Universidad Miguel Hernández, Elche, Alicante, Spain. Carretera de Beniel, Km. 3,2
[2] Dr. Ingeniero Agrónomo.
[3] Ingeniero Técnico Industrial, Grado en Ingeniería Mecánica

Resumen: El departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández del Campus de Orihuela lleva más de catorce años investigando sobre el desarrollo de nuevos materiales, la forma de aditivarlos y su aplicación a la sociedad. El aditivo está patentado, es un fluidificante, superplastificante y retardante del fraguado del yeso, compuesto por dióxido de silicio coloidal más ácido cítrico, con proporciones de 1-3 % de dióxido de silicio y de 99-97 % de ácido cítrico. Se puede adicionar tanto en fase sólida como en líquida, actuando sobre el fraguado. Es de aplicación en yeso blanco, yeso negro o moreno (Black paster) y escayola. Las dosificaciones, por kg de yeso, están entre 0.06 gr/kg hasta 1,2 gr/kg de yeso, con unos tiempos de fraguado entre 15 y 240 minutos. La dosificación del agua para el amasado es variable, siendo una ventaja la reducción de agua en el masado. Se establece en 0,2 kg de agua por 1 kg de yeso. Así se obtiene un material que convertido en pequeñas bolas (diámetro entre 2 y 8 mm) es utilizable en la fabricación de prefabricados mediante prensado. En la fabricación de ladrillos de yeso se produce una reducción de emisiones de CO_2 en torno al 80 %, con temperatura de calcinación de unos 250 ºC, según el tipo de yeso a conseguir. Se evita el tiempo de secado del ladrillo cerámico (unas 8 horas a 100 ºC) más el de cocción del mismo (unas 8-14 horas a 900 ºC). El material tiene un uso industrial en la fabricación de ladrillos huecos o semihuecos (comportamiento a Compresión de unos 19,2323N/mm^2), además de un beneficio medioambiental y económico.

Palabras clave: sulfato cálcico, eficiencia energética, fraguado, ladrillo cerámico, compresión.

1. Introducción

Se analiza en el estudio dos líneas de trabajo distintas. Una de ellas, la propia fabricación de ladrillos y sus correspondientes ensayos mecánicos referidos al más concluyente que es la resistencia compresión. La otra, se refiere al estudio energético, o eficiencia del proceso propuesto.

El desarrollo, centrado en la aplicación del sulfato cálcico al desarrollo de elementos prefabricados, se fundamenta en el hecho de sustituir el procedimiento de colada directa por el de prensado o vibro-comprimido habitual en elementos prefabricados tipo bloques, bovedillas, bordillos, adoquines, etc. El intento de fabricación de ladillos por extrusión ha sido, en nuestro caso, infructuoso por disgregarse el agua de la matriz de yeso y producir un emboce en el cuello de salida de la extrusora. No quiere decir esto que no se pueda experimentar en esa línea, si bien, el resultado de la fabricación mediante prensa, por el contrario, sí ha resultado idóneo.

Otro aspecto a reflejar en el estudio es la necesidad de obtener un material "granuloso" que sea capaz de llenar los huecos de un molde, con la suficiente consistencia mecánica, tiempo de

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3402

fraguado suficiente, plasticidad para moldeo y no adherencia para poder desmoldar. Esta característica que en el amasado de hormigones semisecos es "fácil de conseguir", no lo es tanto cuando se trata de yesos. Para ello, se han elaborado dos procedimientos: uno con aportación de arena (sílice fina tipo arena de playa), y el segundo, que evita la adicción de árido objeto de este estudio.

Para conseguir todo lo descrito, se ha reducido la cantidad de agua de masado a 200g por cada 1000g de sulfato cálcico estándar de construcción o yeso negro. Se ha aditivado, antes de comenzar el proceso de amasado, con 0.6g de aditivo mezclado en la matriz de yeso (también se pude dispersar en agua) y posteriormente se ha amasado con una batidora manual.

En relación a la parte energética, se analiza la parte correspondiente a la fabricación y la de secado o cocción.

El objetivo del estudio que se presenta es mostrar los resultados del proceso de fabricación y de la comparativa energética del ladrillo de sulfato cálcico que se obtiene, con el correspondiente ladrillo cerámico.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Los materiales empleados para la fabricación son los siguientes:

El agua, es uno de los componentes básicos para la formación de la pasta; la empleada en los ensayos es agua de la red de suministro, sin ningún tratamiento especial. Hay que tener en cuenta la temperatura a la que se adiciona, ya que ésta afecta en la cantidad de sulfato de calcio que se disuelve. La empleada en laboratorio ha sido de 25ºC. La tabla 1, expone los parámetros analíticos del agua empleada.

Tabla 1: Parámetros analíticos del agua empleada en la elaboración de los morteros. (Aquagest Levante, S.A.).

Parámetros	Resultados %	Unidades
Amonio	< 0.10 ±15	mg/L
Carbono orgánico total	1.8 ±15	mg/L
Cianuros totales	<5 ±28	µg/L
Indice de Langelier	0,46	-
Bicarbonatos	156.0 ±12	mg/L
Calcio	96.4 ±12	mg/L
Carbonatos	< 2.0 ±13	mg/L
Conductividad a 20ºC	931 ±12	µS/cm
pH	7.9 ±0.1	U. pH.
Sodio	54.7 ±12	mg/L
Cloruros	90.0 ±13.0	mg/L
Fluoruros	0.150 ±12.9	mg/L
Nitratos	2.6 ±13.1	mg/L
Sulfatos	270.8 ±13.1	mg/L

Se ha utilizado Sulfato cálcico para el desarrollo de los ensayos cuyas características nominales vienen definidas según la Norma EN UNE 13279-1, [1], empleando el tipo B1 denominación de Yeso para construcción, siendo las siguientes: Yeso grueso constituido por semihidrato ($SO_4Ca.1/2H_2O$) con más del 50% de hemihidrato, con la posible incorporación de aditivos reguladores del fraguado, con una resistencia mecánica mínima a Flexión de 1 N/mm^2 y de 2 N/mm^2 a Compresión (Tabla 2). Este tipo de yeso se utiliza para pasta de agarre en la

ejecución de tabicados, en revestimientos interiores, como conglomerante auxiliar de obra y es empleado, además, para prefabricados.

Tabla 2. Especificaciones para los yesos de construcción (Fuente: Norma UNE EN 13279-1) [1].

Plaster for construction	Binder plaster % content	Principle of setting time min		Flexural strength N/mm²	Resistance to compression N/ mm²	Surface hardness N/ mm²	Adhesion N/ mm²
		Normal application plaster	Plaster projection mechanics				
B1	≥50						The break occurs on the stand or the mass of plaster; When the break appears in the plaster support interface must be ≥1
B2	<50						
B3	a						
B4	≥50						
B5	<50						
B6	a	>20b	>50	≥1,0	≥2,0	-	
B7	≥50			≥2,0	≥6,0	≥2,5	

a According to paragraphs 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6

b Some handheld applications allow one value less than 20 min. In this case, the producer must declare the principle of setting time.

Aditivo para yesos patentado con número de registro P201700812. El aditivo se trata de fluidifante superplastificante y retardardante del fraguado compuesto por dióxido de silicio coloidal más ácido cítrico (o ácido policarboxílico), con proporciones 1-3% de dióxido de silicio y 99-97% de ácido cítrico molido y tamizado.

La dosificación realizada en los ensayos ha sido: 1000gr de yeso, 200gr de agua y 0.06gr de aditivo.

2.2. Procedimientos o métodos

Proceso de trabajo. Se dosifica en el yeso seco el aditivo sólido y se mezcla durante cinco minutos. Posteriormente se vierte el agua sobre el yeso aditivado y se mezcla con una batidora manual hasta conseguir la dispersión, en forma de bolas, de entre 1-4mm de diámetro aproximadamente. Se vierte sobre la máquina de vibrocompresión con un molde semimazizo o ladillo perforado, del mismo modo que se fabrican los bloques o bovedillas. La presión de trabajo de dicha prensa es de 4,5kg/cm².

Las dimensiones de los ladrillos se han fijado en 221x118x45mm. Se han realizado un total de 10 probetas correspondientes a un solo lote de fabricación.

Una vez obtenido el ladillo se deja secar durante 14 días a temperatura superior a 15ºC y humedad relativa inferior o igual al 65% hasta alcanzar el estado de masa constante. Posterior secado de probetas durante 24 horas a 105ºC con margen de 5ºC, y posterior enfriamiento de 4 horas. Posteriormente se ensaya a compresión en una maquina universal de ensayos. La norma considerada ha sido la UNE-EN 772-1, 2011. [4]



Figura 1. Ladrillo tipo de yeso ensayado.

Con relación al estudio energético. Se evalúa el proceso se fabricación del ladillo de yeso aditivado comparándolo con el cerámico perforado.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados y Discusión resistencia mecánica.

Los resultados de la rotura de probetas, se muestran en la tabla adjunta, además de los parámetros estadísticos más representativos.

Tabla 3: Resultados de los distintos ensayos.

Probeta	Área Media (mm^2)	Carga de rotura (kN)	Resistencia a Compresión (N/mm^2)	Valores estadísticos de la variable Compresión	
1	26078	581,54	22,3	Media	19,87
2	26078	526,78	20,2	Varianza	4,78
3	26078	396,39	15,2	Desv. Estand	2,19
4	26078	482,44	18,5	Coef Variación	0,11
5	26078	524,17	20,1	Xmin	15,20
6	26078	466,80	17,9	Cuartil 1	18,80
7	26078	560,68	21,5	Cuartil 2	20,15
8	26078	576,32	22,1	Cuartil 3	21,43
9	26078	513,74	19,7	Mediana	20,15
10	26078	552,85	21,2	Xmax	22,30

La resistencia a compresión normalizada fb, según norma [4], es de 15,2 N/mm^2

En la gráfica adjunta, se muestra la variabilidad de resultados con una regresión cuadrática de 0.62, alejada de un valor óptimo de 0.95; es evidente que, con un solo lote de fabricación, la dispersión obtenida es más alta de lo esperado, pero se observan los valores de resistencia a compresión comparables con un hormigón H17.5-H20

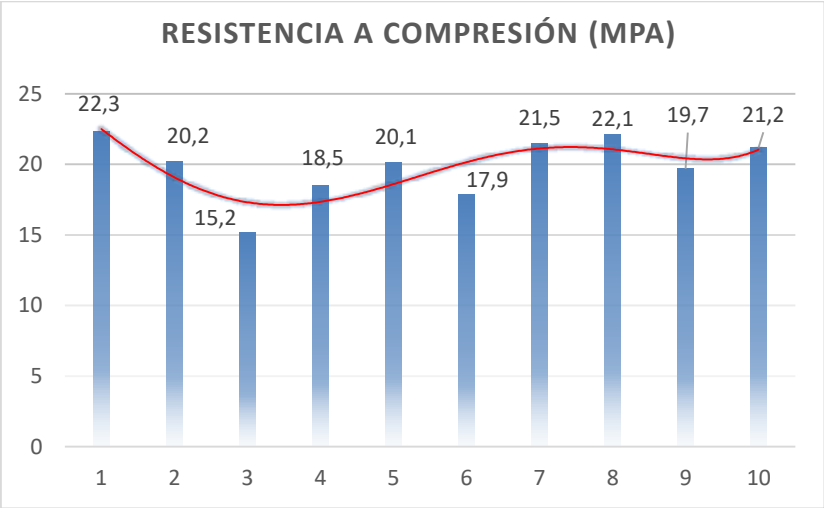


Figura 2: Representación de resultados.

Un ladrillo cerámico de similares características, cierra su resistencia mecánica en valores de 10 N/mm²; como se observa, valores muy inferiores a los obtenidos en los ensayos.



Figura 3: Ladrillos semimacizos de arcilla. (Foto extraída de La plataforma de la construcción).

3.2. Resultados y Discusión estudio energético.

El estudio parte de un supuesto de fabricación con dos máquinas que producen 20 t/h. la producción total anual, es estimada para un solo turno de trabajo de 8 horas, en 70.400 t/año.

Se aclara que la tecnología de fabricación por extrusión de los ladrillos cerámicos, difiere de la considerada en el sistema de vibro-compresión, ya que la producción del primer caso, establece ratios mayores de ladrillos/hora. Pero, se indica que el consumo de las extrusoras supera muy mucho el de las prensas hidráulicas. En este sentido, el análisis de consumo eléctrico/producción, aunque no se refleja en el documento, tiene cierto paralelismo quedando a favor la tecnología de prensando. Un estudio de fabricación, entre otros, lo encontramos en plan de negocio de una ladrillera [2], y el de consumo eléctrico y térmico, el documento de análisis de factividad de una fábrica de ladrillos [3], y del trabajo de Auditoría energética de una industria cerámica de fabricación de tejas y ladrillos [6] de Ruiz de la Cruz.

El problema del ladrillo cerámico es que la fabricación, se establece en dos fases separadas (una vez fabricado el ladrillo). La primera corresponde al secado antes de la cocción.

No existe una sola forma de secar y dependerá del tiempo y la temperatura, aunque, en cualquier caso, no puede superarse los 100ºC

Si suponemos esa temperatura de consigna que provocará la evaporación del agua de un modo lento, establecido en un periodo de 8 horas, y como unidad de consumo establecemos

90.000kcal/t; tenemos que, para la producción indicada, el consumo será de 50.688.000.000 kcal/año que por 4.18, tendremos 211.875.840.000 KJ/año

Si se define una tonelada equivalente de petróleo, o energía que es capaz de rendir 1t de petróleo (tep, o toe) como 41.868.000KJ, o 11.630KW/h, tenemos para esa energía estimada, el valor de 5.061 tep

Los factores de conversión, se han obtenido de IDAE [5], siendo, como referencia y ejemplo, para el carbón para coque, de 4,40 tCO2/tep.

Si continuamos con el proceso, una vez seco el ladrillo, viene la fase de cocción. Es variable del mismo modo que en el caso anterior y, consultados distintos fabricantes, la metodología cambia, si bien la estimación puede ser la siguiente: temperatura de cocción 900ºC durante 8 horas.

La unidad de consumo (extraída de un balance sencillo de energía), es de 1.050.000 Kcal/t lo que lleva a un consumo para la fabricación indicada de 70400t/año de 591.360.000 Kcal/año; 2.471.884.800.400KJ/año y 59.040 tep.

En cuanto al ladrillo de yeso, el secado se hace al aire, por tanto, la energía a considerar en el proceso de fabricación es la del propio yeso.

Con una temperatura de 180ºC se puede obtener yeso. Solo hay que extraer la molécula de agua para convertirlo en yeso dihidrato. En el balance, vamos a subir la temperatura a 250ºC y 1 hora de cocción. El consumo estimado del balance será de 270.000 kcal/t (Q=1000kg x 1.2 x (250-25)). Para la producción indicada: 243.000.000 Kcal/año; 1.015.740.000KJ/año y un tep de 24.

La diferencia de ambos procesos, es de 64.076 tep con una reducción de 185.821 tCO2/año para la producción establecida.

4. Conclusiones

Se consigue un ladrillo perforado de resistencia a compresión normalizada según [5], de 15,2 N/mm², valor muy superior al ladrillo cerámico de similares características.

Se consigue una reducción en la fabricación de emisiones de CO2 con el ladrillo de sulfato cálcico, de más del 80% en proporción directa. Como referencia para una producción de 70400t/año, la reducción es de 185.821 tCO2.

Referencias

1. Norma EN UNE 13279-1. 2006: Yesos para la construcción. Parte 1: definiciones y especificaciones.
2. Buitrago Caicedo, Mónica. Universidad de Nariño, Año 2015. Plan de negocio para la creación de una ladrillera tipo refractarios en el municipio de San Andrés de Tumaco.
3. Guillen Coello, Hernan. Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador. 2011. Análisis de Factividad para la Implemetnación de una Fábrica de Ladrillos para la Construcción.
4. Norma UNE-EN 772-1 + A1, junio 2016. Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 1. Determinación de la resistencia a compresión.
5. Instituto para la Divulgación y Ahorro de Energía. IDEA. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Factores de conversión energía final-energía primaria y factores de emisión de CO2. Año 2010.
6. Ruiz De La Cruz, D. (2016). Auditoría energética de una industria cerámica de fabricación de tejas y ladrillos. http://hdl.handle.net/10251/72725. Universidad Politécnica de Valencia.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Análisis de la rigidez a distintas profundidades de la unión pilar-zapata tipo cáliz de superficies lisas en estructuras prefabricadas de hormigón, mediante modelización por el Método de los Elementos Finitos

F. Molina[2], F.J. García[1], H. Malón[1], M. Vidal[1], A. Boné[1]

[1] Escuela Politécnica Superior. Universidad de Zaragoza – Campus Huesca; Ctra. Cuarte s/n, 22071, Huesca; fjavier@unizar.es
[2] Estudiante de Doctorado. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Zaragoza – Campus Huesca; Ctra. Cuarte s/n, 22071, Huesca; fmolina@aragon.es

Resumen: En este trabajo se ha modelizado mediante modelos de cálculo numérico de elementos finitos una unión pilar-zapata utilizada habitualmente en edificación agroindustrial constituida por un pilar prefabricado y una zapata aislada, de hormigón armado, unidos mediante sistema de cáliz de superficies lisas, que se ejecuta practicando un hueco en la zapata en el que se introduce el pilar prefabricado, rellenando el espacio sobrante con mortero de cemento. Las dimensiones de la zapata han sido 2.100 mm x 2.100 mm de base y 1.200 mm de altura. Las dimensiones del pilar han sido 400 mm x 400 mm con una altura libre desde la rasante de la zapata de 5.000 mm. Las profundidades de empotramiento del pilar (lemb) en el cáliz fueron de 100 mm; 200 mm; 300 mm; 400 mm; 500 mm; 600 mm; 700 mm y 800 mm. Se sometió a los modelos a una combinación de una carga axil de 200 KN, junto a una carga lateral de 6 KN/m. Se han analizado diferentes parámetros en los modelos con el objetivo de determinar el grado de rigidez de la unión pilar-zapata. Como parámetros se han cuantificado la flecha máxima en la cara superior del pilar, la tensión de Von Mises máxima en el cáliz y en el pilar, la separación máxima entre superficies (mm) y la presión de contacto máxima entre las piezas en contacto. Como principal conclusión, a medida que disminuye la profundidad del pilar en el cáliz y, en especial, para valores inferiores a lemb = 400 mm, comienza a producirse una disminución de la rigidez de la unión, lo que da lugar a incrementos no lineales en los desplazamientos del pilar. En general, para profundidades de pilar en cáliz superiores a lemb=h, siendo h la anchura del pilar, el nudo ha mantenido un comportamiento rígido similar a un empotramiento.

1. Introducción

En edificación agroindustrial las estructuras prefabricadas de hormigón son de uso extendido por su rapidez de ejecución y su resistencia a ambientes adversos, como los que se producen en instalaciones ganaderas. La ventaja fundamental de estas estructuras frente a las ejecutadas in situ es la rapidez de su ejecución, puesto que en el primer caso los elementos que la constituyen, exceptuando la cimentación, son prefabricados en fábrica, transportados a obra, y colocados directamente en su posición. Este sistema resulta mucho más rápido que el encofrado y armado in situ de los elementos de la estructura, a la vez que permite un mayor control de la calidad en los elementos prefabricados.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3371

Dentro de las tipologías existentes, y para luces moderadas de hasta 20 metros (caso mayoritario en edificación agroindustrial), una de las soluciones más utilizadas en la actualidad son los pórticos completos prefabricados y unidos a la cimentación, previamente ejecutada in situ, mediante el sistema de cáliz de paredes lisas.

En este sistema de unión se ejecuta un hueco en la parte superficial de la zapata donde se introduce el pilar prefabricado, rellenando el espacio entre ambos con mortero de cemento, sin practicar ningún tratamiento o mecanizado especial a las superficies exteriores del pilar, que tan sólo presentan la rugosidad de la superficie lisa del hormigón prefabricado.

Así, la unión entre el pilar y el cáliz no es continua, ya que no hay armaduras que pasen de uno a otro, ni son piezas hormigonadas simultánea y solidariamente, ni el relleno de cemento u hormigón se puede considerar un elemento que aporte continuidad al conjunto. Por tanto, el pilar y la zapata constituyen piezas individuales que interactúan entre sí a través de sus superficies de contacto. Las características de la unión, además, permite la posibilidad tanto de deslizamiento como de separación entre superficies.

Para el caso de estructuras de edificación sometidas a grandes cargas, existen varios estudios en los que se ha determinado que dicha rigidez depende de la propia profundidad de empotramiento y del coeficiente de rozamiento entre las superficies en contacto. Ambos factores condicionan la transmisión de esfuerzos y el equilibrio estático del conjunto de la unión, y en definitiva su comportamiento más tendente a una articulación o a un empotramiento.

Sin embargo, y para el caso de estructuras agroindustriales de una planta, con cargas relativamente bajas en comparación con las anteriores, y como también se afirma en [1], no existen apenas resultados experimentales que permitan asegurar cuál es la profundidad de empotramiento del pilar en el cáliz a partir de la cual se puede afirmar que se trata de una unión rígida o bien de una unión articulada, además de que los modelos teóricos disponibles se centran en propuestas de los esquemas de fuerzas intervinientes en la unión de cara a recomendar una longitud mínima de empotramiento que garantice su rigidez.

En cuanto a la profundidad de empotramiento, diversos autores y obligaciones normativas establecen la profundidad mínima para considerar la unión empotrada. La EHE-2008 española fija una profundidad mínima de 1,2·h (siendo h el canto del pilar); el código brasileño NBR-9062/85 exige profundidades entre 1,5·h y 2·h; la norma italiana CNR-10025/98 entre 1,2·h y 2·h; Otros autores fijan diversos valores recomendables: 1,68·h y 2,8·h [2]; 1,5·h [3]; entre 1,5·h y 3·h [4]. Por su parte, la empresa italiana CAPRESE recomendó, para pilares cuadrados y excentricidades medias a altas, profundidades entre h y 1,3·h. En cuanto al coeficiente de rozamiento entre las superficies, los propuestos varían entre μ=0,3, como en la EHE-2008 y el EUROCODE 2, μ=0,6 [5], o μ=0,67 [4]. Por su parte, [1] afirma que esta unión presenta una gran rigidez, comportándose como un empotramiento a profundidades mayores a 1,5·h en cualquier caso.

En este artículo se muestran los resultados obtenidos a partir de una serie de modelos numéricos de una unión pilar-zapata por el sistema de cáliz de superficies lisas a distintas profundidades, considerando el comportamiento de los materiales dentro de su rango elástico.

Partiendo de la validez del modelo con respecto al comportamiento de los materiales, tal y como se describe en [6], se evalúa la relación existente entre la flecha máxima del pilar y los esfuerzos que tienen lugar en la zona de unión. Además, se evalúa la evolución del área de contacto entre superficies. Todo ello bajo el mismo estado de cargas, a distintas profundidades de empotramiento, bajo un único coeficiente de rozamiento determinado previamente, y asumiendo la posibilidad de deslizamientos y separación entre superficies.

El objetivo final del artículo es determinar en qué medida las características del contacto entre las piezas implicadas afecta a la rigidez de la unión en función de la profundidad de empotramiento, manteniendo invariables el resto de parámetros implicados, esto es, las cargas y el coeficiente de rozamiento.

En este artículo se mostrarán los resultados obtenidos en esta línea mediante una serie de modelos numéricos, y se establecerá la relación existente entre las deformaciones en el pilar y los esfuerzos y fuerzas de rozamiento que se producen en la zona de interacción de las piezas de la unión.

Con ello se pretende avanzar en el conocimiento del comportamiento de la unión pilar zapata, con el objetivo final de comprobar la validez de los métodos de cálculo y dimensionado de las mismas en futuros proyectos de edificaciones agroindustriales.

2. Materiales y métodos

Se realizó una serie de modelos numéricos por el Método de los Elementos Finitos (MEF) consistentes en una zapata y un pilar de hormigón prefabricado. La unión entre ambos se modelizó con un hueco o cáliz en la zapata, en la que se inserta el pilar.

El software utilizado para el mallado fue el programa Patran. El cálculo de los modelos y el análisis de resultados se realizaron con Abaqus.

En cuanto a las unidades utilizadas en los modelos, reflejadas en la Tabla 1, el software Abaqus es adimensional, lo que implica que no es necesario establecer de antemano las unidades que se introducen en el modelo, siempre que mantengan la coherencia entre ellas.

Tabla 1. Unidades del modelo numérico.

Masa	Longitud	Tiempo	Fuerza	Estrés	Energía	Densidad	Gravedad (g)
Ton	mm	s	N	MPa (N/mm^2)	N-mm	Ton/mm^3	mm/s^2

Las dimensiones de la zapata son 2.100 mm x 2.100 mm de base y 1.200 mm de altura, con armado en la base de la zapata y alrededor del cáliz, tal y como se refleja en la Tabla 2. Se introdujo también en su base una capa de hormigón de limpieza de espesor 100 mm.

Las dimensiones del pilar son 400 mm x 400 mm con una altura libre desde la rasante de la zapata de 5.000 mm. Se modelizó también el armado del pilar, tal y como figura en la Tabla 2.

Las barras de armadura de acero, se modelizaron mediante elementos lineales con 1 dimensión (elementos barra) mientras que el resto de materiales (hormigón, cemento y suelo) se modelizaron con elementos hexaédricos en 3 dimensiones (elementos hexaédricos volumétricos). En el mallado se dispusieron los elementos barra y hexaédricos de tal manera que todos los nodos de los elementos barra comparten sus nodos con los elementos volumétricos en los que se insertan. De este modo se consigue que todos los nodos del modelo sean solidarios, y por tanto también sus desplazamientos, consiguiendo que los materiales se deformen solidariamente.

Tabla 2. Armado del modelo numérico.

Pieza	Armadura	n.º de barras	Diámetro (mm)	Recubrimiento r (mm)	Separación s (mm)
Pilar	Longitudinal	12	16	50	100
	transversal	variable	8	50	250
Cáliz	Longitudinal	24	16	50	100
	Transversal	variable	8	50	100
	Fondo	7x7	10	50	100
Zapata	Fondo	25x25	16	50	100

En cuanto a las condiciones de contorno, se anularon todos los grados de libertad de los nodos de las caras laterales y la base del conjunto formado por la zapata y el hormigón de limpieza.

La interacción entre el pilar y el cáliz se modelizó mediante superficies de contacto entre las caras exteriores de los elementos del pilar empotrado y las interiores de los elementos del cáliz de cemento. Dentro de los modelos disponibles en el software utilizado, se implementó el tipo de contacto superficie a superficie, se permitió deslizamiento entre superficies y separación una vez establecido el contacto entre elementos. El comportamiento tangencial se implementó mediante una variante del modelo de fricción de Coulomb en la que se introducen multiplicadores de Lagrange**;** mientras que con respecto al comportamiento normal, la mayor precisión se produce limitando al máximo la penetración de nodos de una superficie en otra, lo que lógicamente distorsionaría las relaciones entre tensiones y desplazamientos de dichos nodos. Para ello se implementa el método de los Aumentadores de Lagrange, restringiendo la penetración absoluta entre superficies a 0,001 mm.

En Abaqus, sin embargo, la combinación de ambos algoritmos da lugar a graves problemas de convergencia, hasta el punto de que ésta resulta muy difícil o imposible en algunos casos. Sin embargo, la convergencia se alcanza sin problemas, y se obtienen resultados muy similares (con errores menores al 1% en la relación presión de contacto/fuerza de rozamiento en cada nodo), eliminando en el comportamiento friccional los aumentadores de Lagrange e implementando el modelo de Coulomb sin más restricciones que una muy baja tolerancia al deslizamiento elástico.

En todos los casos, se aplicó un coeficiente de rozamiento μ=0,6 como el que mejor correlación proporciona entre el modelo numérico y el experimental [5].

Las profundidades de empotramiento del pilar (lemb) en el cáliz fueron de 200 mm; 300 mm; 400 mm; 500 mm; 600 mm; 700 mm y 800 mm. Para el canto de pilar modelizado (h=400 mm), la mayor de estas profundidades (800 mm) se corresponde con una profundidad de empotramiento lemb = 2·h.

En cuanto a los materiales empleados en los modelos realizados, éstos son acero, hormigón y cemento. En la totalidad de los casos analizados se han considerado como materiales elástico-lineales, debido a que en ningún caso de los analizados se alcanzan valores de tensión cercanos al límite elástico de los materiales considerados, por lo que carece de utilidad introducir un comportamiento elasto-plástico del material, que conlleva además altos costes computacionales.

Las características de los materiales empleados se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de los materiales utilizados en el modelo numérico.

Material	**Grupo de elementos**	**Comportamiento**	**Módulo elástico (N/mm²)**	**Coeficiente de Poisson**	**Densidad (Ton/mm³)**
Acero	Armaduras	Elástico-lineal	210.000	0,3	$7{,}8 \cdot 10^{-9}$
Hormigón H25	Pilar Zapata Hormigón limpieza	Elástico-lineal	29.670	0,2	$2{,}3 \cdot 10^{-9}$
Cemento	Cáliz	Elástico-lineal	25.000	0,2	$2{,}3 \cdot 10^{-9}$

Se sometió a los modelos a una combinación de una carga axil de 200 KN, junto a una carga lateral de 6 KN/m. Estas cargas fueron introducidas en el modelo en forma de presión, aplicando la presión correspondiente a cada carga en su superficie de actuación.

3. Resultados y discusión

A partir de los resultados obtenidos con el modelo, se analiza por una parte, de forma gráfica, la distribución de esfuerzos que la unión transmite al cáliz y a la zapata, comparándola con la correspondiente a una unión totalmente empotrada. Por otra parte, se analizan los valores obtenidos en una serie de variables que permiten describir el comportamiento de la unión, reflejados en la Tabla 4.

En cuanto a la distribución de esfuerzos, que se refleja en la figura 1, resulta coherente con los resultados experimentales obtenidos por diversos autores [7] [8] [9] [10] [11], en los que se reporta que las tensiones en el cáliz se concentran en la zona superior de su cara frontal y en la zona inferior de su cara posterior, así como un flujo de tracciones concentradas alrededor del hueco. Se comprueba como el comportamiento de esta unión presenta discontinuidades en las deformaciones y tensiones de las piezas implicadas, lo que difiere del correspondiente a una unión totalmente empotrada como es el caso de una unión ejecutada "in situ", en la que los materiales se deforman solidariamente y la distribución de esfuerzos entre las piezas presenta variaciones continuas.

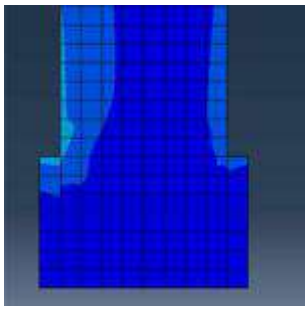
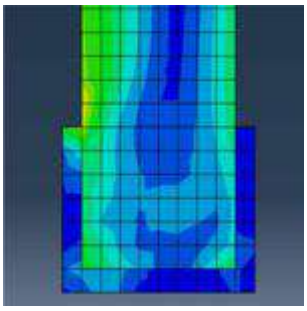
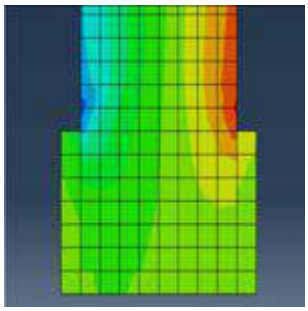
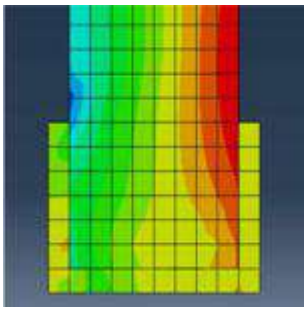
<table>
<tr><td colspan="2">Tensión. Von Mises.</td></tr>
<tr><td>
unión empotrada</td><td>
unión tipo cáliz</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tensión. Tracción y compresión.</td></tr>
<tr><td>
unión empotrada</td><td>
unión tipo cáliz</td></tr>
</table>

Figura 1. Distribución de Tensiones en la unión.

En cuanto a las variables estudiadas, para la carga final aplicada de 6 KN/m, se analizaron las listadas a continuación, reflejándose los valores obtenidos en la Tabla 3:

- flecha máxima (mm): desplazamiento total en la cara superior del pilar.
- S máx cáliz (N/mm^2): tensión de Von Mises máxima en el cáliz.
- S máx pilar (N/mm^2): tensión de Von Mises máxima en el pilar.
- separación máxima entre superficies (mm): indica la separación máxima entre superficies una vez que se ha perdido el contacto entre ellas.
- presión de contacto máxima (N/mm^2): presión máxima entre las piezas en contacto, función de las fuerzas actuantes y de la superficie sobre la que actúan.

Tabla 4. Resultados.

L emb (mm)	S max cáliz	S max pilar	Separación máxima superficies (pared posterior)	Presión contacto máxima (cáliz)	f máx	Δ f (%)
100	15,590	19,47	0,2945	12,99	11,75	39,38
200	10,050	12,64	0,0742	9,250	8,43	9,34
300	7,750	10,62	0,0331	7,568	7,71	2,12
400	6,789	10,24	0,0292	7,078	7,55	0,13
500	6,761	10,23	0,0293	7,051	7,54	0
600	6,764	10,23	0,0296	7,047	7,54	0
700	6,781	10,25	0,0299	7,061	7,54	0
800	6,793	10,26	0,0300	7,083	7,54	--

En cuanto a la flecha máxima en la cara superior del pilar, se comprueba como no se producen diferencias significativas hasta una profundidad de empotramiento de 400 mm, siendo a partir de esta profundidad (para valores inferiores) cuando se aprecia un claro incremento en dicha flecha, lo que indica una pérdida de rigidez en la unión. Estos resultados son coherentes con lo reflejado en [6], si bien en este caso los valores de las flechas son menores, debido probablemente a que la existencia de la zapata en el modelo analizado en el presente trabajo permite mayores desplazamientos al conjunto de elementos.

Se comprueba como a medida que disminuye la profundidad de empotramiento se produce una separación progresiva de las superficies en contacto, aumentando la separación máxima entre superficies y disminuyendo el área de contacto, tal y como se refleja en la figura 2.

Del mismo modo, se comprueba como simultáneamente a lo anterior, aumentan tanto la presión en las superficies como la tensión en los nodos que permanecen en contacto entre las piezas, tanto en el cáliz como en el pilar.

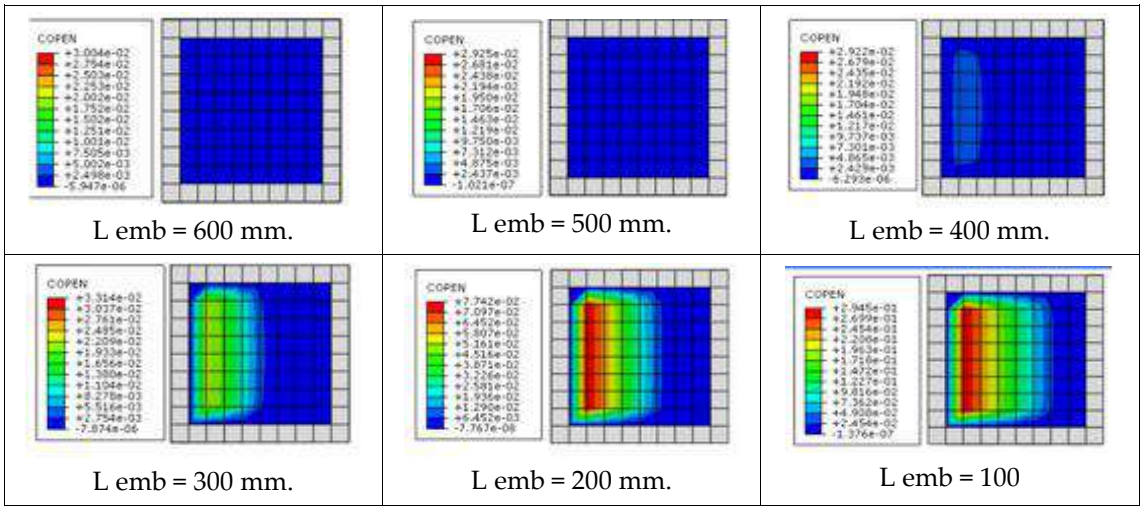
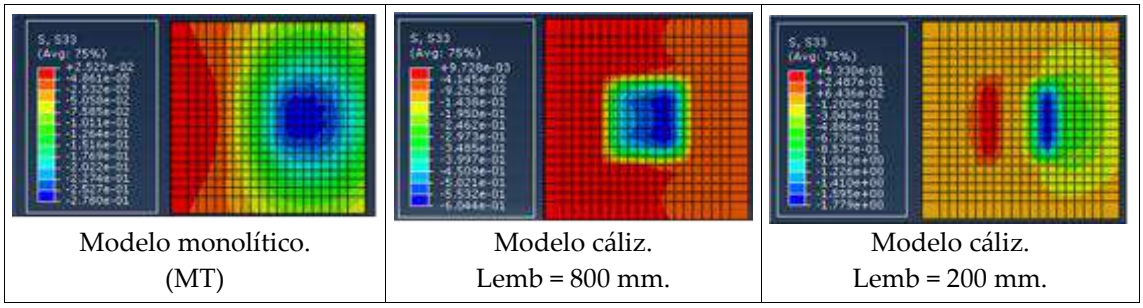


Figura 2. Separación* entre superficies de contacto (mm.) en la unión. Base del cáliz. * en base a los parámetros del modelo se puede considerar el límite entre contacto y pérdida de contacto entre superficies en un valor de la variable COPEN (separación entre superficie (mm.) de $1 \cdot 10^{-5}$ mm.

En el caso más desfavorable de flexión y profundidad de empotramiento, el contacto entre el pilar y el cáliz queda restringido a 3 áreas limitadas, localizadas en la zona superior de la

pared frontal del cáliz; en la zona inferior de su pared posterior y en la zona anterior de su base, entendiendo por anterior la dirección en la que se produce la flexión.

Por último, se analiza gráficamente la transmisión de esfuerzos a la zapata en tres modelos: uno monolítico, y dos de la unión en estudio a dos profundidades distintas. La figura 3 refleja la distribución de tensiones registrada en el interior de la zapata en su zona central, en la zona inmediatamente debajo del cáliz de la unión; y en la figura 4 se representan los valores de tensión registrados para cada modelo.



Modelo monolítico. (MT)	Modelo cáliz. Lemb = 800 mm.	Modelo cáliz. Lemb = 200 mm.

Figura 3. Esfuerzos transmitidos a la zapata con carga axil de 200 KN/m y lateral de 6 KN/m. Zona interior de la zapata situada inmediatamente debajo del cáliz.

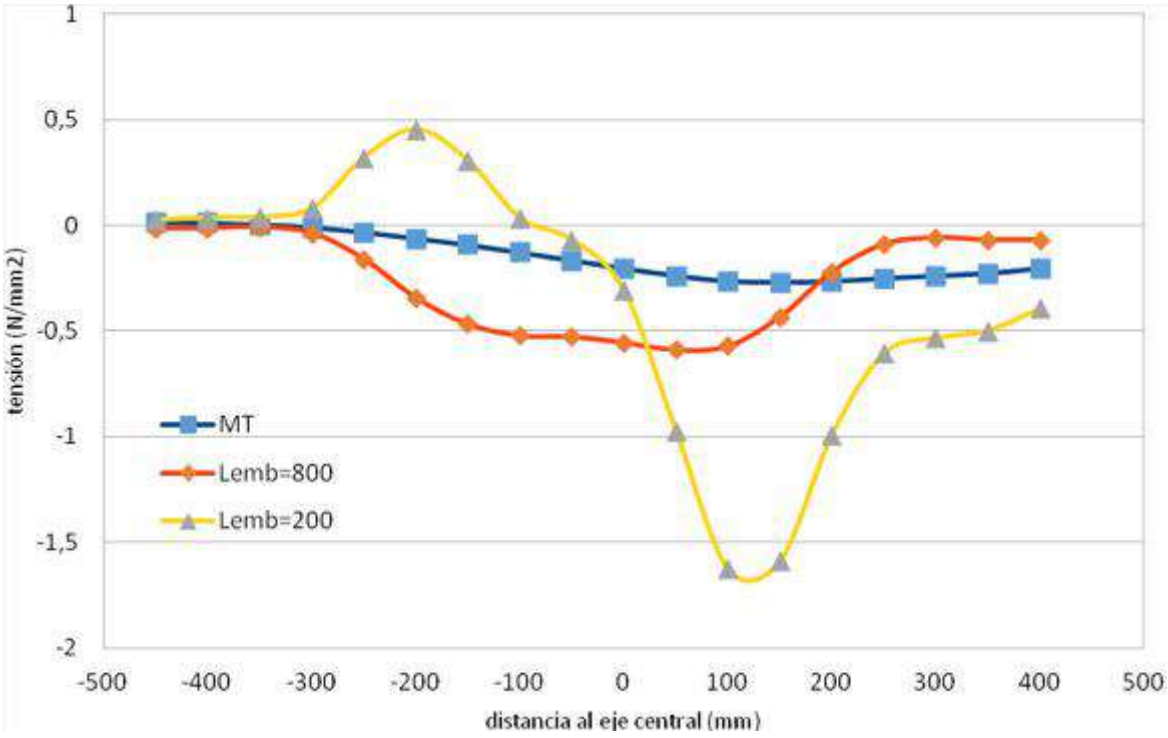


Figura 4. Valores de tensión en el interior de la zapata bajo la base del cáliz.

Como se comprueba en las figuras, la distribución de esfuerzos en el modelo numérico monolítico se asemeja a lo esperado en la teoría del cálculo de cimentaciones, en el que las tensiones presentarían una distribución gradual que varía de tracción a compresión siguiendo la dirección del momento asociado a la flexión del pilar, con un eje neutro cercano al eje central de la zapata. En el caso del modelo numérico calculado, la magnitud de la carga axil en

comparación con la carga lateral provoca que en la base de la zapata no se lleguen a transmitir prácticamente esfuerzos de tracción.

El modelo numérico lemb = 800 mm presenta la misma tendencia, pero se comprueba como presenta mayores valores de tensión de compresión, que además tienden a concentrarse en una menor área alrededor del pilar.

En el modelo lemb = 200, por último, se comprueba como la distribución pierde la homogeneidad, concentrándose las tensiones en dos zonas contiguas a las caras posterior y anterior del pilar, y presentando además los valores dos picos claramente definidos, uno de tracción y otro de compresión, ambos muy superiores a los modelos anteriores.

Estas distribuciones resultan coherentes con una pérdida de rigidez de la unión tipo cáliz con respecto a una unión monolítica, pérdida que además aumenta conforme se hace menor la profundidad de empotramiento.

Esta pérdida de rigidez, además, resulta compatible con una pérdida de contacto entre las superficies de las piezas, reflejada en la figura 2, lo que daría como resultado la transmisión de esfuerzos cada vez mayores (tanto de tracción como de compresión) del cáliz a la zapata, pero en áreas cada vez menores y más cercanas al pilar, lo que a su vez queda avalado por el análisis de las variables realizado previamente.

Además, se comprueba como a medida que disminuye la profundidad de empotramiento, y por tanto las superficies en contacto, la creciente flexión en el pilar provoca la transmisión de cada vez mayores esfuerzos de tracción, tanto a la cara posterior del pilar y el cáliz, como a la zapata, tal y como refleja el pico de tracción en la cara posterior del pilar en el modelo lemb=200 mm. Se ha comprobado, además, que los valores de las fuerzas de rozamiento actuantes entre las caras posteriores del pilar y del cáliz tienen valores más altos y se concentran en una superficie cada vez menores cuanto menor es la profundidad de empotramiento.

4. Conclusiones

En cuanto al comportamiento de la unión, lo que se produce en primera instancia es un deslizamiento entre superficies que transmitirá una serie de fuerzas tangenciales entre ellas debidas al rozamiento, combinado con fuerzas normales de contacto a las paredes del cáliz en la mayor parte del área en contacto con el pilar. Con el sistema de fuerzas así establecido el cáliz es capaz de soportar esfuerzos en toda su superficie. Sin embargo, a medida que aumenta la flexión del pilar, y en especial por debajo de lemb = 400 mm, se produce una separación progresiva de las superficies implicadas, esto es, una pérdida de contacto entre la piezas de la unión, que conlleva un incremento de las tensiones y presiones en las cada vez menores superficies que permanecen en contacto.

Para una misma carga y un mismo coeficiente de rozamiento, el factor desencadenante del incremento no lineal de los desplazamientos en el pilar es la disminución de superficie de contacto entre las piezas a medida que disminuye la profundidad de empotramiento del pilar en el cáliz.

Los resultados obtenidos indican que, en este tipo de estructuras, con cargas axil y lateral relativamente bajas, los desplazamientos no sufren cambios significativos hasta una profundidad de empotramiento lemb = 400 mm. Esto indica que, hasta la profundidad de empotramiento lemb = h (siendo h la anchura del pilar), la unión mantiene una rigidez suficiente como para considerar a la pieza empotrada. Esta resulta la profundidad límite por debajo de la cual la unión comienza a perder la condición de empotramiento.

Referencias

1. Gutiérrez M. Estudio Experimental de Cálices de Hormigón Armado mediante Modelos de Bielas y Tirantes Tridimensionales. 2014, Trabajo Fin de Máster, Universidad Politécnica de València.
2. Leonhardt F., Möning E. Estructuras de Hormigón Armado, Tercera edición. 1984, III.

3. Osanai Y.,Watanabe F., Okamoto, S. Stress Transfer Mechanism of Socket Base Connections with Precast Concrete Columns. 1996, ACI Structural Journal, 93 (3), 266-276.
4. Willert O., Kesser, E. Foundation for bottom-end fixed precast concrete columns. 1983, Betonwerk Fertigteil Technik, 49 (3), 137-172.
5. Canha R. Estudo teórico-experimental da ligação pilar-fundação por meio de cálice em estruturas de concreto pré-moldado. 2004, Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos.
6. Malon H., Garcia-Ramos F., Aguirre J., Molina F. Análisis del grado de rigidez de la unión pilar-zapata para su aplicación en proyectos de instalaciones agroindustriales. 2011, XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos Huesca, 731-747.
7. Canha R., Ebeling E., de Cresce A., El Debs M. Analysing the base of precast column in socket foundations with smooth interfaces. 2009, Materials and Structures, 42 (6) 725-737.
8. Pecce M., Rossi F. The non-linear model of embedded steel–concrete composite column bases. 2013, Engineering Structures, 46, 247-263.
9. Aboukifa M., Reyad K., Saad F. Behavior and design of precast column/base pocket connections with smooth surface interface. 2017, Al-Azhar University Civil Engineering Research Magazine, 39 (3), 191-202.
10. Torres M., Rodríguez M. Comportamiento sísmico de cimentación tipo candelero para puentes con columnas prefabricadas de concreto reforzado. 2014, Revista de Ingeniería sísmica, 90, 55-87.
11. Canha R., de Borja K., de Cresce A., El Debs M. Analysis of the behavior of transverse walls of socket base connections. 2009, Engineering Structures, 31, 3, 788-798.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Análisis de los requisitos de seguridad contra incendios en las industrias agroalimentarias

A. Tascón[1]

[1] Dpto. Agricultura y alimentación, Universidad de La Rioja; alberto.tascon@unirioja.es

Resumen: El objetivo del presente estudio fue analizar los costes asociados a la protección contra incendios en la industria agroalimentaria. Para ello se identificaron las variables de diseño que determinan la obligatoriedad y el grado de exigencia de los requisitos de seguridad contra incendios establecidos por el Real Decreto 2267/2004 y por el CTE DB SI. Además, se seleccionaron varios tipos de industrias agroalimentarias, considerando algunas de las más representativas en el entorno de La Rioja, para así estudiar la aplicación de la normativa contra incendios y posteriormente presupuestar los costes correspondientes. Los resultados han sido analizados para detectar recomendaciones de diseño que permitan optimizar las industrias desde el punto de vista de la normativa contra incendios y para identificar consideraciones relevantes a la hora de comprender y aplicar adecuadamente el R.D. 2267/2004. Este estudio sugiere que las decisiones que se adopten en la fase de concepción del proceso agroindustrial, en la fase de diseño en planta y durante la redacción del documento de protección contra incendios tienen una influencia notable en el coste asociado a la seguridad contra incendios.

Palabras clave: costes, protección contra incendios, diseño de industrias, Real Decreto 2267/2004

1. Introducción

La seguridad contra incendios es un aspecto relevante en los proyectos de industrias agroalimentarias y puede considerarse como uno más de los diversos elementos a integrar durante la fase de diseño de una nueva planta o de una ampliación o reforma de una ya existente. El objetivo del presente estudio ha sido analizar cómo influyen diversas variables del diseño en los requisitos normativos de seguridad contra incendios y, en consecuencia, en los costes asociados a los mismos.

La normativa vigente de aplicación a las industrias agroalimentarias incluye el "Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales" [1] – en adelante RSCIEI – y el "Reglamento de instalaciones de protección contra incendios" [2], así como el documento básico de seguridad contra incendios del Código Técnico de la Edificación [3] en determinados casos. Sin embargo, el RSCIEI es una norma general que es de aplicación a cualquier industria y no está específicamente orientada al caso de la industria alimentaria o agraria, por lo que son habituales las dificultades de aplicación [4].

El cumplimiento de los requisitos de seguridad contra incendios se debe plasmar en el correspondiente proyecto técnico, que podrá estar integrado en el proyecto general exigido por la legislación vigente, o ser específico. Entre las medidas de seguridad contra incendios que establece el RSCIEI se pueden citar: requisitos de los materiales constructivos, estabilidad de las estructuras, sectorización contra el fuego, instalaciones de protección contra incendios, recorridos de evacuación, señalización, etc. En consecuencia, la seguridad contra incendios implica unos costes, que podrán ser mayores o menores en función de diversas variables del proyecto. A pesar

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3348

de ello, son muy escasos los estudios que detallen los costes asociados a la protección contra incendios en el sector agroindustrial [5].

En el presente trabajo, partiendo de estudios previos [5], se ha profundizado en el análisis de la aplicación de la normativa vigente a los proyectos de industrias agroalimentarias y en la estimación de los costes asociados a las medidas de seguridad contra incendios.

2. Materiales y métodos

En una primera fase del estudio se analizaron los requisitos que establece el RSCIEI y se identificaron aquellas variables de diseño relativas a la industria que influyen en la obligatoriedad, o no, de aplicar dichos requisitos y en su grado de exigencia. En una segunda fase, se seleccionaron varios tipos de industrias agroalimentarias, tomando como referencia las más representativas en el entorno de La Rioja, y se acotaron los casos de estudio a analizar. En una tercera fase se aplicó la normativa a dichos casos y se estimaron los costes asociados a la seguridad contra incendios para, finalmente, analizar los resultados con el objeto de detectar recomendaciones de diseño e identificar consideraciones relevantes a la hora de aplicar la normativa.

2.1. Requisitos normativos

El RSCIEI [1] establece una serie de medidas de seguridad contra incendios cuya obligatoriedad depende de 3 factores principalmente: el denominado Nivel de Riesgo Intrínseco (NRI); la configuración y ubicación del establecimiento industrial; y la superficie total de la industria o, en su caso, de cada uno de los sectores de incendios. En la Tabla 1 se resume la influencia de cada uno de estos 3 factores en los requisitos que exige el RSCIEI.

Tabla 1. Parámetros que determinan la exigencia o no de aplicar los distintos requisitos normativos

Requisitos normativos	Parámetro
Ubicaciones no permitidas	NRI + ubicación
Necesidad de sectorizar	NRI + ubicación + superficie total
Resistencia al fuego de la estructura, caso general	NRI + ubicación + sótano/sobre rasante
Detectores manuales de incendio	superficie del sector
Detectores automáticos de incendio	NRI + ubicación + superficie del sector
Sistemas de comunicación de alarma	superficie total
Extintores manuales	NRI + ubicación + superficie del sector
Bocas de incendio equipadas (BIE)	NRI + ubicación + superficie del sector
Hidrantes exteriores	NRI + ubicación + superficie del sector
Columna seca	NRI + altura de evacuación
Rociadores automáticos	NRI + ubicación + superficie del sector
Sistema de abastecimiento de agua	Instalaciones (BIEs, hidrantes, rociadores, etc.)
Sistema de evacuación de humos	NRI + superficie del sector

El NRI sirve para clasificar las industrias en función del riesgo que presentan en relación con el inicio y desarrollo de un incendio. Se determina mediante la "densidad de carga de fuego ponderada y corregida", que a su vez se calcula según las fórmulas del Anexo I del RSCIEI [1]. Del análisis de dichas fórmulas se deduce que el NRI depende de la actividad que se vaya a desarrollar en cada local de la industria proyectada (fabricación de determinado producto,

almacenamiento de determinado material, actividad administrativa, laboratorio, etc.) y del porcentaje que se asigne a cada uno de los locales con respecto a la superficie total, pero no depende de la superficie total de la industria. Es decir, en el cálculo del NRI se realiza una media ponderada de la carga de fuego asociada a cada uno de los locales que componen la industria, por lo que la superficie total no influye. En el caso de almacenamientos, también es muy relevante la altura de almacenaje prevista.

En cuanto a la configuración y ubicación del establecimiento industrial, el RSCIEI establece 5 tipologías, entre las cuales las más habituales son las siguientes: tipo C (la industria ocupa totalmente un edificio, o varios, que están a una distancia > 3 m de otros establecimientos, y dicha distancia está libre de mercancías combustibles o elementos susceptibles de propagar el incendio); y tipo B (el establecimiento industrial ocupa totalmente un edificio que está adosado a otro u otros edificios, o a una distancia ≤ 3 m de otro edificio, ya sean éstos de uso industrial o de otros usos).

La superficie total, aunque no influye en la densidad de carga de fuego y el NRI, sí influye en varios de los requisitos que establece el RSCIEI, tal y como se muestra en la Tabla 1. Además, la superficie de la industria determina la necesidad o no de sectorizar, es decir, de dividir el edificio en varias zonas aisladas unas de otras mediante elementos (tabiquería, puertas, pasos de instalaciones, etc.) resistentes al fuego. Si la industria ha sido sectorizada, cada uno de los sectores será estudiado por separado a la hora de determinar las medidas necesarias de seguridad contra incendios.

Por otro lado, es importante señalar que los límites de superficie que establece el RSCIEI para prescribir las medidas de seguridad necesarias son diferentes en función de que el sector de incendios analizado esté destinado a actividades de fabricación o a actividades de almacenamiento.

2.2. Casos de estudio

Se seleccionaron algunos de los tipos de industrias agroalimentarias más importantes en La Rioja:

- bodegas,
- industrias de conservas vegetales,
- industrias cárnicas,
- industrias lácteas (queserías),
- panificadoras.

Para cada tipo de industria se consideraron las dos configuraciones más habituales según el RSCIEI: configuración tipo B y tipo C. Además, se han estudiado distintas superficies, hasta alcanzar al menos 5.000 m^2 de superficie total.

Las distintas actividades y funciones que se desarrollan dentro de un edificio agroindustrial han sido simplificadas y agrupadas en 6 actividades a efectos de calcular la densidad de carga de fuego ponderada y corregida según la metodología del RSCIEI: almacén de materias primas, zona de procesado, zona de embalaje, almacén de embalajes, almacén de producto terminado y zona de administración y servicios. Cada una de estas 6 actividades fue asimilada a alguna de las actividades recogidas en la tabla 1.2 del RSCIEI con el objeto de determinar su densidad de carga de fuego y su peligrosidad. No en todos los tipos de industrias aparecen las 6 zonas. Por ejemplo, el "almacén de materias primas" puede considerarse inexistente en el caso de bodegas o el "almacén de producto terminado" tampoco ha sido considerado en el caso de las panificadoras, ya que según la Guía de aplicación del RSCIEI [7] no se contabilizarán los acopios de materiales o productos reunidos para la manutención de los procesos productivos o resultantes de los mismos, si su consumo o producción es diario y constituyen el llamado "almacén de día", considerándose que estos materiales forman parte de la zona de proceso productivo y no son un almacenamiento como tal. Para determinar la superficie destinada a cada actividad dentro de la industria, en el caso de las

bodegas se han utilizado los datos recopilados para bodegas de la D.O.Ca. Rioja [6]. Para el resto de industrias, a falta de datos estadísticos sobre diseño en planta, se han tomado como base los datos de bodegas antes mencionados, pero adaptándolos a las peculiaridades de cada proceso productivo.

Como cada proyecto agroindustrial es único y se pueden presentar multitud de situaciones de diseño diferentes, fue necesario acotar más los posibles casos de estudio. Se consideró que en todos los casos el edificio agroindustrial constaba de una única planta situada sobre rasante. También se estimó una relación longitud/anchura del edificio de 1,5 (esta relación puede influir, por ejemplo, en la longitud de las tuberías de las instalaciones de hidrantes exteriores y de BIEs). Igualmente, se estableció que en todos los casos la estructura era de acero y que la cubierta era ligera (peso no superior a 100 kg/m^2, según se define en el RSCIEI [1]), lo cual influye en los costes relativos a la protección de los elementos estructurales. Otra simplificación adoptada en el presente estudio fue la consideración de que los porcentajes de superficie destinada a cada actividad dentro de la industria se mantienen constantes independientemente de la superficie total de la industria, lo cual no se ajustará a la realidad en todos los casos.

La sectorización contra incendios que se decida tendrá gran influencia en los costes totales asociados a la seguridad contra incendios. El planteamiento que se adoptó en este estudio fue el siguiente: inicialmente, para superficies pequeñas, se consideró que toda la superficie de la industria constituía un único sector de incendios; al aumentar la superficie, hubo un punto en el que la superficie de uso administrativo alcanzó 250 m^2, lo cual obligó a crear un sector de incendios independiente para dicha zona, al cual se aplicó el CTE DB SI, según establece el RSCIEI [1]; si la superficie de la industria aumentaba más, es posible que se alcanzaran los límites máximos establecidos por el RSCIEI para un sector de incendios, por lo que fue necesario crear un nuevo sector de incendios destinado a almacenamiento de producto final y de embalajes, quedando el sector de incendios original constituido únicamente por las zonas de recepción y almacenamiento de materias primas y las zonas de procesado.

2.3. Coste de la seguridad contra incendios

Para el cálculo del coste se ha determinado el presupuesto de ejecución material, a partir de los precios de la base PREOC 2017 [8]. Se han presupuesto aquellas medidas de seguridad contra incendios que exige el RSCIEI [1] y también, cuando fuera de aplicación, lo exigido por el CTE DB SI [3] en las zonas administrativas y sociales de la industria.

También se ha aplicado la norma UNE-EN 23007-14 [9] para calcular el número necesario de detectores de humo y de pulsadores manuales de incendio, la norma UNE-EN 12845 [10] para calcular el número necesario de rociadores, la norma UNE 23500 [11] y la norma UNE 12845 [10] para los sistemas de abastecimiento de agua y la norma UNE 23585 [12] para estimar los sistemas de evacuación de humos.

3. Resultados y discusión

Los datos obtenidos se han organizado en forma de gráficas para analizar la variación del coste con la superficie. Los resultados indicaron que para todas las industrias el coste aumenta con la superficie de la industria pero que, en ciertos intervalos, el coste unitario (€/m^2) disminuye o se mantiene constante a pesar de aumentar la superficie total de la industria. Las curvas de coste presentaron una serie de saltos o discontinuidades, cada una de las cuales se corresponde con la introducción de un nuevo requisito o de una nueva sectorización, al alcanzarse la superficie que obliga a ello. A modo de ejemplo, la Figura 1 muestra la relación entre el coste asociado a la seguridad contra incendios y la superficie total de la industria, para el caso de una conservera en ubicación tipo C con la distribución de superficies indicada en la Tabla 1.

Tabla 1. Estimación de la distribución de superficies para industrias conserveras

Actividad	Superficie (%)
zona de proceso	54
administración y servicios	15
zona de embalaje para expedición	5
almacén de materias primas	5
almacén de embalajes	1
almacén de producto terminado	20

Se pueden observar varias zonas en la gráfica debido a la sectorización planteada: para valores bajos de superficie, toda la industria se establece como un único sector de incendio con un nivel de riesgo intrínseco medio-4; al superarse los 250 m² para la zona administrativa (oficinas, zona social, etc.), considerando que la superficie destinada a estos fines supone el 15% de la superficie total de la industria, se hace obligatorio sectorizar y aplicar el CTE DB SI [3] en dicho sector, lo cual tiene como consecuencia que el sector destinado a producción y almacenamiento suba a nivel de riesgo intrínseco medio-5; cuando la superficie destinada a fabricación y/o almacenamiento es superior a 3500 m² es necesario sectorizar de nuevo, optándose en este caso por crear un sector para fabricación, cuyo nivel de riesgo intrínseco vuelve a bajar a medio-4, y otro sector para el almacenamiento de producto final; como el sector de fabricación con NRI medio-4 está limitado por normativa a 4000 m², cuando se supere dicha superficie será necesario sectorizar de nuevo o transvasar más locales al sector 2, por ejemplo, la zona de embalaje.

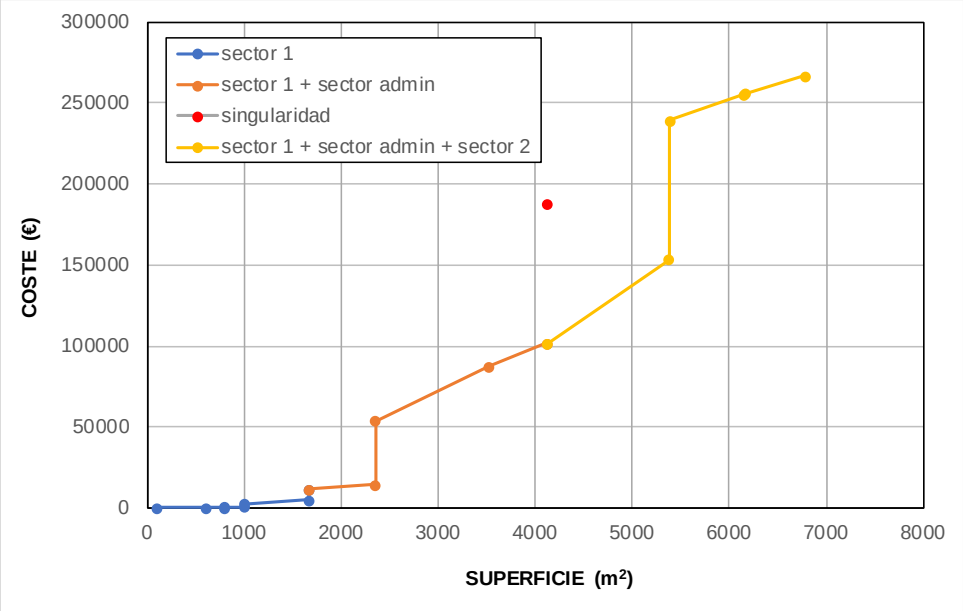


Figura 1. Evolución del coste con la superficie para industrias conserveras en edificio tipo C.

Por último, hay que resaltar que para una superficie productiva de 3500 m² (que se corresponde con 4117 m² si se suma la zona administrativa), aparece en la Figura 1 una singularidad notable: 3500 m² es la superficie máxima admitida para un sector de incendios con NRI medio-5 en edificio tipo C (todavía no se precisaría sectorizar) pero para esa superficie ya es obligatorio instalar hidrantes y rociadores automáticos, lo cual supone un incremento de coste significativo. Como se puede observar, para ese valor de superficie en concreto resultaría mucho más económico sectorizar, aunque no sea estrictamente necesario por normativa.

La Figura 2 compara los costes unitarios para industrias conserveras situadas en edificios tipo B y en edificios tipo C. Se puede observar cómo, en general, la normativa exige unos costes notablemente superiores en los edificios tipo B. También se observa cómo en determinados tramos el coste unitario disminuye al aumentar la superficie de la industria, mientras que en otros se mantiene constante o aumenta ligeramente.

En cada una las dos curvas incluidas en la Figura 2 se puede observar una "singularidad" – ya explicada anteriormente – y dos grandes discontinuidades o saltos: la primera de ellas, (a), se debe a la inclusión de un sistema de evacuación de humos, según se define en la norma UNE 23585 [12]; la segunda, (b), se corresponde con la dotación de hidrantes y de rociadores automáticos, que además requerirán en muchos casos de un sistema de abastecimiento de agua. También puede observarse que el coste unitario disminuyó para edificios tipo B cuando se superó la superficie total de 2940 m² – discontinuidad (c) en la gráfica – debido a que el sector de incendios destinado a fabricación superó el límite dado por el RSCIEI y se hizo necesario crear un nuevo sector de incendios; ello produjo que los dos sectores de incendio resultantes, cada uno con menor superficie que un único sector, tuvieran menores requisitos de seguridad, disminuyendo así el coste global del total de la industria.

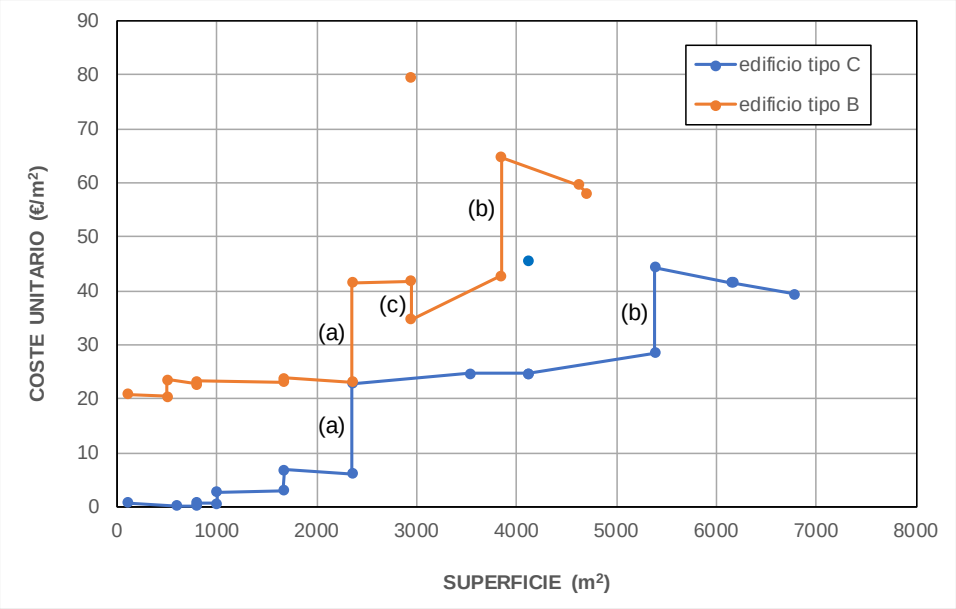


Figura 2. Evolución del coste unitario para industrias conserveras en edificios tipo B y C.

Para el resto de industrias estudiadas se obtuvieron curvas de coste análogas a las presentadas anteriormente, pero con valores de coste total y unitario diferentes en función del nivel de riesgo correspondiente a la actividad de la industria. En la Figura 3 se presenta una comparativa de los resultados obtenidos para 5 tipos de industrias, todas ellas de pequeño tamaño (entre 500 y 2000 m²) y ubicadas en edificios exentos tipo C.

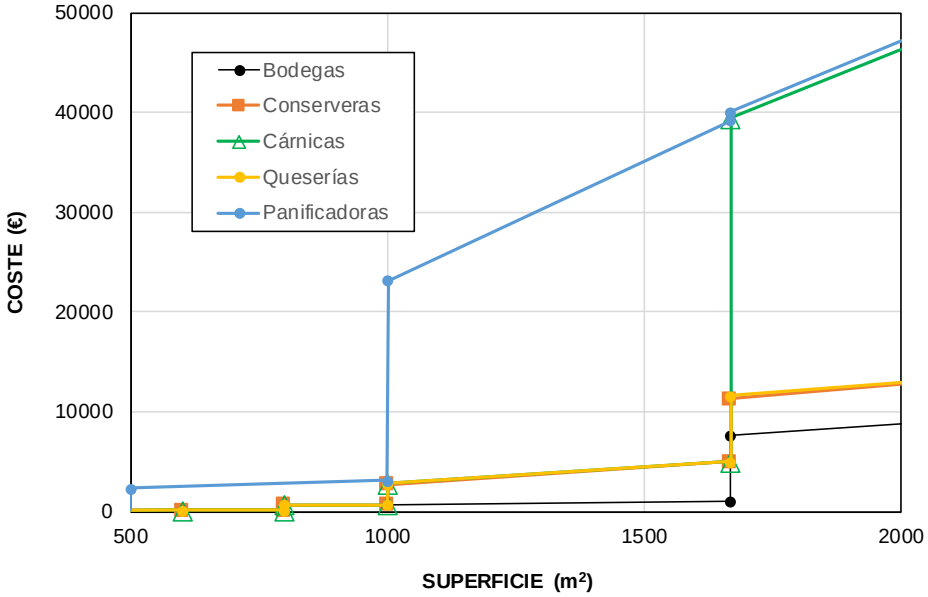


Figura 3. Comparación del coste total en función de la superficie de la industria para edificios tipo C.

Según la Figura 3, el mayor coste correspondió a las panificadoras, que tienen un nivel de riesgo intrínseco alto, mientras que el coste más reducido fue para las bodegas, con nivel de riesgo intrínseco bajo. Las conserveras y las lácteas (queserías) presentaron un coste idéntico ya que ambas tienen un nivel de riesgo intrínseco medio. Las cárnicas, dependiendo de la sectorización realizada, presentaron nivel de riesgo intrínseco medio o alto, por lo que en la parte inicial de la gráfica tuvieron resultados similares a conserveras y lácteas, mientras que para superficies mayores se asimilaron a las panificadoras. Los resultados de la Figura 3 ilustran cómo el coste asociado a la seguridad contra incendios varía significativamente dependiendo del nivel de riesgo intrínseco de la industria.

4. Conclusiones

Los resultados de este estudio indican que el proyectista y las decisiones que se adopten tanto en la fase de concepción del proceso agroindustrial como en la fase de diseño en planta de la industria y durante la redacción del documento de protección contra incendios tienen una influencia notable en el coste asociado a la seguridad contra incendios. En particular, son muy relevantes las dimensiones de los almacenes y la sectorización contra incendios que se decida.

La variedad de requisitos normativos y los distintos factores que influyen sobre cada uno de ellos hacen que no sea fácil encontrar la solución óptima desde el punto de vista del coste de la seguridad contra incendios. La optimización requiere un estudio suficientemente detallado del problema y un conocimiento profundo de la normativa.

La protección de las estructuras, los sistemas de evacuación de humos, los sistemas de abastecimiento de agua contra incendios y las puertas de sectorización de grandes dimensiones son los elementos que mayor influencia tienen en el coste asociado a la seguridad contra incendios.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha contado con financiación del Instituto de Estudios Riojanos (proyecto Análisis de los costes asociados a la protección contra incendios en la implantación de industrias agroalimentarias en La Rioja).

Referencias

1. Real Decreto 2267/2004. Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
2. Real Decreto 513/2017. Reglamento de instalaciones de protección contra incendios. Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.
3. Real Decreto 314/2006. Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio, CTE DB SI. Ministerio de Vivienda.
4. Aguado P.J., Medina-Bocos G., Cubría J.M., Tascón A. El nuevo Reglamento de protección contra incendios en establecimientos industriales y su aplicación a las actividades agrarias. III Congreso de Agroingeniería, León, España, 2005. Libro de Resúmenes, 305–306, ISBN: 84-9773-208-1.
5. Cubría J.M., Medina G., Tascón A., Aguado P.J. Estudio de los sistemas de protección contra incendios en los edificios agrarios y alimentarios. III Congreso de Agroingeniería, León, España, 2005. Libro de Resúmenes, 303–304, ISBN: 84-9773-208-1.
6. Gómez J., Tascón A., Ayuga F. Systematic layout planning of wineries: the case of Rioja region (Spain). Journal of Agricultural Engineering. 2018, vol. 49, 34–41.
7. Guía Técnica de Aplicación del Reglamento de Seguridad Contra Incendios en los Establecimientos Industriales. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2007.
8. PREOC 2017. Base de precios de edificación y obra civil. Atayo, 2017. En internet: <http://www.preoc.es>
9. UNE-EN 23007-14. Sistemas de detección y alarma de incendios, Parte 14: Planificación, diseño, instalación, puesta en servicio, uso y mantenimiento. AENOR, 2014.
10. UNE-EN 12845. Sistemas fijos de lucha contra incendios. Sistemas de rociadores automáticos: Diseño instalación y mantenimiento. AENOR, 2016.
11. UNE 23500. Sistemas de abastecimiento de agua contra incendios. AENOR, 2018.
12. UNE 23585. Seguridad contra incendios. Sistemas de control de humo y calor. Requisitos y métodos de cálculo y diseño para proyectar un sistema de control de temperatura y de evacuación de humos (SCTEH) en caso de incendio estacionario. AENOR, 2017.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Análisis de vigas metálicas utilizadas en correas de cubierta en industrias agroindustriales

Luis M. Serna Jara[1], José A. Flores Yepes[1], Joaquín J. Pastor Pérez[1], Alexandra Baños Foss[2]

[1] Departamento de Ingeniería de la E.P.S.O. de la Universidad Miguel Hernández; luis.serna@goumh.umh.es
[2] Profesora Departamento de Comercialización e Investigación de Mercados de la Universidad de Murcia.

Resumen: A la hora de llevar a cabo la construcción de una industria se han de considerar múltiples parámetros y variables, desde el punto de vista del proyectista. Dentro del desarrollo e implementación del diseño y cálculo estructural de una edificación industrial, en el presente artículo nos hemos centrado en las vigas que sustentan la cubierta de la nave industrial y se apoyan sobre los dinteles de los pórticos que conforman la estructura portante de la edificación industrial. En el presente estudio se desarrollarán los cálculos y analizarán los resultados obtenidos sobre una serie de perfiles comerciales utilizados en la construcción de cubiertas de edificios industriales, en concreto se analizarán perfiles de acero conformados: de cajón cuadrado huecos; de cajón rectangular hueco, Omega simples, correas en "U", correas en "C" y correas en "Z". Para el análisis estructural de estas series de perfiles se han fijado unos parámetros de diseño, para unas hipótesis de acciones fijas y variables según establece la normativa actual mediante el Código Técnico de la Edificación, C.T.E. Con este análisis obtendremos una serie de resultados para cada serie de perfiles, que se clasificarán por el peso propio de dicho perfil; seleccionando el perfil de la serie con menor peso por metro lineal; el estudio se implementará para las distintas series de perfiles conformados. Y sobre ellos se analizarán los resultados obtenidos de las 6 series de perfiles comerciales, analizando cuál de los perfiles estructurales de cada serie, para un intervalo de valores admisibles de resistencia estructural, es el óptimo en función de su peso propio; con lo que repercutirá en un descenso del coste general de la construcción de la edificación industrial.

Palabras clave: construcción, estructura, cubiertas, correas, metálicas.

1. Introducción

En este estudio se trata de analizar una serie de perfiles comerciales de acero conformados en frio para las correas de cubierta que se emplean en la construcción de naves industriales, en concreto se analizarán perfiles de acero conformados: de cajón cuadrado huecos; de cajón rectangular hueco, Omega simples, correas en "U", correas en "C" y correas en "Z", que suelen ser las correas más utilizadas para la construcción de cubiertas de naves industriales.

Las correas de cubierta, o vigas de cubierta tiene la finalidad de sustentar los pesos fijos de la cubierta constituidos por la propia cubierta de panel sándwich, chapa grecada, etc.; asi como sus elementos de fijación como tornillería; además de los pesos fijos, también han de ser capaza de sustentar las acciones de cargas variables a los que pueda ser sometido dicha cubierta, como son las acciones de viento y nieve en función de la localización y características geográficas donde se ubique la nave industrial, estas acciones tanto fijas como variables y los

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3411

estados de combinación de las mismas viene definidos para España, en cuestión, mediante el Documento Básico de Acciones de la Edificación del C.T.E.[1].

A la hora de proyectar una nueva edificación industrial o la rehabilitación de una existente, diversos expertos en el diseño y cálculo de edificaciones industriales, como son el Dr. Jose A. Flores Yepes [2], el Dr. Sisenando C. Morales Palomino [3], han publicado obras en las cuales, desde el punto de vista constructivo, es muy importante que la estructura sea lo más liviana posible al objeto de evitar el exceso de pesos en la misma, y conseguir un ahorro económico en la construcción.

En este estudio, nos hemos centrado en el análisis de estas vigas o correas que sustentan la cubierta, para ello, hemos seleccionado una cubierta de panel sándwich, así, conoceremos la carga fija que actuarán sobre dichas correas que sustentan la cubierta, considerando también las cargas variables según C.T.E. en su documento básico acciones de la edificación. Se empleará para ello un software versión libre, de los muchos que hay en el mercado, para este estudio hemos empleado el Generador de pórticos edición 2018.m de la empresa de software para arquitectura, ingeniería y construcción CYPE, este software en concreto es un generador de geometría de pórticos rígidos y cerchas simples y múltiples, genera automáticamente las cargas de viento y nieve según establece el Código Técnico de la Edificación, C.T.E.; dimensiona y optimiza las correas metálicas de cubierta y laterales de fachada.

El objetivo del estudio que se presenta es realizar una comparación de los diferentes tipos de correas comerciales de acero conformado en frío que se usan en las cubiertas de las edificaciones industriales, con el objeto de estudiar cuál de ellas con unas propiedades mecánicas de resistencia a flexión y compresión similares, es la óptima para conseguir una estructura más liviana, y con ello un mayor ahorro económico a la hora de ejecutar la misma.

2. Materiales y métodos

2.1. Metodología

Para conseguir los objetivos propuestos, se actuará con el fin de obtener un amplio abanico de datos para poder contrastarlos. Se procederá a fijar las variables de diseño de la edificación industrial y la localización geográfica, para que todos los datos paramétricos sean los mismos para el cálculo y análisis de las correas de cubierta.

El análisis lo realizaremos sobre una edificación industrial genérica de estructura metálica de 25 m. de longitud, 20 m de luz, 8 m de altura de pilares y un 10 % de pendiente, una separación de pórticos metálicos de 5 m, Antonio M. Reyes Rodríguez [4], separación usual en edificaciones industriales. La cubierta es de panel tipo sándwich de Arcelormittal [5], 40 mm de espesor, con un intervalo de disposición de las correas de entre 1 y 1,5 metros de separación.

Los huecos de fachada que definiremos para la nave dependerán de varios factores, diseño, uso para el cual se proyecta, etc.; para este estudio definiremos varios huecos en las fachadas, con las siguientes características dimensionales:

Tabla. 1: Parámetros de Diseño, huecos de fachada

Fachada	Hueco	Nº	Dimensiones (m)	Área (m²)
Frontal	Puerta acceso peatonal	1	1,00 x 2,10	2,10
Frontal	Puerta acceso vehículos	1	3,50 x 3,50	7,00
Frontal	Ventana	1	1,20 x 1,00	1,20
Lateral Derecho	Ventana	2	1,20 x 1,00	2,40
Lateral Izquierdo	Ventana	2	1,20 x 1,00	2,40
Posterior	Ventana	2	1,20 x 1,00	2,40

La localización geográfica de la edificación, se ha fijado en una zona de clima invernal: 6 (Murcia), con una altitud topográfica de 42.00 m, una cubierta sin resaltos, y una exposición al viento normal (zona eólica B) con un grado de aspereza IV, según Documento Básico, Seguridad Estructural, Acciones de la Edificación del C.T.E.[1].

Con estos parámetros de diseño fijados, se obtienen unos valores de las acciones fijas de carga, peso propio sobre la estructura, y de acciones variables de cargas en función de la localización geográfica, debidas a viento y nieve principalmente. El software analiza las combinaciones de las acciones fijas y variables más desfavorables según establece el C.T.E. Con dicho software se obtienen la serie de perfiles conformados en frío que cumplen con la normativa con los parámetros de diseño introducidos, también se obtiene la repercusión del peso de las correas sobre el pórtico que lo sustenta, con esa información podemos elegir el perfil óptimo, que será el de menor peso.

La flecha se ha seleccionado L/300, que viene establecida en el C.T.E. para edificaciones de uso industrial.

Se ha procederá al análisis de los tipos de correa metálica conformada en frío de cajón cuadrado hueco, de cajón rectangular hueco, perfil omega simple y rigidizado; series de perfiles como son correas en "U", correas en "C" y correas en "Z" y en "M".

2.2. Materiales.

Los materiales utilizados para el desarrollo de este estudio, junto con sus características técnicas, son:

a.- Panel sandwich, para la formación de cubierta, modelo Ondatherm 1150 es un panel de cubierta para pendientes mínimas del 5%. Fijación oculta mediante tapajuntas para facilitar el montaje y desmontaje. La chapa exterior es de 0,6 mm de espesor con el fin de mejorar la resistencia del panel a las acciones climáticas (viento y nieve), el solape y el amarre de los remates debido a que mejora el atornillado y el transito durante la fase de instalación y posterior mantenimiento. La chapa interior es de 0,4 mm de espesor, con lo que mantenemos el mismo peso, incrementando su resistencia.

Tabla. 2: Datos técnicos, panel sadwich de cubierta

ESPESOR NOMINAL (mm)	**TERMICO (W/m² K)**	**MASA (KG/m²)**	**Volumen Empaquetado (m²/m³)**
40	0,53	10,5	18

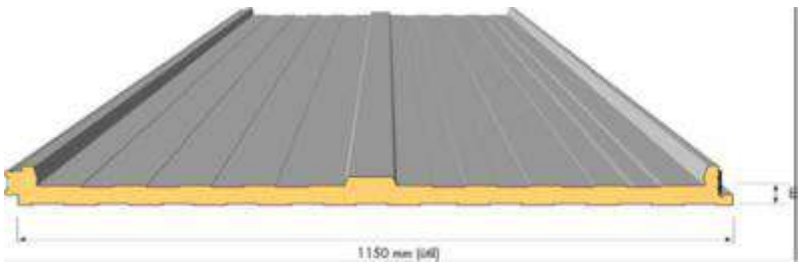


Figura 1: Cubierta de panel sándwich

El panel sándwich para cubierta de espesor 40 mm (figura 1), para nuestro estudio, tiene una carga fija actuando sobre las correas de cubierta, que vendrá dado por el peso propio de la cubierta, más peso propio de tapajuntas de unión y tornillería, más un porcentaje de seguridad.

Tabla 3: Carga fija sobre correas de cubierta

Elementos de Cubierta	**Peso(kN/m²)**
Panel sándwich	0,105
Tapajuntas y tornillería	0,015
Seguridad 10%	0,013
Total	0,133
Carga peso propio de cubierta	0,140

b.- Correas de cubierta, perfiles conformados en frío, que se emplean para la sustentación de la cubierta, así como las acciones variables que pueden actuar sobre ella. Las correas que utilizamos en este estudio son:

- Correas tipo Cuadrado Hueco. UNE-EN 10219. [6]. Figura 2.
- Correas tipo Rectangular Hueco. UNE-EN 10219. [6]. Figura 3
- Correas tipo Omega rigidizada. UNE-EN 36-575-79. [7]. Figura 4
- Correas tipo Omega. UNE-EN 36-575-79. [7]. Figura 5
- Perfil Sigma UNE-EN 10219. [6]. Figura 6
- Perfiles abiertos conformados en frío. perfil CF. UNE 36-573-79 [8]. Figura 7
- Perfiles abiertos conformados en frío, perfil UF. UNE 36-572-80.[9]. Figura 8
- Perfiles abiertos conformados en frío, perfil NF. UNE 36-574-79 [10]. Figura 9
- Perfiles abiertos conformados en frío. perfil ZF. UNE 36-576-79 [11]. Figura 10

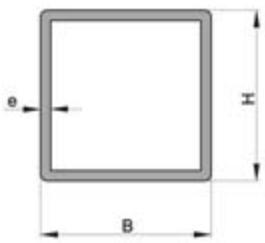


Figura 2: Perfil cuadrado hueco



Figura 3: Perfil rectangular hueco

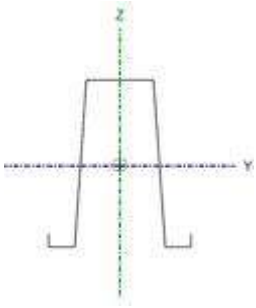


Figura 4: Perfil omega rigidizada

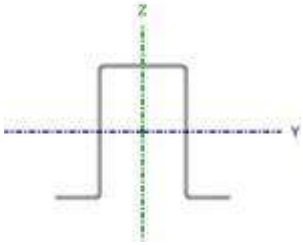


Figura 5: Perfil omega

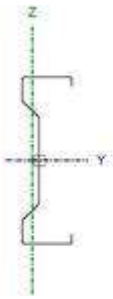


Figura 6: Perfil M



Figura 7: Perfil CF

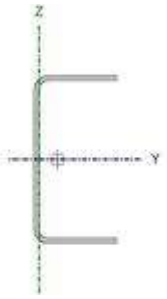


Figura 8: Perfil UF



Figura 9: Perfil Z

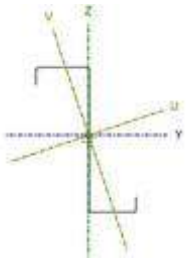


Figura 10: Perfil ZF

2.3. Métodos.

En el apartado de materiales se han establecido las cargas fijas que ha de soportar la cubierta ligera. La categoría de uso es G: Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento y una cota de nieve de altitud inferior o igual a 1000 m; según establece el C.T.E.

Las cargas variables debidas a las acciones de viento establecidas según C.T.E., son las siguientes:

Zona eólica: B
Grado de aspereza: IV. Zona urbana, industrial o forestal
Periodo de servicio (años): 50
Profundidad nave industrial: 25.00
Con huecos:

- Área izquierda: 2.40
- Altura izquierda: 1.70
- Área derecha: 2.40
- Altura derecha: 1.70
- Área frontal: 10.30
- Altura frontal: 1.60
- Área trasera: 2.40
- Altura trasera: 1.70

1 - V(0°) H1, Viento a 0°, presion exterior tipo 1 con presión interior
2 - V(0°) H2, Viento a 0°, presion exterior tipo 1 con succión interior
3 - V(0°) H3, Viento a 0°, presion exterior tipo 2 con presión interior
4 - V(0°) H4, Viento a 0°, presion exterior tipo 2 con succión interior
5 - V(90°) H1, Viento a 90° con presión interior
6 - V(90°) H2, Viento a 90° con succión interior
7 - V(180°) H1, Viento a 180°, presion exterior tipo 1 con presión interior
8 - V(180°) H2, Viento a 180°, presion exterior tipo 1 con succión interior
9 - V(180°) H3, Viento a 180°, presion exterior tipo 2 con presión interior
10 - V(180°) H4, Viento a 180°, presion exterior tipo 2 con succión interior
11 - V(270°) H1, Viento a 270° con presión interior
12 - V(270°) H2, Viento a 270° con succión interior

Las cargas variables debidas a las acciones de nieve, son las siguientes:

Zona de clima invernal: 6 (Murcia)
Altitud topográfica: 42.00 m
Cubierta sin resaltos
Exposición al viento: Normal

Hipótesis aplicadas:

1 - Nieve: estado inicial, (H1-Libre H1-Libre) (H1-Libre H1-Libre)
2 - Nieve: redistribución 1, (H2-Libre H2-Libre) (H1-Libre H1-Libre)
3 - Nieve: redistribución 2, (H1-Libre H1-Libre) (H2-Libre H2-Libre)

Para el cálculo de las propiedades mecánicas de los distintos perfiles empleados en el estudio, hemos utilizado las siguientes expresiones basadas en la normativa vigente, Eurocódigo 3 EN 1993 [12] y CTE DB SE-A [13]:

- Abolladura del alma inducida por el ala comprimida, Eurocódigo 3 EN 1993-1-5 [12]:

$$\frac{\mathbf{h_w}}{\mathbf{t_w}} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc,ef}}} \qquad \text{(Expresión 1)}$$

Donde:

hw: Altura del alma.
tw: Espesor del alma.
Aw: Área del alma.
Afc,ef: Área reducida del ala comprimida.
k: Coeficiente que depende de la clase de la sección.
E: Módulo de elasticidad.
fyf: Límite elástico del acero del ala comprimida.

Siendo:

$$f_{yf} = f_y \qquad \text{(Expresión 2)}$$

- Resistencia a flexión eje Y (CTE DB SE-A) [13]:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1 \qquad \text{(Expresión 3)}$$

Para flexión positiva:
MEd+: Momento flector solicitante de cálculo pésimo.
Para flexión negativa:
MEd-: Momento flector solicitante de cálculo pésimo.
El momento flector resistente de cálculo Mc,Rd viene dado por:

$$\mathbf{M_{c,Rd}} = W_{pl,y} \cdot f_{yd} \qquad \text{(Expresión 4)}$$

Donde:
Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.
Wpl,y: Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.
fyd: Resistencia de cálculo del acero.

$$\mathbf{f_{yd}} = f_y / \gamma_{M0} \qquad \text{(Expresión 5)}$$

Siendo:

fy: Límite elástico. CTE DB SE-A [13]

γM0: Coeficiente parcial de seguridad del material.

Para ello, cálculo de las correas metálicas de cubierta, se ha empleado un sorfware informático, el generador de pórticos de la empresa CYPE Ingenieros [14].

Se procedera mediante método utilizado por el Dr. J.A. Flores Yepes [15], para el cálculo de resistencia a flexión en el eje Y, resistencia a flexión en el eje Z, abolladura del alma inducida por el ala comprimida y resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados

En este aparatado se muestran los resultados obtenidos para la serie de perfiles de cada uno de los tipos de correas estudiadas, solo se expone el perfil de la serie óptimo, que cumpla con los requisitos de resistencia y flecha máxima permitida L/300 según los parámetros indicados anteriormente, posteriormente se procederá a la discusión de dichos resultados.

Tabla 4: Resultados de los distintos tipos de perfiles.

Tipo de correas	**Dimensiones (mm)**	**Nº de correas**	**Separación (m)**	*** Peso Lineal kN/m**	**** Peso lineal por correa kN/m**	***** Peso superficial kN/m²**
Cuadrado Hueco	100x100x4	20	1.10	2.300	0.115	0.117
Rectangular Hueco	120x80x3	18	1.20	1.580	0.088	0.081
Omega Rigidizado	18.5x6.11	16	1.40	0.964	0.060	0.049
Omega	120x80x40x3	18	1,20	1.580	0.088	0.081
Sigma M	23x70x120x2	20	1.10	1.238	0.062	0.063
CF	160x2	18	1.20	0.848	0.047	0.043
UF	120x4	22	1.00	1.524	0.069	0.078
Z	140x35x4.75	20	1.10	1.420	0.071	0.072
ZF	160x2.0	20	1.10	0.911	0.046	0.046

* Peso Lineal en kN/m de todas las correas que sustentan la cubierta sobre un pórtico.

** Peso lineal en kN/m por correa sobre un pórtico.

*** Peso superficial en kN/m² de las correas sobre un pórtico

En la tabla 5, se representan los porcentajes de variación con respecto al valor mínimo obtenido, tanto para los pesos por metro, como los pesos por unidad de superficie:

Tabla **5**: Resultados de los porcentajes de variación de los distintos tipos de perfiles.

Tipo de correas	* **Peso Lineal KN/m**	**% Variación Peso lineal**	*** **Peso superficial kN/m²**	**% Variación Peso superficial kN/m²**
Cuadrado Hueco	2.300	145.20	0.117	7.43
Rectangular Hueco	1.580	73.20	0.081	3.76
Omega Rigidizado	0.964	11.60	0.049	0.62
Omega	1.580	73.20	0.081	3.76
M	1.238	38.97	0.063	2.01
CF	0.848	0.00	0.043	0.00
UF	1.524	67.61	0.078	3.47
Z	1.420	57.25	0.072	2.94
ZF	0.911	6.30	0.046	0.34

* Peso Lineal en kN/m de todas las correas que sustentan la cubierta sobre un pórtico.
*** Peso superficial en kN/m² de las correas sobre un pórtico

3.2. Discusión.

Tras los resultados obtenidos y mostrados en la tabla 4, se puede observar en la gráfica 1, cuál de los perfiles tiene un menor peso lineal de correa por metro lineal, se aprecia que los perfiles conformados en frío, que cumplen con los criterios de resistencia, para los mismos parámetros introducidos, corresponden a los tipos CF, Omega rigidizados, y los ZF; en orden de menor a mayor peso; obteniendose los mejores resultados para el modelo CF, con un valor de 0.848 KN/m; seguido de los perfiles tipo ZF, con un valor de 0.911 KN/m, y continuando de forma ascendente en función de su peso por metro lineal de los periles tipo omega rigidizados con un valor de 0.964 KN/m, como se puede apreciar en la figura 1:

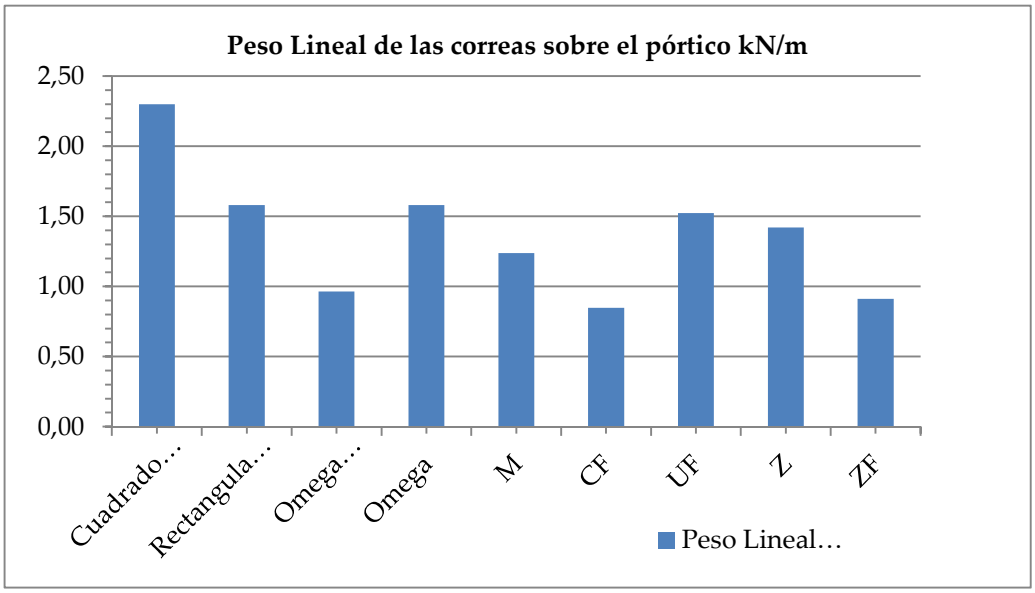


Figura 1: Peso Lineal (kN/m) de lass correass sobre el pòrtico para los distintos tipos de perfiles analizados.

De los resultados, observados en la tabla 5, el porcentaje de variación que se produce con respecto al perfil de mejor resultado, CF, es variable en función del tipo de perfil, con oscilaciones que van desde el 6.30 % de incremento del peso que se produce para los perfiles tipo ZF, hasta el aumento que se produce del 145.20 % de los perfiles cuadrados huecos con respecto a los tipos CF.

Esos porcentajes, disminuyen si la repercusión del peso de las correas la realizamos en función de la superficie, como se observa en la tabla 5, siendo el porcentaje mínimo para las correas tipo ZF, con un aumento del 0.34 % del peso con respecto a las correas tipo CF; y el porcentaje máximo son las de tipo cuadrado hueco, con un porcentaje de aumento del 7.43 %, con respecto a los perfiles tipo CF, todo ello, se aprecia en la figura 2, que muestra a continuación.

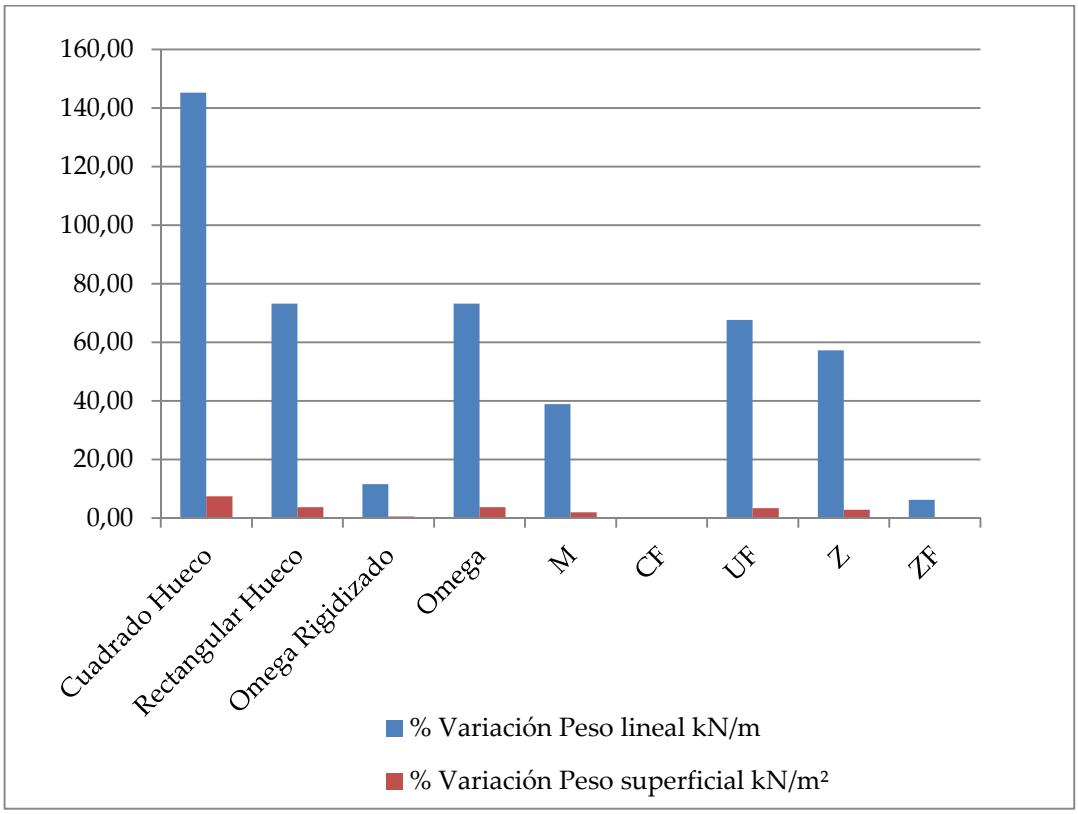


Figura 2: Porcentaje de variación del peso lineal y supercial de las correas sobre el pórtico para los distintos tipos de perfiles analizados.

4. Conclusiones

Las conclusiones que se desprenden de los resultados obtenidos de este estudio, son, que las correas o perfiles conformados en frío, que se utilizan para la sustentación de la cubierta de edificaciones industriales, resultan ser los tipo CF los cuales obtienen los mejores resultados, dichos perfiles, los de tipo CF, tienen una menor repercusión de peso sobre la estructura de la edificación, con el consiguiente ahorro económico que eso supone para la disminución de costes a la hora de llevar a cabo el proyecto de un edificio industrial; como se ha demostrado la repercusión del peso sobre el pórtico que ha de sustentar a las correas, que a su vez sustentan la cubierta es inferior tanto en kN/m como kN/m2, con respecto a los otros tipos de perfiles sometidos a estudio.

Del resto de tipos de perfiles estudiados, le continuarían los de la serie ZF, utilizando este tipo de perfil se produce un aumento del peso metro lineal de las correas sobre la estructura de

un 6,30 % respecto a los perfiles CF, y luego los del tipo omega rigidizado, los cuales suponen una repercusión de peso por metro lineal sobre la estructura de un 11,60 % respecto a la serie CF; con el resto de series de perfiles se produce un gran aumento del peso, que desaconsejan su utilización si la premisa es la del ahorro económico.

Referencias

1. Ministerio de Fomento de España, Código Técnico de la Edificación, Documento Básico Acciones de la Edificación. R.D. 314/2006 de 17 de Marzo. B.O.E. nº 74 del 28/3/2006.
2. Flores Yepes J. A.; libro: Análisis de estructuras metálicas. Cálculo de aplicaciones reales con metal 3D, Año 2011, Editorial AMV, ISBN: 978-84-96709-63-8.
3. Morales Palomino, Sisenando C..; libro: Diseño de Plantas Industriales, Año 2018, Editorial UNED, ISBN: 978-84-362-7356-4.
4. Reyes Rodriguez A. M.; libro: CYPE 2010: Cálculo de estructuras metálicas con nuevo metal 3d, Año 2009, Editorial ANAYA MULTIMEDIA, ISBN: 9788441526570.
5. Arcelormittal, Catálogo comercial, Año 2018.; https://spain.arcelormittal.com
6. Norma UNE-EN 10219-1:2007. Perfiles huecos para construcción soldados, conformados en frío de acero no aleado y de grano fino. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro.
7. Norma UNE 36-575-79: productos de acero: perfiles abiertos conformados en frío: perfil OF
8. Norma UNE 36-573-79: productos de acero: perfiles abiertos conformados en frío: perfil CF
9. Norma UNE 36-572-80: productos de acero: perfiles abiertos conformados en frío: perfil UF
10. Norma UNE 36-574-79: productos de acero: perfiles abiertos conformados en frío: perfil NF
11. Norma UNE 36-576-79: productos de acero: perfiles abiertos conformados en frío: perfil ZF
12. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Norma UNE-EN 1993
13. Ministerio de Fomento de España, Código Técnico de la Edificación, Documento Básico Seguridad Estructural- Acero. R.D. 314/2006 de 17 de Marzo. B.O.E. nº 74 del 28/3/2006.
14. CYPE Ingenieros, S.A.Software para Arquitectura, Ingeniería y Construcción, versión 2018
15. Flores Yepes, J.A.; Ferrandez-Villena García, Manuel; Curso de metal 3d y generador de pórticos de metal 3d de Cype, 2015, Ediciones TC, ISBN 978-84-95556-21-9

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Análisis del coste constructivo de salas de crianza aéreas para vino tinto

Teresa Gómez-Villarino[1], Fernando R. Mazarrón[1], Ignacio Cañas[1]

[1] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas. Universidad Politécnica de Madrid; teresa.gomez.villarino@upm.es; f.ruiz@upm.es; ignacio.canas@upm.es

Resumen:

El sector vitivinícola español se encuentra inmerso en un importante proceso de actualización y renovación, no sólo en cuanto a superficie de viñedo, sino también en cuanto al nivel de inversión que se ha destinado a la edificación de nuevas bodegas, a la mejora de las instalaciones y equipamientos y a la utilización de técnicas de envejecimiento distintas para ofrecer una gama mucho más amplia de vinos de calidad. En este contexto se ha desarrollado el proyecto "Estrategias de diseño bioclimático en bodegas como modelo de edificios de consumo de energía casi nulo", que planteando un ambicioso estudio global y a gran escala, ha analizado un importante número de bodegas repartidas por todo el territorio español, representativas de los principales diseños constructivos. En el presente trabajo se analiza y cuantifica el coste actualizado de naves de crianza en superficie ubicadas en regiones vitivinícolas destacadas. La documentación técnica de la ejecución de las bodegas analizadas (proyecto, planos, certificados de obra, etc.), fue revisada y complementada con inspecciones y visitas realizadas a dichas bodegas, obteniendo presupuestos actualizados con base de precios de 2018.

Palabras clave: Bodegas, Diseño, Proyectos, Presupuestos

1. Introducción

Son numerosos los trabajos que analizan la temperatura y humedad relativa existente en el interior de naves de crianza de vino [1-6]. Entre las diferentes tipologías existentes, las construcciones bajo tierra (subterráneas, sótano, etc.) han sido la más estudiada hasta ahora, ofreciendo las condiciones adecuadas para el envejecimiento del vino sin gasto energético [7-11]. Además de la tipología constructiva, estudios como el de Torreggiani et. al. [12] abordan las necesidades de técnicas arquitectónicas de diseño que deberían tener las bodegas de vino, para optimizar sus procesos y mejorar la calidad de sus productos.

Sin embargo, el número de construcciones bajo la superficie para la crianza del vino en barricas es limitado y crear nuevos implica un alto coste económico para las bodegas. Además, las bodegas para la crianza de vino subterráneas tienen el gran inconveniente de tener una estructura muy rígida por la existencia de pilares que dificultan los movimientos de barricas y jaulones de botellas con limitaciones en el espacio y, en muchos casos, problemas de humedad por la situación de la capa freática. Los sistemas de climatización hacen posible que la crianza pueda llevarse a cabo en construcciones en superficie, aunque tienen el inconveniente de la necesidad de una mayor superficie ocupada por la bodega y el costo del consumo de energía necesaria para realizar una correcta climatización [13].

Por ello, en la actualidad, para conseguir las condiciones adecuadas de crianza, las bodegas comerciales optan por diferentes soluciones de la sala de crianza [14], y una gran mayoría ha

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3359

optado por construir sus salas de crianza sobre la superficie, en las denominadas bodegas aéreas, de las que hasta ahora poco o nada se ha abordado en la literatura. En este sentido es necesario realizar un estudio pormenorizado de las diferentes soluciones constructivas de las bodegas aéreas, principalmente enfocado a conocer su coste de construcción para obtener un punto de comparativa costo-beneficio.

El trabajo ha desarrollado un estudio comparativo entre diferentes condiciones constructivas de la envolvente de la sala de crianza de bodegas aéreas con el fin último de sentar las bases para poder analizar, en una segunda fase, cómo influyen en las condiciones higrotérmicas de las zonas de crianza en barricas.

2. Materiales y métodos

El estudio se inscribe dentro del proyecto "Estrategias de diseño bioclimático en bodegas como modelo de edificios de consumo de energía casi nulo", del Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad financiado por el Ministerio español de Economía y Competitividad, que pretende promover la sostenibilidad energética y medioambiental en este sector a través del proceso de edificación de las bodegas para crianza, buscando construcciones de consumo de energía casi nulo. El proyecto ha planteado un estudio a gran escala, basado en la caracterización de decenas de bodegas repartidas por todo el territorio nacional. Para conseguir este objetivo el primer paso es realizar un análisis a detalle de las diferentes soluciones constructivas utilizadas para la construcción de naves de crianza.

La metodología seguida para abordar el estudio está basada en la investigación-acción. El proyecto proporciona un entorno para "aprender haciendo", analizando los diseños constructivos de las salas de crianza con la colaboración indispensable de los responsables de las bodegas, para cambiar el sistema en una dirección deseable de sostenibilidad energética y medioambiental. El logro de estos objetivos requiere la colaboración activa de investigadores y profesionales, y por lo tanto enfatiza la importancia del co-aprendizaje como un aspecto primario del proceso de investigación [15]. La investigación tiene lugar en situaciones del mundo real y tiene como objetivo resolver problemas reales.

Así el procedimiento establecido para abordar el caso de estudio ha necesitado de una fuerte implicación del sector empresarial vitivinícola y se ha dividido en tres fases.

En una primera fase, se identificación las bodegas presentes en el territorio nacional e inscritas en una Denominación de Origen. Se identificando un total de 3.863 bodegas con las que se contactó telefónicamente y a las que se solicitó contestar una encuesta, accediendo a ello 389 bodegas. De entre ellas se realizó una primera preselección de 100 bodegas, teniendo en cuenta el interés de la bodega en colaborar y la información necesaria para el estudio de que disponían; así se dio prioridad a aquellas bodegas que contaban con el proyecto constructivo y datos del consumo energético. De este análisis se obtuvo una selección de 35 bodegas que incorporaban soluciones bioclimáticas y/o fuentes de energía alternativa. Finalmente se seleccionan las bodegas de vino tinto que tienen la sala de crianza por encima del nivel del suelo, obteniendo 10 bodegas.

En una segunda fase se procedió a la caracterización de las soluciones constructivas utilizadas en ellas. Esta caracterización ha incluido tanto aspectos constructivos (materiales, propiedades, espesores, sistemas constructivos, etc.) como el coste de los mismos a partir de:

- Información facilitada por las bodegas, (proyectos, certificaciones de obra, etc.).
- Información recabada, con métodos no destructivos, de las visitas realizadas a las mismas.

Para cada bodega se ha generado una ficha con datos generales de la bodega y con carácter específico para la nave de crianza. La nave de producción de vino de crianza se ha entendido como un espacio, separado del resto de edificios de la bodega total o parcialmente, donde se albergan de forma permanente barricas de madera para criar el vino joven. La ficha se completa con planos de alzado, planta y estructura que, junto con el detalle constructivo, permite la actualización de los costes constructivos de la nave de crianza.

En cada una de las fichas generadas se recoge la siguiente información:

1. Identificación de la bodega
2. Localización
3. Descripción
4. Microclima
5. Fotos de la nave de crianza
6. Fotos exteriores
7. Características constructivas
8. Instalaciones
9. Presupuesto
10. Estructura
11. Planta
12. Alzado
13. Sección
14. Detalle constructivo
15. Plano de sensores
16. Observaciones

Los seis primeros apartados se refieren a aspectos generales de la bodega. El epígrafe Identificación caracteriza el tipo de producción y localización de la bodega -que se cartografía posteriormente en el apartado específico de Localización- las condiciones microclimáticas asociadas, y las características básicas de la nave de crianza, (número de naves, forma del edificio, orientación, espesor de las paredes y superficie útil). También quedan identificados los sistemas de ventilación, iluminación, climatización y control de la humedad. Respecto a la energía se identifican fundamentalmente si existen fuentes de energía alternativa, dispositivos de ahorro de electricidad o sistemas de acumulación de energía térmica.

El epígrafe Descripción caracteriza la distribución de la bodega identificando las distintas naves existentes y usos asociados a cada una de ellas y se acompaña de un croquis representativo de la distribución.

El cuarto aspecto general que queda identificado en la ficha son las condiciones microclimáticas donde queda encuadrada la bodega y que van a ser básicas para poder determinar si la solución constructiva adoptada por la bodega va a poder asegurar un óptimo periodo de crianza, donde las condiciones de temperatura y humedad permanezcan estables durante todo el proceso [16].

Para finalizar la caracterización de la bodega se incluyen fotos representativas.



Fotos 1, 2, 3 y 4. Salas de crianza aéreas para vino tinto

El resto de los epígrafes de la ficha se dedican a un análisis en detalle de la nave de crianza, de la cual se aportan también fotos en detalle. En el epígrafe Condiciones constructivas se detalla: cimentación de la nave, solera, estructura, pavimento, cubierta, cerramiento y carpintería y, a partir de estos datos, se realiza un Detalle Constructivo. Las Instalaciones (saneamiento, fontanería, electricidad, etc.) se describen en un epígrafe propio.



Foto 5. Hueco de ventilación



Foto 6. Extractor



Foto 7. Detalle climatización



Foto 8. Comprobación in situ de espesor

Por último y en una tercera fase se actualizaron los presupuestos; el detalle constructivo, junto con los planos, permitieron obtener las partidas presupuestarias y mediciones necesarias para obtener un presupuesto actualizado de los costes constructivos de la nave de crianza. Para ello se utilizó el programa de presupuestos Presto 2017, software de referencia en materia de presupuestos, mediciones y control de costes para edificación, que permitió actualizar de forma sistematizada los costes de las diferentes unidades de obra y actualizar los presupuestos de forma estandarizada.

3. Resultados y discusión

De cada una de las bodegas analizadas se ha obtenido un detalle constructivo de la sala de crianza y se ha generado una ficha con la información correspondiente a las 16 variables presentadas anteriormente con el fin de realizar un estudio comparativo entre diferentes condiciones constructivas de la envolvente de las bodegas (cubiertas, cerramientos y soleras) con el fin de poder determinar cómo influyen en las condiciones higrotérmicas de las zonas de crianza. El fin último es el diseño óptimo de nuevas salas de crianza en superficie.

De las bodegas aéreas analizadas, mayoritariamente la nave de crianza está adosada a otros edificios en sus laterales o testeros y sólo en dos casos forma parte del edificio de la bodega. Los cerramientos a exterior tienen habitualmente dos hojas (exterior e interior) de fábrica de termoarcilla o ladrillo, y algún elemento aislante en el interior. Disponen de soleras directamente sobre el terreno, generalmente sin aislamiento. Mientras que las cubiertas son normalmente faldones de algún panel tipo sándwich, o tablero que incorpora algún aislamiento ligero, y rematadas con teja.

Para analizar las soluciones constructivas se ha considerado necesario agrupar las bodegas estudiadas en diferentes zonas climáticas. La zonificación climática empleada ha sido la proporcionada por el Código Técnico de Edificación (CTE), resultando que 9 de las 10 bodegas analizadas se localizaban en la zona D2 y una en la zona D3.

Las figuras 1, 2 y 3 muestran las soluciones constructivas tipo identificadas para la envolvente de las salas de crianza aéreas para vino tinto, cuantificando su coste actual. Para el cálculo del coste constructivo se han suprimido aquellos elementos estéticos, que no siendo relevantes al modelo afectaban al coste final. Se incluye también la zona climática a la que pertenece la bodega.

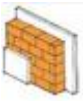
	SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS PARA FACHADAS		COSTE	ZONA CLIMÁTICA (CTE)
TIPO 1		Muro hormigón (e = 40 cm) Panel sandwich (e = 4 cm)	40,93 €/m²	D2
TIPO 2		Enfoscado (e = 1,5 cm) Bloque de termoarcilla (e = 24 cm) Mortero (e = 1,5 cm)	71,90 €/m²	D2
TIPO 3		Enlucido de yeso (e = 1,5 cm) Ladrillo hueco doble (e = 8 cm) Espuma de poliuretano (e = 4 cm) Fábrica termoarcilla (e = 19 cm) Enfoscado (e = 2 cm)	94,29 €/m²	D2
TIPO 4		Enfoscado (e =1,5 cm) 1/2 Ladrillo perforado (e = 24 cm) Poliuretano (e = 4 cm) Fábrica termoarcilla (e = 19 cm) Enfoscado (e = 2 cm)	96,90 €/m²	D2
TIPO 5		Enfoscado exterior (e = 2 cm) Bloque termoarcilla (e = 19 cm) Cámara de aire Espuma de poliuretano (e = 4 cm) Fábrica termoarcilla (e = 24 cm) Enfoscado interior (e = 2 cm)	97,15 €/m²	D2
TIPO 6		Enfoscado (e = 1,5 cm) Bloque termoarcilla (e = 14 cm) Poliestireno extruído (e = 8 cm) Bloque termoarcilla (e = 14 cm) Enfoscado (e = 1,5 cm)	98,21 €/m²	D2
TIPO 7		Revestimiento tirolesa acrílica Bloque termoarcilla (e = 14 cm) Espuma poliestireno expandido (e = 8 cm) Bloque termoarcilla (e = 24 cm) Enfoscado (e = 1,5 cm)	109,89 €/m²	D2
TIPO 8		1/2 Ladrillo HD (e = 60 cm) Cámara de aire Poliestireno extrusionado (e = 5 cm) Bloque termoarcilla (e = 14 cm) Enfoscado (e = 1,5 cm)	113,48 €/m²	D2
TIPO 9		Enfoscado (e = 1,5 cm) Fábrica ladrillo hueco (e = 14 cm) Aislante poliestireno (e = 4 cm) Bloque de hormigón (e = 20 cm) Alicatado de Gres	223,95 €/m²	D3

Figura 1. Soluciones constructivas tipo de la fachada de las salas de crianza aéreas para vino tinto.

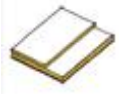
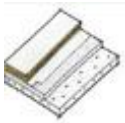
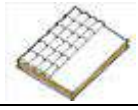
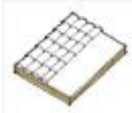
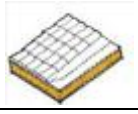
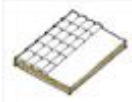
	SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS PARA CUBIERTAS		COSTE	ZONA CLIMÁTICA (CTE)
TIPO 1		Tablero Aislamiento poliestireno expandido	30,80 €/m²	D2
TIPO 2		Hormigón celular de espesor medio de 5 cm Geotextil Membrana impermeabilizante de PVC Poliestireno	38,96 €/m²	D2
TIPO 3		Aislamiento poliestireno Panel chapa	52,73 €/m²	D2
TIPO 4		Panel sándwich + EPS (Poliestireno Expandido) + doble tapa de madera Teja cerámica	77,97€/m²	D2
TIPO 5	(Forjado sobre nave de crianza)	Placa alveolar prefabricada de hormigón pretensada	79,51 €/m²	D2
TIPO 6		Aislante poliestireno (e= 4 cm) Tablero Aislante poliestireno (e= 4 cm) Capa de compresión Teja cerámica	85,01 €/m²	D2
TIPO 7		Tablero cubierta Aislamiento poliestireno extruído Tablero cubierta	93,32 €/m²	D2
TIPO 8		Panel sándwich h+corcho80+friso madera Teja cerámica	119,97 €/m²	D2
TIPO 9		Panel sándwich (e = 10 cm) Lámina impermeabilizante Teja mixta	129,84 €/m²	D2
TIPO 10		Panel sándwich h+ poliestireno extruído +friso madera Teja cerámica	152,06 €/m²	D3

Figura 2. Soluciones constructivas tipo de la cubierta de las salas de crianza aéreas para vino tinto.

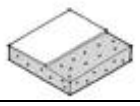
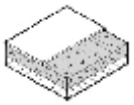
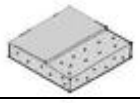
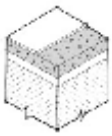
SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS PARA SOLERAS			COSTE	ZONA CLIMÁTICA (CTE)
TIPO 1		Hormigón armado (e = 15 cm) Pavimento epoxi	36,09 €/m²	D3
TIPO 2		Zahorra (e = 15 cm) Hormigón armado (e = 15 cm) Pavimento epoxi	39,39 €/m²	D2
TIPO 3		Zahorra (e = 15 cm) Encachado (e= 20 cm) Hormigón armado (e= 15 cm) Pavimento epoxi	40,74 €/m²	D2
TIPO 4		Hormigón armado (e = 15 cm) Revestimiento multicapa	48,83 €/m²	D2
TIPO 5		Zahorra (e= 1,2 m) Encachado (e= 15 cm) Hormigón armado (e= 18 cm) Pavimento epoxi	56,27 €/m²	D2
TIPO 6		Capa de grava (e = 15 cm) Capa impermeabilización (e = 0,25 cm) Hormigón armado (e = 20 cm) Sub-base de pavimento todo en 1 (e=15 cm)	63,95 €/m²	D2
TIPO 7		Zahorra + Bolos (e = 1,5) Geotextil Hormigón armado (e = 20 cm) Pavimento epoxi	103,63 €/m²	D2

Figura 3. Soluciones constructivas tipo de la solera de las salas de crianza aéreas para vino tinto.

4. Conclusiones

El coste medio obtenido para la envolvente de las salas de crianza es de 241 €/m², conformado por un coste medio obtenido para las fachadas es de 104 €/m², de 86 €/m² para cubiertas y de 51 €/m² para la solera.

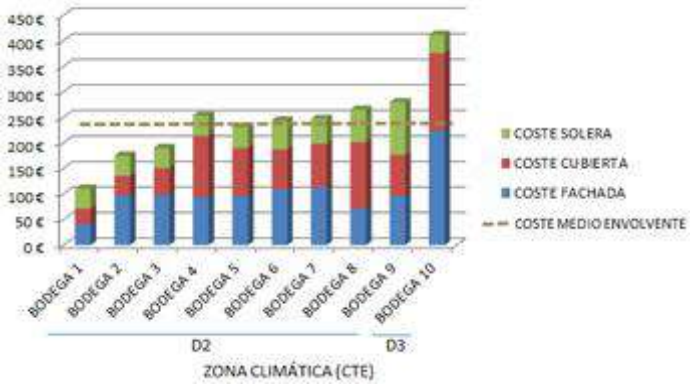


Figura 4. Coste soluciones constructivas de las bodegas aéreas estudiadas

La bodega 10, ubicada en la zona climática D3, presenta un coste constructivo mucho más alto de fachada que la media de las fachadas en la zona climática D2. Si se elimina esta bodega se obtiene, para la zona climática D2 un coste medio para la envolvente de las salas de crianza es de 222 €/m², conformado por un coste medio obtenido para las fachadas es de 91 €/m², de 78 €/m² para cubiertas y de 52 €/m² para la solera.

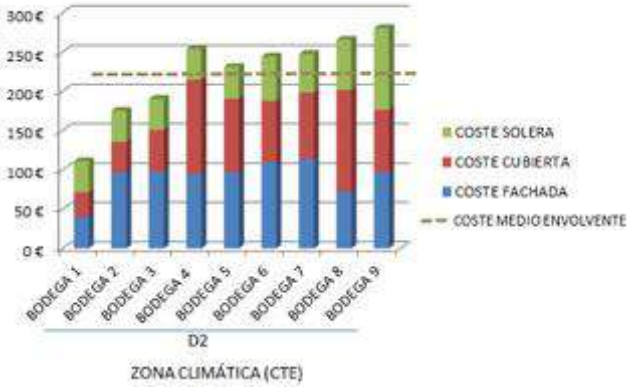


Figura 5. Coste soluciones constructivas de las bodegas aéreas estudiadas en la zona climática D2

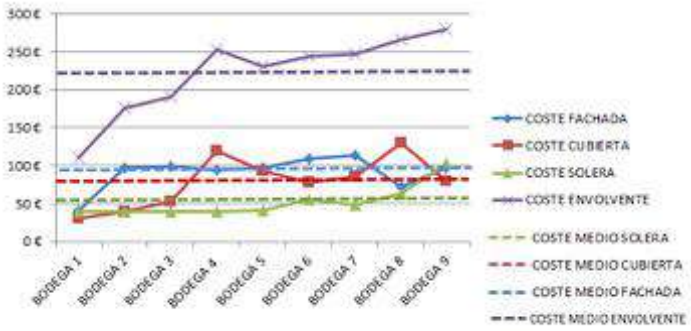


Figura 6. Coste soluciones constructivas de solera, cubierta y fachada y envolvente de bodegas aéreas en la zona climática D2

Centrándonos en la zona climática D2, de la cual es posible obtener conclusiones, el cerramiento tipo más usado es el formado por una hoja exterior y otra interior de fábrica de ladrillo o termoarcilla sobre las que va un enlucido o esfoscado y un elemento aislante de poliuretano o poliestireno entre ellas, con un coste aproximado de 95 €/m². Este precio incrementa o disminuye ligeramente en función del grosor del ladrillo y de la capa aislante.

En lo que respecta a las cubiertas el precio oscila en un amplio rango que va desde los 30 €/m² para una solución muy sencilla de tablero y aislante de poliestireno hasta la más cara y compleja formada por paneles sándwich, lámina impermeabilizante con recubrimiento de teja mixta con un coste de 129 €/m². La cubierta tipo estaría formada por panel tipo sándwich o tablero con un aislamiento ligero y rematadas con teja lo que supone un coste aproximado de unos 70 €/m².

Por último la solución más empleadas para el solado está formada por zahorra, hormigón armado y pavimento epoxi con un costo aproximado de 39 €/m². El precio se incrementa en función del tipo de capa impermeabilizante que se incluya.

Para asegurar un óptimo periodo de crianza, las condiciones de temperatura y humedad deben permanecer lo más estables posible durante todo el proceso. Actualmente las condiciones constructivas en las salas de crianza aéreas no permiten alcanzar las condiciones higrotérmicas necesarias, siendo necesario incluir la climatización en todas ellas. Un diseño más eficiente en la construcción permitiría minimizar las necesidades de climatización de las salas.

El edificio, respondiendo a las críticas condiciones espaciales y ambientales óptimas para la elaboración del vino, debe presentar soluciones que minimicen el consumo de la energía necesaria para mantener dichas condiciones. El ahorro energético es no sólo importante, sino que debe ser consustancial al diseño.

5. Agradecimientos

Este estudio se realizó como parte del proyecto de investigación BIA2014-54291-R, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España.

Referencias

1. S. Martin, I. Canas, A comparison between underground wine cellars and aboveground storage for the aging of Spanish wines, Transactions of the ASABE 49 (2006) 1471e1478.
2. S.M. Ocana, I.C. Guerrero, Comparison of analytical and on site temperature results on Spanish traditional wine cellars, Applied Thermal Engineering 26 (2006) 700e708.
3. O. Clarke, New Encyclopedia of Wine. Houghton Mifflin Harcourt, Hong Kong, 1999.
4. C. Pérez, J.L. Gervás, Manual práctico de la vida autosuficiente. Elaboración artesanal del vino. Blume, Barcelona, 1998.
5. Marescalchi C. Manuale dell'enologo (Winemaking Manual). Fratelli Marescalchi, Casale Monferrato (1965)
6. Vogt E. Fabricacion de vinos (Winemaking). Editorial Acribia, Zaragoza (1971)
7. I. Canas, F.R. Mazarron, The effect of traditional wind vents called zarceras on the hygrothermal behaviour of underground wine cellars in Spain, Building and Environment 44 (2009) 1818e1826.
8. F.R. Mazarron, I. Canas, Exponential sinusoidal model for predicting temperature inside underground wine cellars from a Spanish region, Energy and Buildings 40 (2008) 1931e1940.
9. S.M. Ocana, I.C. Guerrero, Comparison of hygro-thermal conditions in underground wine cellars from a Spanish area, Building and Environment 40 (2005) 1384e1394.
10. I.C. Guerrero, S.M. Ocana, Study of the thermal behaviour of traditional wine cellars: the case of the area of "Tierras Sorianas del Cid" (Spain), Renewable Energy 30 (2005) 43e55.
11. F.R. Mazarron, I. Canas, Seasonal analysis of the thermal behaviour of traditional underground wine cellars in Spain, Renewable Energy 34 (2009) 2484e2492.

12. Torreggiani, D., Benni, S., Corzani, V., Tassinari, P., & Galassi, S. (2011). A meta-design approach to agroindustrial buildings: A case study for typical Italian wine productions. *Land Use Policy*, 28(1), 11–18. http://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2010.04.001
13. del Río, M. D. (2016*). La tecnología de elaboración de vino como factor determinante del diseño constructivo de las bodegas* (Doctoral dissertation, Universidad de La Rioja).
14. Porras Amores, Cesar. *Las construcciones subterráneas para bodegas, un modelo de ahorro de energía mediante los sistemas constructivos. Estudio de las condiciones higrotérmicas, ventilación y modelos de simulación.* PhD Dissertation. ETSIAAB UPM, 2014.
15. O'Brien, Rory. "An overview of the methodological approach of action research." (1998).
16. Mazarrón, F. R., López-Ocón, E., Garcimartín, M. A., & Cañas, I. (2013). Assessment of basement constructions in the winery industry. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 200-206.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Análisis resistente de viales de jabre estabilizados con los cementos: CEM II B-L 32,5N y CEM II A-V 42.5N

C. Gilarranz[1], S. Laserna[2], J. Montero[3]

[1] Universidad Politécnica de Madrid; carlosandres.gilarranz@upm.es
[2] Autónomo; santiago.laserna@agroes.es
[3] Universidad de Castilla-La Mancha; jesus.montero@uclm.es

Resumen: En el presente trabajo se pretende hacer una comparativa de las propiedades resistentes de un mismo suelo de jabre estabilizado con 2 tipos de cemento; CEM II B-L 32,5N y CEM II A-V 42.5N, analizando la influencia de la dosificación del cemento y el tiempo de curado sobre la resistencia del suelo a compresión, y establecer unas recomendaciones técnicas de su utilización que cumplan las indicaciones del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. Esto se realizará analizando la influencia de la dosificación del cemento (de 0 a 10%) y el tiempo de curado (2, 7 y 21 días) sobre la resistencia del suelo a compresión, así como comparar resultados con los estudios previos realizados con ambos tipos de cemento.

Palabras clave: caminos, geotecnia, mecánica de suelos

1. Introducción

El jabre se presenta en yacimientos sedimentarios como depósito de fragmentos de una roca granítica que se ha desagregado por la acción de los agentes atmosféricos (meteorización) y descomposición, que han permanecido in situ o muy próximos a la roca madre. Posee un ángulo de rozamiento en torno a 28-32º.

Dependiendo de ese nivel de descomposición, desde el punto de vista granulométrico, este material se puede agrupar en tres categorías: jabre de arena gruesa, jabre de arena fina y jabre arcilloso.

La principal característica debida a su composición granítica es la ausencia de barro una vez mojado. Esto lo convierte en un material que tiene muchas ventajas en comparación con otros, pues tiene bajo coste, alta rapidez en la ejecución y bajo coste de mantenimiento. Es un material que tradicionalmente ya se utilizaba en tiempos de los romanos en sus calzadas [1] y que desde pocos años a acá se ha reimpulsado su uso, como en la rehabilitación de caminos del Parque del Oeste en Madrid o en varios caminos en la urbanización La Moraleja en Madrid[2].

2. Materiales

Cemento, jabre y agua

Los materiales utilizados en la presente experimentación fueron cemento, jabre y agua.

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. Dosificado y mezclado apropiadamente con agua y áridos produce un hormigón o

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3399

mortero que conserva su trabajabilidad durante un tiempo suficiente alcanzando unos niveles de resistencias preestablecido y presentando una estabilidad a largo plazo.

Uno de los cementos Portland es el CEM II B-L 32.5N, con la denominación Cemento portland con caliza, y con los siguientes componentes[3]: Clínker (65-79%), Caliza (21-35%) y componentes minoritarios (0-5%). La elección de este tipo de cemento se hizo por llevar un alto porcentaje de caliza ya que ésta participa activamente en el proceso de la hidratación, favoreciendo este proceso, así como también hacer de filler calizo.

El otro cemento Portland es el CEM II A-V 42.5N, con la denominación Cemento portland con cenizas volantes, y con los siguientes componentes[3]: Clínker 85%, Cenizas volantes 10% y componentes minoritarios 5% que en su mayoría son reguladores del fraguado como es el yeso 3%. La elección de este tipo de cemento se hizo por llevar un alto porcentaje de cenizas volantes ya que éstas mejoran la trabajabilidad y proporcionan menor calor de hidratación lo que hace que haya una menor retracción y fisuración al disminuir la velocidad global de hidratación y por lo tanto enlentecer el fraguado, siendo los cementos puzolánicos recomendados para firmes de carreteras, según enunciaba ya [4].

El agua a emplear, tanto para el amasado como para el curado del hormigón en obra, no debe contener ningún ingrediente en cantidades tales que afecte negativamente a las propiedades del mortero u hormigón. Considerándose que las aguas potables son aptas para el uso en adición con cemento.

Así el agua debe cumplir los siguientes requisitos mínimos:

- Exponente de hidrógeno. PH > 5.
- Sustancias disueltas < 15 gramos por litro (15.000 p.p.m.).
- Sulfatos, expresados en SO4, máximo de 1 gramo por litro (1.000 p.pm.).
- Hidratos de carbono, deben ausentarse.
- Sustancias orgánicas disueltas en éter < de 15 gramos por litro (15.000 p.p.m.).

En este ensayo se ha utilizado agua corriente proporcionada por el Canal de Isabel II, que proviene en mayoría de los embalses localizados en la zona norte de la Comunidad de Madrid. Éste agua es utilizada habitualmente como agua potable, por lo que cumple con las necesidades expuestas en el PG-3.

La composición mineralógica del jabre está formada por arenas de cuarzos granulares (pseudoesféricos), feldespatos (ortosa), turmalinas, biotitas, etc., unidas por partículas arcillosas (caolinita). Se encuentra en las zonas meteorizadas de los grandes batolitos graníticos próximos a la calzada romana, de donde se extrae con facilidad mediante medios mecánicos rudimentarios dada su escaso grado de compactación[5].

Ya por úlimo, este material, el jabre, según el artículo 513 del Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, cumple con las características previas que deberían cumplir los suelos para que al estabilizarlos con cemento resultase un material con características técnicas adecuadas y económicamente admisible[6].

<u>Probetas y aparataje</u>

Las probetas se realizan con un molde cilíndrico de metal de 102mm +/- 0,4mm de diámetro interior y 122,4mm +/- 0,1mm de altura, equivalente a un volumen de 1000 cm^3 y debe disponer de un collar con el mismo diámetro y una altura aproximada de 60 mm, para colocarlo en la parte superior del molde en el momento del apisonado.

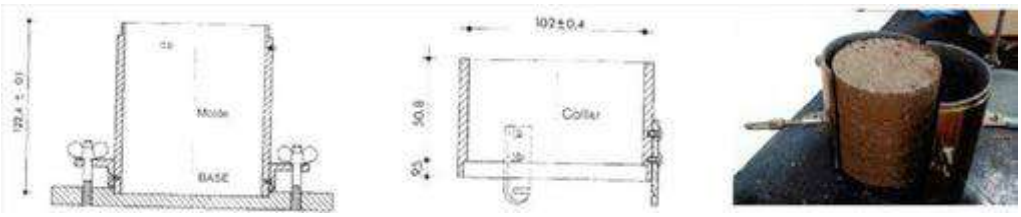


Figura 1. Molde y probeta

Para la fabricación de estas probetas y poder realizarse el ensayo Proctor Normal fue necesaria la compactadora que tiene una maza metálica de 2,5kg +/- 0,01kg, adaptada al interior de una guía tubular adecuada para que a altura de caída libre sea de 305mm +/- 2mm. La maza puede ser manual, aunque se utilizó compactadora automática que distribuye los golpes de manera uniforme sobre la superficie del material. El procedimiento de fabricación de esta era el de llenar el molde con el collar superior colocado mediante la porción de jabre-cemento mezclada con agua, repartida en tres capas aproximadamente iguales, de forma que cada capa después de ser compactada, quedara con una altura superior a un tercio de la altura del molde. La compactación de cada una de estas capas se realiza por medio de 26 golpes de maza distribuidos uniformemente. Con este procedimiento se normaliza la energía de compactación de 0,583 J/cm^3 que se le ha imprimido a cada probeta.



Figura 2. Compactadora

Para la rotura de estas probetas se utilizó la prensa multiensayo. La probeta se coloca entre los cabezales de la prensa, se acciona el sistema y a continuación el dispositivo avanza lo estrictamente necesario para que el cabezal y la probeta entren en contacto. Una vez conseguido este acoplamiento se inicia el proceso de carga de la probeta de tal forma que el tiempo final de rotura esté comprendido entre 1 y 10 minutos. Una vez conseguido esto, se observan las cargas y deformaciones cada 30 segundos hasta que el valor de la carga comience a disminuir, dicho valor es anotado ya que coincide con la carga máxima soportable de la probeta o lo que se conoce como carga de rotura.



Figura 3. Rotura en prensa multiensayo

3. Métodos

La metodología empleada ha sido la Norma UNE para los ensayos, tanto al jabre como a la mezcla.

3.1. Metodología de ensayos realizados al jabre.

- Granulometría por tamizado, según norma [7].
- Determinación del Límite Pástico [8].
- Determinación del Límite Líquido [9].
- Ensayo de Compactación. Proctor Normal [10].

Siguiendo esta metodología se ha pretendido caracterizar este material base de este tipo de estabilizaciones, justificando su idoneidad para ser estabilizado con cemento.

3.2. Metodología de ensayos realizados a la mezcla jabre-cemento

- Mezclas de áridos sin ligante y con conglomerante hidráulico. Parte 41: método de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión de las mezclas de áridos con conglomerante hidráulico [11].

Una vez determinada la curva humedad-densidad, se determinó la humedad óptima que proporcionaba la máxima densidad y ya con este valor se determinaron tres ensayos bien diferenciados, correspondiendo estos a los días de curado de las probetas (2, 7 y 21 días) a la mezcla de jabre estabilizado con cemento. Se analizó también como variable el contenido en cemento (%CEM), del 0-1,5-2,5-3,5-4,5-5,5-6,5-7,5-8,5-10%, con tres repeticiones por muestra y poder así tratar estadísticamente los datos obtenidos por medio de un análisis de la varianza ANOVA.

Tanto para el jabre como para la mezcla, las determinaciones obtenidas aparecen detalladas en el epígrafe resultados.

4. Resultados

4.1. Curva granulométrica del Jabre

Las características granulométricas de este material se han analizado en laboratorio mediante tamizado, siguiendo la norma UNE 103 101:95 (1995) con tamices UNE-EN 933-2 desprendiendo los valores que se expresan en la figura 1.

Con estos resultados obtenidos a partir de la curva granulométrica del material, no se podría estabilizar con cal este tipo de material en los suelos EST1 y EST2, puesto que no cumple el requisito de la tabla 512.1.a [12] que el porcentaje que pasa por el tamiz 0,063mm debe de ser superior o igual al 15% y en nuestro caso es significativamente inferior.

Para el caso de cumplir con la tabla 512.1.b de la misma orden ministerial, en este caso cumple todos los requisitos para poderse estabilizar con cemento, pudiendo ser S-EST1, S-EST2 y S-EST3.

Ahora bien, si nos vamos a la tabla 512.3.a, podemos descartar los S-EST1 y S-EST2 puesto que el índice plástico del jabre es muy bajo, no superando el 2%.

Ya por último, observando la tabla 512.3.b sólo cabe clasificar este material como S-EST-3.

En este material existen fracciones de todos los tamaños comprendidos entre el más pequeño y el mayor del mismo, es decir, con una "granulometría continua".

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, este material granular es óptimo para estabilizarse con el cemento y por esto se eligió el cemento como conglomerante.

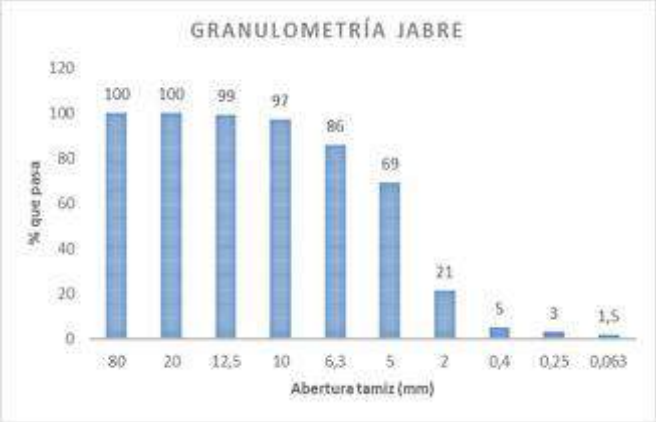


Figura 4: Curva granulométrica del jabre

4.2. Plasticidad

Para el límite líquido se utilizó el aparato de Casagrande. Se ensayó con diferentes humedades, siendo la más baja 20% y la más alta 27%, sin embargo, hasta el rango de humedades comprendidas entre 21 y 24 % ningún resultado daba un número de golpes comprendido entre 10 y 40. Siendo el resultado del ensayo de 16 golpes para una humedad de 23% y de 35 golpes para una humedad del 21%. Por lo tanto, el valor del límite líquido del jabre es de 22%.

Los resultados del ensayo del Límite Plástico del jabre resultaron un valor de promedio de 24%, por tanto, el Índice de Plasticidad (IP=LL-LP) es prácticamente nulo, asemejándose este material en cuanto a comportamiento a las arenas, debido a la muy poca proporción de finos. Esta es una propiedad muy positiva para el jabre, puesto que no presentará cambios significativos de plasticidad en presencia de agua, siendo suelos más estables y permeables.

4.3. Ensayo de Compactación Proctor Normal

Con el ensayo Proctor Normal se determinó la curva de humedad óptima-densidad máxima del jabre. En este ensayo se realizaron un total de 15 probetas compactándolas con unos porcentajes de agua a priori predefinidos, que, una vez realizado y visto su contenido de agua final, se calculó su densidad. Todos estos datos se llevaron al programa statgraphics y se obtuvo la parábola de regresión que mejor ajuste presentaba, de tal forma que una vez conocida ésta, se derivó su función y se sacó su máximo relativo, valor éste que relaciona su porcentaje de humedad óptima con su máxima densidad seca (figura 2).

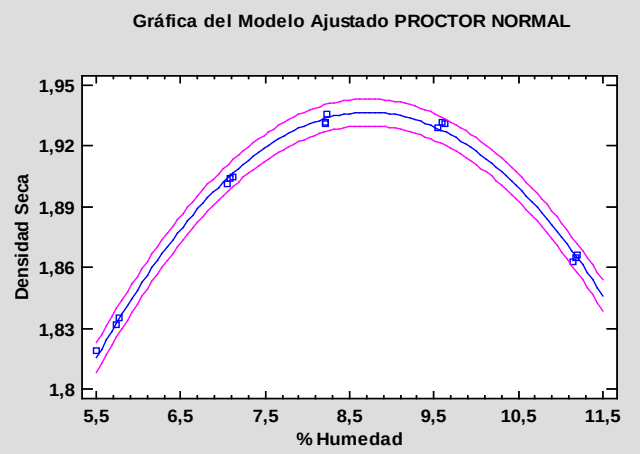


Figura 5. Modelo ajustado de Proctor Normal al jabre

Para el Proctor Normal, la parábola que explica la relación entre los datos observados y los predichos tiene una correlación R^2 del 99,5%. Al darnos un p-valor de 0,000 < 0,05, se puede inferir estadísticamente que la siguiente parábola explica la realidad con un nivel de confianza de al menos el 95%:

$$\mathbf{Dseca = 1{,}04783 + 0{,}203842 \cdot H - 0{,}0116878 \cdot H^2}$$

La máxima densidad obtenida fue de 1,93 kg/dm3 para una humedad óptima del 8,7%.

Basándonos en los estudios de [13] y de [14], un adición de cemento induce a una ligera bajada de la densidad seca y a un aumento del agua óptima comparándolo con si realizamos el mismo proceso pero sin conglomerante. Esto es debido a la hidratación que debe de tener el cemento que le hemos añadido. Esto es importante tenerlo en cuenta ya que se incrementarían ligeramente los valores de resistencia al añadir a nuestro estudio ese porcentaje de agua de hidratación.

De la misma forma y tal y como nos indica [15] si se incrementase el contenido en arcilla de este material por sobre-descomposición del granito formándose caolín (silicato de aluminio hidratado) el contenido en cemento debe aumentarse, ya que como indica el mismo autor y lo corrobora [16] en su libro, obras en tierra, la adición de cemento reduciría el efecto no deseado de aumento de la plasticidad así como atenuar la expansión de la arcilla, consiguiendo con la adición de cemento, reducir el índice plástico de la mezcla, de tal forma que habría que añadir más cantidad de cemento, por cuanta más cantidad contenga de arcilla.

4.4. Resistencia a compresión del jabre estabilizado con cemento

4.4.1. Análisis ANOVA de las muestras

El jabre, una vez caracterizadas sus propiedades geotécnicas de granulometría, plasticidad y compactación, se mezcló con el cemento, y con el porcentaje de humedad óptimo que proporciona la máxima densidad, obtenido anteriormente (figura 3).

Tras realizar los ensayos de compresión (según UNE-EN 13286-41, 2003), se ha realizado un análisis multifactorial ANOVA que nos liga y discrimina la resistencia a compresión simple (N/cm2) con los porcentajes de cemento utilizados (0-1,5-2,5-3,5-4,5-5,5-6,5-7,5-8,5 y 10%) a los distintos días a rotura (2, 7 y 21 días) con 3 repeticiones por cada ensayo.

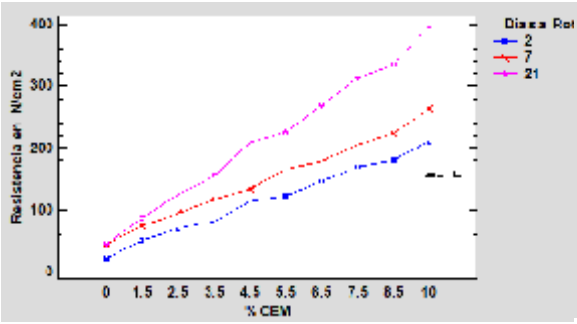


Figura 6. Resultados de la resistencia del jabre- CEM II B-L 32,5N

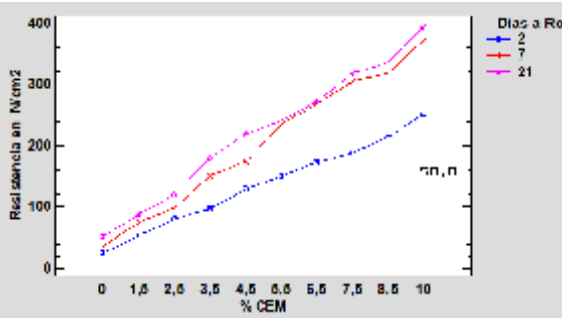


Figura 7. Resultados de la resistencia del jabre-CEM II A-V 42,5N

En la figura 3 se observan dos cosas básicamente: que las curvas a 2 y 7 días son prácticamente paralelas, y que la curva a 21 días de rotura tiene una pendiente mayor que las otras, alcanzando resistencias más altas a la misma concentración de cemento usada en la mezcla.

A simple vista en la figura 4 se observan dos cosas básicamente, la primera es que hay pocas diferencias entre la curva 7 y 21 días de rotura y la segunda, que la curva a dos días de rotura tiene, como cabía de esperar, menores resistencias.

En ambas figuras 3 y 4, la resistencia se ha tomado como referencia el valor de 150 N/cm2, ya que el PG-3, así como su Orden FOM/2523/2014 (2014) nos define que la resistencia mínima a compresión simple en suelos estabilizados in situ ha de ser de 1,5 MPa (150 N/cm2).

Se ha realizado un análisis estadístico ANOVA, introduciendo como variable dependiente la resistencia y como factores el %CEM y días a rotura.

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de Resistencia en contribuciones debidas a los dos factores (%CEM y días a rotura). La contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que los 3 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Resistencia con un 95,0% de nivel de confianza, comprobándose que se cumple la homocedasticidad de los errores y que el ruido no es significativo.

A continuación se han analizado estas rectas de regresión, realizando un análisis estadístico de regresión lineal con análisis de la varianza. En todos los casos, la variable dependiente es la Resistencia (R, en N/cm2) y la variable independiente el porcentaje de cemento (%CEM).

4.4.2. Análisis REGRESIÓN LINEAL de las muestras

Regresión Lineal para un curado de 2 días

Variable dependiente: Resistencia y variable independiente: %CEM

Jabre- CEM II B-L 32,5N	**Jabre-CEM II A-V 42,5N**
R = 22,5849 + 19,1043·%CEM	R = 22,9746 + 22,7344·%CEM

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 99,7239% de la variabilidad en Resistencia (N/cm2) para el caso del CEM II A-V 42,5N y del 99,0692% para el CEM II B-L 32,5N. El coeficiente de correlación es superior al 99% en ambas muestras, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables.

Comparación de ambas muestras:

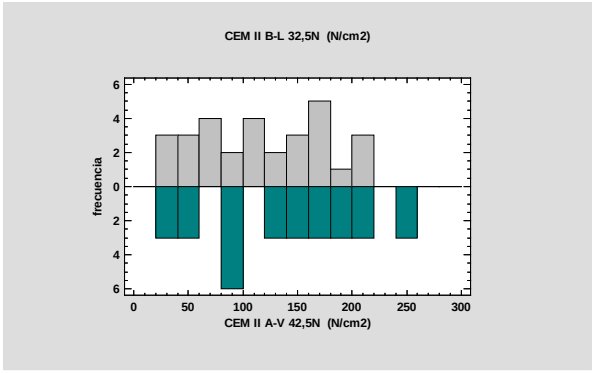


Figura 8. Histograma para el curado 2 días.

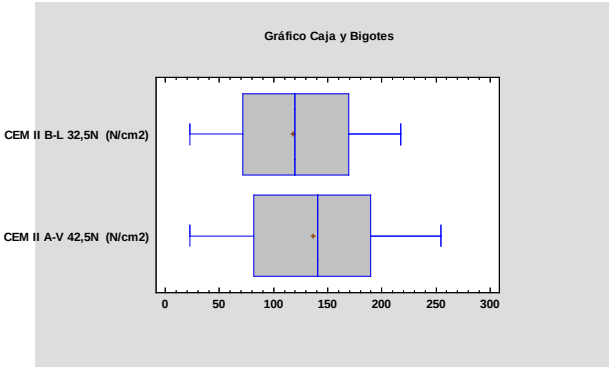


Figura 9. Gráfico de caja y bigotes para el curado 2 días

Realizando un estudio estadístico comparativo de ambas muestras de Prueba t para comparar medias

Hipótesis nula: media1 = media2 suponiendo varianzas iguales:
t = -1,10542 valor-P = 0,27354

Hipótesis Alt.: media1 <> media2

No se rechaza la hipótesis nula para un nivel de significación de 5%.

En este caso, la prueba se ha construido para determinar si las medias son iguales versus la hipótesis alternativa de que son diferentes. Puesto que el valor-P calculado es mayor del 27% podemos afirmar con un 5% de significancia que no se puede rechazar la hipótesis nula, resultando que las medias son parecidas o mejor dicho, no son distintas. No hay diferencia significativa entre las medias de las dos muestras de datos, con un nivel de confianza del 95,0%.

Realizando el estudio estadístico Prueba-F comparativo de ambas muestras para comparar desviaciones típicas.

Hipótesis Nula: sigma1 = sigma2 F = 0,710816 valor-P = 0,363338
Hipótesis Alt.: sigma1 <> sigma2

No se rechaza la hipótesis nula para un nivel de significación de 5%.

En este caso, la prueba se ha construido para determinar si las desviaciones típicas son iguales versus la hipótesis alternativa de que son diferentes. Puesto que el valor-P calculado es mayor del 36% podemos afirmar con un 5% de significanciaq que no se puede rechazar la hipótesis nula, resultando que las desviaciones típicas son parecidas o mejor dicho, tenemos que aceptar que las dispersiones son iguales.

Regresión Lineal para un curado de 7 días

Variable dependiente: Resistencia y variable independiente: %CEM

Jabre-CEM II A-V 42,5N **Jabre- CEM II B-L 32,5N**
R = 26,3428 + 35,4181·%CEM R = 40,3604 + 22,2239·%CEM

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 98,9591% de la variabilidad en Resistencia (N/cm2) para el caso del CEM II A-V 42,5N y del 99,3509% para el CEM II B-L 32,5N. El coeficiente de correlación está entorno al 99% en ambas muestras, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables.

Comparación de ambas muestras:

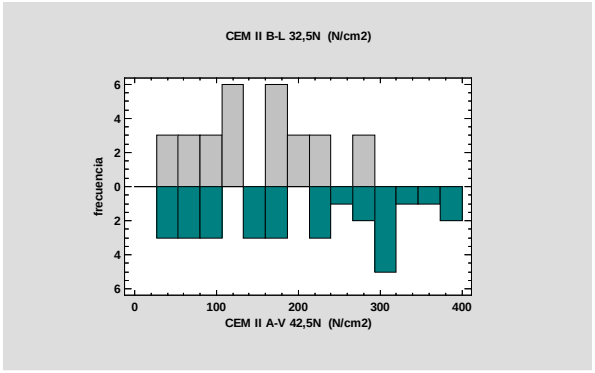


Figura 10. Histograma para el curado 7 días.

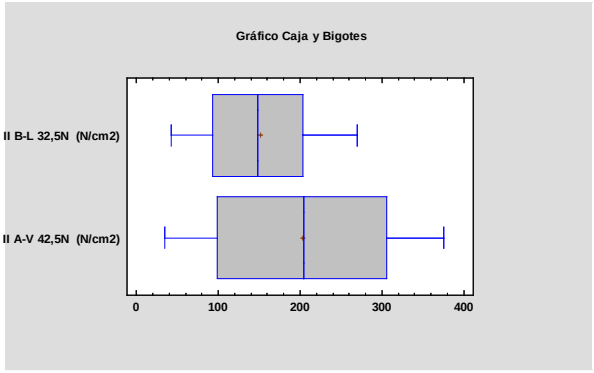


Figura 11. Gráfico de caja y bigotes para el curado 7 días

Realizando un estudio estadístico comparativo de ambas muestras de Prueba t para comparar medias.

Hipótesis nula: media1 = media2 suponiendo varianzas iguales:
t = -2,19571 valor-P = 0,0321265
Hipótesis Alt.: media1 <> media2

Se rechaza la hipótesis nula para un nivel de significación de 5%.

En este caso, la prueba se ha construido para determinar si las medias son iguales versus la hipótesis alternativa de que son diferentes. Puesto que el valor-P calculado es del 3,2%, y por lo

tanto inferior al 5%, podemos afirmar con un 5% de significancia que sí se puede rechazar la hipótesis nula, aceptando la alternativa, resultando que las medias son distintas.

Realizando el estudio estadístico Prueba-F comparativo de ambas muestras para comparar desviaciones típicas.

Hipótesis Nula: sigma1 = sigma2 F = 0,39217 valor-P = 0,014062
Hipótesis Alt.: sigma1 <> sigma2

Se rechaza la hipótesis nula para un nivel de significación de 5%.

En este caso, la prueba se ha construido para determinar si las desviaciones típicas son iguales versus la hipótesis alternativa de que son diferentes. Puesto que el valor-P calculado es del 1,4%, y por lo tanto inferior al 5%, podemos afirmar con un 5% de significancia que sí se puede rechazar la hipótesis nula, resultando que las medias son distintas y por tanto, las dispersiones no son iguales.

Regresión Lineal para un curado de 21 días

Variable dependiente: Resistencia y variable independiente: %CEM

Jabre-CEM II A-V 42,5N **Jabre- CEM II B-L 32,5N**

R = 46,9618 + 34,985·%CEM R = 39,8316 + 35,5063·%CEM

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 99,1698% de la variabilidad en Resistencia (N/cm2) para el caso del CEM II A-V 42,5N y del 99,5534% para el CEM II B-L 32,5N. El coeficiente de correlación es superior al 99% en ambas muestras, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables.

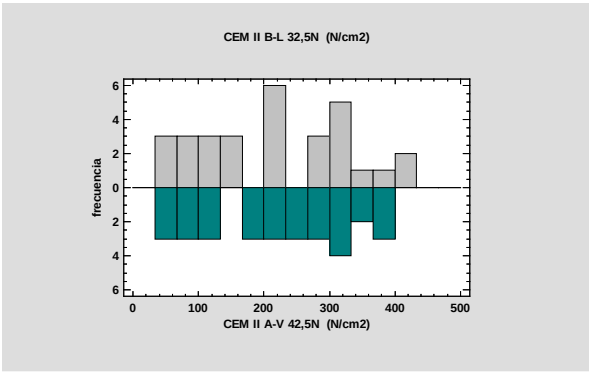


Figura 12. Histograma para el curado 21 días.

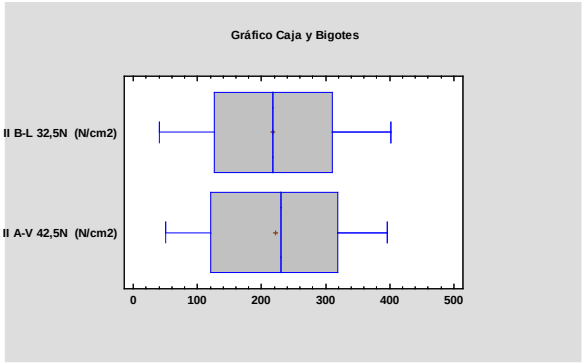


Figura 13. Gráfico de caja y bigotes para el curado 21 días

Realizando un estudio estadístico comparativo de ambas muestras de Prueba t para comparar medias

Hipótesis nula: media1 = media2 suponiendo varianzas iguales:
Hipótesis Alt.: media1 <> media2 t = -0,1606 valor-P = 0,872966

No se rechaza la hipótesis nula para un nivel de significación de 5%.

En este caso, la prueba se ha construido para determinar si las medias son iguales versus la hipótesis alternativa de que son diferentes. Puesto que el valor-P calculado es mayor del 87% podemos afirmar a un 5% de significancia que no se puede rechazar la hipótesis nula, resultando que las medias son parecidas o mejor dicho, no son distintas. No hay diferencia significativa entre las medias de las dos muestras de datos, con un nivel de confianza del 95,0%.

Realizando el estudio estadístico Prueba-F comparativo de ambas muestras para comparar desviaciones típicas.

Hipótesis Nula: sigma1 = sigma2 F = 1,02606 valor-P = 0,945251
Hipótesis Alt.: sigma1 <> sigma2

No se rechaza la hipótesis nula para un nivel de significación de 5%.

En este caso, la prueba se ha construido para determinar si las desviaciones típicas son iguales versus la hipótesis alternativa de que son diferentes. Puesto que el valor-P calculado es mayor del 94% podemos afirmar a un 5% de significancia que no se puede rechazar la hipótesis nula, resultando que las desviaciones típicas son parecidas o mejor dicho, tenemos que aceptar que las dispersiones son iguales.

4.4.3. Resistencia a compresión y normativa.

De acuerdo con el mínimo requerido de resistencia en los suelos estabilizados insitu, según el PG-3 así como su Orden [17] que nos define que esa resistencia mínima a compresión simple ha de ser de 1,5 MPa (150 N/cm2), y considerando el modelo estadístico con sus rectas de regresión e igualando este valor sobre las rectas de regresión, se determina que aplicando un Proctor Normal del 100% a una humedad del 8,7% (valor óptimo humedad/densidad), se alcanza una resistencia mínima de 1,5 MPa con una concentración mínima en función de cada tipo de cemento de:

Para el CEM II B-L 32,5N se necesitaría un mínimo de concentración de cemento del 3,5% dejando un tiempo de fraguado de 21 días, aunque si se quiere disminuir el tiempo, la concentración de cemento aumenta hasta el 5%.

Para el CEM II A-V 42,5N con este valor mínimo del 3,5 % de cemento se alcanza de manera muy similar esta resistencia de referencia tanto a los 21 días de fraguado como a los 7. En parte, este comportamiento se puede explicar debido a que este cemento tiene más resistencia y por lo tanto se alcanzaría esa resistencia mínima antes en comparación con el anterior cemento.

Conclusión parecida es a la que llega[18]. en el caso de una estabilización de un suelo de filitas estabilizado con cemento V-A 32,5 N/mm2, indicando que es conveniente incorporar un 5% de cemento para mejorar la resistencia a punzonamiento del suelo y por ende la resistencia de este, registrándose con esta proporción un incremento de la resistencia a compresión uniaxial y reduciéndose la permeabilidad y así poder con los requisitos mínimos del PG-3. También, en este estudio se descarta la estabilización con cal, por aumentar la permeabilidad.

5. Conclusiones

Se concluye que el jabre es un material granular con unas buenas propiedades de granulometría, plasticidad y compactación. Mezclado con cemento CEM II B-L 32,5N, se ha comprobado la influencia significativa del % de cemento en la mezcla y del tiempo de curado.

Del estudio estadístico comparativo de medias y desviaciones típicas se desprende, a tenor de su p-Valor, que la que más correlación tiene entre sus muestras es la serie de rotura **a 21 días**, siendo sus **rectas de regresión muy similares. A pesar de ser cementos con resistencias distintas**, la conclusión que se puede extractar es que se puede utilizar un cemento más económico como es el CEM II B-L 32,5N, obteniéndose resultados similares en cuanto a resistencia se refiere al dejar pasar 21 días de fraguado.

La última conclusión, casi es más una **recomendación de carácter práctico**, puesto que la resistencia mínima a compresión simple, según PG-3, debe de ser de 1,5 MPa (150 N/cm2), valores estos que se alcanzan en función de cada tipo de cemento con:

CEM II B-L 32,5N	**3,5% a los 21 días, y del 5% de cemento a los 7 días.** Valores inferiores al 5% de cemento para estos tiempos de curado harían inviable la obra por falta de resistencia.
CEM II A-V 42,5N	**3,5% a los 7 y 21 días.** Valores inferiores del 3,5% de CEM harían inviable la obra por falta de resistencia.

Referencias

1. Gallo, I.M., Vías romanas: ingeniería y técnica constructiva2004: Isaac Moreno Gallo.
2. Mejora en las aceras con arena de jabre, 2016: La Moraleja, Entidad urbanística de conservación.
3. RC-16, Instrucción para la recepción de cementos. Real Decreto 256/2016, de 10 de junio. Ministerio de la Presidencia, 2016.
4. Calleja, J., Cenizas, cementos y hormigones con cenizas. ETCC/CSlC Madrid, 1982.
5. Montes, J.G., Identificación de una carretera romana a través de la procedencia de los materiales. Elementos de Ingeniería Romana.Congreso Europeo Obras Públicas Romanas, 2004.
6. Pretel, G.B., PG-3 Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. Artículo 513, 2010: Ediciones Liteam SL.
7. UNE103101:95, Análisis granulométrico de suelo por tamizado. AENOR, 1995.
8. UNE103103:93, Determinación del Límite Líquido de un suelo. AENOR, 1993.
9. UNE103104:93, Determinación del Límite Líquido de un suelo. AENOR, 1993.
10. UNE103500:94, Geotécnia. Ensayo de compactación. Proctor Normal. AENOR, 1994.
11. UNE-EN13286-41, Mezclas de áridos sin ligante y con conglomerante hidráulico. Parte 41: Método de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión de las mezclas de áridos con conglomerante hidráulico. AENOR, 2003.
12. FOM/2523/2014, O.M., Artículo 512. Suelos estabilizados in-situ. 2014.
13. Kezdy, A., Stabilized earth road. Scientific Pub. Co, Amsterdam, 1979.
14. Miller, G.A., Azad, S., Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. Construction adn Building Materials 14,89-97, 2000.
15. Dal-Ré, R., Caminos rurales. Proyecto y construcción. Ediciones Mundi-Prensa, 1994.
16. Cuadra J., G.C., Obras en tierra. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Universitaria deIngeniería Técnica Agrícola, 2003.
17. FOM/2523/2014, B.d.e.d.O., Orden por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos., in Artículo 512.3 tipo y composición del sulo estabilizado2014.
18. Garzón E., C.M.e.a., Effect of cement and lime on phyllites raw materials from SE Spain. 17th International Congress on Proyect Management and Engineering, 2013. Universidad de Almería e Instituto de Ciencia de Materiales, CSIC-US.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Avaliação do comportamento térmico de pavilhões de produção de frangos em Moçambique

Milton Gussule[1], Fátima Baptista[1]

[1] Universidade de Évora, Escola de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Rural. ICAAM - Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, Núcleo da Mitra, Ap. 94, 7002-554 Évora, Portugal, d39583@alunos.uevora.pt , fb@uevora.pt

Resumo: Em Moçambique, localizado no Sudeste da África, a carne de frango representa a maior fonte proteica para a alimentação da população. No entanto, os sistemas de produção continuam a ser pouco eficientes e enfrentam dificuldades na adequação das construções às características climáticas. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho térmico dos pavilhões de produção de frango, tendo como estudos de caso a Província de Maputo. A avaliação teve em consideração as características dos elementos construtivos, dimensões médias dos aviários do pequeno e médio produtor, o número de frangos produzidos, as necessidades de ventilação e a influência do clima exterior no ambiente interior, na criação de frangos de 1ª semana e 4ª semana de idade. O balanço térmico considerou o calor sensível produzido pelos frangos, as trocas de calor sensível através da envolvente e da ventilação, representado pela equação simplificada. Verificou-se que a principal entrada de calor no interior dos aviários ocorre pela ventilação e pela alta incidência de radiação solar sobre a cobertura, alcançando temperaturas de 40 °C no verão. No período do inverno o dano é amenizado. Os resultados permitem concluir que existe necessidade de adequação das infraestruturas para atender às exigências de conforto dos frangos.

Palavras-chave: Província de Maputo, condicionamento ambiental, aviários de frangos, conforto térmico, stress térmico.

1. Introdução

A carne de frango é a mais consumida em todo o mundo e responde por 44% da carne consumida [1]. Em África, apesar do rápido crescimento na última década, o nível de consumo de carne per capita permanece baixo, em apenas 34% da média global [2]. Em Moçambique o consumo é mais baixo, aproximadamente de 2 kg/capita e comparado com outros países da região, como a África do Sul, com médias 20 vezes superiores [3]. Ainda assim, a carne de frango representa a maior fonte proteica. Esta importância acentua-se, pois, problemas sanitários associados com a produção de carne de vaca e de porco dificulta a sua produção em escala comercial, tornando a produção de frango como a mais viável [4]. O valor potencial do sector pecuário em Moçambique é substancial. No entanto, o desenvolvimento desta atividade, ainda enfrenta grandes desafios, dentre os quais, a tipologia dos alojamentos, sistemas de condicionamento ambiental e condições climáticas adversas [5]. Relativamente ao clima, na maioria das áreas do Leste e Sudeste de África (Moçambique incluído), a principal preocupação ambiental é tentar amenizar as altas temperaturas [6]. As perdas produtivas na avicultura, provenientes de climas com temperaturas diárias elevadas, são potencialmente de grande magnitude, pois abrangem perdas diretas e indiretas [7]. Exercem influência no consumo de

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.4230

ração, afetando diretamente o ganho de peso e a conversão alimentar [8]. Podem também comprometer a manutenção de sua homeotermia [9]. Sob stress térmico por calor são afetadas as funções fisiológicas e metabólicas, levando a situações extremas, assim ocasionando altas taxas de mortalidade [10].

O primeiro objetivo das construções é a modificação das características climáticas, de forma a criar as condições convenientes para a produção animal, possibilitando o aumento da produtividade [11]. O conforto térmico dentro das instalações está diretamente relacionado com o calor produzido pelos animais, ganhos pela radiação solar, o calor trocado através dos materiais de cobertura, paredes, piso ou cama e às trocas térmicas provocadas pela ventilação, natural ou artificial [12]. A temperatura da superfície das aves varia em função da temperatura do ar de cada ambiente reprodutivo [13]. A correlação da temperatura do ar ambiente com a temperatura superficial das aves foi documentada e é diretamente relacionada à temperatura da superfície da instalação, o que confirma, por sua vez, a importância do uso de materiais de construção com baixa condutividade térmica [14]. A diferença de temperatura entre o meio ambiente interior e exterior de um edifício provoca a passagem de calor através das paredes, pavimento e cobertura [15].

O telhado é o elemento construtivo mais relevante de um aviário em virtude da grande área de intercetação de radiação solar [16]. Normalmente, quase todo o ganho de calor em região de clima quente ocorre através do telhado, principalmente por transferência de calor radiante [17] [9]. No total, são aproximadamente 75% da carga térmica transferida para o interior através do telhado [18] e constitui um dos principais causadores do stress térmico nos frangos [19]. O aumento da resistência térmica na cobertura e o maior controlo sobre a ventilação possibilitam alcançar maior estabilidade térmica, mesmo tratando-se de sistema de ventilação natural [20].

O sistema de ventilação natural é muito comum em regiões em desenvolvimento do mundo e em pequenas e médias operações avícolas [21]. Em Moçambique verifica-se a ocorrência quase que maciçamente de instalações abertas, representando 83,3% [22]. Esta tipologia em condições naturais de clima quente, apresenta dificuldades em controlar o ambiente interno de maneira adequada, mesmo com o uso de ventiladores [23].

A exemplo de outros animais, conhecendo as condições climáticas da zona onde se localizam a exploração, as necessidades dos animais a alojar, as características das construções e equipamento de condicionamento ambiental é possível, recorrendo a fórmulas relativamente simples, proceder à correta quantificação do caudal de ventilação numa instalação [24]. Além disso, permite prever as condições de temperatura, conhecendo o caudal de ventilação e as condições exteriores.

O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho térmico dos pavilhões de construção típicos de Moçambique e relacioná-los com a temperatura aconselhada para as condições de conforto térmico para frangos de corte.

2. Materiais e métodos

O trabalho foi conduzido em Moçambique, particularmente na Província de Maputo, onde se concentra a maior produção de frangos [25]. Apresenta maioritariamente aviários do modelo construtivo aberto, que sofre maior influência do ambiente exterior.

A avaliação do desempenho térmico dos pavilhões teve em consideração os grupos de produtores de acordo com o número de frangos em produção. Destacam-se os pequenos (até 5.000 frangos) e médios (5.000 a 50.000 frangos) [26]. Ainda teve em consideração as características dos elementos construtivos, as necessidades de ventilação e a influência do clima exterior sobre o ambiente interior, como mostra a tabela 1.

Tabela 1. Características dos aviários típicos da província de Maputo

	Produtor	Densidade (frango/m2)	Capacidade (Nro de frangos)	Área	Altura do pé direito (m)	Material de Cobertura	Espessura blocos de cimento (m)	Revest. parede
Maputo	Pequeno	12	2887	232	2,7	zinco	0,15	n/ reb. Pint
	Medio	14	14125	1008	2,7	zinco	0,2	reb. Pint.

Relativamente à fase de desenvolvimento dos frangos, foi considerado o período de 1ª e 4ª semanas de idade. No que se refere às condições climáticas, foram consideradas situações assumidas como as mais limitantes: a situação de inverno, com a temperatura do ar mínima, que se verifica durante a noite e a situação de verão, com a temperatura de ar máxima, o que ocorre durante o dia.

No que concerne à temperatura do ar, para efeitos de cálculo de balanço térmico, foram consideradas a temperatura do ar exterior máxima e mínima de projeto calculadas, utilizando as expressões seguintes:

$$\text{Tmax proj} = \frac{\text{tmax abs} + 2\text{tmax media}}{3} \quad (^{o}C)$$

$$\text{Tmin proj} = \frac{\text{tmin abs} + 2\text{tmin media}}{3} \quad (^{o}C)$$

Para o cálculo de balanço térmico, considerou-se o calor sensível produzido pelos frangos (Qan), as trocas de calor sensível através da envolvente (QB) e da ventilação (QV), representado pela equação simplificada do balanço térmico:

$$Qan = QB + Qv \text{ [27]} \quad (W)$$

A produção de calor sensível produzido pelos frangos foi estimada para as idades de 1ª e 4ª semanas, dado por:

$$Qan = Qsen \times N^{o} \text{ frangos[27]} \quad (W)$$

sendo Qsen a produção de calor sensível expresso em W/frango

Os ganhos de calor pela envolvente resultam da ação combinada da radiação solar incidente nas superfícies e da diferença de temperatura entre o ar no interior e no exterior, para as paredes (QBp) e para a cobertura (QBc):

$$QBp = \Sigma\, Ai \times Ui \times \Delta te \text{ [28]:} \quad (W)$$

onde Δte representa a diferença efetiva de temperatura que engloba os efeitos da temperatura ambiente e da radiação solar incidente (ºC) e é função do tipo de envolvente (parede e cobertura/ sua cor), Ai a área do elemento i da envolvente (m^2), Ui o coeficiente de transmissão térmica global do elemento i ($W/m^{2º}C$)

Os ganhos de calor devido à ventilação (Qv) foram calculados considerando o caudal de ventilação (CV, m^3/s) mínimo calculado em função da qualidade do ar para o verão.

$$Qv = CV \times \mu \times Cp \times (ti – te) \quad (W)$$

unde μ representa a massa volúmica do ar (kg/m3) e Cp o calor específico do ar ($J/kg^{o}C$).

Relativamente ao caudal de ventilação considerado, foi para garantir a qualidade do ar, uma vez que se tratando de estruturas abertas torna-se complexo calcular tendo em consideração as aberturas de ventilação. No caso de verão, uma vez que a temperatura exterior é superior à temperatura interior pretendida, o caudal de ventilação mínimo, garante a qualidade do ar e foi

calculado em função da concentração máxima admissível para o dióxido de carbono, aplicando a seguinte equação:

$$CV = \frac{P}{Ci - Ce} \qquad (m^3/s)$$

sendo P a quantidade de CO_2 a remover, Ci o teor máximo de CO_2 admitido no interior e Ce a concentração de CO_2 no exterior.

Considerando que a variação de temperatura (Δt, ºC) no interior dos aviários, resulta do balanço de calor sensível produzido pelos animais (Qan, W) e das perdas de calor sensível pela envolvente (QB, W/ºC) e pela ventilação (Qv, W/ºC), tem-se:

$$\Delta t = \frac{Q_{an}}{Q_B + Q_V}$$

onde QB é o somatório das perdas de calor pela cobertura (QBc) e pelas paredes (QBp), ambas expressas em W/ºC.

A temperatura do ar interior (ti) estimada é dada por:

$$ti = te + \Delta t$$

A temperatura do ar interior foi estimada e, posteriormente comparada com a temperatura do ar recomendada para os frangos, considerando 31ºC para a 1ª semana e 26 ºC para a 4ª semana de vida das aves [30, 31, 32, 33].

3. Resultados e discussão

Na situação de verão, os valores de temperatura do ar interior estimadas nos aviários de Maputo não ultrapassam os 40ºC (37 a 39,4 ºC), como se observa no gráfico 1.

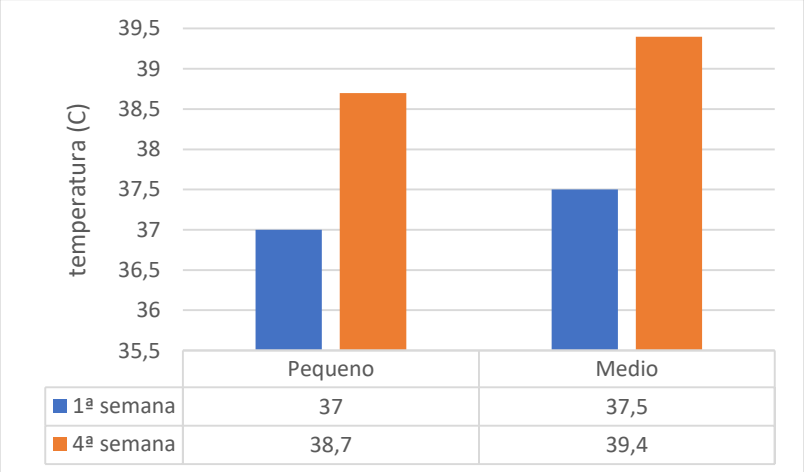
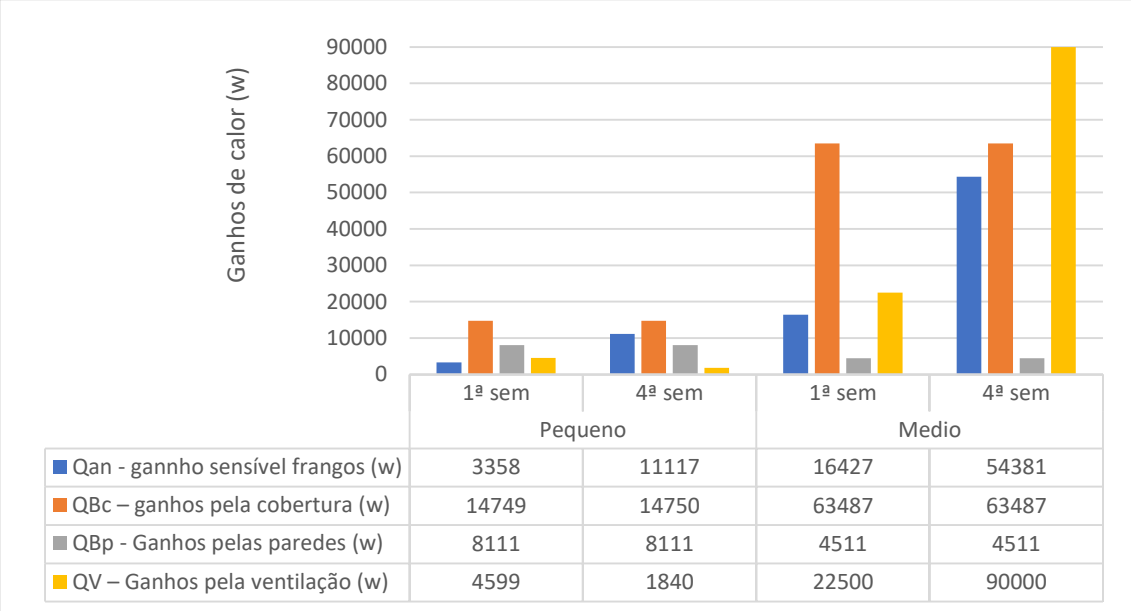


Gráfico 1. Temperatura máxima do ar interior estimada para aviário de Maputo no verão

Em ambos os casos, os resultados das temperaturas de verão registradas, mostram-se inapropriadas para a criação de frangos, em particular na idade de 4 semanas. Os valores de temperatura iguais ou superiores a 38 °C, podem ser letais, especialmente se acompanhados por altos valores de humidade relativa do ar [6]. As temperaturas do ar no interior dos aviários da ordem de 37,2 ºC por período prolongado podem levar a taxas de mortalidade de 14% ou mesmo superiores [17]. Se forem próximas a 40 °C representam estado de stress severo [1]. No caso de frangos com uma semana de idade, considerando o limite superior de 35ºC [30]. Os efeitos das temperaturas no verão não são tão nefastos.

Os cálculos demonstram que, no verão, os ganhos de calor ocorrem, principalmente, pela cobertura e pela ventilação, tratando-se de pavilhões abertos com ventilação natural, principalmente no caso dos aviários típicos dos médios produtores, como mostra o gráfico 2.



	Pequeno		Medio	
	1ª sem	4ª sem	1ª sem	4ª sem
Qan - gannho sensível frangos (w)	3358	11117	16427	54381
QBc – ganhos pela cobertura (w)	14749	14750	63487	63487
QBp - Ganhos pelas paredes (w)	8111	8111	4511	4511
QV – Ganhos pela ventilação (w)	4599	1840	22500	90000

Gráfico 2. Distribuição relativa dos ganhos de calor para aviário de Maputo no verão

Os ganhos que ocorrem pela cobertura estão relacionados com o facto de os aviários apresentarem, na sua maioria, cobertura de zinco sem material isolante térmico. Nas condições de ausência de isolamento é frequente ocorrer aumento de 1 a 5 ° C da temperatura interior acima da temperatura do ar ambiente [35].

Tratando-se de pavilhões abertos com ventilação natural, no verão com temperatura exterior de projeto acima de 36ºC é de esperar que ocorra aumento da temperatura do ar interior. Quando a temperatura ultrapassa 32 °C, a eficácia do uso do efeito de ar frio diminui [36]. Sempre que a temperatura interior apresentar valores excessivos devido a elevada temperatura exterior, o efeito benéfico do aumento do caudal de ventilação é limitado [37]. No caso particular, verifica- se grandes ganhos de calor pela ventilação, quase igualando- se aos ganhos pela cobertura, devido ao parâmetro para cálculo utilizado de qualidade do ar de 1500ppm para CO2, o que resulta em grande caudal e logo elevado ganho de calor. Efetivamente poderia ser considerado um valor superior para a concentração do CO2, mas assumiu-se neste caso o valor aconselhado como limite superior para a manutenção das condições adequadas à saúde dos tratadores.

No inverno, os valores de temperatura do ar interior estimados nos aviários de Maputo variam de 18 ºC a 22,5 ºC, como demonstrado no gráfico 3. No caso de frangos com uma semana verifica-se uma temperatura muito abaixo da pretendida. Os pintos devido à condição de stress por frio, procuraram manter-se agrupados, com a tendência de diminuir a frequência de idas ao comedouro e bebedouro em relação aos animais criados em ambientes a 33°C [38, 39].

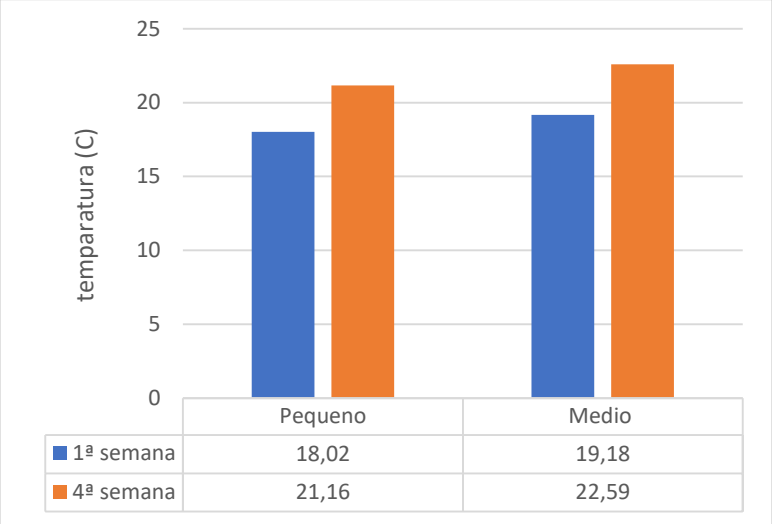


Gráfico 3. Temperatura inferior do ar interior estimada para aviário de Maputo no inverno

Com temperatura do ar estimada próxima de 22,6 º C, no caso dos frangos de 4 semanas, apresentam- se dentro da faixa de conforto [30, 40, 41, 42]. Consideram- se também dentro do limite inferior quando apresentam 20° C a 22 ° C [43]. A temperatura de 21ºC para idade de 31 dias até ao abate, é aceitável [44]. Neste caso, pode afirmar-se não haver necessidade de aquecimento, minimizando dessa forma, custos adicionais com energia. Na fase adulta manutenção da temperatura interna será feita apenas através do manejo de cortinas e uso de ventiladores [45].

As perdas de calor consideradas são as que ocorrem principalmente pela via sensível ou corporal e mais relevante, pelas cortinas de ventilação, como mostra o gráfico 4.

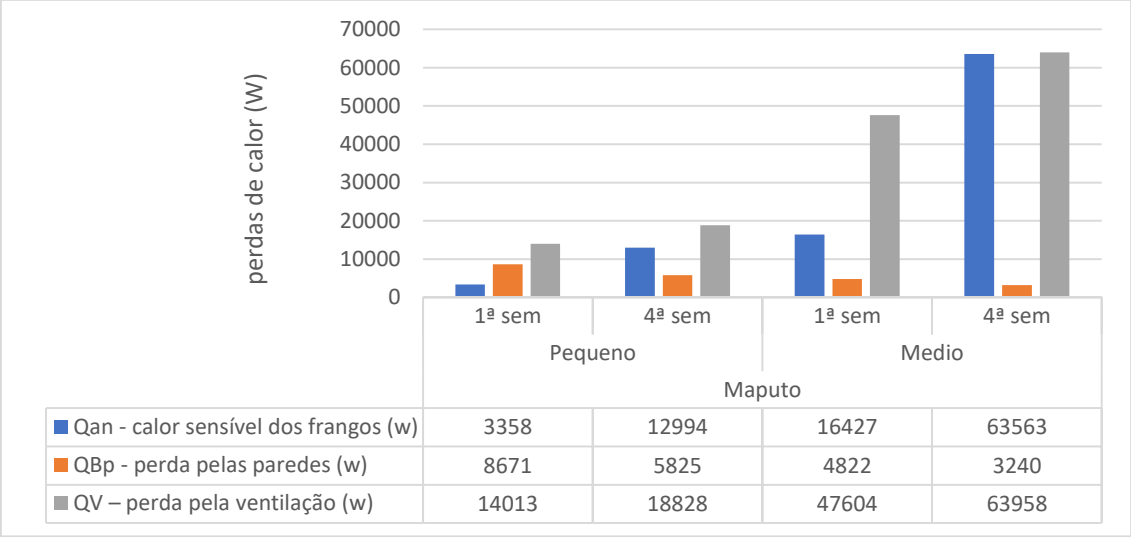


Gráfico 4. Distribuição relativa das perdas de calor para aviário de Maputo no inverno

A perda de calor pela ventilação é associada a abertura das janelas para manter a qualidade do ar ou caudal mínimo. O caudal de ventilação mínimo admite que a temperatura atinja valores abaixo do ótimo, ou seja, repondo oxigénio, assim como extraindo gases e vapor de água [30]. No caso das perdas corporais, observa- se que frangos de corte com poucos dias de vida, criados a 20ºC incorrem a aumento de 9 vezes na perda de calor corporal por radiação e redução de 15,5%

do peso corporal em relação aos animais criados no conforto [46]. Neste caso, é necessário aproveitar da melhor maneira o calor produzido pelos animais.

4. Conclusões

No período de verão, a alta incidência de radiação solar sobre a cobertura das instalações avícolas, constitui o principal ganho de calor e um dos principais elementos causadores do stress térmico nos frangos, podendo alcançar temperaturas próximas dos 40ºC, sendo o maior constrangimento da produção de frangos, especialmente no caso de frangos adultos, próximos da idade de abate.

Na fase adulta, após a 4ª semana, uma vez não necessitando de aquecimento, a manutenção da temperatura interna pode ser feita apenas através do maneio de cortinas, sem custos associados.

Num país como Moçambique que carece de estratégias para melhorias nas estruturas de criação de frangos, uma vez identificado a cobertura como meio para a entrada de calor no interior, a solução pode ser o uso de material local como capim ou palha de coqueiro, muito abundantes no país, mais barato e fornece um isolamento térmico melhor, mas ainda carecendo de estudos para melhorar a durabilidade.

A ventilação é outro fenómeno por equacionar, uma vez que se trata de uma condição limitada pelas altas temperaturas e humidade de verão. O uso de painéis solares durante o dia para viabilizar o funcionamento de ventiladores, poderá tornar-se uma solução de baixo custo e sustentável, principalmente para os produtores localizados em regiões sem acesso a energia elétrica para controlar e amenizar o stress pelo calor.

Como trabalho futuro pretende-se desenvolver um estudo técnico para modelos de aviários para pequenos, médios e grandes produtores tendo como base materiais disponíveis e abundantes em Moçambique.

Referências

1. OECD/FAO. Oecd-fao agricultural outlook 2018-2027. 2018. Acesso em: 18/04/2019. Disponível em: https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2018-2027_agr_outlook-2018-en
2. OECD/Food. OECD-FAO Agricultural Outlook 2014. 2014. Acesso em: 20 maio. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2014-en
3. Agrix. Investment Opportunities for Dutch Agrifood Companies in Mozambique. Pretoria: Agricultural Council from the Netherlands Embassy in Pretoria. 2014. 98p
4. Mata, B. B. Estudo para o controle da doença de Newcastle com aplicação da vacina I-2: Criação de galinhas e a doença de Newcastle no Sector Familiar em Angoche e Manjakaze e Análise Custo/Benefício na Produção, Distribuição e Utilização da vacina I-2. Projetco IFAD. Moçambique: INIVE/DNER. 2000.
5. Vernooij, A., Dos Santos, M., & Van, M. Livestock Development in the Zambezi Valley, Mozambique: Poultry, Dairy and Beef Producition. Wegeningen University and Research. Wageningen: Centre for Development Innovation. 2016. 119p
6. FAO. Elements of construction. In FAO, Rural structures in the tropics. Design and development. FAO: Italy. 2011. 149-204 pp.
7. Salgado D. D. e. Nääs. I. de A. Avaliação de risco à produção de frango de corte do estado de São Paulo em função da temperatura ambiente. Eng. Agríc. Jaboticabal. 2010. V.30, n.3, 367-376 pp.
8. NAVARINI, F.C. Níveis de Proteína Bruta e Balanço Eletrolítico para Frangos de Corte. Dissertação (Pós-Graduação em Zootecnia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2009. 68 p.
9. Tinôco, I. de F. F. Avicultura Industrial: Novos Conceitos de Materiais, Concepções e Técnicas Construtivas Disponíveis para Galpões Avícolas Brasileiros. Revista Brasileira de Ciência Avícola. 2001. 3, 1-26pp.

10. Silva, M. G. Desempenho Térmico de Tipos de Coberturas no Interior de Modelos Reduzidos de Galpões Avícolas. Botucatu: Revista Energia na Agricultura. 2015. 30, 269- 275pp.
11. Baptista, F.J.; Meneses, J.F. Ventilação Natural de Instalações Pecuárias. Revista Portuguesa de Zootecnia, Ano IV-Nº 2. Associação Portuguesa de Engenheiros Zootécnicos, Vila Real. 1997. 74-97 pp.
12. Kawabata, C.Y., Castro, R.C., Savastano Junior, H. Indices de conforto térmico e respostas fisiológicas da raça holandesa em bezeiros individuais com diferentes coberturas. Eng. Agrícola. 2005. V25, n3, 598-607 pp.
13. Andrade R.R., Tinoco I.F., Souza C.F., Oliveira K.P., Barbari M., Cruz V.M.F., Baptista F.J., Vilela M.O., Conti L. and Rossi G. Effect of thermal environment on body temperature of early-stage laying hens. Agronomy Research. 2018. 16(2), 320-327 pp.
14. Nascimento, G. R. do., Nããs, I. A., Baracho, M. S., Pereira, D. F., Neves, D. P. Termografia Infravermelho na Estimativa de Conforto Térmico de Frangos de Corte. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2016. 18, 658 – 663pp.
15. LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil). Coeficiente de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios (1ª ed.). Lisboa: ICT informação técnica. 2006. 172p.
16. Sampaio, C. A. P.; Cardoso, C. O.; Souza, G. P. Temperaturas superficiais de telhas e sua relação com o ambiente térmico. Engenharia Agrícola. 2011. 31, 230-236 pp.
17. Donald, J. Planning Broiler Housing for Environmental Control Systems. Simpósio Internacional sobre Ambiência e Sistemas de Produção Avícola. Embrapa Suínos e Aves. 2008. 118 - 143 pp.
18. Morgan, W. E. Heat Reflective Roof Coating. American society Agricultural Engeneers. 1990. 9p.
19. Machado, N. T. Resfriamento da Cobertura de Aviários e Seus Efeitos na Mortalidade e nos Índices de Conforto Térmico. Revista Nucleus. 2012. 9, 50-62 pp.
20. Perdomo, C. C. Sugestões para o Manejo, Tratamento e Utilização de Dejetos de Suinos. Concórdia: Embrapa-CNPSA. 1999. 2p.
21. FAO. Animal Health and Production. Poultry Sector and country review. 2006. Acesso em: 10 de junho. Disponível em: http//www. Fao.org/avianflu/en/farmingsystems.html
22. Gussule, M. G. M. Avaliação do comportamento térmico de pavilhões de produção de frangos em Moçambique (Dissertação de Mestrado). Universidade de Évora. 2018. 89PP.
23. LEE, I.; SASE, S.; SUNG, S. Evaluation of CFD Accuracy for the Ventilation Study of a Naturally Ventilated Broiler House. Japan Agricultural Research Quarterly. 2007. V.41, n.1, 53-64 pp.
24. Cruz V. F. e Baptista F. Conceitos Básicos Sobre Ventilação no Alojamento de Suínos. 72. 2006. 40-48pp.
25. MEF (Ministério da Economia e Finanças). Cadeia de Valor de Frango em Moçambique. Maputo: Ministério da Economia e Finanças. 2016. 70p
26. Nicolau, Q. C. Análise das Transformações Técnicas Produtivas da Avicultura de Corte em Moçambique: Do Estado Estruturante ao Liberalismo Económico. Revista de Ciências Agrárias. 2011. 182-198 pp.
27. Vidal, B. V., Rodenas, E. S., Salvador, A. G. Climatización: Balance de calor, aislamiento y ventilación. In Vidal B. V., tecnologia de la Producción Animal Valencia:Departamento de Ciência Animal da Universidade Politécnica de Valencia. 2004. 73-84pp.
28. RCCTE (Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios), Decreto-lei 80/2006.
29. Hellickson, M., e Walker, J. Ventilation of Agriculture Structures. (1ª Ed.). USA: Amer Society of Agricultural. 1983. 372 p.
30. Curtis, S. E. Environmental management in animal agriculture. Ames: Iowa State University. Press. 1983. 409p.
31. Macari, M. Conforto Ambiental para Aves: Ponto de Vista do Fisiologista. Simpósio goiano de avicultura. Goiânia: UFG/AGA. 1996. 57-60 pp
32. Abreu, P. G. e Abreu, V. M. Função e Manejo da Cortina de Aviários (CT 273). Embrapa Suínos e Aves. 2001. 1-2 p
33. Cassuce, D. C. A determinação das faixas de conforto térmico em aves de diferentes idades criadas no Brasil (tese de doutorado). Universidade Federal de Viçosa. Brasil. 2011. 103p.
34. Sonaiya, E. B., & Swan, S. E. Small- sacale poultry Production. FAO. Roma. 2004. 06-101pp

35. Czarick, M., Fairchild, B.B. Poultry production in hot climates. Poultry production in hot climates. University of Georgia. Georgia: Cab International. 2008. 2nd edition. 80-117pp
36. Cobb. Manual de Manejo de Frangos de Corte Cobb. 2012. 68p.
37. Le Dividich, J. e Herpin, P. Environmental temperature requirement of the weaned piglet. Proceedings of the 43rd Anual meeting of the European Association for Animal Production. Madrid. 1992. 1-15pp.
38. Ferreira, C. B. (2017). Efeitos do Estresse por Frio em Frangos de Corte na Fase Inicial de Criação. (Tese Doutoramento). Universidade Federal de Minas Gerais, 74p
39. Schiassi, L. Junior, T. Y. Ferraz, P. F. P. Campos, A. T. Silva, G. R. Abreu, L. H. P. Comportamento de Frangos de Corte Submetidos a Diferentes Ambientes Térmicos. Engenharia Agrícola. 2015. 390-396pp.
40. Medeiros, C. M. Ajuste de Modelos e Determinação de Índice Térmico Ambiental de Produtividade para Frangos de Corte. (Doutorado em Construções Rurais e Ambiência). Universidade de Federal de Viçosa. 2001. 3-95pp.
41. Damerow, G. The Chicken Health Handbook. In Damerow, G., Mysteries of Metabolism. United State: Deb Burn. 2016. 2nd Edition, 102-107pp.
42. Oliveira, R.F.M., Donzele. J.L., Abreu. M.L.T. et al. Efeitos da Temperatura e da Umidade Relativa sobre o Desempenho e o Rendimento de Cortes Nobres de Frangos de Corte de 1 a 49 dias de Idade. Revista Brasileira de Zootecnia. 2006. 35, 797-803pp.
43. Breedt, H.T. e Uitenweerde, R.T. Small-Scale Poultry Housing in South Africa. Pretoria: ARC-Institute for Agricultural Engineering. 2000. 71p
44. Oliveira, R.F.M., Donzele. J.L., Abreu. M.L.T. et al. Efeitos da Temperatura e da Humidade Relativa sobre o Desempenho e o Rendimento de Cortes Nobres de Frangos de Corte de 1 a 49 dias de Idade. Revista Brasileira de Zootecnia. 2006. 35, 797-803pp.
45. Paula, M.O., Sá, L.V., Carvalho, S.O., Tinôco, I.F.F. Análise do conforto térmico e do desempenho animal em galpão para frango de corte na fase inicial de vida. Enciclopédia Biosfera. 2014. 10, 18, 236 - 250pp.
46. Oviedo-Rondón, E. O. Efecto de la Temperatura y de la Velocidad del aire en Naves de Pollos. PV ALBEITAR. 2014. 29: 109– 111pp.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Caracterización de tableros de partículas sin adhesivos elaborados con rizoma de caña común

A. Ferrandez-Garcia[1]; C.E. Ferrandez-Garcia[1]; M. Ferrandez-Villena[1]; T. Garcia-Ortuño, M.T. Ferrandez-Garcia[1]

[1] Departamento de Ingeniería. Escuela Politécnica Superior de Orihuela (Alicante). Universidad Miguel Hernández de Elche. España. Ctra. Beniel km 3,2. Orihuela (Alicante).

Resumen: El uso de tableros de partículas (tableros de aglomerado) en la industria del mueble está en continuo crecimiento debido a la escasez de la madera como materia prima. Se trata de materiales compuestos tradicionalmente por virutas de madera y un aglomerante. Los desechos agrícolas están formados por materiales lignocelulósicos que pueden sustituir a la madera natural y conseguir ser una alternativa adecuada en la fabricación de tableros destinados a mobiliario, envases y usos constructivos. Los objetivos de este trabajo han sido obtener tableros de aglomerado sin adhesivos empleando como material el rizoma de la caña común, evaluar sus propiedades siguiendo las normas EN y valorar el mecanismo de auto-unión de las partículas del tablero. Con este tipo de panel se pretende reducir el uso de madera natural y emplear una mala hierba como es la caña común sin aplicar ningún adhesivo o resina enlazante para obtener un producto totalmente ecológico. Se fabricaron 6 tipos de tableros (12 clases) con biomasa de rizoma de caña. Se elaboraron con una temperatura de 110ºC y tiempos de 7 y 15 minutos y dos ciclos de prensado. Los resultados alcanzados demuestran que utilizando menor tamaño de partícula de rizoma y con dos ciclos de prensado se mejoraban las propiedades mecánicas.

Palabras clave: residuos, paneles, propiedades, rizoma, *Arundo donax* L.

1. Introducción

La preocupación por el medio ambiente y la eficiencia energética ha adquirido mayor fuerza dentro de la sociedad dando paso a múltiples propuestas en el área de la construcción con el objetivo de satisfacer la demanda de los usuarios. Actualmente se racionaliza el empleo de los recursos naturales incrementando el uso de materiales de construcción a base de fibras vegetales, considerando dichos productos no agresivos con el medio ambiente.

La caña común (*Arundo donax* L.) se considera una de las 100 peores especies invasoras del mundo, según la Base de Datos Mundial de Especies Invasoras de la UICN y también está incluida en el Catálogo Español de Especies Invasoras [1]. El principal método de propagación de esta especie es por el crecimiento de los fragmentos dispersos de rizomas. En los cauces de los ríos, la fuerza del agua secciona los rizomas y actúa como el agente dispersante. Debido a su rápida tasa de crecimiento y a su reproducción vegetativa ocupa nuevas áreas y forma masas densas (cañaverales), provocando profundas transformaciones de los ecosistemas que invaden a expensas de otras especies nativas.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3464

Para solventar los problemas causados por esta especie invasora e intentar recuperar el ecosistema, los métodos de control utilizados han sido la aplicación de glifosato [2], el empleo de tareas mecánicas de corte y extracción y el uso de medidas de control biológico [3], pero ninguna de estas técnicas ha resultado efectiva [4]. Los rizomas son capaces de germinar independientemente de su tamaño y bajo una gran mayoría de condiciones ambientales, ya que tienen una alta tolerancia a las condiciones salinas y una adaptación significativa a la acumulación de sal en el suelo [5]. Por tanto, cuando se han arrancado y triturado los rizomas, en las zonas donde se ha depositado este material, vuelven a crecer cañas extendiéndose sin control por otros lugares [6].

Debido a su alto rendimiento de biomasa, a su adaptación a diferentes tipos de suelos y condiciones climáticas, a que necesita menores requerimientos de labranza que los cultivos tradicionales, a sus propiedades de fitorremediación [7, 8, 9] y a ser apreciada como un buen biofiltro de aguas residuales [10], la caña común ha sido considerada como un cultivo energético competitivo [11]. Se ha propuesto la utilización de la parte área de la caña para la fabricación de papel [12], la extracción de xilosa [13], la producción de carbones activados [14], el procesado de compost [15], la generación de biomasa [16, 17], la elaboración de biogás [18], la obtención de biofuel [19, 20, 21], la formación de films lignocelulósicos [22], la preparación de composites [23], el diseño de refuerzos de morteros de cemento [24] y la construcción de tableros de partículas [25].

También hay un elevado interés relacionado con la fabricación de tableros libres de formaldehído que ha dado lugar a un aumento de la presión sobre los productores de tableros aglomerados para dejar de usar estos aglutinantes. En este sentido, se han realizado estudios sobre tableros de partículas con resinas y adhesivos naturales para sustituir a las resinas sintéticas, tales como proteínas, ligninas, taninos, glútenes, almidones, etc. [26, 27, 28, 29, 30, 31].

Actualmente las investigaciones con biomasa vegetal se dirigen a obtener tableros de partículas sin adhesivos con diferentes tratamientos previos, estando ampliamente demostrada la capacidad de auto-unión que tienen las fibras naturales cuando se produce la temperatura de transición vítrea. El tamaño y la forma de la partícula pueden tener mucha influencia sobre las propiedades de los tableros sin adhesivos [32], por tanto, el determinar el rango de tamaño de las partículas es un parámetro importante para mejorar su unión. El material de partida para fabricar tableros de partículas sin adhesivos contiene celulosa, hemicelulosa, lignina y también polisacáridos lo que da buenas expectativas de la capacidad de autoadhesión de sus fibras naturales durante la degradación de estos compuestos al alcanzar la temperatura de transición vítrea, aunque no se conoce exactamente la contribución de cada componente en la auto-unión de las partículas [33].

El aumento de la temperatura con valores superiores a 180ºC unidos al empleo de mayores de tiempos de prensado y a la aplicación de presiones superiores a las empleadas en la industria convencional, mejoraban la resistencia mecánica y la estabilidad de los tableros sin adhesivos [34]. Estos parámetros tienen la gran desventaja de que aumentan significativamente el consumo de energía del proceso, por lo que son líneas de trabajo que se consideran poco recomendables.

Ensayos realizados con tableros de caña común sin adhesivos evidenciaron que se obtenían propiedades físicas y mecánicas muy bajas [31], pero al contar el rizoma de la caña con gran cantidad de azúcares fermentables [35] se puede conjeturar que con este material es posible conseguir tableros sin adhesivos con buenas propiedades.

Teniendo en cuenta la necesidad de nuevos materiales a partir de la reutilización de residuos, el presente trabajo tiene como objetivo la fabricación y evaluación de tableros de aglomerado de partículas del rizoma de la caña común sin el empleo de adhesivos, analizando el mecanismo de auto-unión de las partículas del tablero.

2. Materiales y Métodos

2.1. Materiales

Los materiales empleados fueron rizoma de caña común y agua de la red de agua potable municipal. Los rizomas de caña común procedían de la limpieza del cauce del río Segura. Los rizomas se pusieron a secar al aire durante 5 meses y se trituraron en una desfibradora de cuchillas. Posteriormente se tamizaron las partículas obtenidas en una tamizadora vibradora, clasificándolas en función del tamiz que atravesaban y el tamiz en el que quedaban retenidas. Las partículas tenían una humedad aproximada del 15% y se dejaron secar al aire hasta una humedad del 9%. Para la elaboración de los tableros se utilizaron tres tamaños de partículas (0.25 a 1, 1 a 2 y 2 a 4 mm).

2.2. Métodos

2.2.1. Fabricación de tableros

Los tableros se fabricaron en un molde de 400x600 mm a una temperatura de 110ºC y una presión de 2.5 Mpa. El proceso de elaboración de un ciclo consistió en poner la masa de partículas sobre el molde y posteriormente pulverizar sobre la superficie un 10% en peso de agua en función del peso de las partículas e introducirlas en la prensa de platos calientes. A los tableros sometidos a un segundo ciclo de prensado se les pulverizó un 5% en peso de agua sobre la superficie antes de someterlos a presión y calor.



Figura 1. Tableros de rizoma de caña sin adhesivos clase B0

Se fabricaron 12 clases de tableros utilizando 3 tamaños de partícula, 2 tiempos de prensado de un ciclo en prensa (7 y 15 min) y dos ciclos en prensa (7+7 min y 15 +15 min). En la tabla 2 se indican las características de fabricación de cada clase de tablero fabricado y en la figura 1 se puede observar tableros de rizoma de clase B0.

Tabla 1. Características de los tableros de rizoma fabricados.

Tipo	Clase	Tamaño de partícula (mm)	Tª (ºC)	Tiempo (min)	Nº de tableros
B0	B01	0.25 a 1	110	7	3
	B02	0.25 a 1	110	7+7	3
B1	B11	0.25 a 1	110	15	3
	B12	0.25 a 1	110	15+15	3
C0	C01	1 a 2	110	7	3
	C02	1 a 2	110	7+7	3
C1	C11	1 a 2	110	15	3
	C12	1 a 2	110	15+15	3
D0	D01	2 a 4	110	7	3
	D02	2 a 4	110	7+7	3
D1	D11	2 a 4	110	15	3
	D12	2 a 4	110	15+15	3

Los tableros tenían un espesor medio de 7 mm, posteriormente se cortaron las probetas con las dimensiones adecuadas que indican las normas europeas para cada uno de los ensayos de laboratorio.

2.2.2. Ensayos experimentales

El método seguido fue experimental mediante ensayos en el laboratorio de resistencia de materiales. Los valores se determinaron siguiendo las normas europeas establecidas para los tableros de partículas de madera Antes de proceder a los ensayos se cortaron las probetas de cada tablero y se acondicionaron a una temperatura de 20ºC y una humedad relativa del 65%.

Se midió la densidad [36], el hinchamiento en espesor (TS) y absorción de agua (WA) tras 2 y 24 horas de inmersión en agua [37], el módulo de ruptura a flexión (MOR) y el módulo de elasticidad a flexión (MOE) [38] y la cohesión interna o resistencia a tracción (IB) [39]. Para evaluar los tableros se aplicó la normativa europea [40].

Los ensayos mecánicos se realizaron en la máquina de ensayos marca IMAL (Modelo IB600), que cumple con la velocidad requerida en cada ensayo, según indican las normas europeas aplicables. De los valores medios de los ensayos se obtuvo la desviación estándar y se realizó el análisis de la varianza (ANOVA). Para comparar las diferencias entre los tipos de tableros se utilizó el test de Duncan ($P<0.05$). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa informático SPSS v.25.0 de IBM.

3. Resultados y Discusión

3.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas obtenidas se indican en la tabla 2.

3.1.1. Densidad.

La densidad de los tableros oscila entre 735.25 y 912.76 kg/m^3, pudiendo considerarse como tableros de media densidad. Realizado el análisis de la varianza se observa que la densidad depende del tamaño de partícula y del ciclo de prensado, obteniendo mayores valores con partículas de menor tamaño y con un segundo ciclo de prensado, siendo el tamaño de partícula la variable de fabricación con mayor influencia.

Tabla 2. Valores medios de las propiedades físicas de los tableros de rizoma de caña común sin adhesivos.

Tipo	Clase	Densidad (kg/m³)	TS 2h (%)	TS 24h (%)	WA 2h (%)	WA 24h (%)
B0	B01	812.74 (22.94)	44.69 (7.45)	57.74 (2.70)	69.35 (3.58)	89.00 (3.55)
	B02	882.82 (30.31)	33.36 (12.06)	52.73 (10.23)	66.92 (8.62)	94.85 (0.74)
B1	B11	911.10 (39.31)	33.04 (8.44)	50.52 (4.45)	60.67 (9.30)	81.63 (13.80)
	B12	912.76 (75.03)	37.41 (9.91)	53.98 (6.57)	69.98 (14.73)	87.62 (18,54)
C0	C01	775.54 (44.66)	26.32 (1.78)	43.29 (7.83)	36.28 (9.17)	69.68 (9.82)
	C02	863.44 (98.37)	29.00 (7.96)	44.15 (8.51)	35.54 (9.69)	67.09 (3.61)
C1	C11	735.25 (05.00)	53.43 (0.27)	59.31 (1.55)	85.45 (3.45)	106.12 (5.01)
	C12	799.63 (58.53)	45.84 (6.29)	58.98 (3.64)	93.36 (8.53)	100.96 (6.52)
D0	D01	785.88 (44.90)	37.47 (7.89)	52.65 (11.08)	82.32 (9.28)	104.28 (7.46)
	D02	885.41 (69.17)	28.81 (7.37)	52.19 (10.06)	54.73 (19.79)	88.35 (14.12)
D1	D11	742.80 (72.17)	50.18 (20.98)	60.21 (6.56)	85.06 (10.26)	103.89 (2.28)
	D12	827.48 (38.81)	53.39 (6.95)	72.50 (6.31)	81.00 (6.96)	97.34 (3.33)

TS: Hinchamiento en espesor, WA: absorción de agua. (..) desviación estándar3.1.2. Hinchamiento en espesor

Los valores medios del % de hinchamiento en espesor (TS) después de inmersión en agua durante 2 h y 24 h se indican en la tabla 2, observando que a las 24 h se consiguen medidas muy altas comprendidas entre el 44.15% y el 72.50%. Según el ANOVA el TS depende del tiempo en la prensa de platos caliente, no teniendo una influencia significativa el tamaño de partícula empleado. En la figura 2 se muestran los TS obtenidos a las 24 h en función del tiempo en la prensa de platos calientes pudiéndose comprobar que un aumento en el tiempo en la prensa provoca mayores valores en el TS.

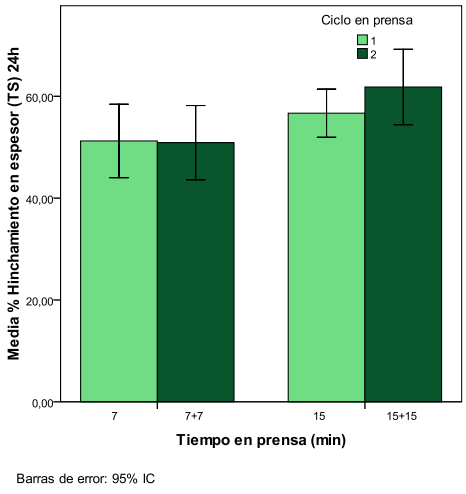


Figura 2. % Hinchamiento en espesor a las 24 h (TS) en función del tiempo en la prensa.

3.1.3. Absorción de agua

Los valores medios del % de absorción de agua (WA) se indican en la tabla 2. Los tableros de rizoma absorben gran cantidad de agua y sus parámetros a las 24 h oscilan entre un 67.09% y un 106.12%. El análisis estadístico indica que la WA depende del tiempo en la prensa, de manera que a mayor tiempo en la prensa se produce un aumento en los valores de la WA, no influyendo en este caso el tamaño de partícula empleado ni el ciclo de prensado aplicado.

3.2. Propiedades mecánicas

3.2.1. Resistencia a flexión

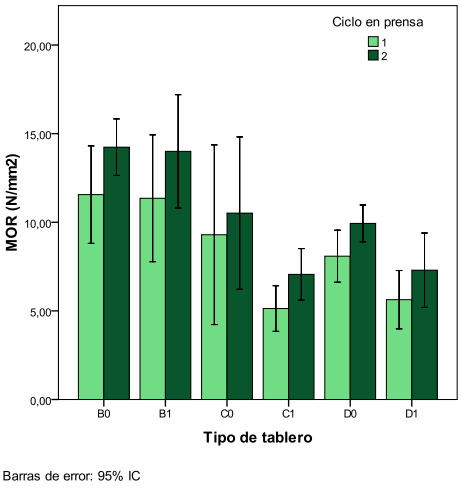


Figura 3. Resistencia a flexión (MOR) en función del tipo de tablero.

Como se observa en la figura 3 se obtienen mayores resistencias a flexión (MOR) cuando se somete a los tableros a un segundo ciclo de prensado y con partículas de menor tamaño. También influye en el MOR el tiempo de prensado, siendo mayores los valores de MOR en los tableros con menor tiempo en la prensa.

Igualmente se observa el mismo comportamiento en los valores del módulo de elasticidad a flexión (MOE) como se advierte en la figura 4. El ANOVA indica que el MOR y MOE dependen del tamaño de partícula, del tiempo en la prensa y del ciclo de prensado.

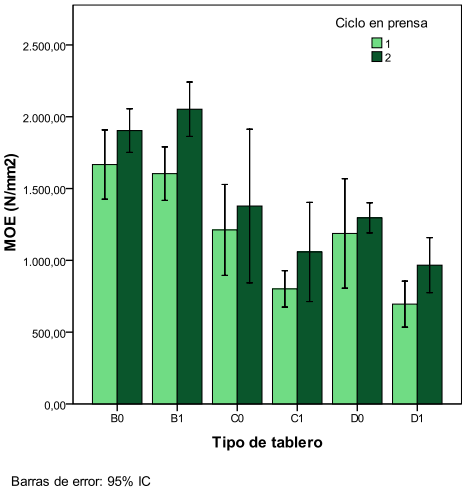


Figura 4. Módulo a flexión (MOE) en función del tipo de tablero.

3.2.2. Resistencia a tracción interna

Como se indica en la figura 5 se obtienen valores muy altos, desde 0.58 hasta 1.12 N/mm^2. El análisis indica que depende del tiempo en la prensa y de los ciclos empleados. En la figura 6 se puede observar que con mayor tiempo en la prensa aumenta el IB, igualmente aumenta al someter a los tableros a un segundo ciclo de prensado.

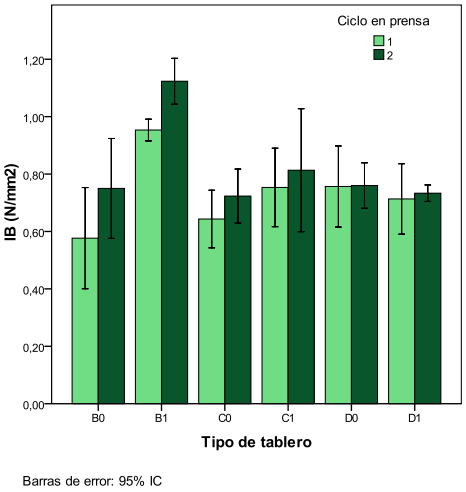


Figura 5. Resistencia a tracción (IB) en función del tipo de tablero.

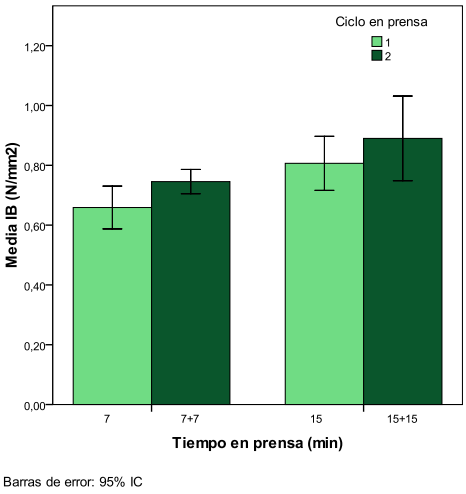


Figura 6. Resistencia a tracción (IB) en función del tiempo en prensa.

3.3. Discusión

De las tres variables de fabricación de los tableros, el tamaño de partícula influye en la densidad, el MOR, el MOE y el IB; el tiempo en la prensa repercute en el MOR, el IB, el TS y la WA y el ciclo de prensado afecta al MOR, al MOE y a la IB. El tamaño de partícula para la elaboración de los tableros se ha convertido en el factor más importante en los análisis realizados por los investigadores, concluyendo que con un menor tamaño de partícula se obtienen mejores propiedades [41], tal y como se demuestra en el presente trabajo.

Otros autores [34] indican que ampliando el tiempo en la prensa se consiguen mejores propiedades, sin embargo, en este trabajo se consigue menor hinchamiento y buenos valores de MOR y de MOE con dos ciclos de prensado y un reducido tiempo en la prensa de platos calientes.

La mayoría de trabajos consultados [33] indican que para fabricar tableros sin adhesivos hacen falta altas temperaturas, superiores a 180ºC, en cambio en este trabajo se han obtenido tableros de partículas de rizoma de caña común con temperatura de 110ºC que podrían ser empleados según se refleja en las especificaciones de las normas europeas [40].

Si comparamos los valores obtenidos por los tableros de rizoma de caña con los valores indicados en la normativa [40] donde se determinan los usos compatibles que pueden tener los tableros (tabla 3), algunos se catalogarían de tipo P1 (tableros para uso general en ambiente seco) y otros se clasificarían de tipo P2 (tableros para aplicaciones interiores incluyendo mobiliario). Ninguno podría ser designado como tipo P3 (tableros no estructurales para ambiente húmedo) ya que no cumplen los cuatro requisitos, pudiendo considerar en futuros trabajos la aplicación de sustancias hidrófobas para disminuir el TS.

Tabla 3. Características de los tipos de paneles fabricados y clasificación.

	Clase	MOR (N/mm²)	MOE (N/mm²)	IB (N/mm²)	TS 24 h (%)
Este trabajo	B01	11.56	1667.04	0.58	57.74
	B02	14.24	1903.62	0.75	52.73
	B11	12.02	1603.79	0.95	50.52
	B12	14.00	2052.45	1.12	53.98
	C02	10.52	1378.30	0.72	44.15
[40] (grosor de 6 a 13 mm)	Tipo P1	10.50	-	0.28	-
	Tipo P2	11.00	1800.00	0.40	-
	Tipo P3	15.00	2050.00	0.50	17.00

Con el fin de evaluar los tableros fabricados, se han comparado en la tabla 4 los valores logrados en este trabajo con los resultados obtenidos por otros autores, destacando que con baja temperatura y poco tiempo en prensa se han conseguido fabricar tableros de rizoma de caña con mejores propiedades que con otros materiales investigados. El rizoma de caña tiene gran concentración de azúcares fermentables [35]. El proceso que ha producido la auto-unión de las partículas puede ser debido a que la adición de agua a temperaturas de prensado de 110ºC haya provocado que los de azúcares se transformen en furfural, favoreciendo el mecanismo de enlace de las partículas.

Tabla 4. Valores de las propiedades obtenidas por diferentes autores con tableros sin adhesivos.

Referencia	Material	Tª (ºC)	Tiempo (min)	Densidad (kg/m³)	TS 24h (%)	MOR (N/mm²)	MOE (N/mm²)	IB (N/mm²)
[42]	Palmera datilera	180	2	1200	150.00	8.40	928.00	0.13
[43]	Palmera aceite	180	20	800	20.00	13.57		0.71
[44]	Palmera canaria	120	30	850	27.56	13.00	1467.82	0.40
[45]	Tallo arroz	110	30+30	1140	53.75	15.09	2696.85	0.18
Este estudio	Rizoma caña	110	7+7	883	52.73	14.24	1903.62	0.75

4. Conclusiones

Mejorando los parámetros de fabricación, es factible elaborar tableros sin adhesivos de rizoma de caña común con un reducido gasto energético (baja temperatura, presión y tiempo) consiguiendo buenas propiedades mecánicas.

Cuando se aplica un segundo ciclo de prensado con la adición de agua se mejoran las propiedades mecánicas. Este resultado puede estar justificado en la alta concentración de azúcares con la que cuenta el rizoma de la caña y su conversión a furfural debido a la temperatura aplicada en la prensa que favorece significativamente el mecanismo de auto-unión de las partículas.

El tamaño de la partícula tiene un efecto muy importante sobre las propiedades mecánicas de los tableros, concluyendo que con los tableros de partículas de 0.25 a 1 mm se alcanzan los mejores resultados mecánicos y se cumplen los requisitos para tableros tipo P1 y P2 especificados en la normativa europea.

La valorización de estos materiales de desecho en la fabricación de productos de larga vida útil, como son los tableros, puede ser beneficioso para el medio ambiente, ya que es un método de fijación de carbono y, por tanto, refuerza los trabajos encaminados a la disminución del CO_2 atmosférico.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad de España (MINECO, AGL2013-41612-R).

Referencias

1. International Union for Conservation of Nature. Global Invasive Species Database. (2011) Checklist Dataset. http://issg.org/database/species/List.asp. Accessed: July 12, **2018** Google Scholar.
2. Spencer, DF., Tan, W., Liow, P-S., Ksander, GG., Whitehand, LC., Weaver, S., Olson, J., Newhouser, M. Evaluation of glyphosate for managing giant reed (*Arundo donax*). Invasive Plant Sci Manag. **2008**; 1, 248–254.
3. Goolsby, J. A., Moran, P. Host range of Tetramesa romana Walker (Hymenoptera: Eurytomidae), a potential biological control of giant reed, *Arundo donax* L. in North America. Biological Control **2009**; 49(2), 160-168.
4. San Martín, C., Gourlie, J. A., Barroso, J. Control of Volunteer Giant Reed (*Arundo donax*). Invasive Plant Science and Management **2019**; 1-8.
5. Andreu-Rodríguez, J., Pérez-Espinosa, A., Pérez-Murcia, M. D., Moral, R., Agulló, E., Ferrández-Villena, M., Ferrández-Garcia, M.T., Bustamante, M. A. Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for the assessment of biomass production and C sequestration by *Arundo donax* L. in salt-affected environments. Agricultural Water Management **2017**;183, 94-100.
6. Santín-Montanyá, M. I., Jimenéz, J., Vilán, X. M., Ocaña, L. Effects of size and moisture of rhizome on initial invasiveness ability of giant reed. Journal of Environmental Science and Health, Part B **2014**; 49(1), 41-44.
7. Kausar, S., Mahmood, Q., Raja, IA., Khan, A., Sultan, S., Gilani, MA., Shujaat, S. Potential of *Arundo donax* to treat chromium contamination. Ecol Eng **2012**; 42, 256–259.
8. Barbosa, B., Boléo, S., Sidella, S., Costa, J., Duarte, MP., Mendes, B., Cosentino, SL., Fernando, AL. Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils using the perennial energy crops Miscanthus spp. and *Arundo donax* L. Bioenergy Res **2015**; 8, 1500–1511.
9. Fiorentino, N., Ventorino, V., Rocco, C., Cenvinzo, V., Agrelli, D., Gioia, L., Di Mola, I., Adamo, P., Pepe, O., Fagnano, M. . Giant reed growth and effects on soil biological fertility in assisted phytoremediation of an industrial polluted soil. Sci Total Environ **2017**; 575, 1375–1383.
10. Mavrogianopoulos, G., Vogli, V., Kyritsis, S. Use of wastewater as a nutrient solution in a closed gravel hydroponic culture of giant reed (*Arundo donax*). BioresTech **2002**; 82(2), 103-107.
11. Ge, X., Xu, F., Vasco-Correa, J., Li, Y. Giant reed: A competitive energy crop in comparison with miscanthus. Renewable and Sustainable Energy Reviews **2016**; 54, 350-362.
12. Abrantes, S., Amaral, M., Costa, A., Shatalov, A., Duarte, A. Evaluation of giant reed as a raw material for paper production. Appita J **2007**; 60, 410–415.
13. Shatalov, A. A., Pereira, H. Xylose production from giant reed (*Arundo donax* L.): modeling and optimization of dilute acid hydrolysis. Carbohydrate Polymers **2012**; 87(1), 210-217.
14. Ahmed, M.J. Potential of *Arundo donax* L. stems as renewable precursors for activated carbons and utilization for wastewater treatments: review. J Taiwan Inst Chem Eng **2016**; 63, 336–343.
15. Pelegrín, M., Sáez-Tovar, J.A., Andreu-Rodríguez, J., Pérez-Murcia, M.D., Martínez-Sabater, E., Marhuenda-Egea, F.C., Paredes, C. Composting of the invasive species *Arundo donax* with sewage and agri-food sludge: Agronomic, economic and environmental aspects. Waste Management **2018**; 78, 730-740.
16. Borin, M., Barbera, A. C., Milani, M., Molari, G., Zimbone, S. M., Toscano, A. Biomass production and N balance of giant reed (*Arundo donax* L.) under high water and N input in Mediterranean environments. European Journal of Agronomy **2013**; 51, 117-119.
17. Burner, DM., Hale, A.L, Carver, P., Pote, DH., Fritschi, FB. Biomass yield comparisons of giant miscanthus, giant reed, and miscane grown under irrigated and rainfed conditions. Ind Crops Prod **2015**; 76, 1025–1032.
18. Corno, L., Pilu, R., Adani, F. *Arundo donax* L.: a non-food crop for bioenergy and bio-compound production. Biotechnology Advances **2014**; 32(8), 1535-1549.
19. Scordia, D., Cosentino, S.L., Lee, J.W., Jeffries, T.W. Bioconversion of giant reed (*Arundo donax* L.) hemicellulose hydrolysate to ethanol by Scheffersomyces stipitis CBS6054. Biomass and Bioenergy **2012**; 39, 296-305.

20. Di Girolamo, G., Grigatti, M., Barbanti, L., Angelidaki, I. Effects of hydrothermal pre-treatments on Giant reed (*Arundo donax*) methane yield. Biores Tech **2013**; 147, 152-159.
21. Ragaglini, G., Dragoni, F., Simone, M., Bonari, E. Suitability of giant reed (*Arundo donax* L.) for anaerobic digestion: effect of harvest time and frequency on the biomethane yield potential. Biores Tech **2014**; 152, 107-115.
22. Martínez-Sanz, M., Erboz, E., Fontes, C., López-Rubio, A. Valorization of *Arundo donax* for the production of high-performance lignocellulosic films. Carbohydrate Polymers **2018**; 199, 276-285.
23. Scalici, T., Fiore, V., Valenza, A. Effect of plasma treatment on the properties of *Arundo donax* L. leaf fibres and its bio-based epoxy composites: A preliminary study. Composites Part B: Engineering, **2016**; 94, 167-175.
24. Ferrandez-Garcia, C.E., García-Ortuño, T., Andreu-Rodríguez, J., Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-Garcia, M.T. Mechanical Properties of a Cement Mortar Reinforced with *Arundo donax* L. Reeds. International Journal of Civil and Structural Engineering–IJCSE **2015**; 2(1), 305-308.
25. Garcia-Ortuño, T., Andreu-Rodríguez, J., Ferrandez-Garcia, M.T., Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-Garcia, C.E. Evaluation of the physical and mechanical properties of particleboard made from giant reed (*Arundo donax* L.). BioRes **2011**; 6(1), 477-486.
26. Imam, S.H., Gordon, S.H., Mao, L., Chen, L. Environmentally friendly wood adhesive from a renewable plant polymer: Characteristics and optimization. Polym Degrad Stab **2001**; 73(3), 529-533.
27. El-Wakil, N.A., Abou-Zeid, R.E., Fahmy, Y., Mohamed, A.Y. Modified wheat gluten as a binder in particleboard made from reed. J. Appl Polym Sci **2007**; 106(6), 3592-3599.
28. Ciannamea, E.M., Stefani, P.M, Ruseckaite, R.A. Medium-density particleboards from modified rice husks and soybean protein concentrate-based adhesives. Biores Tech **2010**; 101, 818-825.
29. Moubarik, A., Allal, A., Pizzi, A., Charrier, F., Charrier, B. Preparation and mechanical characterization of particleboard made from maritime pine and glued with bio-adhesives based on cornstarch and tannins. Maderas: Ciencia y Tecnología **2010**; 12(3), 189-197.
30. Wang, Z., Gu, Z., Hong, Y., Cheng, L., Li, Z. Bonding strength and water resistance of starch-based wood adhesive improved by silica nanoparticles. Carbohydrate Polymers **2011**; 86(1), 72-76.
31. Ferrandez-Garcia C.E., Andreu-Rodríguez J., Ferrandez-Garcia M.T., Ferrandez-Villena M., Garcia-Ortuño T. Panels made from giant reed bonded with non-modified starches. BioRes **2012**; 7(4), 5904-5916.
32. Widyorini, R., Xu, J., Umemura, K., Kawai, S. Manufacture and properties of binderless particleboard from bagasse I: effects of raw material type, storage methods, and manufacturing process. J Wood Science **2005**; 51(6), 648-654.
33. Pintiaux, T., Viet, D., Vandenbossche, V., Rigal, L., Rouilly, A. Binderless materials obtained by thermo-compressive processing of lignocellulosic fibers: A comprehensive review. BioRes **2015**; 10(1), 1915-1963.
34. Boon, JG., Hashim, R., Sulaiman, O., Hiziroglu, S., Sugimoto, T., Sato, M. Influence of processing parameters on some properties of oil palm trunk binderless particleboard. Holz Roh Werkst **2013**; 71(5), 583–589.
35. Proietti, S., Moscatello, S., Fagnano, M., Fiorentino, N., Impagliazzo, A., Battistelli, A. Chemical composition and yield of rhizome biomass of *Arundo donax* L. grown for biorefinery in the Mediterranean environment. Biomass and Bioenergy **2017**; 107, 191-197.
36. EN 323. **1993**. Tableros derivados de la madera. Determinación de la densidad. Madrid. España.
37. EN 317. **1993.** Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación del hinchamiento en espesor tras 24 horas de inmersión en agua. Madrid. España.
38. EN 310. **1993**. Tableros derivados de la madera. Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión. Madrid. España.
39. EN 319. **1993**. Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las caras del tablero. Madrid. España.
40. EN 312. **2010**. Tableros de partículas. Especificaciones. Madrid. España.
41. Hegazy, S., Ahmed, K. Effect of date palm cultivar, particle size, panel density and hot water extraction on particleboards manufactured from date palm fronds. Agriculture **2015**; 5(2), 267-285.

42. Saadaoui, N., Rouilly, A., Fares, K., Rigal, L. Characterization of date palm lignocellulosic by-products and self-bonded composite materials obtained thereof. Materials and Design **2013**; 50, 302-308.
43. Hashim, R., Wan Nadhari, WNA., Sulaiman, O., Kawamura, F., Hiziroglu, S., Sato, M., Sugimoto, T., Seng, TG., Tanaka, R. Characterization of raw materials and manufactured binderless particleboard from oil palm biomass. Materials and Desing **2011**; 32, 246-252.
44. Ferrandez-Garcia, A., Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-Garcia, C.E., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, M.T. Potential use of Phoenix canariensis biomass in binderless particleboards at low temperature and pressure. BioRes **2017**;12(3), 6698-6712.
45. Ferrandez-Garcia, C.C., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, M.T., Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-Garcia, C.E. Fire-resistance, physical, and mechanical characterization of binderless rice straw particleboards. BioRes **2017**; 12(4), 8539-8549.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Determinación de la influencia del contenido de humedad en el coeficiente de rozamiento interno de microesferas de cristal mediante ensayos de corte directo

F. Gallego-Gómez[1], Manuel Moya[2]

[1] Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid (ICMM, CSIC). C/ Sor Juana Inés de la Cruz, 3, 28049 Cantoblanco (Madrid); francisco.gallego@icmm.csic.es

[2] Universidad de Extremadura. Centro Universitario de Plasencia. Avda. Virgen del Puerto nº 2, 10600 Plasencia (Cáceres); manuelmi@unex.es

Resumen: En este trabajo se realizaron ensayos de corte directo para determinar las curvas tensión-deformación de microesferas de cristal en un amplio intervalo de humedades. De esta forma se pudo determinar la variación del ángulo de rozamiento interno del material con la humedad. Además, se estudió la variación de la densidad del material, expresada como fracción sólida, con la carga normal aplicada y la humedad. En general, se determinó que, para cada una de las cargas normales aplicadas, que variaban entre 3,4 y 350 kPa, la fracción sólida oscilaba entre 0,47 y 0,74, aproximadamente, aumentando progresivamente hacia valores asintóticos a medida que la carga normal aumentaba. Por otro lado, se observó que la fracción sólida alcanzaba valores muy altos en condiciones secas (0,69-0,74), disminuía sensiblemente (0,48-0,68) al comenzar a añadirle agua en un intervalo bajo de humedad (0,1-5%), y aumentaba claramente a humedades elevadas, entre el 17 y el 20% (0,59-0,69 a H = 20%). Por su parte, de los ensayos de corte directo llevados a cabo se pudo comprobar que para bajos contenidos de humedad el material dilataba, mientras que éste se compactaba a altas humedades. Finalmente, se obtuvieron dos ángulos de rozamiento diferentes dependiendo de la región de carga normal aplicada, uno para cargas normales elevadas, entre 100 y 250 kPa, el otro para cargas normales bajas comprendidas entre 0 y 80 kPa.

Palabras clave: material granular, propiedades mecánicas, densidad, capilaridad, fracción sólida

1. Introducción

Hace mucho tiempo que se tiene constancia de la relación que existe entre el contenido de humedad y las propiedades mecánicas de materiales granulares. En condiciones de humedad las moléculas de agua se insertan entre los granos a través de las fuerzas de capilaridad, afectando de esta manera a la cohesión y al rozamiento del material [1-3]. De hecho, la cantidad de líquido presente en el medio granular determina el número y la forma de los puentes de capilaridad que se establecen entre los granos y, por lo tanto, los estados pendular, funicular y de capilaridad que se puedan dar. En ese sentido, a medida que un determinado material pasa de un estado húmedo a otro seco, o viceversa, se crean o se destruyen uniones capilares/puentes capilares/puentes líquidos entre partículas, determinando el comportamiento cohesivo del material, aspecto que se está investigando en los últimos años [4-7]. Además, es especialmente interesante comprender bien el comportamiento de material en las transiciones entre los

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3418

regímenes de humedad existentes, lo que ocurre habitualmente cuando se añaden muy pequeñas cantidades de agua que permiten alcanzar el régimen pendular, que determina el paso del estado seco al húmedo, o como ocurre en el paso del régimen funicular al de capilaridad cuando se dan condiciones de humedad próximas a las del estado de saturación. La aparición de las fuerzas de capilaridad entre partículas provoca resistencia a la tracción que afecta significativamente a la densidad del medio granular húmedo y su compactación cuando se somete a una carga externa. Estos aspectos determinan la resistencia a tracción, el rozamiento entre partículas, el papel lubricante del agua, la fracción sólida en el medio, etc., rigiendo el comportamiento de materiales granulares sometidos a tensiones normales y tangenciales, lo cual posee gran interés para una gran cantidad de campos naturales, científicos e industriales, desde la geología a la tecnología de materiales pulverulentos.

A pesar de lo expuesto en el párrafo anterior, habitualmente la investigación de las características mecánicas de materiales granulares y pulverulentos se limita al empleo de muestras secas [8-10] y, más raramente, pues hay relativamente muy pocos estudios al respecto, se centran en el estudio de la humedad empleando principalmente cantidades intermedias de líquido (habitualmente en el estado pendular, rara vez hasta el estado funicular) [11-13], olvidándose de lo que ocurre en las transiciones a contenidos de humedad muy bajos o muy altos, que es lo que ocurre en condiciones reales, como es el caso de las muestras de material granular no consolidadas. Por lo tanto, en la actualidad existe una carencia en la comprensión del comportamiento mecánico de materiales granulares húmedos no consolidados especialmente en contenidos de humedad críticos. Por este motivo, en este trabajo se va a realizar un estudio para determinar la influencia de la humedad en la resistencia al corte de microesferas de cristal de tamaño en torno a 100 μm, así como para conocer cómo influye ésta en la variación de la densidad de dicho material con la carga normal aplicada. La información que se obtenga puede ser de gran utilidad para diversas aplicaciones prácticas, desde el manejo de un determinado material granular a la evaluación del riesgo de materiales geológicos o habitualmente utilizados en la ingeniería civil.

2. Materiales y métodos

Como se ha comentado en el párrafo anterior, para la realización del presente trabajo se utilizaron microesferas de cristal de tamaño medio aproximado de 100 μm. Este material se utiliza frecuentemente como aditivo en multitud de aplicaciones, tales como adhesivos, masillas, revestimientos, resina epoxy, etc., permitiendo que el producto final que se obtiene pueda mejorar sus condiciones (protección frente a caídas, aislamiento térmico y auditivo, rigidez, reducción de la densidad, etc.)

2.1. Preparación de la muestra

Para la realización de los ensayos, en primer lugar se procedió a lavar repetidamente el material utilizado con agua destilada para eliminar las impurezas que pudiera contener éste, procediendo al secado de éste en estufa a 120º C durante 6 días, cribándolo posteriormente en un tamiz con tamaño de abertura de 220 μm para eliminar los posibles agregados que pudieran haberse formado. Para certificar la ausencia de impurezas en la muestra, así como la suavidad de la superficie de las microesferas y la esfericidad de la mayoría de ellas, se escaneó todo el material en un microscopio electrónico (SEM). De esta manera, una vez que se añadió el líquido, pudieron descartarse los mecanismos cohesivos distintos de las fuerzas de capilaridad, como las fuerzas físico-químicas o la cementación química. Las superficies de los cristales son duras e insolubles en líquidos humectantes, como el agua, y a la vez el tamaño medio de las microesferas es suficientemente grande como para despreciar las fuerzas de Van der Waals o las

fuerzas electrostáticas, pero suficientemente pequeñas como para despreciar la fuerza gravitatoria en presencia de los puentes de capilaridad.

Para humedecer la muestra se utilizó agua destilada en laboratorio. El contenido de humedad se expresa como el porcentaje del peso de agua añadida con respecto al peso total (agua y microesferas). La cantidad de muestra elegida fue la misma en todos los ensayos llevados a cabo (250 g), de modo que en un recipiente cerámico se depositaba ésta y se añadía la cantidad de agua necesaria para los distintos puntos de humedad que se deseaban ensayar, mezclando bien mediante movimientos circulares y durante un tiempo suficiente, alrededor de 10 minutos, para homogeneizar la muestra resultante utilizando para ello una varilla de cristal. En el proceso de homogeneización de la muestra se evitó en todo momento presionar a la muestra contra las paredes o el fondo del recipiente, o realizar movimientos excesivamente rápidos para que no se compactara ésta. El intervalo de humedad obtenido finalmente osciló entre el 0,1% y el 22%. No se pudieron ensayar humedades superiores al 22% porque se producía una fase de separación del material, lo que denotaba que se alcanzaba el estado de saturación del material granular.

Durante la realización de los distintos ensayos se minimizó en todo momento la exposición de la muestra a la humedad y temperatura ambientes (la humedad relativa del aire fue inferior en todos los casos al 30%). Además, tras completar cada tanda de ensayos con una misma muestra, ésta era depositada en el interior de una estufa para proceder a su secado a una temperatura de 105-110º C durante 24 horas.

2.2. Densidad del material

La densidad de la muestra fue determinada para todos los intervalos de humedad previstos, incluyendo el caso seco (0% de humedad). Para ello se utilizó la fracción sólida, definida como la relación entre el volumen de las microesferas de cristal y el volumen total de la muestra en condiciones de humedad, tal como se muestra en la expresión 1:

$$f = \frac{V_{microesferas}(cm^3)}{V_{Total}\,(cm^3)} = \frac{\frac{Peso\ seco\ (g)}{\rho_s(\frac{g}{cm^3})}}{V_{Total}\,(cm^3)} \quad (1)$$

Siendo

f = fracción sólida, expresada en tanto por uno

ρ_s la densidad de las microesferas totalmente secas. Su valor, aplicando el método del picnómetro, es de 2,55 g/cm^3.

$V_{microesferas}$ = volumen de la muestra de microesferas secas utilizadas en cada ensayo de corte directo, expresado en cm^3.

V_{total} = volumen total ocupado por la muestra de microesferas para cada estado de humedad ensayado, expresado en cm^3.

Se trata de un parámetro indicativo de la compactación de la muestra antes de la realización de los ensayos de corte directo. Para su determinación, la muestra, a la que se le había añadido previamente la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad prevista en cada caso, se colocó en el interior de una caja de corte circular de 10 cm de diámetro, procediendo a medir la altura inicial alcanzada por ella en el interior de la caja de corte. A partir de ese momento la muestra fue sometida a diferentes presiones normales que variaban en un intervalo entre 0 y 350 kPa, incrementando la carga aplicada una vez que la muestra se consolidada a la carga aplicada en ese momento. El descenso provocado en la altura de la muestra situada en el interior de la caja de corte como consecuencia de la compactación sufrida por ésta al aplicarle los diferentes escalones de carga normal fue determinado mediante un sensor de desplazamiento, de modo que con la aplicación informática utilizada para tal efecto se conocía perfectamente dicha altura del material y, por lo tanto, el volumen ocupado por la muestra húmeda en cada escalón.

2.3. Ensayo de corte directo

En el laboratorio de geotecnia del Centro Universitario de Plasencia se dispone de un aparato de corte directo semiautomático con el que se realizaron los ensayos previstos en el presente trabajo y que es el que se muestra en la figura 1:



Figura 1. Aparato de corte directo utilizado en el laboratorio de geotecnia del Centro Universitario de Plasencia

En el presente trabajo se utilizó la caja de corte circular de 10 cm de diámetro y 3 cm de altura, cumpliéndose así el requisito de que la relación entre el tamaño de la caja y el tamaño medio de las partículas de la muestra utilizada sea superior a 40 para evitar el efecto escala. Para el desarrollo del ensayo, en primer lugar se procedió al llenado de la caja de corte con la muestra de microesferas humedecidas previamente al punto de humedad que se deseaba ensayar en cada momento, evitando el uso de técnicas de vibrado o de tapeo para no compactar la muestra. Una vez distribuida ésta uniformemente por toda la superficie de la caja de corte se colocaban sobre ella una piedra porosa, una rejilla, además de la propia tapa, piezas todas ellas del mismo diámetro, aplicando así una carga vertical inicial de 3,43 kPa (que era la primera carga vertical considerada). Sobre la tapa se colocaba un sensor de desplazamiento vertical y, a su vez, una célula de carga proporcionaba la fuerza tangencial que se iba aplicando en cada momento, permitiendo obtener así la relación entre la deformación horizontal y la tensión tangencial, además de conocer la deformación vertical de la muestra. La velocidad de ensayo fue 0,63 mm/min y el desplazamiento máximo permitido de 12 mm, ambos suficientes para que se produjera la rotura del material en el menor tiempo posible, evitando así que se pudiera secar la

muestra en la serie completa realizada a las distintas cargas normales ensayadas. Con esta primera carga se procedió a realizar el ensayo de corte directo, de modo que una vez finalizado éste se repetía el proceso vaciando con sumo cuidado la caja de corte para no perder material, volviendo a colocarlo en su interior de forma similar a la descrita anteriormente, colocando dicha caja en el carro del aparato de corte directo, poniendo la piedra porosa, la rejilla y la tapa y colocando para la siguiente y sucesivas cargas crecientes el bastidor que posee un brazo multiplicador de carga (se seleccionó la posición de multiplicar por 10 dicha carga) y un juego de pesas para alcanzar la presión vertical deseada en cada caso. En total se establecieron entre 8 y 10 escalones de carga en función del contenido de humedad de la muestra, alcanzando en todo caso una presión normal máxima de 350 kPa, como se comentó anteriormente. El ensayo se repitió dos veces para cada una de las cargas verticales consideradas con el fin de obtener un valor medio fiable.

Para cada uno de los puntos de humedad seleccionados, una vez realizada la serie completa de cargas verticales prevista para ellos, con los datos proporcionados por la célula de carga y el transductor de desplazamiento vertical, además del conocimiento que se tenía sobre la velocidad de corte seleccionada (deformación horizontal), se pudo representar la envolvente de Mohr-Coulomb, determinando así el ángulo de rozamiento interno del material y la cohesión aparente. Además, pudieron representarse las curvas tensión-deformación horizontal y las de deformación vertical-deformación horizontal, como se verá en la siguiente sección dedicada a la exposición de resultados su posterior discusión.

3. Resultados y discusión

3.1. Fracción sólida

En primer lugar se van a mostrar los resultados obtenidos para la fracción sólida de las microesferas de cristal. En la figura 2 se observa la tendencia general seguida cuando se representa la fracción sólida en el eje de ordenadas, expresada en tanto por uno, y la presión normal (en kPa), en el eje de abscisas. En este caso concreto la humedad aplicada a la muestra era del 10%. Resultados bastante similares se han obtenido para esta misma muestra con contenidos de humedad diferentes, variando éste entre el 0,5% y el 22%.

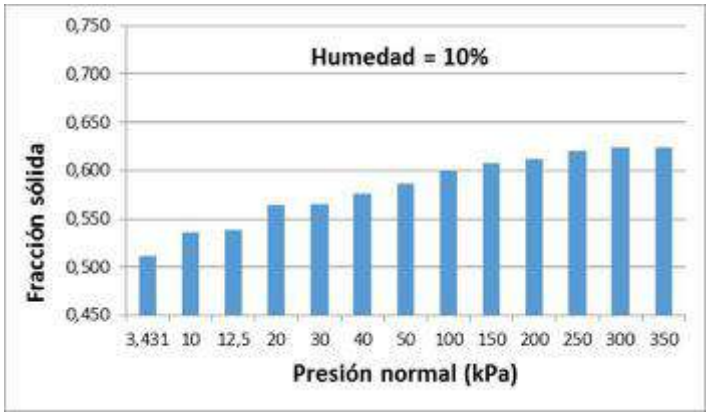


Figura 2. Variación de la fracción sólida con la presión normal aplicada para muestra humedecida al 10%

Como se puede observar en la gráfica anterior, la fracción sólida va creciendo más o menos uniformemente a presiones bajas y su tendencia se va suavizando hasta tender a un valor asintótico a presiones elevadas. Este comportamiento es lógico teniendo en cuenta que a medida que se aplican cargas mayores la muestra se va compactando pero lo hace un poquito menos cada vez porque el volumen de aire que hay dentro de la muestra va siendo menor a medida que aumenta la presión normal aplicada, como se corrobora en [14].

Por su parte, la figura 3 muestra la variación de la fracción sólida con el contenido de agua, en los puntos de humedad seleccionados para tal fin, y para cada una de las presiones normales aplicadas a la muestra.

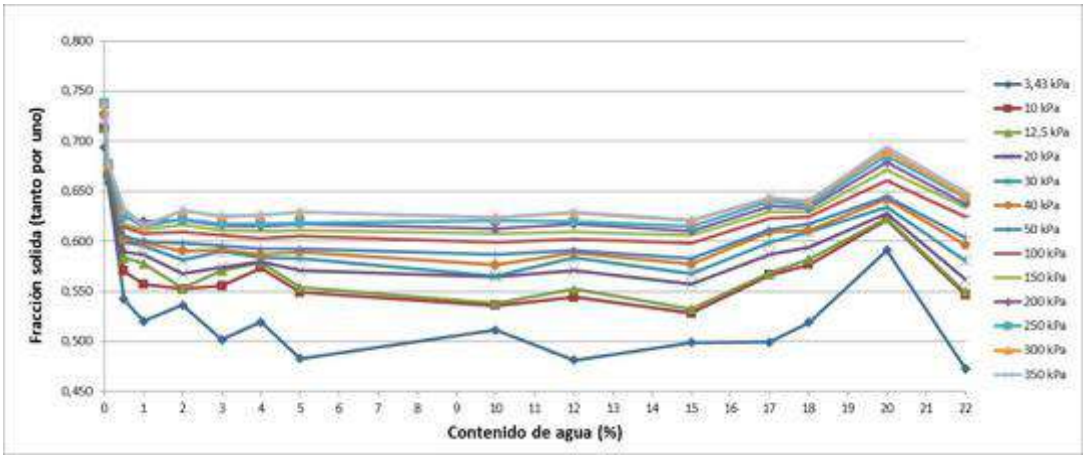


Figura 3. Variación de la fracción sólida con la humedad para cada una de las presiones normales aplicadas a la muestra

De entrada, en esta figura se corrobora que la fracción sólida varía claramente en función de la humedad que posee la muestra en cada momento. Como se puede observar, si partimos de los valores obtenidos para este parámetro con la muestra totalmente seca (0% de humedad), que oscilan entre 0,69 y 0,74, dichos valores disminuyen sensiblemente con contenidos de humedad muy bajos (en el intervalo comprendido entre el 0,1 y el 5%, aproximadamente, según casos), oscilando éstos entre 0,48 y 0,68. Para humedades más elevadas, entre el 5 y el 15% de agua, aproximadamente, la fracción sólida se estabiliza experimentando leves subidas o bajadas en su valor en función de la carga normal aplicada, incrementándose su valor a partir del 15% y alcanzando un valor "pico" al 20% de humedad (valor que en ningún caso supera al alcanzado con la muestra totalmente seca), oscilando en este punto entre 0,59 y 0,69, valor que va disminuyendo seguidamente de manera sensible al 22% de humedad, situándose entre 0,47 y 0,65.

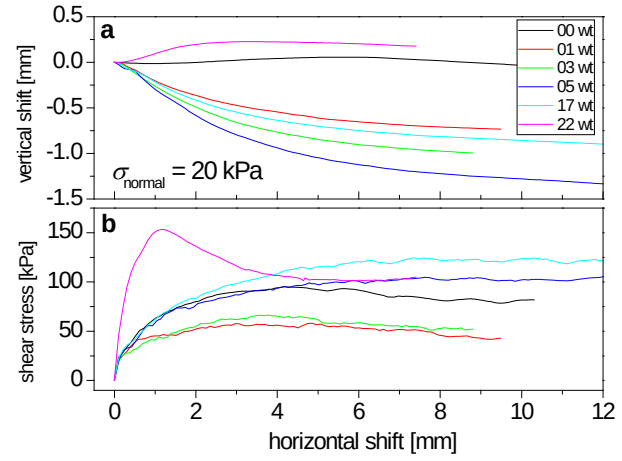
De manera semicuantitativa la dependencia de la fracción sólida con respecto a la humedad podría explicarse considerando el número y la distribución de los puentes de capilaridad que se crean por la adición de agua. En condiciones totalmente secas, f alcanza un valor de 0,69 para una tensión normal de 3,43 kPa, llegando a un valor de 0,74 a 350 kPa. Sin embargo, estos valores pasan a ser de 0,66 y 0,68 para una tensiones normales de 3,43 y 350 kPa, respectivamente, con una cantidad mínima de agua (0,1%, a temperatura ambiente). Esto es lógico pues en condiciones secas no existen fuerzas cohesivas significativas entre las esferas presentes en la muestra, estando ésta relativamente suelta de manera aleatoria, mientras que con la aplicación de una pequeña carga normal (3,43 kPa) se logra una la ligera compactación del material, comenzando a crearse arcos estables entre las diferentes partículas, incrementando la cantidad de poros grandes [15]. El claro descenso de f, por debajo de 0,48 al 5% de humedad, sugiere que la baja viscosidad y la gran tensión superficial del agua le asignen un papel fundamental a las fuerzas de capilaridad atractivas (y, por lo tanto, a la aparición de estructuras granulares sueltas sostenidas por el rozamiento estático entre partículas) sobre los efectos de la lubricación en los puntos de contacto entre partículas.

Por el contrario, a humedades más altas se forman puentes de líquido entre las esferas y, por lo tanto, las cada vez mayores tensiones tangenciales que se producen a continuación en el material llevan a una compactación progresiva y global de éste. Esta tendencia se produciría hasta llegar al 20% de humedad, pues a humedades superiores se alcanza la saturación del

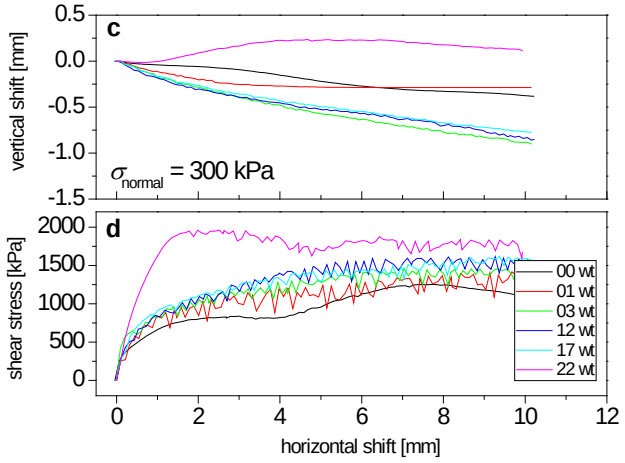
material. Este hecho puede atribuirse al comienzo de coalescencia de los puentes líquidos y la ocupación por el líquido de los huecos entre partículas, lo que lleva a una incipiente de la succión capilar (o presión de Laplace) dentro del material, dando paso al denominado régimen funicular. Finalmente, al continuar con la adición de agua, los huecos que quedan entre las esferas son ocupados por ésta y la cohesión del material se induce sólo por la succión capilar en la superficie externa, alcanzando el estado capilar. En consecuencia, la resistencia a tracción del material disminuye posteriormente y así lo hace también la compactación, hasta f = 0,47. Se ha de tener en cuenta que, al compararlo con el estado seco, la presencia de agua en abundancia entre las esferas induce una separación adicional de las partículas sólidas, disminuyendo la fracción sólida a pesar de la succión capilar (que es nula en el material granular seco).

3.2. Ensayo de corte directo

Las curvas tensión-deformación obtenidas a partir de los ensayos de corte directo llevados a cabo muestran una tendencia clara en función del contenido de agua y la tensión normal aplicada, y lo mismo ocurre con las curvas de deformación obtenidas (deformación vertical frente a desplazamiento horizontal), tal como se aprecia en la figura 4.



(a)



(b)

Figura 4. Curvas tensión-deformación (gráfica inferior) y curvas de deformación (gráfica superior) en función de la humedad y de la tensión vertical aplicadas obtenidas en los ensayos de corte directo a) Tensión normal de 20 kPa. b) Tensión normal de 300 kPa.

En la figura anterior, las dos gráficas de deformación parecen mostrar la dependencia de la deformación experimentada por la muestra con la densidad de ésta, parámetro que fue tratado en el apartado anterior. Así, mientras las muestras en seco mostraban una cierta dilatación (d>0), algo típico en los sistemas granulares densos [8, 9], con las muestras húmedas el comportamiento es el opuesto, es decir, se va comprimiendo la muestra (d<0) a medida que se va produciendo el corte ya que la baja fracción sólida dejaba espacios vacíos para que se pudieran acomodar las partículas que estaban en movimiento. Sin embargo, para grandes humedades el grado de compactación disminuye hasta que, al final, la muestra dilata claramente en el estado de capilaridad (H=22%), lo que puede atribuirse a la gran cantidad de agua que ocupa los huecos vacíos que hay entre las partículas sólidas. Estas tendencias se acentúan a bajas tensiones normales, mientras que con tensiones normales mayores se induce una mayor densidad de la muestra, reduciéndose por lo tanto el grado de compactación experimentado durante el corte.

Por su parte, las curvas tensión-deformación mostraron de manera general un pequeño pero progresivo incremento de la resistencia al corte a medida que se iba produciendo éste tendiendo a un valor máximo asintótico, casi constante. En general, la resistencia al corte aumentaba con la humedad, especialmente en el caso de bajas tensiones normales, en el que la dependencia de la fracción sólida con respecto a la humedad parece ser clave (figura 4a), mientras que esta influencia era menor a mayores tensiones normales (figura 4b). Por otro lado, con muestra seca (H = 0%) la tensión tangencial alcanzada era intermedia a bajas tensiones normales pero fue la menor a tensiones normales elevadas. Este comportamiento puede justificarse si se tiene en cuenta tanto la configuración de la muestra seca en comparación con la de las muestras húmedas como la ausencia de la resistencia a tracción en el caso seco. Por un lado, a bajas tensiones normales la muestra seca densa puede mostrar mayor resistencia al corte que la ofrecida por las muestras húmedas sueltas hasta que la resistencia a tracción de las últimas sea suficientemente alta al aumentar la humedad. Por otro lado, a mayores tensiones normales la densidad de las muestras, tanto la de la seca como las de las húmedas, es similar, lo que unido a la ausencia de resistencia a tracción facilita el corte de las muestras secas. Por su parte, la muestra saturada (H = 22%) mostró una curva de corte claramente diferente a las anteriores pues en ella la tensión tangencial alcanzó rápidamente un valor pico a desplazamientos horizontales bajos (> 2 mm), disminuyendo inmediatamente después y estabilizándose relativamente a desplazamientos horizontales más altos (tendiendo a un valor asintótico inferior en cualquier caso al máximo alcanzado anteriormente). A su vez, al analizar lo que ocurre con la curva de deformación vertical en condiciones de saturación se puede comprobar que el comportamiento de la muestra difiere sensiblemente de la tendencia que se observa con muestras a humedades inferiores ya que en este caso la muestra dilata en todo momento, incrementándose el grado de dilatación a bajos desplazamientos horizontales y suavizándose esta tendencia a medida que éstos aumentan.

La evolución de las tensiones tangenciales de las muestras ensayadas a medida que avanzaban los ensayos se produjo de manera bastante suave a bajas tensiones normales, hasta los 100 kPa, aproximadamente, pero a tensiones normales superiores las curvas obtenidas se tornaron más irregulares, experimentando los valores de la tensión tangencial rápidos ascensos y descensos a pequeños incrementos del desplazamiento horizontal (lo que en la terminología anglosajona se denomina fenómeno "slip-stick"), fenómeno que ocurre con bastante asiduidad durante el corte de medios granulares cuando se aplican cargas elevadas [16-18]. La única excepción a este comportamiento se produjo con la muestra totalmente seca (H = 0%), incluso cuando para ésta se aplicaban las tensiones normales máximas (350 kPa). En el caso de muestra saturada (H = 22%) también se observó este fenómeno si bien en este caso las caídas en los valores de la tensión tangencial no eran tan bruscas.

La figura 5 muestra las envolventes de Mohr-Coulomb obtenidas a partir de la media de los valores máximos alcanzados para la tensión tangencial en los distintos ensayos de corte directo realizados a diferentes tensiones normales y a distintas humedades. La pendiente de las diferentes envolventes proporciona el valor del ángulo de rozamiento interno para cada caso, mientras que el punto en el que éstas cortan al eje de ordenadas determina el valor de la cohesión aparente del material.

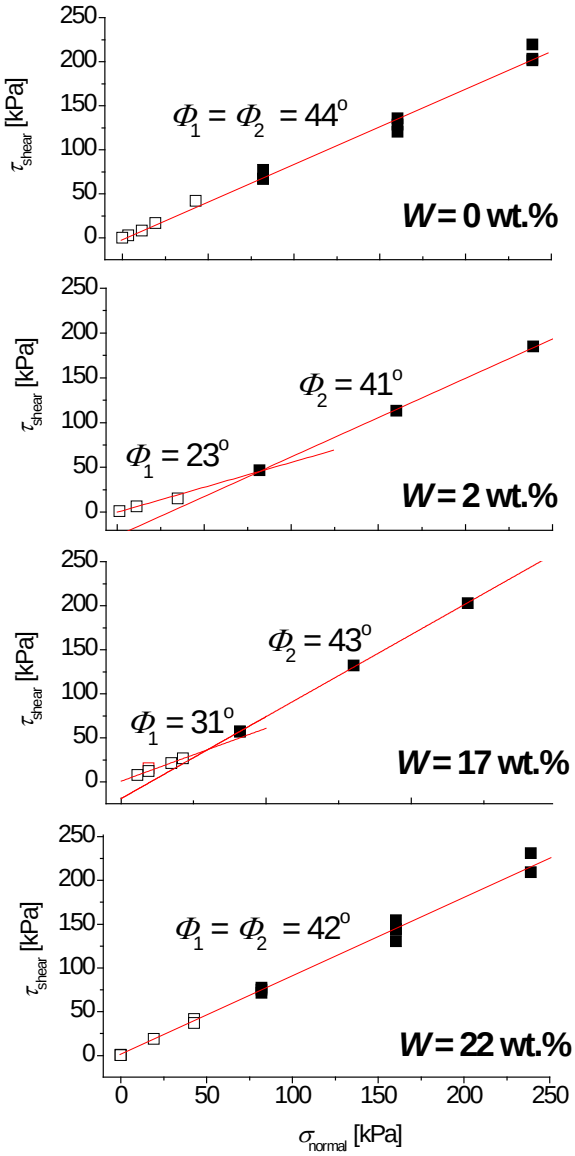
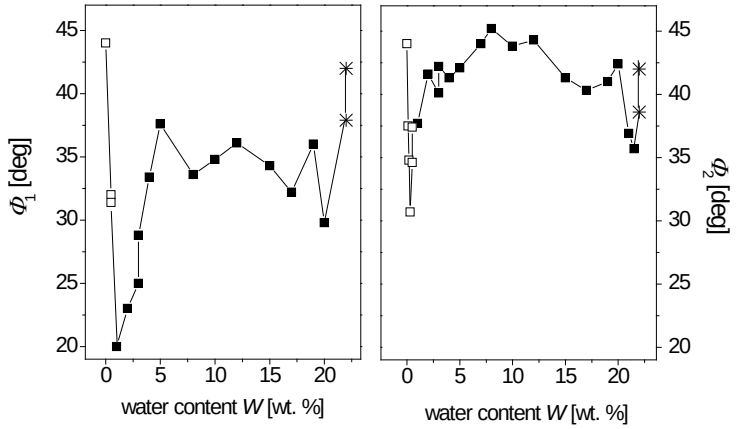


Figura 5. Envolventes de Mohr obtenidas a distintas humedades.

De la figura 5 se deduce que tanto para la muestra seca (H = 0%) como para la muestra saturada (H = 22%) se obtiene una única recta, proporcionando valores del ángulo de rozamiento interno de 44º y 42º, respectivamente. Sin embargo, para valores intermedios de humedad se manifiestan dos tendencias diferenciadas, una a bajas tensiones normales (entre 3,43 y 80 kPa) y otra a altas tensiones normales (entre 100 y 250 kPa), obteniéndose por lo tanto dos valores diferentes para el ángulo de rozamiento interno en estas condiciones, a los que denominaremos ϕ_1 y ϕ_2, respectivamente, oscilando éste entre 20 y 45º en los distintos intervalos de humedad ensayados. Los valores más altos del ángulo de rozamiento interno aquí obtenidos

son en general superiores a los obtenidos con materiales agrícolas granulares y pulverulentos [8-10].

La figura 6 muestra la variación del ángulo de rozamiento interno con el contenido de humedad. La imagen de la izquierda es para bajas tensiones normales, donde se obtiene ϕ_1, mientras que la figura de la derecha corresponde a altas tensiones normales, donde se obtiene ϕ_2.



(a) (b)

Figura 6. Variación del ángulo de rozamiento interno con la humedad. a) Para bajas tensiones normales (ϕ_1). b) Para altas tensiones normales (ϕ_2).

De la figura anterior se deduce que a bajas humedades la pendiente de la envolvente de Mohr-Coulomb tendía a suavizarse, especialmente notable para una humedad del 1%, para la que el ángulo de rozamiento interno obtenido fue de 20º, menos de la mitad de los 44º obtenidos para la muestra seca (H = 0%). Este descenso se debe a que con una pequeña adición de agua se favorece el corte de la muestra, disminuyendo la resistencia ofrecida por ésta. Por esta misma razón, a bajas tensiones normales los valores obtenidos para ϕ en materiales granulares no consolidados siempre fueron menores con muestras humedecidas moderadamente, si bien en estos casos el valor del ángulo de rozamiento interno fue mayor que el obtenido al 1% de humedad.

Por su parte, al analizar lo que ocurre con el ángulo de rozamiento interno a tensiones normales elevadas (Φ_2), se constata igualmente su dependencia de la humedad pero con algunas diferencias significativas con respecto a lo observado a bajas tensiones normales. Así, el valor mínimo es mayor que el obtenido en el caso anterior (30º a H = 0,5%) y a humedades intermedias los valores obtenidos eran más parecidos a los máximos alcanzados en los extremos y, por lo tanto, generalmente superiores a los obtenidos en materiales agrícolas granulares y pulverulentos [8-10]. Además, a elevadas tensiones normales la humectación del material granular no consolidado no conlleva necesariamente una reducción de la resistencia al corte, como ocurría a bajas cargas normales.

4. Conclusiones

La determinación de las propiedades mecánicas de materiales granulares en distintas condiciones de humedad es esencial en ámbitos tan diversos como la geología, la ingeniería civil, la industria farmacéutica o las industrias agrarias, entre otros. De estas propiedades dependerán tanto la seguridad de las instalaciones correspondientes en las que se almacenen, como los costes de las operaciones de manejo, pues éstos pueden variar sensiblemente en

función de la eficiencia de los procesos correspondientes. A pesar de esto, son muy pocos los estudios científicos realizados hasta el momento sobre esta cuestión, por lo que se hace preciso investigar más a fondo.

A tenor de los ensayos llevados a cabo en este trabajo se puede concluir que la fracción sólida depende de la humedad a la que se encuentre sometida la muestra correspondiente, hallándose intervalos de humedad en los que este parámetro oscila sensiblemente. En general, se observa que el valor obtenido para este parámetro es máximo con muestras totalmente secas, alcanzando valores entre 0,69 y 0,74. Entre el 0,1 y el 5% de humedad la fracción sólida cae sensiblemente con respecto a los valores obtenidos en condiciones totalmente secas (0,48-0,68), permaneciendo más o menos estable a humedades intermedias (5-15%), para aumentar al 20% de humedad (0,59-0,69) y disminuir finalmente en condiciones de saturación (0,47-0,65 al 22% de humedad).

De los ensayos de corte directo realizados cabe destacar, en primer lugar, la relación de dependencia que se observa entre el ángulo de rozamiento interno y la humedad de la muestra. En las envolventes de Mohr-Coulomb obtenidas en las muestras secas y saturadas (0 y 22% de humedad, respectivamente) la tendencia seguida fue la de una única recta, obteniéndose ángulos de rozamiento interno de 44º y 42º, respectivamente. Sin embargo, a humedades intermedias (0,1-20%) se observaron dos tendencias diferentes en la curva, una a bajas tensiones normales (0-80 kPa) y otra a elevadas tensiones normales (100-250 kPa), dando lugar a dos ángulos de rozamiento (ϕ_1 y ϕ_2, respectivamente). A cargas normales bajas, para una humedad del 1% se obtuvo un valor mínimo $\phi_1 = 20º$, aumentando progresivamente los valores de ϕ con la humedad en intervalos intermedios de esta última (2-20%), mientras que para una humedad del 0,5% se obtuvo un valor mínimo $\phi_2 = 30º$, encontrándose los valores correspondientes de ϕ a humedades intermedias en valores parecidos a los obtenidos al 0 y 22% de humedad.

Referencias

1. Davies R.M., El-Okene A.M. Moisture-dependent physical properties of soybeans. International Agrophysics. 2009, 23, 299-303.
2. Frye K.M., Marone C. Effect of humidity on granular friction at room temperature. Journal of Geophysical Research. 2002, 107(11), 13 pp.
3. Nokhodchi A. An overview of the effect of moisture on compaction and compression. Pharmaceutical Technology. 2005, 29(1), 46-66.
4. Delenne J.Y., El Youssoufi M.S., Cherblanc F., Bénet J.C. Mechanical behavior and failure of cohesive granular materials. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2004, 28, 1577-1594.
5. Delenne J.Y., Soulié F., El Youssoufi M.S., Radjai F. From liquid to solid bonding in cohesive granular media. Mechanics of Materials. 2011, 43, 529-537.
6. Topin V., Delenne J.Y., Radjai F., Brendel L., Mabille F. Strength and fracture of cemented granular matter. The European Physical Journal E. 2007, 23, 413-429.
7. Jiang M., Yu H., Harris D. Bond rolling resistance and its effect on yielding of bonded granulates by DEM analyses. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2006, 30(8), 723-761.
8. Moya M., Ayuga F., Guaita M., Aguado, P.J. Mechanical properties of granular agricultural materials. Transations of the ASAE. 2002, 45(5), 1569-1577.
9. Moya M., Guaita M., Aguado P.J., Ayuga, F. Mechanical properties of granular agricultural materials. Part 2. Transactions of the ASABE. 2006, 49(2), 479-489.
10. Ramírez A., Moya M., Ayuga F. Determination of the mechanical properties of powdered agricultural products and sugar. Particle and Particle Systems Characterization. 2009, 26(4), 220-230.
11. Louati H., Oulahna D., de Ryck A. Apparent friction and cohesion of a partially wet granular material in steady-state shear. Powder Technology. 2015, 278, 65-71.

12. Landi G., Barletta D., Poletto M. Modelling and experiments on the effect of air humidity on the flow properties of glass powders. Powder Technology. 2011, 207, 437-443.
13. Zhang H., Wan Z., Ma D., Zhang B., Zhou P. Coupled effects of moisture content and inherent clay minerals on the cohesive strength of remodeled coal. Energies. 2017, 10, 12 pp.
14. De Bono J.P., McDowell G.R. On the packing and crushing of granular materials. International Journal of Solids and Structures. 2018, 1-8.
15. Castellanos A. The relationship between attractive interparticle forces and bulk behaviour in dry and uncharged fine powders. Advances in Physics. 2005, 54(4), 263-376.
16. Richefeu V., El Youssoufi M.S., Radjai F. Shear strength properties of wet granular materials. Physical Review E. 2006, 73(5), 13 pp.
17. Platonov P., Poltorak V. Investigation of shear of a granular material along a bordering surface. Powder Technology. 1970, 3, 361-363.
18. Bucklin R.A., Molenda M., Bridges T.C., Ross I.J. Slip-stick frictional behavior of wheat on galvanized steel. Transactions of the ASAE. 1996, 39(2), 649-653.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Determinación de los coeficientes de rozamiento en piezas de madera de castaño de procedencia española y su aplicación estructural

José R. Villar [1], Antonio J. Corbacho [2], Manuel Moya [1], Pablo Vidal [3]

[1] Grupo de Investigación Forestal, Departamento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, Centro Universitario de Plasencia. Universidad de Extremadura. Avda. Virgen del Puerto 2, 10600 Plasencia, Cáceres, España; jrvillar@unex.es, manuelmi@unex.es

[2] Grado en Ingeniería Forestal, Centro Universitario de Plasencia. Universidad de Extremadura. Avda. Virgen del Puerto 2, 10600 Plasencia, Cáceres, España; acorbachf@alumnos.unex.es

[3] Grupo de Investigación Ingeniería Mecánica y Fluidos, Departamento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, Escuela de Ingenierías Agrarias, Universidad de Extremadura. Av. Adolfo Suarez s/n, 06071 Badajoz, España; pvidal@unex.es

Resumen: Este trabajo presenta la determinación de los coeficientes de rozamiento tanto estático como dinámico en madera de castaño (Castanea Sativa Mill.) de origen español, así como la aplicación práctica de los resultados. La madera de frondosas está actualmente en auge para su empleo estructural, y dentro de ella la madera de castaño. Ni la normativa de cálculo ni otros estudios aportan valores para sus coeficientes de rozamiento, estando centrados principalmente en coníferas. En madera, los coeficientes de rozamiento dependen del contenido en humedad, de las propiedades anatómicas, de la dureza y del mecanizado de las superficies así como de la orientación del plano estudiado respecto a la dirección de la fibra, originando distintas rugosidades. Los planos considerados han sido los principales que define la ortotropía del material, que suelen coincidir con las caras en contacto en situaciones reales. En la realización de los ensayos se ha modificado un aparato de corte directo, máquina del ámbito de la geotecnia, para reproducir el sistema tribológico. Como valores medios se obtuvieron μ_e=0.45 para fricción estática y μ_c=0.32 para dinámica. Los valores obtenidos se han aplicado al diseño de una pasarela peatonal bajo el sistema de placa tensada, donde el rozamiento entre tablones resulta determinante en el cálculo de la misma.

Palabras clave: Tribología, Fricción, Propiedades mecánicas, Aparato de corte directo

1. Introducción

La fricción entre piezas de madera está presente en multitud de sistemas estructurales realizados con este material, desde un simple apoyo en un durmiente hasta el rozamiento entre tablones de una placa tensada, pasando por la transmisión de fuerzas en uniones entre barras de madera.

Diversos trabajos [1–7] atestiguan la importancia del conocimiento de estos coeficientes para una correcta simulación de las uniones en estructuras de madera y profundizar en el conocimiento de los mecanismos de transmisión de esfuerzos. Las situaciones descritas corresponden a rozamiento entre elementos en reposo, propio del interés estructural, pero también resulta de interés la fricción de la madera entre acoplamientos por rozamiento y en otros sistemas dinámicos.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3409

Considerando un bloque sólido simplemente apoyado en una superficie, su peso W, genera una fuerza de contacto normal a la superficie, N, de igual valor, colineal y de sentido contrario. Si actuamos horizontalmente con una fuerza P, aparece en la reacción de la superficie una componente horizontal F que es la resultante de todas las fuerzas de contacto que se producen entre el bloque y la superficie. Mientras el bloque no se mueva P se ve contrarrestada por F, al aumentar progresivamente P también aumentará F hasta llegar a un valor máximo F_{max} que se corresponde con el "punto" o "condición de deslizamiento inminente". Superado este punto la fuerza de rozamiento ya no es capaz de contrarrestar el valor de P y se produce el deslizamiento, en ese momento y de manera teóricamente instantánea el valor de F disminuye entorno a un 20 - 25 % para un gran número de materiales empleados en construcción. En este punto hablaremos de fuerza de rozamiento cinético F_c por contraposición al máximo valor de F en reposo que denominaremos fuerza de rozamiento estático o F_e. Para que el bloque se desplace a velocidad constante ha de ejercerse una fuerza de igual magnitud y de sentido opuesto a la fuerza de rozamiento cinético, esto es, si el deslizamiento se realiza a velocidad constante la fuerza ejercida es igual a F_c.

La mecánica de sólidos considera con mucha aproximación que existe una proporcionalidad directa entre F_e y N [8, 9] donde la constante de proporcionalidad recibe el nombre de coeficiente de rozamiento estático μ_e:

$$F_e = \mu_e N \qquad (1)$$

De manera similar existe una proporcionalidad entre F_c y N a través del coeficiente de rozamiento cinético μ_c:

$$F_c = \mu_c N \qquad (2)$$

Ambos coeficientes son prácticamente independientes a efectos macroscópicos del área de contacto y de la magnitud de la fuerza normal [8–11].

En el caso de superficies de madera, los coeficientes de rozamiento dependen del contenido en humedad, de la rugosidad y de las características de la superficie [12]. Estos dos últimos factores directamente relacionados con las propiedades anatómicas, la dureza de la madera y del mecanizado o tratamiento recibido por las piezas. En cuanto a las propiedades anatómicas se hace patente por la anisotropía del material, donde la orientación de la superficie estudiada respecto a las direcciones de ortotropicidad, longitudinal o paralelo a la fibra, y perpendicular a la fibra, con las direcciones radial y tangencial, da lugar a distintas rugosidades para una misma pieza.

En general los estudios se realizan para cortes ortogonales a estas direcciones principales, puesto que en muchos casos se corresponden con las superficies en contacto que se originan en el empleo de la madera. El mecanizado o tratamiento de las superficies en contacto también afectará a su rugosidad, en este trabajo se considera rozamiento entre piezas de madera aserrada.

Respecto a la humedad, para la mayoría de las especies de madera, los coeficientes de fricción aumentan con el contenido de humedad hasta alcanzar la saturación de las fibras.

La única referencia en cuanto a valores de coeficientes de rozamiento en la normativa europea de cálculo de estructuras, es en el Eurocódigo 5-Parte 2: Puentes (EC 5-2) [13] en el que se indican para su aplicación a placas de láminas tensadas, y únicamente para coníferas, Tabla 1.

Tabla 1. Valores de cálculo del coeficiente de rozamiento estático según EC5-2. Tomada de [13]

	Contenido de humedad madera (%)			
	≤12	**≥16**	**≤12**	**≥16**
Material	**Perpendicular a la fibra**		**Paralela a la fibra**	
Madera aserrada-Madera aserrada	0.3	0.45	0.23	0.35
Madera cepillada-Madera cepillada	0.2	0.4	0.17	0.3
Madera aserrada-Madera cepillada	0.3	0.45	0.23	0.35

Publicaciones de física general indican en madera valores genéricos para el coeficiente de fricción dinámico de 0.20 y 0.25-0.5 para el estático [9].

Ya en el caso de publicaciones centradas en madera, [14] recoge como valores genéricos para madera seca 0.25 a 0.7 para el coeficiente de fricción estático y 0.15 a 0.4 para el dinámico. También [12] indica de manera genérica que los coeficientes de fricción cinética para la madera lisa y seca contra superficies duras y lisas pueden variar desde 0.3 a 0.5; cuando el contenido de humedad es intermedio de 0.5 a 0.7 y cerca de la saturación de fibra, de 0.7 a 0.9. McKenzie et al [15] indica en madera-madera un coeficiente de fricción dinámico de 0.45 y un valor estático de 0.6 pero sin precisar direcciones.

Otros valores, ya teniendo en cuenta la ortotropicidad de la madera, son los reportados para el roble por Kollman, F. [16], que indica para rozamiento entre superficies paralelas a la fibra 0.62 para fricción estática y un valor dinámico de 0.48, perpendiculares a la fibra 0.54 en fricción estática y dinámica de 0.34, y por útimo rozando superficies paralelas contra perpendiculares μ_e=0,43 y μ_c=0,19.

Los valores para superficies y direcciones de rozamiento concretas generalmente provienen de investigaciones relacionadas con uniones en estructuras de madera para su empleo en simulaciones numéricas, algunos de estos valores [17–19] se emplearán en la comparación con los resultados obtenidos en este trabajo.

De la revisión bibliográfica realizada se desprende que en muchos casos los datos son ofrecidos sin especificidad de especies, y en pocas ocasiones se refieren a los distintos planos de simetría que genera la ortotropía del material. Al mismo tiempo no se han encontrado estudios relevantes para la madera de castaño, la cual es una madera ampliamente empleada en estructuras, especialmente como madera aserrada, lo que en muchos casos conlleva el empleo de uniones tradicionales o carpinteras donde el coeficiente de rozamiento tiene una alta influencia en su comportamiento.

2. Materiales y métodos

La normativa europea actual no recoge ningún método estandarizado para realizar ensayos de rozamiento, tampoco en particular para elementos de madera. Como marco de referencia se podría tomar la norma americana ASTM G-115-10 [20] que recoge recomendaciones en cuanto a la preparación de las muestras, superficies y método de ensayo, indicando de manera genérica que se reproduzca lo más fielmente posible la realidad que se desea conocer con el ensayo.

El ensayo para obtener los coeficientes de rozamiento implica poner en contacto las superficies a rozar aplicarles una carga normal (N) y registrar el desplazamiento y la fuerza (F) necesaria para producirlo. En este trabajo se expone la modificación de una máquina de ensayo ampliamente presente en los laboratorios de materiales, como es la máquina de corte directo CD, para la obtención de coeficientes de rozamiento tanto estáticos como dinámicos entre superficies de sólidos, en el caso de este trabajo especímenes de madera. El procedimiento aquí propuesto ayudaría por tanto a estandarizar el ensayo de obtención de coeficientes de rozamiento.

2.1. Implementación del ensayo

Para implementar el ensayo de rozamiento es necesario disponer los especímenes con sus caras enfrentadas de tal forma que pueda existir movimiento relativo entre ellas. Para ello resulta necesario realizar una serie de modificaciones en el aparato de corte directo hasta conseguir la configuración recogida en la Figura 1 que principalmente consiste en retirar la caja de corte y disponer los especímenes de madera tal que el especimen inferior es móvil recibiendo el empuje a través de su apoyo en el portacajas donde se aloja. Mientras que el superior se retiene contra el puente de la caja de corte, que a su vez se encuentra unido a través de un brazo a una célula de carga que capta la fuerza de retención sobre el especimen superior. La carga vertical N es conocida y se puede seleccionar a través de la disposición de las masas conocidas, que, en este caso, mediante un brazo de palanca multiplican la carga hasta los 2.5 kN sobre los especímenes. Un captador de desplazamiento registra el desplazamiento horizontal producido. El software adquiere datos continuamente de la célula de carga y del sensor LDVT permitiendo el cálculo continuo del coeficiente de rozamiento y su posterior representación para detectar μ_e y μ_c.



Figura 1. Fotografía de la disposición del ensayo.

2.2. Materiales

En este trabajo se ha empleado madera de castaño (Castanea Sativa Mill.) de procedencia española. Para cada test el specimen se compone de dos partes de iguales dimensiones, 105 x 50 x 25 mm. Estas dimensiones permiten la correcta disposición de los especímenes en el aparato modificado y permiten un recorrido de rozamiento de 20 mm que se ha comprobado suficiente para captar la estabilización de la fuerza de rozamiento que se necesita para definir μ_c. Las probetas fueron acondicionadas entorno al 12% de humedad parta realizar los ensayos.

Al mismo tiempo, la ortotropía de la madera origina distintas rugosidades en distintos planos, por lo que se han de estudiar las direcciones de los cortes según dicha anisotropía y el interés para determinadas aplicaciones.

Las superficies estudiadas, con indicación de su aplicación a superficies de contacto en uniones carpinteras, han sido las siguientes, Figura 2:

- Plano o sección transversal, perpendicular a la fibra, dos direcciones de deslizamiento; por ejemplo, en encuentros frontales en uniones en empalme de llave o uniones embarbilladas con poca inclinación:
  - dirección predominante de deslizamiento radial (según el radio de los anillos de crecimiento), (A) en la Figura 5.
  - dirección predominante de deslizamiento tangencial (a los anillos de crecimiento), (B) en la Figura 5.
- Plano o sección radial, definido por el eje y un radio del tronco:
  - dirección de deslizamiento paralela a las fibras; por ejemplo, en superficies radiales en empalmes de llave o embarbillados con poca inclinación, (C) en la Figura 5.
  - dirección de deslizamiento perpendicular a la fibra; por ejemplo, en rozamiento entre tablones que constituyen placas tensadas, (D) en la Figura 5.
- Plano o sección tangencial, tangente a los anillos de crecimiento:
  - dirección de deslizamiento paralela a las fibras; por ejemplo, en superficies tangenciales en empalmes de llave o embarbillados con poca inclinación, (E) en la Figura 5.
  - dirección de deslizamiento perpendicular a la fibra; por ejemplo, en rozamiento entre tablones que constituyen placas tensadas, (F) en la Figura 5.



Figura 2. Caras de rozamiento indicando la dirección de deslizamiento.

El número de test realizados para cada dirección se estableció entorno a 25, si bien en algún caso no se pudo alcanzar este número por la necesidad de rechazar algunos ensayos debido a comportamientos inconsistentes del especimen ensayado con respecto al del conjunto, lo que en algún caso no permitió fijar los valores de alguno de los coeficientes.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados y discusión de los test de rozamiento

Para apreciar la fase estática y dinámica del rozamiento y así determinar los valores del coeficiente estático y dinámico en cada caso, se representó la variación del coeficiente frente al desplazamiento producido en cada uno de los tests.

Como ejemplo de los test relizados, la Figura 3, muestra los gráficos de variación del coeficiente de rozamiento frente al desplazamiento producido para distintas orientaciones de las superficies y direcciones de rozamiento. Se ha representado un ejemplo de cada uno de los casos ensayados. Se puede apreciar como los gráficos reproducen el comportamiento indicado en el apartado 1, diferenciándose una región inicial que se corresponde con una situación estática y una posterior dinámica.

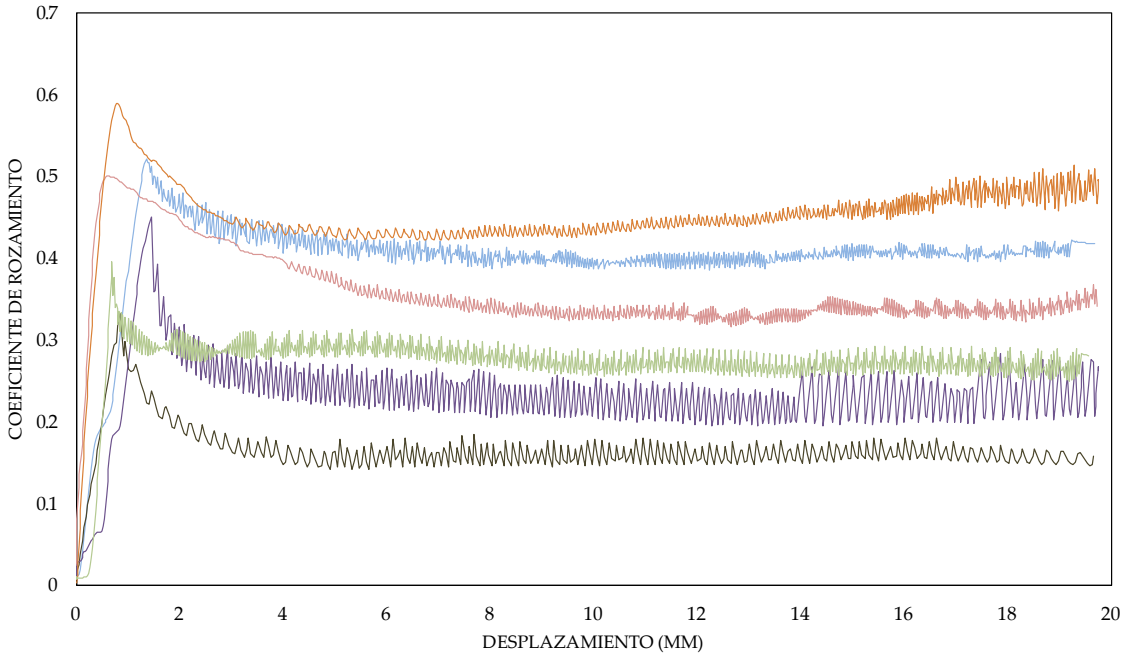


Figura 3. Ejemplos de variación del coeficiente de rozamiento frente a desplazamiento para (superficie/dirección de deslizamiento respecto a la fibra): transversal/radial; transversal/tangencial; radial/paralela; radial/perpendicular; tangencial/paralela; tangencial/perpendicular.

En la región estática se produce un incremento lineal de la fuerza de friccción, y por tanto del coeficiente asociado, hasta alcanzar el punto o pico de "desplazamiento inminente". A partir del cual se produce una inflexión en la gráfica generalmente pronunciada, dicho máximo constituye el coeficiente de fricción estático μe que se puede obtener con la Ecuación (1).

Se observa que dicho máximo aparece tras captarse un pequeño desplazamiento, inclinación del inicio del gráfico, en la mayoría de casos inferior a 1 mm, no apreciable en la realización del ensayo, atribuíble a la rotura de microsoldadudas entre superficies y a pequeñas deformaciones entre ambas partes que constituyen el especimen, algo también observado en Aira et al. [17] y a posibles ajustes en el contacto madera-metal con el puente que ejerce la retención. Esta inclinación ligera al inicio del gráfico es recogido como comportamiento típico en la norma ASTM G-115-10 [20].

Posteriormente se produce la estabilización entorno a una asíntota horizontal que constituye el coeficiente de rozamiento dinámico o cinético μ_c que se puede obtener con la Ecuación (2). También en la Figura 3 se aprecia como la mayoría de los test presentaron un ligero comportamiento "stick-slip" en este periodo dinámico, un cíclico incremento y decremento en la fuerza de fricción a medida que progresa el deslizamioento comportamiento también recogido en la norma ASTM G-115-10 [20]como posible en algunos materiales. Sin embargo, el pequeño valor de esta variación permite identificar correctamente el valor del coeficiente cinético μ_c frente al valor de μ_e.

La Tabla 2 resume los resultados obtenidos, mostrando los valores medios para los coeficientes de rozamiento estático y dinámico en función de la orientación de las superficies en contacto y la dirección de deslizamiento.

Tabla 2. Coeficiente estático y dinámico para las superficies y direcciones estudiadas. Valores medios y coeficientes de variación (CV %)

Superficie	Dirección de deslizamiento	μ_e	μ_c	μ_c/μ_e
Transversal	Radial	0.45(31.5)	0.32(32.6)	0.72
	Tangencial	0.39(36.8)	0.25(39.8)	0.63
Radial	Paralela a la fibra	0.41(30.7)	0.31(35.2)	0.76
	Perpendicular a la fibra	0.52(32.3)	0.34(40.2)	0.65
Tangencial	Paralela a la fibra	0.36(30.3)	0.28(38.7)	0.78
	Perpendicular a la fibra	0.55(23.9)	0.39(34.9)	0.71

A la vista de la Tabla 2 los valores medios obtenidos sin considerar las distintas secciones y direcciones de la madera fueron de 0.45 para fricción estática y 0.32 para dinámica. Valores que se encuentran dentro de los recogidos por [9, 16] para madera en general: coeficiente estático (0.25-0.5) y ligeramente superiores al 0.20 indicado para el cinético, pero entre el 0.3 y 0.5 también indicado para el cinético por [12] con humedad del 12%. McKenzie et al [15] indica una estática de 0.6 y dinámica 0.45 sin precisar direcciones ni especies, lo que resultaría más elevado de lo aquí obtenido.

Los CV, dentro de cada dirección considerada, si bien resultan elevados en algún caso para los coeficientes dinámicos (llegando al 40.2% en un caso), en el resto de casos se encuentran dentro de la variabilidad propia de la madera y semejantes a los obtenidos por otros autores.

La relación entre coeficientes μ_c/μ_e arrojó un valor medio global de 0.71, valor que se encuentra cercano al 25% de descenso en el valor de la fricción cinética respecto a la estática indicado en general para rozamiento entre sólidos [8–11]. Al relacionar μ_e y μ_c se puede apreciar una buena correlación, lo que indicaría que obtenido el valor de la fricción estática se podría estimar la dinámica en cada caso.

Si atendemos a las distintas direcciones consideradas se aprecia que los mayores valores tanto para el rozamiento estático como dinámico se producen para superficies de corte radiales y tangenciales en dirección de deslizamiento perpendicular a la fibra, con valores entre un 16 y un 23% y entre 8 y 24% más que el valor medio para μ_e y μ_c respectivamente. Siendo los menores valores obtenidos los correspondientes a superficies tangenciales con dirección de deslizamiento paralela a la fibra, con valores 19% y 11% menores que la media para μ_e y μ_c respectivamente, lo que muestra el efecto de la menor intersección con los anillos de crecimiento. En el caso de μ_c también destaca el bajo valor obtenido para superficies transversales y dirección tangencial de deslizamiento. En todos estos casos se aprecia la estrecha relación entre μ_e y μ_c en cuanto a que los valores máximos y mínimos estáticos también lo son dinámicos.

Respecto a la relación con los valores obtenidos por otros autores para las distintas direcciones, se pueden realizar los siguientes apuntes, si bien hay que tener presente la ausencia de estudios para algunas de ellas, en muchos casos englobadas conjuntamente varias direcciones, que sí han sido consideradas en este trabajo:

(i) Para superficies provenientes de cortes transversales se han obtenido unos valores medios de 0.42 (μ_e) y 0.29 (μ_c) que resultan similares a los reportados por [18] para madera laminada de *Picea abies* L. Karst (0,467 (μ_e) y 0,310 (μ_c)) en cortes transversales y dirección de deslizamiento indefinida o intermedia radial-tangencial. También para superficies perpendiculares a la fibra y madera de roble Kollmann [16] indica valores del orden de los aquí obtenidos. Para madera de coníferas en general y humedades inferiores al 12%, en rozamiento perpendicular a la fibra, la norma Eurocode 5-Part 2: Bridges [13] indica un valor de diseño para el coeficiente estático de 0.30, que debiera considerarse conservador.

(ii) Para deslizamiento paralelo a la fibra se han obtenido unos valores medios de 0.41 (μ_e) y 0.31 (μ_c) en caso de supoerficies radiales, y 0.36 (μ_e) y 0.28 (μ_c) para superficies tangenciales.

Lo que se puede comparar con el valor del coeficiente estático aportado por la norma Eurocode 5-Part 2: Bridges [13] para madera de coníferas, 0.23 (μ_e), valor bajo, inferior a los obtenidos, y que debiera considerarse conservador dada su aplicación normativa. Valores más elevados los aporta Kollmann [16] para madera de roble y superficies paralelas a la fibra: 0.62(μ_e) y 0.48(μ_c).

(iii) En el caso de deslizamiento perpendicular a la fibra en superficies de corte paralelas a la misma, radiales o tangenciales, (movimiento como de rodadura entre fibras), se han obtenido unos valores muy semejantes entorno a 0.5(μ_e) y 0.35(μ_c) para superficies radiales y tangenciales. La única referencia cercana a este tipo de rozamiento puede encontrarse en los ensayos realizados por Soilán [19] con madera laminada de *Picea abies* Karst obteniendo valores ligeramente menores a los de este trabajo. Por otro lado, el valor aportado por la norma Eurocode 5-Part 2: Bridges [13] para rozamiento estático perpendicular a la fibra de 0.30 se pudiera interpretar como válido también para estas superficies y bajo al tratarse de valores de diseño.

Los resultados obtenidos se encuentran dentro del orden de los valores aportados por la bibliografía, aunque la comparación que se pudo realizar contiene limitaciones, ya que en unos casos es para otras especies, o para madera en general, o no precisan todas las direcciones estudiadas en este trabajo. Ha de tenerse presente también que los distintos métodos de ensayo añaden variabilidad a los resultados obtenidos por los distintos autores.

3.2. Aplicación al cálculo de una pasarela de madera

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo de una pasarela con tablero de placa de madera tensada de castaño. Dicha pasarela estaría destinada al paso de peatones, pero con capacidad vehicular para mantenimiento o emergencia como puede ser un camión motobomba para la extinción de incendios. Salva una luz de 5 m con un ancho de 3,5m y se emplaza en un Espacio Natural Protegido, "Sierra de Gredos y Valle del Jerte", perteneciente a la Red Natura 2000, por lo que una pasarela de madera aportaría una mejor integración ambiental con un material de construcción sostenible.

Este sistema se basa en la conformación de placas rígidas a través de piezas de madera, aserradas o laminadas, dispuestas de canto longitudinalmente una al lado de la otra. Se emplean barras de acero que atraviesan transversalmente las piezas de madera y que luego son tensadas, todo ello para garantizar la colaboración de todos los elementos entre sí. La transmisión de carga resulta de la unión por rozamiento entre las tablas. Esta tipología estructural permite que la pasarela tenga también uso vehicular. La Figura 4 muestra las características de la placa tensada de la pasarela.

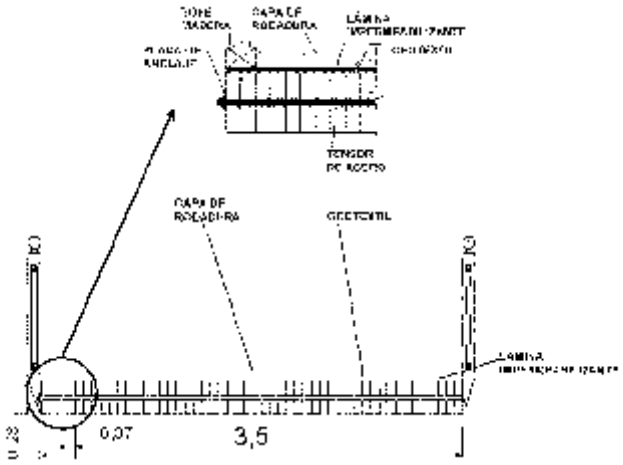


Figura 4. Sección transversal de la pasarela de placa tensada y detalle.

La introducción del coeficiente de rozamiento se realiza en la determinación del nivel requerido de tensión inicial de las barras tensoras, Pi, que a su vez generará la compresión perpendicular sobre la madera. Será función del momento transversal (Mt) y del cortante transversal (Vt) que producen la combinación de cargas a aplicar al tablero según:

$$Pi = 2{,}5 * P \qquad P = MAX\left[(6*Mt) / d^2 \;;\; (1{,}5*Vt) / (\nu * d) \right]$$

siendo "d" el espesor de la placa y "**ν" el coeficiente de rozamiento estático**

Los resultados obtenidos en los ensayos para la madera de castaño indican un valor medio del coeficiente de rozamiento de 0,5 para este tipo de contactos, que supera holgadamente el que propone la norma para rozamiento perpendicular a la fibra (0,3) en coníferas y valor aconsejado ante ausencia de más datos, si bien abre la puerta al empleo de valores obtenidos por experimentación. En este caso se ha obtado por considerar que los ensayos han servido para confirmar del lado de la seguridad el valor dado por la norma no sólo para coníferas sinó también para el castaño y se ha empleado μ_e=0,3 en el cálculo normativo de la pasarela.

Habiéndose determinado previamente un espesor de la placa de 28 cm, empleando un acero de límite elástico f_y=500 N/mm2 y con tensores espaciados 50 cm entre sí, se toma un diámetro de barra de 25 mm y unas placas de anclaje cuadradas de 7 cm de lado para evitar el aplastamiento en el apoyo sobre la madera.

3.3. Aplicación a la simulación numérica de estructuras

El conocimiento del coeficiente de rozamiento estático es fundamental para una correcta simulación de los contactos entre piezas estructurales. La obtención de estos valores para el castaño permitirá realizar este tipo de estudios con este material constructivo, lo que resulta de gran importancia dado que la madera de castaño se emplea generalmente en forma de madera aserrada y las estructuras ejecutadas suelen resolverse mediante uniones tradicionales o carpinteras, donde la transmisión de esfuerzos implica en gran medida la presencia del rozamiento.

Los autores del presente trabajo ya disponen de modelos de simulación numérica validados para diversas uniones estructurales en madera [1–3, 6, 7] por lo que se han podido comenzar los estudios del comportamiento de este material al respecto. Como ejemplo de aplicación y comienzo de dichos estudios, la Figura 5 muestra las tensiones normales paralelas a la fibra en una simulación numérica por elementos finitos para un embarbillado simple trasero entre un par y un tirante de una cercha de gran escuadría ejecutada con madera de castaño. Los valores de las propiedades elásticas se han recogido de un trabajo previo de los autores [21], mientras que los valores del coeficiente de rozamiento empleados fueron los valores medios obtenidos en el presente estudio, μ_e=0,42 para la cara de contacto frontal (media en las superficies transversales) y μ_e=0,39 para la cara inferior de rozamiento (media entre los valores en superficies tangenciales y radiales con deslizamientos paralelos a la fibra) dadas las superficies de rozamiento que se generan en las condiciones antes indicadas al emplear madera aserrada de castaño.

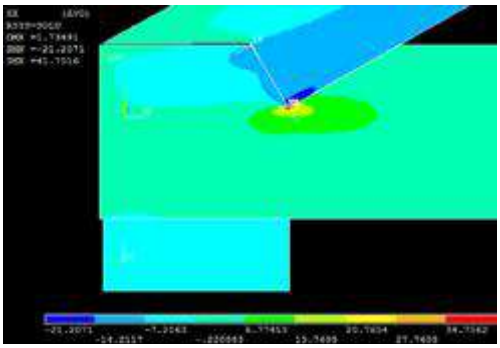


Figura 5. Tensiones normales paralelas a la fibra (N/mm²) en una unión por embarbillado trasero en un encuentro par-tirante para una carga en el par de 137 kN. Software ANSYS [22].

4. Conclusiones

El procedimiento desarrollado para la determinación de los coeficientes de rozamiento en madera mediante la modificación de un aparato de corte directo propio de estudios de geotecnia ha resultado viable. A la standarización del método puede contribuir el procedimiento aquí descrito ya que el aparato de corte directo es una máquina comunmente disponible en laboratorios de materiales.

Los valores medios obtenidos sin considerar las distintas direcciones de la madera fueron de $\mu_e = 0.45$ para fricción estática y $\mu_c = 0.32$ para dinámica. Los mayores valores obtenidos tanto para rozamiento estático como dinámico se producen para superficies de corte radiales y tangenciales con dirección de deslizamiento perpendicular a la fibra, seguidos de los obtenidos para secciones transversales. Los menores valores obtenidos son los correspondientes a superficies de corte tangenciales con deslizamiento paralelo a la fibra, lo que también muestra el efecto de la ausencia (o ligera) intersección con los anillos de crecimiento.

En todos los casos μ_e ha resultado mayor a μ_c. Se ha apreciado una buena correlación entre μ_s y μ_k lo que permitiría estimar el coeficiente dinámico conocido el estático.

La determinación de estos valores ha tenido su aplicación práctica en el diseño y cálculo de una pasarela de madera de castaño con sistema de placa tensada, ya que los valores que aporta la normativa son únicamente para coníferas.

Finalmente, la determinación del coeficiente de rozamiento estático ha permitido una correcta simulación del contacto entre superficies de elementos estructurales con este material, e iniciar el estudio del estado tensional de uniones en estructuras de madera de castaño.

5. Agradecimientos

Para este trabajo se ha contado con la financiación de la Junta de Extremadura (España) a través de las ayudas GR18175 y GR18193 (financiadas parcialmente por fondos FEDER).

Referencias

1. Villar JR, Guaita M, Vidal P, Arriaga F. Analysis of the Stress State at the Cogging Joint in Timber Structures. Biosyst Eng. 2007, 96, 79–90. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2006.09.009
2. Villar-García JR, Crespo J, Moya M, Guaita M. Experimental and numerical studies of the stress state at the reverse step joint in heavy timber trusses. Mater Struct. 2018, 51, 17. doi: 10.1617/s11527-018-1144-9
3. Villar JR, Guaita M, Vidal P, Argüelles R. Numerical simulation of framed joints in sawn-timber roof trusses. Spanish J Agric Res. 2008, 6, 508–520. doi: 10.5424/sjar/2008064-345
4. Aira JR, Íñiguez-González G, Guaita M, Arriaga F. Load carrying capacity of halved and tabled tenoned timber scarf joint. Mater Struct. 2016, 49, 5343–5355. doi: 10.1617/s11527-016-0864-y
5. Koch H, Eisenhut L, Seim W. Multi-mode failure of form-fitting timber connections – Experimental and numerical studies on the tapered tenon joint. Eng Struct. 2013, 48, 727–738. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.12.002
6. Villar-García JR, Vidal-López P, Crespo J, Guaita M. Analysis of the stress state at the double-step joint in heavy timber structures. Mater. Construcción. 2019. In press.
7. Villar JR, Crespo J, Lorenzana JA, Guaita M. Análisis experimental y por elementos finitos del estado tensional de uniones tradicionales por embarbillado simple y doble en madera estructural. VIII Congreso Ibérico de Agroingenieria. Orihuela, España, 1- 3 junio 2016. Libro de Actas pág. 516–527.
8. Tipler PA (2008) Physics for scientists and engineers, 6th ed. W. H. Freeman-Worth, 1999 4th ed., New York, USA
9. Serway RA, Jewett JW (2013) Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics. Cengage Learning, New York, USA
10. Keller FJ, Gettys WE, Skove MJ (1993) Physics, classical and modern, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, USA

11. Young HD, Freedman RA (2016) University Physics, 14th ed. Pearson Education, San Francisco, USA
12. USDA Forest Products Laboratory (2010) Wood handbook : wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. doi: 10.2737/FPL-GTR-190
13. CEN EN 1995-2:2016 (2016) Eurocode 5 : Design of timber structures - Part. 2. Bridges. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium
14. Argüelles R, Arriaga F, Esteban M, et al (2015) Timber Structures. Joints (in Spanish). AITIM. Technical Research Association of the Wood and Cork Industries, Madrid, Spain
15. McKenzie WM, Karpovich H. The frictional behaviour of wood. Wood Sci Technol. 1968, 2, 139–152. doi: 10.1007/BF00394962
16. Kollmann F (1959) Wood technology and its applications. Technologie des Loses und der Holzwerkstoffe. Instituto Forestal de Investigaciones y experiencias y servicio de la madera. Ministerio de Agricultura., Madrid, Spain
17. Aira JR, Arriaga F, Iniguez-Gonzalez G, Crespo J. Static and kinetic friction coefficients of Scots pine (Pinus sylvestris L.), parallel and perpendicular to grain direction. Mater Constr. 2014. doi: 10.3989/mc.2014.03913
18. Crespo J, Regueira R, Soilan A. Methodology to determine the coefficients of both static and dynamic friction apply to different species of wood. 1st Ibero-Latin American Congress Wood Construction CIMAD, Coimbra, Portugal, 11 Junio 2011. Proceedings doi: 978-989-96461-2-4
19. Soilán A, Arriaga F, Baño V. Analysis of the behavior of the dovetail connection by numerical simulation with the finite element method. 1st Ibero-Latin American Congress Wood Construction CIMAD, Coimbra, Portugal, 11 Junio 2011. Proceedings doi: 978-989-96461-2-4
20. ASTM International ASTM G115-10(2018) (2018) Standard Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients. doi: 10.1520/G0115-10R18
21. Villar-García JR, Crespo J, Moya M, Guaita M. Determinación de las propiedades mecánicas del castaño extremeño mediante medición de la velocidad de propagación de onda de ultrasonidos. IX Congreso Ibérico de Agroingenieria. Bragança, Portugal, 4 - 6 Septiembre 2016.
22. ANSYS Inc. ANSYS® (2012) Academic Research, Release 14.0, ANSYS Mechanical APDL

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Estratificación en "bodegas catedral" para la crianza de vinos generosos

E. G. Navía-Osorio[1]; C. Porras-Amores[2]; F. R. Mazarrón[1], I. Cañas[1]

[1] Universidad Politécnica de Madrid; E.T.S.I. Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas; Departamento de Ingeniería Agroforestal, 28040 Madrid; egnavia@gmail.com; f.ruiz@upm.es; ignacio.canas@upm.es
[2] Universidad Politécnica de Madrid; E.T.S. Edificación; Departamento de Construcciones Arquitectónicas Construcciones y su Control, 28040 Madrid; c.porras@upm.es

Resumen: La zona de producción de vinos generosos conocida como Marco de Jerez cuenta con un tipo particular de bodegas, las "catedrales del vino". Estos edificios de extraordinarias dimensiones que vivieron su apogeo durante el siglo XIX reciben su nombre por la similitud que muestran con los templos de la cristiandad. Este trabajo desvela el fenómeno de la estratificación vertical, a través de la monitorización de temperatura y humedad relativa a diferentes alturas. Los resultados del estudio demuestran que la estratificación vertical es notable en primavera y verano. En los meses más calurosos, las diferencias durante la tarde superan los 4ºC y 15% HR en la zona de barricas, y los 15ºC y 35% HR. considerando toda la altura de la bodega. Este comportamiento justifica las técnicas utilizadas en el sistema tradicional de crianza, situando el vino con más edad en la zona inferior. El diseño característico de las bodegas catedral hace posible estratificar el aire y proteger al vino de los incrementos de temperatura y las bajadas de humedad relativa; su comportamiento podría servir de inspiración y referencia para un diseño más eficiente de nuevas construcciones para la crianza del vino tinto.

Palabras clave: temperatura, humedad relativa, uniformidad vertical

1. Introducción

La zona de producción de los vinos de las denominaciones de origen «Jerez Xérès-Sherry» y «Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda», conocido como Marco de Jerez, es testigo de la presencia de un tipo particular de bodegas, las conocidas como "Catedrales del Vino". Estos edificios de extraordinarias dimensiones que vivieron su apogeo durante el siglo XIX reciben su nombre por la similitud que muestran con los templos de la cristiandad. Sus características arquitectónicas nacen del perfeccionamiento de los maestros bodegueros en la técnica enológica de la crianza de vinos bajo velo de "flor".

Los Vinos Generosos que incluyen: finos, manzanillas, amontillados, olorosos y palos cortados; son vinos secos, con una graduación alcohólica superior a 15°. Los más exigentes en cuanto a condiciones de temperatura y humedad son los finos y las manzanillas, estos son criados en botas de madera de roble mediante el crecimiento en superficie de un velo microbiano heterogéneo, compuesto mayoritariamente por levaduras, sensible al mantenimiento de ciertas condiciones ecológicas, que mediante una proceso de crianza aeróbica le confiere a estos caldos unas características particulares. La técnica tradicional para la crianza de los vinos generosos se denomina de "criaderas y soleras", basada en la supuesta estratificación existente en estas bodegas, siendo las botas ubicadas en las zonas más bajas (soleras) las de mayor calidad.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3358

Históricamente se han descrito las excepcionales condiciones ambientales que se desarrollan en el interior de las Bodegas Catedral, como paradigma de la crianza biológica de vinos bajo vejo de flor,

La crianza biológica requiere unas condiciones ambientales muy sensibles y limitantes. Así, Bobadilla, G. postula que la temperatura debe conservarse entre 15 y 20^0 C [1]. García del Barrio Ambrosy hace unas recomendaciones microclimáticas en el interior de las bodegas, con un valor máximo de 25^0 C y mínimo de 12^0 C [2], ya que por encima o por debajo de estas temperaturas se produce la parada de la actividad microbiana; además afirma que "la humedad ambiental de la bodega, o sea la humedad relativa del aire es su interior, debe ser lo más alta posible y además lo más constante posible a lo largo del día, de la noche y del año,". Lozano y Perdigones realiza un seguimiento en una serie de bodegas del Puerto de Santa María encaminados a establecer las posibles relaciones entre el comportamiento de la flor en las botas y la evolución en las condiciones ambientales, concluyendo que con una temperatura ambiente de 18-20^0 C, el proceso de crianza será óptimo [3]. Yravedra afirma que la temperatura en el interior de la bodega debe oscilar entre 18-22^0C [4].

A pesar de la importancia de las condiciones higrotérmicas en una correcta crianza bajo velo de flor, y del sistema de crianza basado en diferentes alturas de barricas, ningún estudio ha analizado en profundidad los gradientes existentes, como sí se ha hecho en bodegas para vino tinto [5]. Por ello, este trabajo desvela el fenómeno de la estratificación vertical, a través de la monitorización de temperatura y humedad relativa a lo largo del año.

2. Materiales y métodos

2.1. Bodega monitorizada

La bodega está situada en San Lúcar de Barrameda. Consta de tres naves a dos aguas iguales entre ellas (Figura 1). Cada nave cuenta con una puerta en su fachada principal. Todas las fachadas contienen huecos en la zona superior y sin acristalar que proporcionan iluminación y ventilación natural.

Para su construcción se ha empleado un sistema estructural basado en elementos prefabricados de hormigón. Los pilares tienen una sección de 0,25 m x 0,60 m y una altura de 6 m. Sobre los pilares apoyan vigas inclinadas de canto variable que dan forma a la cubierta a dos aguas de cada nave. El canto de las vigas oscila entre los 0,95 m en su arranque hasta los 0,30 m en el centro del vano.

El pavimento de la nave es de hormigón en las zonas de tránsito y de terrizo de albero en las zonas destinadas al almacenamiento de las barricas, el cual ayuda a mantener la humedad de la nave y reducir la temperatura.

Sobre los pórticos apoyan correas metálicas y sobre éstas placas de fibrocemento.

El cerramiento de los muros se ha realizado con bloques huecos de hormigón enfoscado por las dos caras y finalmente encalado.

2.2. Sistema de monitorización

La monitorización se llevó a cabo utilizando registradores de la marca Hobo®, el Hobo Pro v2 de segunda generación y el Hobo de 4 canales. El modelo Hobo Pro es un registrador con sensores internos de temperatura tipo termistor y de humedad relativa tipo capacitivo. Presentan una capacidad de almacenamiento 43.526 (21.763 registros de temperatura y otros 21.763 de humedad relativa). El Hobo de 4 canales es un registrador al que se acoplan sondas de temperatura, con una capacidad de almacenamiento de 43.000 medidas.

La Tabla 1 resume las características más importantes del instrumental utilizado.

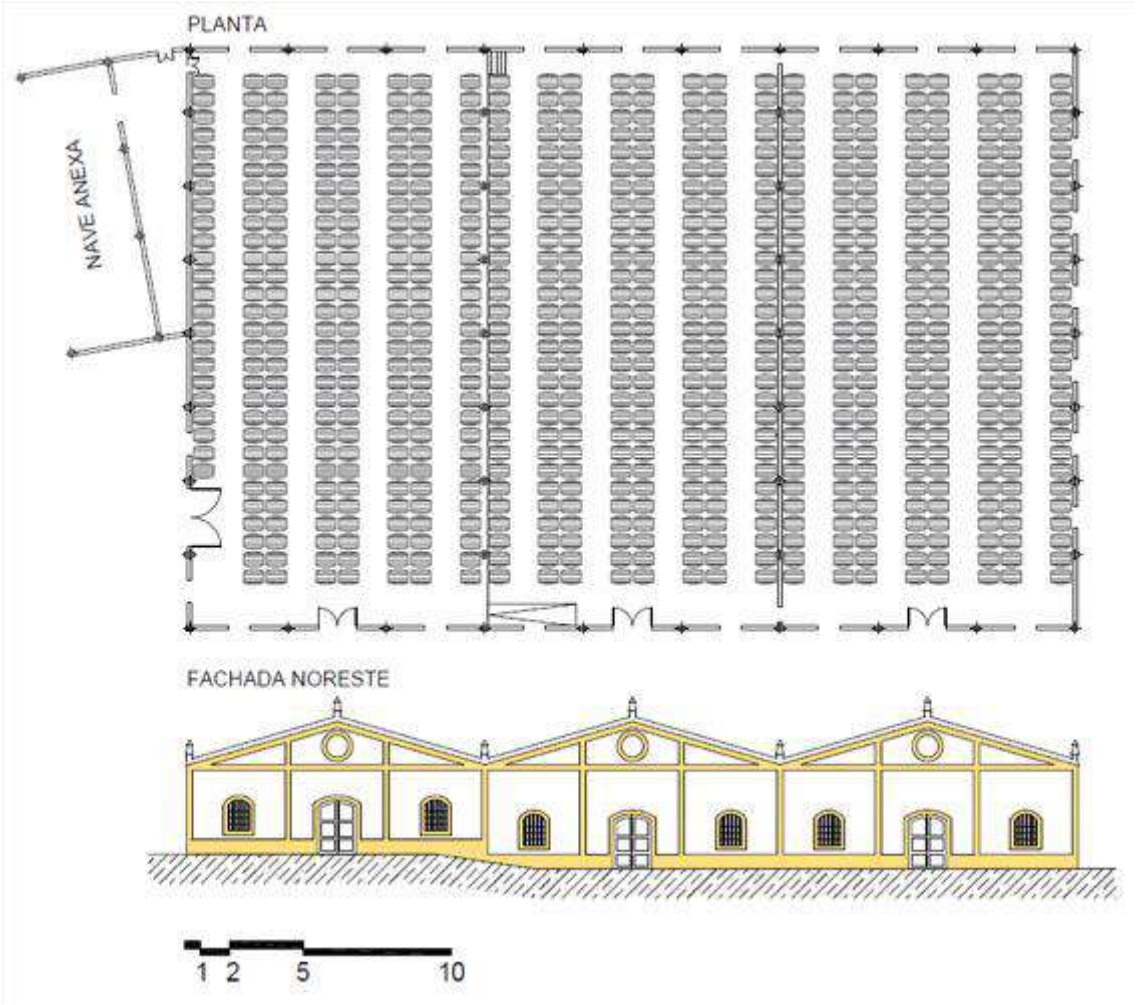


Figura 1. Planta y Alzado de la bodega.

Tabla 1. Características de los registradores y sensores utilizados

Equipo	Magnitud	Rango	Precisión	Resolución
Hobo® Pro v2	%HR Tª	0% a 100% -40° a 70°C	± 2.5% de 10 a 90% ±0.18°C a 25°C	0.03% HR 0.02°C a 25°C
Hobo® 4-Channel con sondas	Tª	-20C° a 70°C	±0.25° a 20°C	0.03° a 20°C

El estudio se focalizó en dos de las naves, instalando tres líneas de medida de la estratificación vertical en cada una, y otros dos en la zona de separación de las mismas. En el centro de las 2 naves se monitorizó la temperatura y humedad relativa mediante 9 registradores Hobo Pro v2 en cada una, distribuidos equidistantemente entre el suelo y la zona próxima a la cubierta. En el resto de localizaciones sólo se monitorizó la temperatura mediante registradores Hobo con sondas, instalando entre 8 y 12 sensores en cada línea vertical. En total, 82 sensores de temperatura y 18 sensores de humedad.

2.3. Análsis de los datos

Los millones de datos obtenidos en la monitorización fueron analizados utilizando plantillas desarrolladas en VBA (Visual Basic for Applications) y herramientas de Microsoft Excel.

Teniendo en cuenta que la altura de colocación de los sensores varía ligeramente de unas líneas a otras, y que el número de sensores no es el mismo, es necesario interpolar para disponer de valores a la misma altura en todas las localizaciones. Para ello, en cada una de las ocho líneas de estratificación se llevó a cabo un análisis de regresión siguiendo una polinómica de cuarto orden ($y = a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x^1 + a_0$), para cada uno de los 35040 instantes monitorizados a lo largo del año; en total, 280320 regresiones para temperatura con un R^2 promedio de 0.96 y 70080 para humedad relativa con R^2 promedio de 0.99.

3. Resultados y discusión

3.1. Estratificación de temperatura

La figura 2 muestra el promedio diario de temperatura para diferentes alturas, a partir de los datos interpolados en las ocho localizaciones. La estratificación vertical es notable la mayor parte de primavera y verano, registrándose durante un gran número de días diferencias superiores a los 5ºC entre el suelo y la zona próxima a la cubierta. Durante el otoño y el invierno el aire se homogeniza y la estratificación es mucho menor.

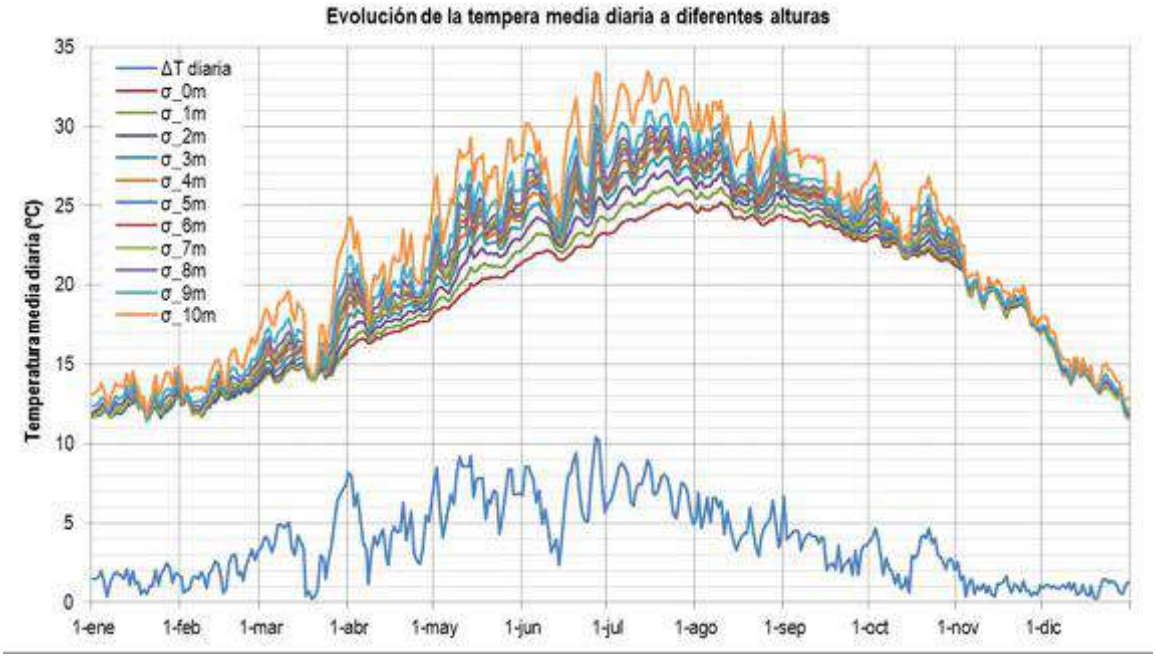


Figura 2. Evolución del promedio diario de temperatura interior a diferentes alturas.

Las botas de vino de niveles superiores están sometidas a mayores temperaturas que las inferiores durante varios meses, con diferencias superiores a los 2ºC de media mensual durante el verano (Figura 3). Por encima de las barricas, a partir de 4 metros, la temperatura sigue aumentando, especialmente en la zona cercana a la cubierta.

No obstante, la estratificación también presenta grandes variaciones a lo largo del día, por lo que las diferencias durante las horas de la tarde (de 12h a 19h) son mucho mayores, superando los 4ºC durante varios meses en la zona de barricas, y los 15ºC considerando toda la altura de la bodega (Figura 4).

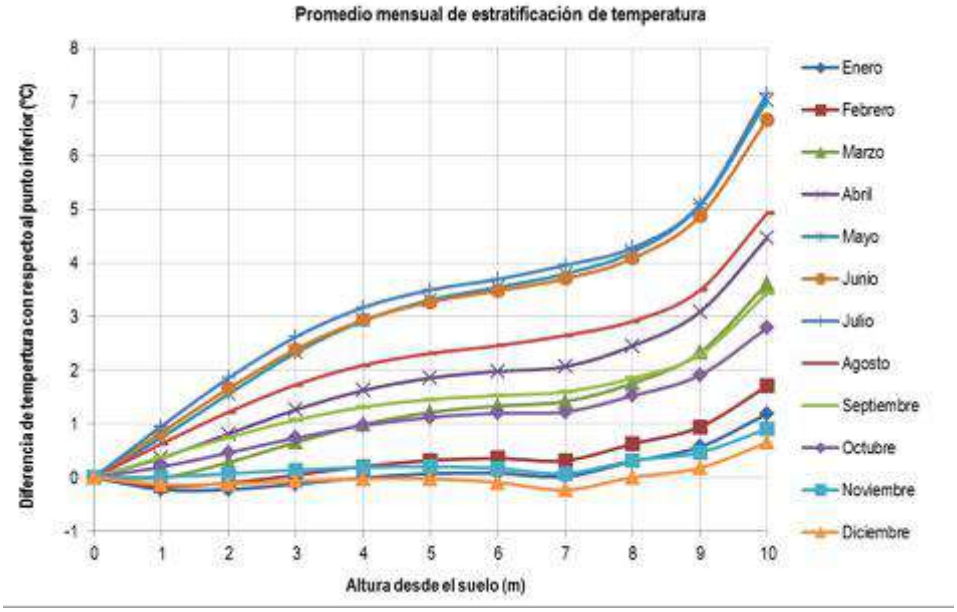


Figura 3. Promedios mensuales de estratificación de temperatura, tomando como referencia el sensor más cercano al suelo.

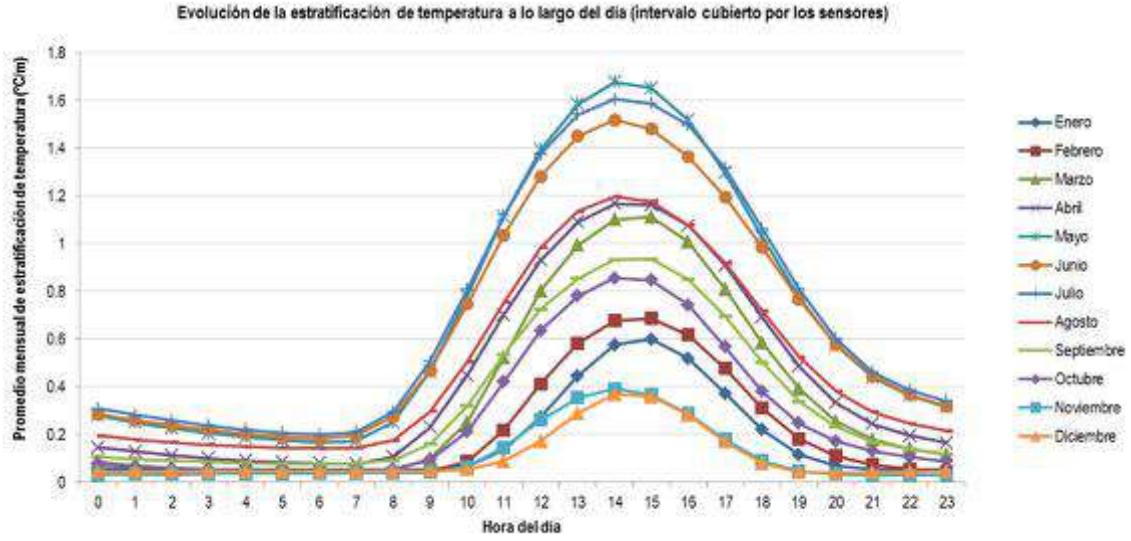


Figura 4. Evolución a lo largo del día de la estratificación media (°C por cada metro) considerando toda la altura de la nave (promedio mensual).

3.2. Estratificación de humedad relativa

El comportamiento de la humedad relativa es equivalente al de temperatura, aunque disminuye con el aumento del calor y de la altura (Figura 5). La estratificación es notable la mayor parte de primavera y verano, registrándose durante un gran número de días diferencias superiores al 10% de humedad relativa entre el suelo y la zona próxima a la cubierta. Durante el otoño y el invierno el aire se homogeniza y la estratificación es mucho menor.

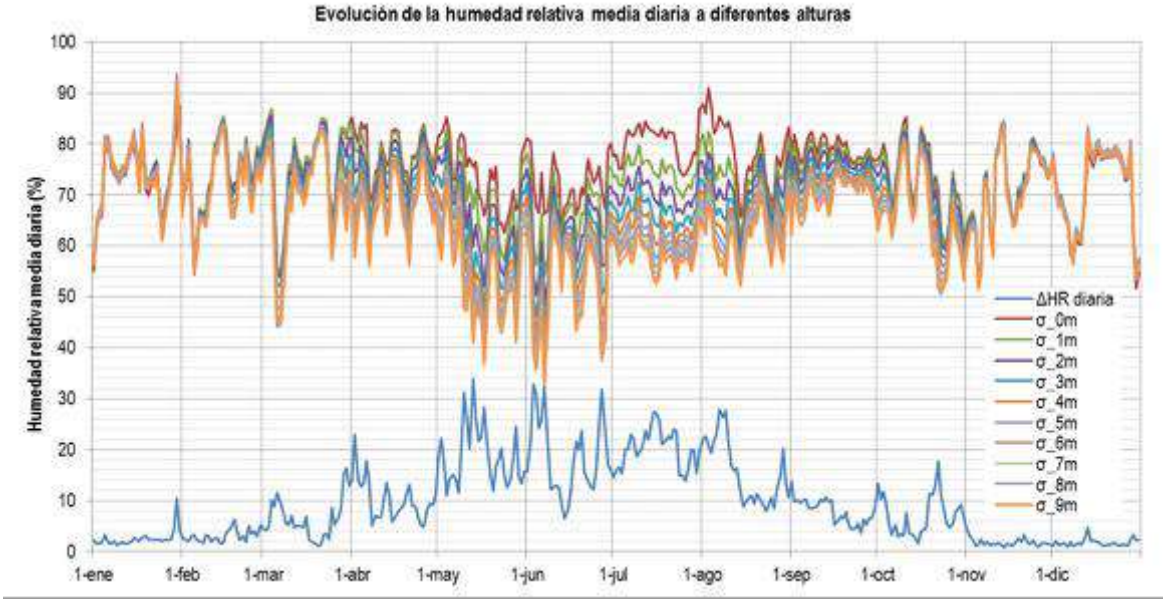


Figura 5. Evolución del promedio diario de humedad relativa interior a diferentes alturas.

Las botas de vino de niveles superiores están sometidas a menor humedad relativa que las inferiores durante varios meses, con diferencias superiores al 10% HR. de media mensual durante el verano (Figura 6).

La estratificación de humedad relativa también presenta grandes variaciones a lo largo del día, por lo que las diferencias durante las horas de la tarde (de 12h a 19h) son mayores, superando 15% HR. durante varios meses en la zona de barricas, y 35% HR considerando toda la altura de la bodega (Figura 7).

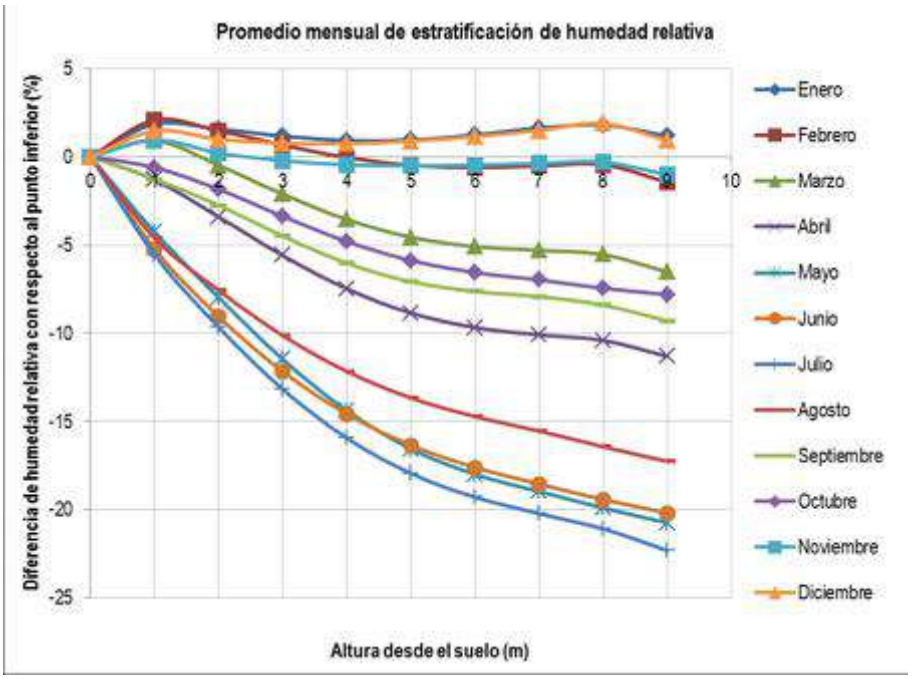


Figura 6. Promedios mensuales de estratificación de humedad relativa, tomando como referencia el sensor más cercano al suelo.

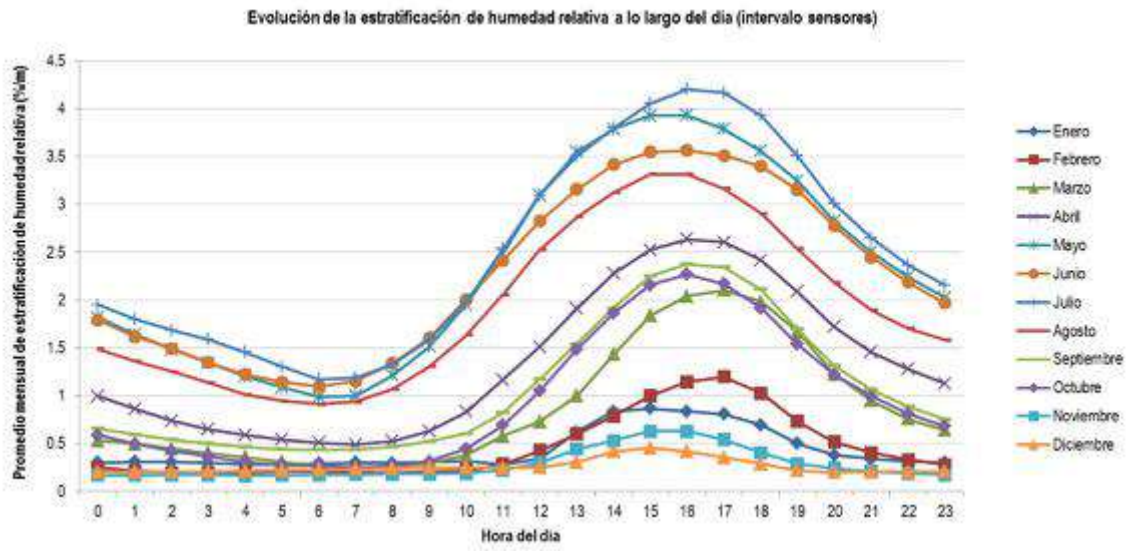


Figura 7. Evolución a lo largo del día de la estratificación media (% HR. por cada metro) considerando toda la altura de la nave (promedio mensual).

4. Conclusiones

La estratificación vertical es notable en primavera y verano, especialmente durante las horas de la tarde. A lo largo de varios meses, las botas de niveles superiores están sometidas a mayor temperatura y menor humedad relativa que las del nivel inferior. En los meses más calurosos, las diferencias durante la tarde (de 12h a 19h) superan los 4^{0}C y 15% HR en la zona de barricas, y los 15^{0}C y 35% HR considerando toda la altura de la bodega.

Este comportamiento justifica las técnicas utilizadas en el sistema tradicional de crianza, situando en los niveles inferiores el vino más viejo y valioso. En muchos casos, vinos que no requieren crianza biológica (olorosos) se sitúan en el nivel superior.

Por encima de las barricas, a partir de 4 metros, la temperatura sigue aumentando y la humedad relativa disminuyendo, especialmente en la zona cercana a la cubierta. La gran altura de las "bodegas catedral" permite estratificar el aire y proteger al vino de los incrementos de temperatura y las bajadas de humedad relativa.

Las "bodegas catedral" pueden servir de inspiración y referencia para un diseño más eficiente de nuevas construcciones para la crianza del vino tinto.

5. Agradecimientos

El presente estudio se ha podido realizar gracias al proyecto: "Estrategias de diseño bioclimático en bodegas como modelo de edificios de consumo de energía casi nulo". Referencia: BIA2014-54291-R. Financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad

Referencias

1. Bobadilla, G. F. Los vinos en la crianza biológica. Microbiología Enológica, Fundamentos en Vinificación. Mundi-Prensa. 1943. Madrid
2. García del Barrio Ambrosy, I. Las bodegas del vino de Jérez. Cuaderno Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. 1984, 16.
3. Lozano, J.I. Perdigones, F. Estudio de parámetros ambientales que condicionan la crianza del vino fino. V Jornadas Universitarias de Viticultura y Enología Jerez, 1989: p. 167.
4. Yravedra, S. M. J. Arquitectura y cultura del vino. Munilla-Lería. 2003.
5. Porras-Amores, C., Mazarrón, F. R. Cañas, I. Study of the Vertical Distribution of Air Temperature in Warehouses. Energies, 2014, 1193-1206

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Estudio de la mejora de la durabilidad de hormigones reciclados con biopolímeros

Julia García-González[1], Andrés Juan-Valdés[1], Julia Mª. Morán-del Pozo[1], M. Ignacio Guerra-Romero[1], Paulina Faria[2], Paulo C. Lemos[3], Alice S. Pereira[4], André Freches[5].

[1] Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal, Universidad de León; julia.garcia@unileon.es; andres.juan@unileon.es; julia.moran@unileon.es; ignacio.guerra@unileon.es
[2] Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. CERIS and Dep. Civil Engineering; mpr@fct.unl.pt;
[3] Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. LAQV-REQUIMTE, Dep. of Chemistry; paulo.lemos@fct.unl.pt
[4] Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. UCIBIO-REQUIMTE, Dep. of Chemistry; masp@fct.unl.pt
[5] Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. LAQV-REQUIMTE, Dep. of Chemistry; a.freches@campus.fct.unl.pt

Resumen: Una innovadora posibilidad planteada para prolongar la vida útil de los materiales de construcción y edificación es el uso de agentes biorreparadores. Este estudio se centró en la evaluación del efecto protector de agentes reparadores, y a la vez respetuosos con el medio ambiente, mediante el análisis de la absorción superficial de agua en el hormigón reciclado. Se ha ensayado un hormigón reciclado en el que una parte del árido grueso natural ha sido sustituida por residuos de construcción y demolición (RCD), y otro hormigón similar en el cual, además, se sustituyó el cemento convencional Portland por cemento reciclado. Estos hormigones fueron recubiertos superficialmente con biopolímeros obtenidos en el proceso de producción de polihidroxialcanoatos utilizando biomasa residual de dos cultivos microbianos mixtos diferentes. Los resultados mostraron que disminuye significativamente la absorción de agua en el hormigón, siendo más eficaces en las muestras de hormigón reciclado con cemento reciclado.

Palabras clave: absorción de agua, biotratamiento, RCD, biorreparación.

1. Introducción

Las necesidades de reparación y mantenimiento en las estructuras de hormigón aumentan con la edad. A veces resulta más adecuado programar un plan de reparación y mantenimiento, para protegerlas de las inclemencias medioambientales, que hacer diseños muy costosos para no tener que preocuparse del mantenimiento a lo largo de toda o una buena parte de su vida útil. Además, a pesar de la relativamente buena durabilidad del hormigón, es inevitable que factores tales como las sobrecargas, la fatiga, cambios de uso, etc., den lugar a la aparición de grietas y fisuras. Algunas de estas grietas, en condiciones ambientales adversas, deben ser reparadas para preservar el hormigón en buen estado y evitar una pérdida de durabilidad.

En la bibliografía consultada se han encontrado diversos trabajos de investigación [1-7] que estudian el efecto de varios tipos de tratamientos de reparación superficial en el hormigón. Se ha comprobado que algunos de estos tratamientos mejoran su durabilidad. Esta mejora se consigue en unos casos disminuyendo la permeabilidad del agua, la difusión de la humedad o

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3420

los más novedosos produciendo una especie de autosellado de las grietas. Y estas mejoras, evaluadas en la mayoría de los casos con ensayos de absorción de agua, han arrojado resultados muy esperanzadores, como puede ser el caso de Woo et al [1], quienes obtuvieron una mejora de la resistencia a la penetración del agua que osciló entre 29-57 % empleando ciertos materiales de composite; o por su parte Chandra et al [2], estos autores utilizando extracto de cactus, consiguieron resultados aún mejores, del 83 %.

En esta comunicación se muestran los resultados preliminares de un estudio llevado a cabo con subproductos de origen vegetal, en adelante biopolímeros, que se aplica en la superficie del hormigón para mejorar sus condiciones de durabilidad. Se espera mejorar la durabilidad del hormigón y dar un uso a estos subproductos, contribuyendo de esta manera a la sostenibilidad.

2. Materiales y métodos

En este estudio se han ensayado dos tipos de hormigón: en uno se ha sustituido el 50 % del árido grueso natural por árido reciclado (hormigón reciclado, HR) y en el otro además se ha utilizado un cemento reciclado, a base de cemento Portland y un 25 % de residuos cerámicos (hormigón reciclado con cemento reciclado, HRCR). Se hicieron varias probetas con estos dos hormigones las cuales se sometieron a un tratamiento superficial con el fin de evaluar el efecto de los biopolímeros en la durabilidad del hormigón. El tratamiento superficial se hizo con subproductos de naturaleza biológica, capaces de recubrir las fisuras incipientes y aumentar la consolidación entre las partículas que forman las capas superficiales de los elementos de hormigón. Se trata de tratamientos 'biorreparadores', denominado comúnmente en inglés *healing biotreatments*.

En la elaboración de HR se emplearon los siguientes componentes: cemento Portland CEM III/A 42.5 N/SR; áridos rodados de naturaleza silícea; áridos reciclados mixtos (ARM), previamente sometidos a un tratamiento de obtención mecánico, procedentes de una planta de reciclaje de Madrid. Para la elaboración de HRCR, en base a la dosificación de HR se sustituyó el cemento comercial por un cemento reciclado, caracterizado por incorporar un 25 % de material cerámico de origen residual. En la tabla 1 se muestran las características de ambos tipos de cemento y en la tabla 2 la composición del ARM. Todos los materiales cumplen las prescripciones establecidas en las normas españolas de referencia [8-13].

Tabla 1. Composición química del cemento Portland y del cemento reciclado

Composición química (%)		
	CEM III/A 42.5 N/SR	Cemento reciclado
Al_2O_3	7.59	7.32
CaO	51.33	47.04
Cl	0.02	0.04
Fe_2O_3	2.04	3.06
MgO	3.87	2.24
P_2O_5	0.06	0.17
K_2O	0.60	1.70
SiO_2	25.08	29.35
Na_2O	0.14	0.41
SrO	0.11	0.08
SO_3	2.54	2.45
TiO_2	0.39	0.31
ZnO	0.04	0.03
Cr_2O_3	0.01	0.01
MnO	0.22	0.09
LOI	3.930	2.66

Tabla 2: Composición del árido reciclado

Composición	% (w/w)
Materiales sueltos, formados por árido natural	44.1
Material cerámico (restos de ladrillo, azulejos, loza sanitaria, etc.	33.6
Árido natural con restos de mortero adherido en la superficie	17.5
Otros (asfalto, vidrio, yeso e impurezas)	4.8

En el laboratorio se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas del árido natural y reciclado, tales como la relación D/d, el contenido en finos, el índice de lajas o el coeficiente de los ángeles y la absorción de agua [14-17]. Se observó que ambos áridos cumplen con la EHE-08 [11]. Cabe destacar que la absorción de agua en el árido reciclado, ARM, fue notablemente superior a la del árido natural, debido, principalmente, a la presencia de mortero adherido y material cerámico, componentes en ambos casos más absorbentes que el árido natural. Como consecuencia se produjo una reducción en la docilidad del hormigón durante el amasado. Para evitar esto, se presaturó el árido reciclado antes de ser amasado con los demás componentes de la dosificación. Esta técnica de presaturación demostró ser adecuada en hormigones reciclados sin altas prestaciones de resistencia, mejorándose notablemente la trabajabilidad de la masa [18]. En la tabla 3 se muestra la dosificación empleada para los hormigones elaborados, estableciéndose como parámetros de partida una relación A/C de 0,5 y una resistencia característica del hormigón de 25 MPa.

Tabla 3. Dosificación del hormigón por metro cúbico

Componentes	Composición
Agua	155 L
Cemento	313 kg
Arena 0/4 mm	97 kg
Arena 0/5 mm	442 kg
Grava 4/10 mm	242 kg
Grava 6/12 mm	81 kg
ARM 4/20 mm	323 kg

Partiendo de probetas prismáticas de 100 mm x 100 mm x 400 mm, se obtuvieron mediante una sierra de diamante las muestras de ensayo, con dimensiones de 50 mm x 50 mm x 100mm. Sobre la cara cuadrada, correspondiente a la superficie enrasada se aplicó el tratamiento superficial.

En los tratamientos se probaron dos grupos de productos, uno procedente de la producción de polihidroxialcanoatos (PHA) generados por la acción de un cultivo mixto microbiano (MMC) sobre aceite de madera de pino (MMC-P) y otro siguiendo la misma metodología, pero partiendo de glicerol crudo procedente de la producción de biodiesel (MMC-Gly). Dentro de cada grupo, unos productos fueron sometidos a sonicación para romper las paredes celulares de las bacterias productoras de PHA (MMC-Gly_S y MMC-P_S) y otros no. Además, se probaron dos concentraciones diferentes de cada producto (* Menor concentración: 1 Vol. de biopolímeros/ 2 Vol. de agua; * * Mayor concentración: 1 Vol. de biopolímeros/ 1 Vol. de agua). La tabla 4 muestra los diferentes tratamientos.

Tabla 4. Referencia y descripción de los tratamientos

Tratamiento referencia	Descripción
Control	Control, sin aplicar ningún producto
H_2O	De referencia con agua
MMC-Gly*	MMC procedente de glicerol sin sonicar, baja concentración
MMC-Gly**	MMC procedente de glicerol sin sonicar, alta concentración
MMC-Gly_S*	MMC procedente de glicerol sonicado, baja concentración
MMC-Gly_S**	MMC procedente de glicerol sonicado, alta concentración
MMC-P*	MMC procedente de aceite de pino sin sonicar, baja concentración
MMC-P**	MMC procedente de aceite de pino sin sonicar, alta concentración
MMC-P_S*	MMC procedente de aceite de pino sonicado, baja concentración
MMC-P_S**	MMC procedente de aceite de pino sonicado, alta concentración

Se aplicó en la superficie de cada muestra una cantidad de 2 ml de biopolímero de cada uno de los tratamientos utilizando una pipeta. Cada tratamiento fue aplicado sobre tres muestras. Las condiciones ambientales durante el ensayo fueron de 20 ± 2 °C y 40 ± 5 % de humedad relativa (RH).



Figura 1. Fases características del ensayo de absorción de una gota de agua: a) aplicación de la gota. b) aspecto de la gota de agua en el instante de contacto con la superficie del hormigón. c) Aspecto de la gota en un estado avanzado del proceso de absorción.

Dos días después de la aplicación se hizo la prueba de absorción de una gota de agua, para medir el efecto impermeabilizador de los biopolímeros aplicados sobre la superficie de las probetas. Esta prueba consiste en aplican una gota de agua sobre la superficie a ensayar y medir el tiempo que dicha gota tarda en absorberse completamente por la muestra. En la figura 1 se pueden observar las tres fases características que describen dicho ensayo. La aplicación de cada una de las gotas es grabada con una cámara de vídeo para posteriormente determinar el tiempo exacto desde su aplicación hasta la completa absorción. Los incrementos de tiempo obtenidos para las muestras tratadas con respecto a las muestras sin tratar permiten cuantificar el efecto reparador que ejercen los biopolímeros sobre las superficies de los distintos hormigones.

3. Resultados y discusión

En la figura 2 se puede ver el tiempo de absorción de la gota de agua en cada tratamiento. Los resultados indican que las muestras tratadas con el biopolímero son menos permeables que las de control, sin ningún tipo de tratamiento, y la diferencia es aún más evidente si se comparan con las muestras tratadas con agua. Demostrando por lo tanto un efecto positivo de los biotratamientos sobre la durabilidad de las muestras de hormigón.

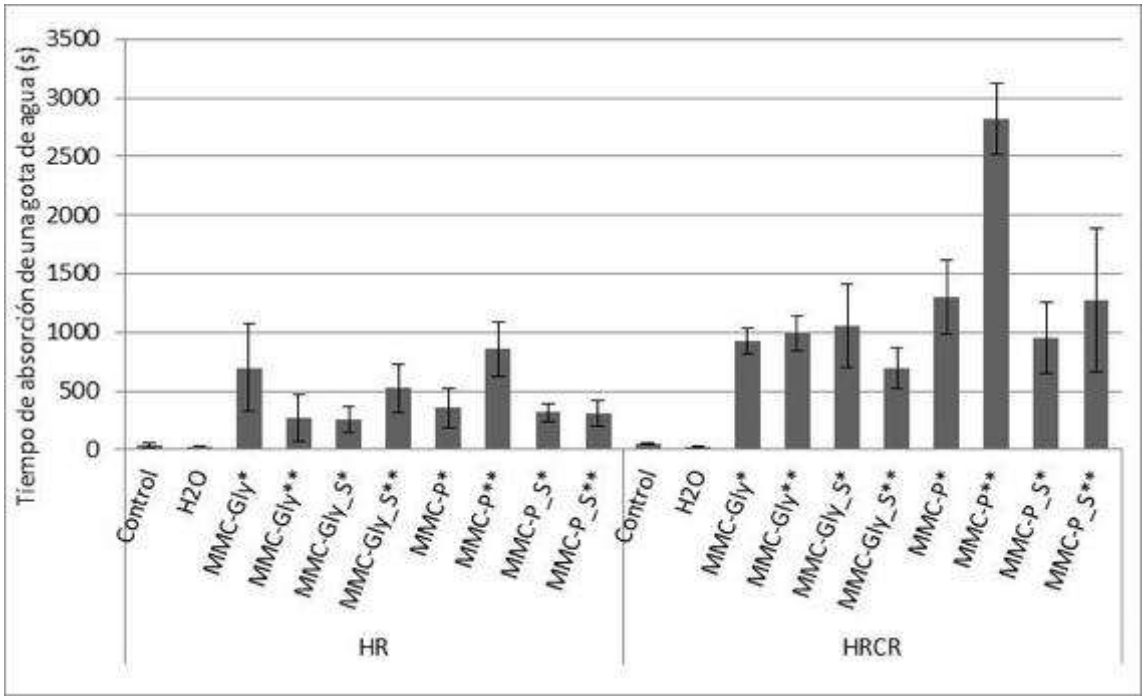


Figura 2. Tiempo de absorción de una gota de agua en las muestras de hormigón

Se puede observar que el tratamiento MMC es más eficaz en el hormigón con cemento reciclado que con cemento normal. Además es de reseñar que la sonicación no ha tenido influencia en la absorción de agua, resultando ser incluso contraproducente sobre la permeabilidad de alguna de las muestras, observando las muestras HRCR se aprecia como las muestras tratadas con bioproducto sin sonicar (MMC-P* y MMC-P**) son significativamente menos absorbentes que las muestras tratadas con bioproducto sonicado (MMC-P_S* y MMC-P_S**). Comparando los dos tipos de biopolímeros entre sí, se puede observar como para cualquiera de las dos muestras de hormigón ensayadas, el PHA procedente de madera de pino alcanza mejores resultados impermeabilizantes que el PHA obtenido a partir del glicerol.

El efecto de impermeabilización de la superficie de hormigón que supone el uso de estos biopolímeros alcanza una mejoría notable en comparación con los resultados obtenidos por otros autores, quienes han utilizado otros tipos de bioproductos como Woo et al. [1] o Chandra et al [2], en cuyos estudios, los tiempos de absorción casi se duplicaron –entre el 57 y 83 %–. En esta línea, en el presente estudio se han conseguido mejorar los resultados de absorción, llegándose a incrementan más de 70 veces respecto al tiempo empleado por las muestras de control. Posteriores estudios podrán indicar si efectivamente estos biopolímeros pueden utilizarse con seguridad y garantías para mejorar la durabilidad de los hormigones comerciales, aportando en estos casos el valor añadido de la sostenibilidad.

4. Conclusiones

Una única aplicación superficial con los biopolímeros mejora significativamente el tiempo de absorción de una gota de agua sobre la superficie de los dos tipos de hormigones reciclados empleados en este ensayo, lo que implica una mejora en la durabilidad de los mismos, dejando de manifiesto el efecto reparador de los polihidroxialcanoatos.

Los biopolímeros dieron mejores resultados en el hormigón hecho con cemento reciclado que en el elaborado con cemento convencional, lo que implica un efecto potenciador de la materia cerámica en el agente reparador. Para ambos tipos de hormigón, el PHA procedente de madera de pino alcanza un mayor efecto reparador que el PHA obtenido a partir de glicerol crudo.

5. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto europeo SARCOS a través del programa de estancias a jóvenes investigadores STSM Grant from the COST Action CA15202. (http://www.sarcos.enq.cam.ac.uk) y el proyecto BIA2017-83526-R "Procesos de auto-sanado mediante bio-polímeros en hormigones y morteros reciclados", financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Este trabajo fue apoyado también por el Associate Laboratory for Green Chemistry-LAQV and Applied Molecular Biosciences Unit-UCIBIO financiado por fondos nacionales de FCT/MCTES (UID/QUI/50006/2013; UID/Multi/04378/2013) y co-financiado por el ERDF under the PT2020 Partnership Agreement (POCI-01-0145-FEDER – 007265; POCI-01-0145-FEDER-007728).

Referencias

1. R. S. C. Woo, H. Zhu, M. M. K. Chow, C. K. Y. Leung, J. Kim, "Barrier performance of silane-clay nanocomposite coatings on concrete structure," *Compos Sci Technol,* vol. 68, pp. 2828-2836, November 2008. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.10.028
2. S. Chandra, L. Eklund, R. R. Villarreal, Use of cactus in mortars and concrete, *Cem Concr Res*, vol. 28, pp. 41-51, January, 1998. DOI: 10.1016/S0008-8846(97)00254-8
3. C. K. Y. Leung, H. Zhu, J. Kim, R. S. C. Woo, Use of polymer/organoclay nanocomposite surface treatment as water/ion barrier for concrete, *J Mater Civ Eng,* vol. 20, pp. 484-492, July 2008. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:7(484)
4. B. Pigino, A. Leemann, E. Franzoni, P. Lura, Ethyl silicate for surface treatment of concrete – Part II: characteristics and performance, *Cement Concr Compos*, vol. 34, pp. 313-321, March 2012. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2011.11.021
5. S. Amidi, J. Wang, Surface treatment of concrete bricks using calcium carbonate precipitation, *Constr Build Mater*, vol. 80, pp. 273-278, April 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.001
6. L. Jia, C. Shi, X. Pan, J. Zhang, L. Wu, Effects of inorganic surface treatment on water permeability of cement-based materials, *Cement Concr Compos,* vol. 67, pp. 85-92, March 2016. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.01.002
7. J. Li, Z. Yi, Y. Xie, Progress of silane impregnating surface treatment technology of concrete structure, *Mater Rev*, vol. 26, pp. 120-125, January, 2012.
8. Royal Decree 256, *Cement Reception Instruction* (RC-16), 2016.
9. UNE 80303-1 *Cements with additional characteristics. Part 1: Sulphate resisting cements,* Madrid, 2013.
10. EN 197-1 Cement. Part 1: *Composition, specifications and conformity criteria for common cements*, Brussels, 2011.
11. EHE-08 *Code on Structural Concrete*, Madrid, 2008.
12. EN 12620+A1 *Aggregates for concrete*, Brussels, 2008.
13. EN 933-11 *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate*, Brussels, 2009.
14. EN 933-1 *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method*, Brussels, 2012.
15. EN 933-3 *Tests for geometrical properties of aggregates. Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index*, Brussels, 2012.
16. EN 1097-2 *Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation*, Brussels, 2010.
17. EN 1097-6 *Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption*, Brussels, 2013.
18. J. García-González, D. Rodríguez-Robles, A. Juan-Valdés, J.M. Morán-Del Pozo, M. I. Guerra-Romero, Pre-saturation technique of the recycled aggregates: solution to the water absorption drawback in the recycled concrete manufacture, *Materials*, vol. 7, pp. 6224-6236, September 2014. DOI: 10.3390/ma7096224

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Estudio de la valorización de residuos de almendra para paneles de bajo coste

A. Ferrández-García[1], C.E. Ferrández-García, M. Ferrández-Villena[1], T. García-Ortuño[1], M.T. Ferrández-García[1]

[1] Departamento de Ingeniería. Escuela Politécnica Superior de Orihuela (Alicante). Universidad Miguel Hernández de Elche. España. Ctra. Beniel km 3,2. CP 03312. Orihuela (Alicante).

Resumen: Con el fin de reducir el consumo energético y favorecer el impacto ambiental en la fabricación de nuevos productos se están desarrollando muchas investigaciones encaminadas a incrementar el uso de recursos renovables y ecológicos como las fibras vegetales. El almendro es un árbol caducifolio originario de las zonas mediterráneas, aunque actualmente Estados Unidos es el principal productor de almendras del mundo. El fruto del almendro tiene tres partes diferenciadas: el núcleo interno o la carne, la parte media dura de la cáscara y la cubierta o casco exterior de la cáscara (exocarpo y mesocarpo). En este trabajo se analiza el uso de un residuo de la almendra para obtener tableros de partículas ecológicos. Se ha usado como materia prima el casco exterior de la almendra triturado, obteniendo 4 tipos de partículas. Se han elaborado 8 tipos tableros sin utilizar ningún tipo de adhesivo. Se evaluó el efecto del tiempo en la prensa y el tamaño de las partículas empleadas en la fabricación de los tableros en algunas propiedades físicas y mecánicas En este estudio se demuestra que es técnicamente posible el desarrollo de tableros con este material, ya que la alta dureza obtenida hace viable su empleo para pavimentos de madera en el interior de las edificaciones.

Palabras clave: Tableros de partículas, exocarpo, Prunus dulcis (Mill) D.A, libre de adhesivos.

1. Introducción

El almendro, científicamente conocido como *Prunus dulcis* (Mill) D.A. Webb, pertenece a la familia de las Rosáceas y también se relaciona con frutas de hueso como los melocotones, ciruelas y cerezas. El almendro es originario de las zonas mediterráneas. Fue propagado en tiempos antiguos a lo largo de las orillas del Mediterráneo hasta el norte de África y el sur de Europa y, más recientemente, se transportó a otras partes del mundo, especialmente a California (EE. UU.). Estados Unidos, es el principal productor de almendras del mundo, seguido de España. Las frutas de almendras tienen tres partes distintas: el núcleo interno o la carne, la parte media dura o la cáscara y la cubierta o casco exterior de la cáscara verde. El casco exterior de la almendra (exocarpo y mesocarpo) se obtiene con el secado de la porción de la fruta de la almendra que rodea la cáscara dura y normalmente se queda en campo, constituyendo un residuo que puede dar lugar a problemas medioambientales como la propagación de incendios o plagas.

La producción de almendras genera millones de toneladas de residuos incluyendo las cáscaras, los cascos, las podas, las hojas, la piel y la parte no comestible del grano. Estos residuos son buenas materias primas para la producción de bioenergía y otros compuestos valiosos, siendo recomendable mayor investigación y desarrollo en este campo [1].

Hay numerosas propuestas para la utilización de la cubierta exterior verde de la almendra: obtención de polisacáridos [2, 3], bioactivos [4, 5, 6], antioxidantes [7, 8, 9, 10, 11], bioenergía [12,

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3518

13, 14], carbones activados [15] y filtros absorbentes [16, 17, 18]. Varios estudios destacan su uso potencial en la alimentación animal [19, 20, 21, 22, 23, 24].

Los desechos agrícolas son también materiales lignocelulósicos que pueden sustituir a la madera natural, pero es necesario demostrar que sus fibras pueden ser una materia prima adecuada en la fabricación de tableros para mobiliario, envases y usos constructivos. El empleo de materiales vegetales sustitutos de la madera como materia prima jugará un papel importante en el futuro. La fabricación de tableros de partículas (tableros de aglomerado) está en continuo crecimiento debido a la escasez de madera. Son básicamente, materiales compuestos, tradicionalmente hechos de virutas de madera y un aglomerante.

También existen propuestas para la utilización de la cáscara de almendra en la fabricación de diferentes composites [25, 26, 27, 28, 29] y con el casco verde exterior [30].

Los adhesivos de madera se han desarrollado en la industria petroquímica y tienen un excelente rendimiento, buenas propiedades de trabajo y son económicamente satisfactorios. Sin embargo, se cree que los adhesivos actuales para los composites de madera serán inevitablemente restringidos en el futuro debido a las disminuciones en las reservas de recursos fósiles y a las emisiones de formaldehido perjudiciales para la salud.

Existen investigaciones para obtener tableros de partículas usando varias especies vegetales como materia prima y las últimas investigaciones se han dirigido a obtener tableros de partículas aglomeradas sin utilizar ningún producto aglomerante: palmera datilera [31, 32, 33], palmera de aceite [34, 35, 36, 37, 38, 39], palmera canaria [40], tallo de arroz [41, 42], kenaf [43, 44], caña de azúcar [45], cáscara de coco [46], bambú [47], sorgo [48], tallo de algodón [49] y residuos de almendra [30].

En este trabajo, se propone utilizar los cascos exteriores de la almendra (exocarpo y mesocarpo) como materia prima para fabricar tableros sin aglomerante, en un intento de desarrollar una aplicación de valor agregado para este residuo. El objetivo es obtener un producto totalmente ecológico, mediante el uso de residuos de la almendra en la elaboración de tableros aglomerados sin adhesivos y valorar el mecanismo de auto-unión.

2. Materiales y Métodos

2.1. Materiales

Los materiales empleados han sido partículas de los cascos verdes de la almendra procedente de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela

Los cascos de almendra se dejaron secar durante 6 meses al aire libre. Posteriormente se trituraron en una desfibradora de cuchillas. Las partículas obtenidas se tamizaron en una tamizadora vibradora y se seleccionaron 4 tamaños de partículas: partículas que quedaron retenidas en el tamiz de 2 mm y atravesaron el de 4 mm (2 a 4 mm), partículas retenidas en el tamiz de 1 mm y atravesaron el tamiz de 2 mm (1 a 2 mm), partículas que quedaron retenidas en el tamiz de 0.25 mm y atravesaron el tamiz de1 mm (0.25 a 1 mm) de mm y partículas que atravesaron el tamiz de 0.25 mm (< 0.25 mm).

2.2. Métodos

Se fabricaron tableros de partículas sin adhesivos, se evaluaron sus propiedades mediante métodos experimentales y se analizaron los resultados mediante métodos estadísticos.

2.2.1. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación consistió en formar la manta del tablero con los residuos de almendra de cuatro tamaños de partículas. La manta se formó en un molde de dimensiones 600 mm x 400 mm y se sometió a presión y calor en una prensa de platos calientes, con una presión

de 2.5 MPa, una temperatura de 120ºC durante 30 min y cuando se enfriaron, la mitad de los tableros se introdujeron nuevamente en la prensa otros 30 minutos a la misma temperatura. Posteriormente, se dejaron los paneles enfriar en posición vertical. Los tableros tenían unas dimensiones aproximadas de 600 x 400 x 5 mm. Las características de elaboración de los 8 tipos de paneles se indican en la tabla 1 y algunos de los citados paneles se muestran en la figura 1. Se elaboraron 6 paneles de cada tipo.

Tabla 1. Características de los tipos de paneles elaborados

Tipo de tablero	Nº de tableros	Tamaño de partícula (mm)	Tiempo (min)	Temperatura (ºC)
A1	6	< 0.25	30	120
A2	6	< 0.25	30+30=60	120
B1	6	0.25 a 1	30	120
B2	6	0.25 a 1	30+30=60	120
C1	6	1 a 2	30	120
C2	6	1 a 2	30+30=60	120
D1	6	2 a 4	30	120
D2	6	2 a 4	30+30=60	120



Figura 1. Cascos de almendra (exocarpo y mesocarpo) y tableros de partículas obtenidos sin adhesivos.

2.2.2. Métodos experimentales

Las propiedades se determinaron siguiendo las normas europeas establecidas para los tableros de partículas de madera [50]. Antes de proceder a los ensayos se cortaron las probetas de cada tablero con las dimensiones adecuadas según indican las normas europeas. De cada tablero se cortaron 6 probetas para el ensayo a flexión, 6 probetas para el ensayo de densidad, 3 probetas para el ensayo de inmersión en agua y 3 probetas para el ensayo de cohesión interna. Antes de proceder a los ensayos, se acondicionaron las probetas en una cámara de conservación a una temperatura de 20ºC y una humedad relativa del 65%.

Se midieron las propiedades de los tableros siguiendo las normas estándares europeas: densidad [51], hinchamiento en espesor (TS) y absorción de agua (WA) tras 2 y 24 horas de inmersión en agua [52], cohesión interna o resistencia a tracción (IB) [53], módulo de ruptura a flexión (MOR) y módulo de elasticidad a flexión (MOE) [54]. Los tableros se evaluaron según indica la norma europea [55]. Los ensayos mecánicos se realizaron en la máquina de ensayos marca IMAL (Italy), que cumple con la velocidad requerida en cada ensayo, según indican las normas europeas aplicables a los ensayos.

2.2.3. Análisis estadístico de los resultados

De los valores medios de los ensayos se obtuvieron las barras de error, la desviación estándar y se realizó el análisis de la varianza (ANOVA). El análisis estadístico se realizó con el programa informático SPSS v. 25.0 de IBM.

3. Resultados y Discusión

3.1. Densidad.

Los valores medios de densidad de cada tipo de tablero se indican en la figura 2, no observándose diferencias significativas entre unas clases de tableros y otros. Son tableros de alta densidad 1343 ± 74 kg/m^3. El análisis estadístico indica que la densidad no depende del tamaño de la partícula ni del tiempo en la prensa.

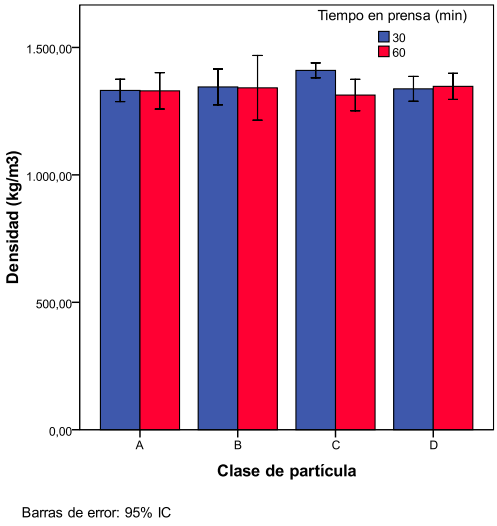
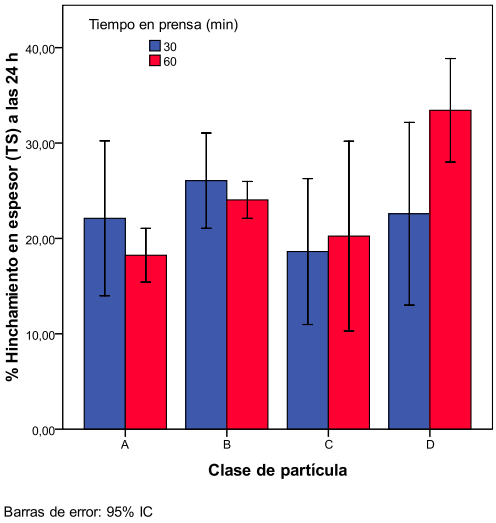


Figura 2. Densidad media en función de la clase de tablero.

3.2. Hinchamiento en espesor (TS) y absorción de agua (WA) después de inmersión en agua durante 2h y 24 h.



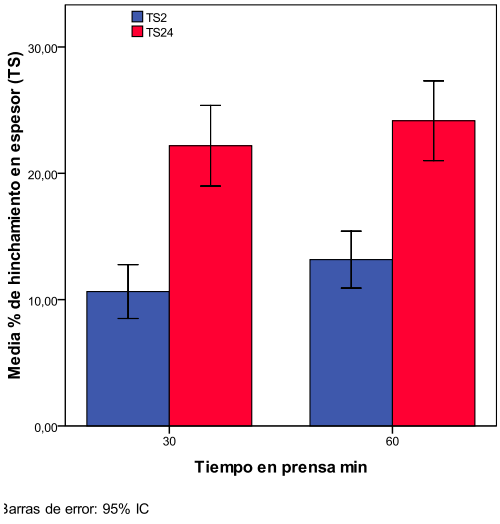


Figura 3. TS a las 24 h en función del tipo de tablero. **Figura 4.** TS en función del tiempo en prensa.

El ensayo se realizó en tres probetas de cada tablero. Los resultados medios de hinchamiento en espesor (TS) a las 24 h se indican en la figura 3. En el ensayo a las 2 h, los tableros con menor TS son tipo C1 con un 8.77%, y los tableros con mayor TS son tipo B4 con un 17.51 %. A las 24 h los tableros tipo A2 tienen un TS del 18.24 % (valor mínimo), y los tableros tipo B4 del 33.43 % (valor máximo). Estadísticamente se observa que depende del tamaño de partícula y del tiempo en la prensa. En la figura 4 se observan los valores medios de TS de cada tipo de tablero y las barras de error con un índice de certeza del 95% en función del tiempo en la prensa.

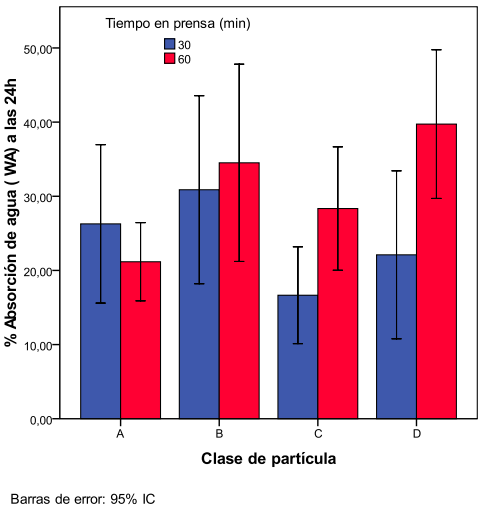


Figura 5. WA en función del tipo de tablero.

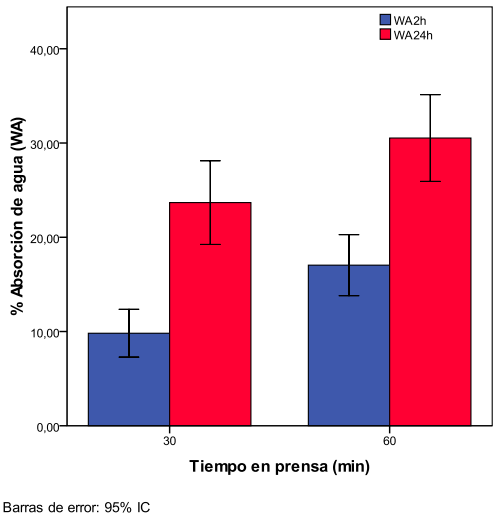


Figura 6. WA en función del tiempo en la prensa.

En la figura 5 se indican los valores medios de WA y las barras de error a las 24 h. Los valores del porcentaje de absorción de agua a las 2 h oscilan entre el tipo C1 con un 6.83 % y el B2 con un 20.42 %, habiendo grandes diferencias entre unos tipos de tableros y otros. A las 24 h aumenta la absorción de agua obteniendo en los tipos C1 un valor del 16.65 % y en los tipos B4 del 39.73%. Esto indica que depende del tamaño de partícula y del tiempo en la prensa. En la figura 6 se observa que a mayor tiempo en la prensa mayor es WA.

Para minimizar el hinchamiento y la absorción de agua se podría emplear algún producto hidrófugo como los que se utilizan en la industria de la madera.

3.3. Resistencia a flexión (MOR) y Modulo de elasticidad en flexión (MOE)

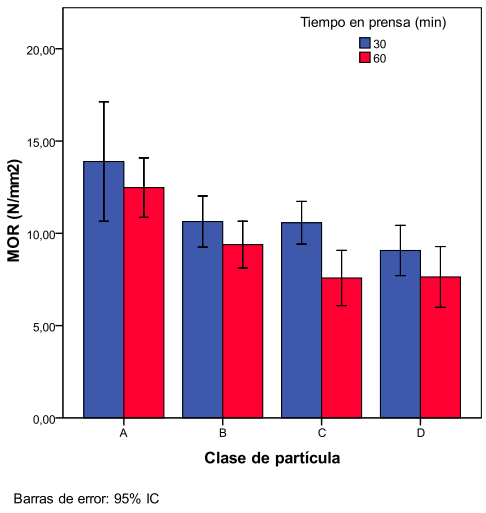


Figura 7. MOR en función del tipo de tablero.

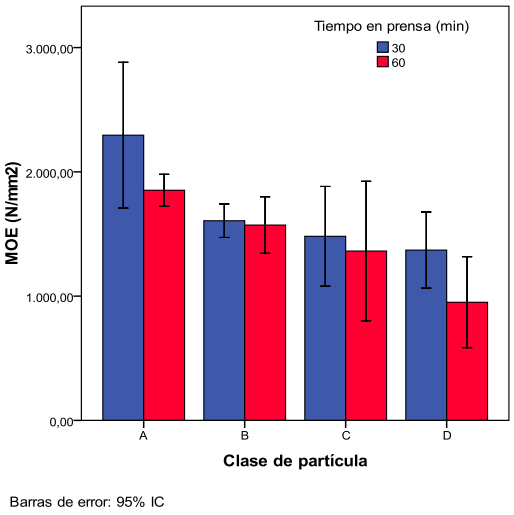


Figura 8. MOE en función del tipo de tablero.

Para obtener las propiedades a flexión se cortaron 6 probetas de cada tablero, tres en dirección longitudinal y otras tres en dirección transversal. Los resultados de los ensayos a flexión se indican en las figuras 7 y 8, donde se observa el valor medio de los ensayos de resistencia a flexión (MOR) de cada uno de los tipos de tableros y el módulo de elasticidad en flexión (MOE).

Los valores obtenidos de resistencia a flexión y el módulo de elasticidad dependen del tamaño de partícula utilizada, disminuyendo conforme el tamaño de partícula es mayor. El tiempo en la prensa influye negativamente ya que a mayor tiempo se alcanzan peores resistencias. Con las partículas de tamaño < 0.25 mm se obtienen mayores resistencias logrando un valor de MOR de 14.01 N/mm^2 y un MOE de 2295.32 N/mm^2.

3.4. Cohesión interna (IB)

Los resultados del ensayo de cohesión interna (IB) se indican en la figura 9, obteniéndose valores elevados que oscilan entre 0.57 y 1.27 N/mm^2.

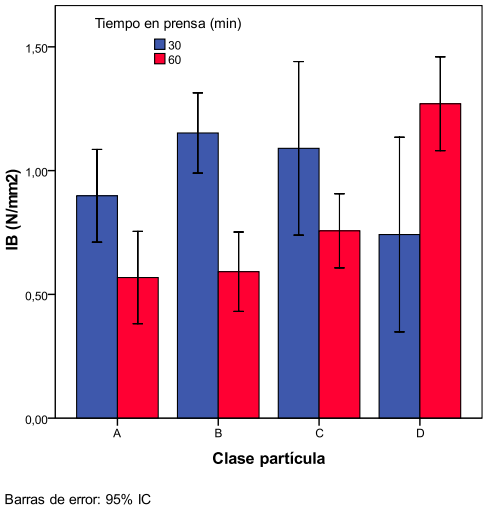


Figura 9. Cohesión interna en función del tipo de tablero.

Como puede observarse en la figura 9 la cohesión interna depende del tamaño de partícula. Con un tiempo de prensado de 30 min se obtienen mejores valores con partículas de tamaño medio y con tiempo de prensado de 30+30 min se mejoran los resultados en la medida que el tamaño de las partículas aumenta. En la tabla 2 se comparan los resultados obtenidos con los valores necesarios especificados en las normas europeas [56] para determinar la compatibilidad de usos de tableros con espesor de 4 a 6 mm.

Tabla 2. Características de los tipos de paneles elaborados y clasificación.

Tipo de tablero	MOR	MOE	IB	TS 24 h
A1	14.01	2295.32	0.90	22.11
A2	12.48	1852.04	0.57	18.24
B1	10.64	1606.83	1.15	26.06
B2	9.39	1571.91	0.59	24.04
C1	10.57	1481.50	1.09	18.62
C2	7.58	1362.81	0.76	20.24
D1	9.07	1370.56	0.74	22.58
D2	7.64	950.65	1.27	33.43
Tipo P1 [56]	11.50	-	0.31	-
Tipo P2 [56]	12.00	1950.00	0.45	-
Tipo P3 [56]	14.00	1950.00	0.50	20.00

Solo podrían ser empleados los tableros fabricados con menor tamaño de partícula y 30 minutos de tiempo de prensa (tipo A1) como tableros de uso general para utilización en ambiente interior (P1) o tableros para aplicaciones interiores incluyendo mobiliario (P2). Para conseguir la clasificación P3 (tableros no estructurales para ambiente húmedo) habría que considerar añadir sustancias hidrófobas para disminuir el valor de TS.

En un trabajo anterior [50] con una temperatura de 110ºC se obtuvieron menores valores resistentes. En este caso al aumentar la temperatura a 120ºC se ha incrementado en más del 50% su resistencia, por lo que será necesario realizar nuevos ensayos para comprobar la influencia de la temperatura.

Con el casco exterior de la almendra se obtienen mejores propiedades que con la palmera datilera [30, 34] y con la palmera de aceite [35, 39] empleando menor temperatura, lo que supone un gasto energético inferior.

Con partículas de tallos de arroz [42] y palmera canaria [40] se obtienen mejores propiedades al someter los tableros a presión de forma cíclica, en cambio con el casco exterior de la almendra empeoran las propiedades. Será necesario comprobar la fabricación de estos tableros utilizando menores tiempos en la prensa de platos calientes, ya que este material tiene distinto comportamiento al ser sometido a calor y presión.

Los cascos exteriores de la almendra tienen gran cantidad de polisacáridos [2, 3], luego es factible que algunos alcanzaran la temperatura de transición vítrea y contribuyeran a la auto-unión.

4. Conclusiones

Los tableros fabricados con partículas < 0.25 mm y 30 minutos de prensa (tipo A1) alcanzan propiedades compatibles para ser empleados para revestimientos interiores y en elementos de mobiliario.

Los tableros se han fabricado a una temperatura de 120ºC (que puede considerarse como muy baja) y un tiempo de prensa de 30 y 30+30 min, por lo que habría que realizar nuevos ensayos organizando nuevas combinaciones para intentar conseguir mejores propiedades.

Todas las propiedades analizadas dependen del tamaño de partícula utilizado, salvo la densidad que no presenta diferencias significativas entre los diferentes tipos de tableros ensayados.

Los tableros obtenidos cuentan con una alta densidad, por tanto, uno de los mercados potenciales para este tipo de tableros podría ser el núcleo central de los pavimentos laminados, donde actualmente se están empleando tableros de fibra de madera de alta densidad.

Este estudio demuestra que es técnicamente posible fabricar tableros de partículas sin adhesivos con el casco exterior de la almendra.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad de España (MINECO, AGL2013-41612-R).

Referencias

1. Chen, P., Yanling, C., Shaobo, D., Xiangyang, L., Guangwei, H., Ruan, R. Utilization of almond residues. International J Agricultural and Biological Engineering **2010**; 3(4), 1-18.
2. Offeman, R.D., Dao, G.T., Holtman, K.M., Orts, W.J. Leaching behavior of water-soluble carbohydrates from almond hulls. Ind Crops Prod **2015;** 65, 488-495.
3. Sequeira, R.M., Lew, R.B. The carbohydrate composition of almond hulls J. Agric. Food Chem. **1970**; 18(5), 950-951.

4. Amico, V., Barresi, V., Condorelli, D., Spatafora, C., Tringali, C. Antiproliferative Terpenoids from Almond Hulls (Prunus dulcis): Identification and Structure− Activity Relationships. J. Agric. Food Chem. **2006**; 54(3), 810-814.
5. Takeoka, G., Dao, L., Teranishi, R., Wong, R., Flessa, S., Harden, L., Edwards, R. Identification of three triterpenoids in almond hulls. J. Agric. Food Chem. **2000**; 48(8), 3437-3439.
6. Sang, S., Lapsley, K., Rosen, R. T., Ho, C.T. New prenylated benzoic acid and other constituents from almond hulls (Prunus amygdalus Batsch). J. Agric. Food Chem. **2002**; 50(3), 607-609.
7. Takeoka, G.R., Dao, L.T. Antioxidant constituents of almond [Prunus dulcis (Mill.) DA Webb] hulls. J. Agric. Food Chem. **2003**; 51(2), 496-501.
8. Pinelo M., Rubilar M., Sineiro J., Núñez M. J. Extraction of antioxidant phenolics from almond hulls (Prunus amygdalus) and pine sawdust (Pinus pinaster). Food Chem **2004**; 85(2), 267–73.
9. Wijeratne, SSK., Abou-Zaid, M.M., Shahidi, F. Antioxidant Polyphenols in Almond and Its Coproducts. J. Agric. Food Chem. **2005**; 54(2), 312–318.
10. Rubilar, M., Pinelo, M., Shene, C., Sineiro, J., Nuñez, M.J. Separation and HPLC-MS identification of phenolic antioxidants from agricultural residues: almond hulls and grape pomace. J. Agric. Food Chem. **2007**; 55(25), 10101-10109.
11. Sfahlan, A.J., Mahmoodzadeh, A., Hasanzadeh, A., Heidari, R., Jamei, R. Antioxidants and antiradicals in almond hull and shell (Amygdalus communis L.) as a function of genotype. Food Chem **2009**; 115(2), 529-533.
12. Demirbas, A., Pehlivan, E., Altun, T. Potential evolution of Turkish agricultural residues as bio-gas, bio-char and bio-oil sources. I J of Hydrogen Energy **2006**; 31(5), 613-620.
13. Holtman, K.M., Offeman, R.D., Franqui-Villanueva, D., Bayati, A.K., Orts, W.J. Countercurrent extraction of soluble sugars from almond hulls and assessment of the bioenergy potential. J. Agric. Food Chem. **2015**; 63(9), 2490-2498.
14. Aktas, T., Thy, P., Williams, R. B., McCaffrey, Z., Khatami, R., Jenkins, B.M. Characterization of almond processing residues from the Central Valley of California for thermal conversion. Fuel Processing Technology **2015**; 140, 132-147.
15. Ioannidou, O., Zabaniotou, A. Agricultural residues as precursors for activated carbon production--A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews **2007**; 11(9), 1966–2005.
16. Reddad, Z., Gerente, C., Andres, Y., Le Cloirec, P. Adsorption of several metal ions onto a low-cost biosorbent: kinetic and equilibrium studies. Enviro Scien Tech **2002**; 36(9), 2067-2073.
17. Ahmadpour, A., Tahmasbi, M., Bastami, T.R., Besharati, J.A. Rapid removal of cobalt ion from aqueous solutions by almond green hull. Journal of Hazardous Materials **2009**; 166(2-3), 925-930.
18. Adegoke, K.A., Bello, O.S. Dye sequestration using agricultural wastes as adsorbents. Water Resources and Industry **2015**; 12, 8-24.
19. Alibes, X., Maestre, M.R., Muñoz, F., Combellas, J., Rodriguez, J. Nutritive value of almond hulls for sheep. Animal Feed Science and Technology **1983**; 8(1), 63-67.
20. Aguilar, A. A., Smith, N. E., Baldwin, R. L. Nutritional value of almond hulls for dairy cows. J. Dairy Science **1984**; 67(1), 97-103.
21. Aderibigbe, A.O, Tor-Agbidye, Y., Cheeke, P.R., Patton, N.M. Evaluation of almond hulls as a feedstuff for rabbits. Journal of Applied Rabbit Research **1990**; 13(3-4): 110–3.
22. Jahanban-Esfahlan, A., Jamei, R., Jahanban-Esfahlan, R. The importance of almond (Prunus amygdalus L.) and its by-products. Food Chem **2010**; 120, 349-360.
23. Yalchi, T., Kargar, S. Chemical composition and in situ ruminal degradability of dry matter and neutral detergent fiber from almond hulls. J Food Agric Environ **2010**; 8(2), 781-784.
24. Jafari, S., Alizadeh, A., Imni, A., Meng, G. Y., Rajion, M.A., Ebrahimi, M. In situ degradation of almond (Prunus dulcis L.) hulls, a potential feed material for ruminants. Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences **2015**; 39(6), 676-681.
25. Gürü, M., Tekeli, S., Bilici, I. Manufacturing of urea–formaldehyde-based composite particleboard from almond shell. Materials and Design **2006**; 27(10), 1148-1151.
26. Pirayesh, H., Khazaeian, A. Using almond (Prunus amygdalus L.) shell as a bio-waste resource in wood based composite. Composites Part B: Engineering **2012**; 43(3), 1475-1479.

27. Chaudhary, A. K., Gope, P. C., Singh, V. K. Effect of almond shell particles on tensile property of particleboard. Journal Mater. Environ. Sci **2013**; 4, 109-112.
28. Sabarinathan, P., Rajkumar, K., Gnanavelbabu, A. Mechanical properties of almond shell-sugarcane leaves hybrid epoxy polymer composite. Trans Tech Publications. Applied Mechanics and Materials **2016**; 852, 43-48.
29. 29. Quiles-Carrillo, L., Montanes, N., Sammon, C., Balart, R., Torres-Giner, S. Compatibilization of highly sustainable polylactide/almond shell flour composites by reactive extrusion with maleinized linseed oil. Ind Crops Prod **2018**; 111, 878-888.
30. Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-Garcia, C.E., Andreu-Rodriguez, J., Ferrandez-Garcia, M.T., Garcia-Ortuño, T. Effect of pressing conditions on physical and mechanical properties of binderless boards made from almond hulls (Prunus dulcis (Mill.) DA Webb). In Proceedings of the 41 International Symposium on Agricultural Engineering (**2013**, February) 19-22.
31. Amirou, S., Zerizer, A., Pizzi, A., Haddadou, I., Zhou, X. Particleboards production from date palm biomass. E J Wood and Wood Prod **2013**; 71(6), 717-723.
32. Saadaoui, N., Rouilly, A., Fares, K., Rigal, L. Characterization of date palm lignocellulosic by-products and self-bonded composite materials obtained thereof. Materials and Design **2013**; 50, 302-308.
33. Hegazy, S., Ahmed, K., Hiziroglu, S. Oriented strand board production from water-treated date palm fronds. BioRes **2014**; 10(1), 448-456.
34. Laemsak, N., and Okuma M. Development of boards made from oil palm frond II: properties of binderless boards from steam-exploded fibers of oil palm frond. J Wood Scie **2000**; 46, 322-326.
35. Hashim, R., Wan Nadhari, WNA., Sulaiman, O., Kawamura, F., Hiziroglu, S., Sato, M., Sugimoto, T., Seng, TG., Tanaka, R. Characterization of raw materials and manufactured binderless particleboard from oil palm biomass. Materials and Desing **2011**; 32, 246-252.
36. Boon, J.G., Hashim, R., Sulaiman, O., Hiziroglu, S., Sugimoto, T., and Sato, M. Influence of processing parameters on some properties of oil palm trunk binderless particleboard. E J Wood and Wood Prod **2013**; 71, 583–589.
37. Lammaming, J., Sulaiman, O., Sugimoto, T., Hashim, R., Said, N., Sato, M. Influence of chemical components of oil palm on properties of binderless particleboard. BioRes **2013**; 8(3), 3358-3371.
38. Jumhuri, N., Hashim, R., Sulaiman, O., Noor Aidawati, W., Salleh, K.M., Saharudin, N.I. and Razali, M.Z. Effect of treated particles on the properties of particleboard made from oil palm trunk. Materials and Design **2014**; 64, 769-774.
39. Henao, E. M., Quintana, G. C., Ogunsile, B. O. Development of binderless fiberboards from steam-exploded and oxidized oil palm wastes. BioRes **2014**; 9(2), 2922-2936.
40. Ferrandez-Garcia, A., Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-Garcia, C.E., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, M. T. Potential Use of Phoenix canariensis Biomass in Binderless Particleboards at Low Temperature and Pressure. BioRes **2017**; 12(3), 6698-6712.
41. Kurokochi, Y., Sato, M. Effect of surface structure, wax and silica on the properties of binderless board made from rice straw. Ind Crops Prod **2015**; 77, 949-953.
42. Ferrandez-Garcia, C.C., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, M. T., Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-García, C.E. Fire-resistance, physical, and mechanical characterization of binderless rice straw particleboards. BioRes **2017**; 12(4), 8539-8549.
43. Xu, J., Sugawara, R., Widyorini, R., Han, G., Kawai, S. Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. J Wood Scien **2004**; 50(1), 62-67.
44. Widyorini, R., Xu, J., Watanabe, T., Kawai, S. Chemical changes in steam-pressed kenaf core binderless particleboard. J Wood Scien **2005**; 51(1), 26-32.
45. Nonaka, S., Umemura, K., Kawai, S. Characterization of bagasse binderless particleboard manufactured in high-temperature range. J Wood Scien **2013**; 59(1), 50-56.
46. Van Dam, J.E., Van den Oever, M.J., Keijsers, E.R. Production process for high density high performance binderless boards from whole coconut husk. Ind Crops Prod **2004**; 20(1), 97-101.
47. Widyorini, R., Yudha, A. P., Prayitno, T. A. Some of the properties of binderless particleboard manufactured from bamboo. Wood Research J **2011**; 2(2), 89-93.

48. Khazaeian, A., Ashori, A., Dizaj, M.Y. Suitability of sorghum stalk fibers for production of particleboard. Carbohydrate Polymers **2015**; 120, 15-21.
49. Ferrandez-Garcia, M.T., Ferrandez-Garcia, C.E., Andreu-Rodriguez, J., Ferrandez-Villena, M., Garcia-Ortuño, T. The suitability of utilising cotton stalk for low cost binderless panels. In Actual Tasks on Agricultural Engineering. Proceedings of the 41. International Symposium on Agricultural Engineering, Opatija, Croatia, 19-22 February **2013**, 383-387.
50. EN 309. **2005**. Tableros de partículas. Definición y clasificación. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
51. EN 323. **1993**. Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la densidad. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
52. EN 317. **1993.** Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la hinchazón en espesor después de inmersión en agua. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
53. EN 319. **1993**. Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las caras del tablero. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
54. EN 310. **1993**. Tableros derivados de la madera. Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
55. EN 312. **2010**. Tableros de partículas. Especificaciones. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Estudio de los costes de construcción y climatización en bodegas: tipologías constructivas de la sala de barricas respecto a la cota del terreno

A. Tascón[1], J. Gómez[2]

[1] Dpto. Agricultura y alimentación, Universidad de La Rioja; alberto.tascon@unirioja.es
[2] Faber 1900 - Estudio de Ingeniería y Arquitectura; javier@faber1900.com

Resumen: El objetivo de este trabajo fue estimar el coste de construcción y el de climatización de la sala de barricas de una bodega de Rioja, considerando 3 posibles tipologías constructivas: subterránea, parcialmente subterránea o semienterrada y aérea sobre cota cero del terreno. Las dimensiones de la sala de barricas se establecieron a partir de datos estadísticos obtenidos en trabajos previos, pudiendo considerarse como representativas de las bodegas industriales de la D.O.Ca. Rioja, y se fijó su ubicación en las proximidades de la ciudad de Logroño. En el estudio se incluyeron varias soluciones constructivas habituales para los cerramientos de fachada y de cubierta. La demanda de climatización, tanto de refrigeración como de calefacción, se calculó mediante el Método de las Series Radiantes de ASHRAE, implementado en la aplicación informática Cypetherm Loads. Los costes de construcción se calcularon a partir de una base de precios de uso habitual y el programa Presto, apoyándose también en la experiencia propia en proyectos. El análisis y comparación de los resultados obtenidos ha permitido obtener información relevante para la toma de decisiones en la fase de diseño de bodegas.

Palabras clave: crianza, Rioja, eficiencia energética, diseño, proyectos

1. Introducción

Es bien conocido que el vino requiere unas determinadas condiciones de temperatura y humedad para su adecuado envejecimiento y conservación [1]. Además, las condiciones higrotérmicas también influyen en las pérdidas de vino por evaporación y en el desarrollo de mohos [2].

El control de la temperatura en los locales destinados a la crianza de vino implica un coste debido al consumo de energía, excepto en aquellos casos particulares en los que no se precise un sistema mecánico de climatización. La eficiencia energética de las bodegas es un aspecto de gran interés y que puede jugar un papel relevante en el grado de competitividad y en la sostenibilidad del sector a largo plazo.

Los costes de climatización de la sala de barricas variarán en función de la tipología constructiva de la bodega respecto a la cota del terreno. Tradicionalmente, las bodegas se ejecutaban subterráneas en muchas zonas productoras, para aprovechar la mayor inercia térmica de estos espacios y conseguir así una adecuada conservación del vino sin necesidad de instalar sistemas para el control de la temperatura [3]. En la actualidad se pueden encontrar bodegas aéreas, bodegas parcialmente enterradas o semisubterráneas y bodegas subterráneas [4]; cada una de estas soluciones tendrá asociada distinta demanda energética. Otro aspecto a considerar en el diseño de la sala de crianza y en su influencia sobre la rentabilidad de la bodega es el coste asociado a su construcción, que también variará según su disposición respecto a la cota del terreno.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3349

Partiendo de trabajos previos [5], en el presente estudio se ha profundizado en el análisis de los costes de construcción y climatización de una sala de crianza en barricas en relación a su disposición con respecto a la cota del terreno, considerando así mismo distintas soluciones constructivas para la envolvente de la misma.

2. Materiales y métodos

2.1. Casos de estudio

Este trabajo se ha centrado en las bodegas acogidas a la Denominación de Origen Calificada Rioja. Los casos de estudio se han definido a partir de una sala de barricas de 1547 m^2, que puede considerarse representativa de las bodegas industriales de Rioja, según los datos obtenidos previamente sobre el diseño y distribución en planta de bodegas de Rioja [6]. Las dimensiones elegidas fueron 36,3 m x 43,7 m en planta y una altura libre de 7 m. La ubicación seleccionada ha sido Logroño.

En el análisis se han estudiado 3 posibles tipologías constructivas: sala de barricas totalmente subterránea (cota -7,00 m), sala parcialmente subterránea (cota -3,50 m) y sala aérea sobre cota cero del terreno (cota 0,00 m). Distintas soluciones para la envolvente, habituales en los proyectos de bodegas de Rioja, han sido consideradas. En la Tabla 1 se resumen los casos de estudio.

Tabla 1. Características de las salas de crianza analizadas

Caso nº	Cota	Cubierta	Cerramientos
1	0,00 m	R1	W1
2	0,00 m	R1	W2
3	0,00 m	R2	W1
4	0,00 m	R2	W2
5	-3,50 m	R1	W1
6	-3,50 m	R1	W2
7	-3,50 m	R2	W1
8	-3,50 m	R2	W2
9	-7,00 m	R3	W3
10	-7,00 m	R4	W3

A continuación, se describen brevemente las características de las distintas soluciones constructivas:

- R1: teja sobre doble rastrel metálico apoyada en panel sándwich con 10 cm de aislante de lana de roca.
- R2: teja sobre doble rastrel metálico apoyada en placa de fibrocemento y falso techo horizontal con paneles de lana de roca de 4 cm.
- R3: firme de hormigón de 20 cm sobre láminas impermeabilizantes y 12 cm de poliestireno extruido, todo apoyado en losa de HA de 40 cm (esta sala de barricas enterrada estaría situada bajo una zona de circulación de vehículos).
- R4: capa de 100 cm de tierra, geotextil separador y lámina drenante, capas de impermeabilización y losa de HA de 40 cm (esta sala de barricas enterrada estaría situada bajo zona verde, ajardinamiento, etc.).
- W1: panel de fachada prefabricado de hormigón de 24 cm de espesor con aislamiento a base de poliestireno expandido de 12 cm.
- W2: fábrica de bloques de termoarcilla de 29 cm de espesor enfoscada con mortero de cemento por ambas caras.
- W3: muro de hormigón armado ejecutado in situ.

En el caso de las bodegas semienterradas, los cerramientos se componen de dos partes: la parte enterrada se resuelve mediante un muro de HA (solución W3) y la parte aérea mediante el cerramiento que corresponda, W1 o W2. La solera, en todos los casos, se ha considerado constituida por una capa de encachado de grava, una capa de hormigón y acabado superficial mediante resina epoxi.

2.2. Demanda energética

La demanda de climatización, tanto de refrigeración como de calefacción, de cada uno de los casos de estudio se ha calculado mediante el Método de las Series Radiantes de ASHRAE [7], implementado en el módulo Cypetherm Loads de la aplicación informática CYPE [8]. Para ello, previamente se elaboró un modelo BIM para cada una de las 3 disposiciones constructivas (bodega aérea, semisubterránea y subterránea) utilizando la aplicación IFC-Builder de Cype.

Las características de los cerramientos (conductividad térmica, densidad y calor específico) han sido obtenidos del catálogo de elementos constructivos del Código Técnico de la Edificación [9] o directamente de catálogo de fabricantes, como en el caso de los paneles prefabricados de hormigón. Además, para que las simulaciones tuvieran en cuenta la gran inercia térmica que suponen las barricas de vino almacenadas en la sala de crianza, se crearon en los modelos BIM unos espacios ficticios cerrados con tabiquería consistente en dos capas, con las propiedades térmicas de la madera de roble y del vino, de manera que el volumen de madera y líquido y el volumen total ocupado por dichos espacios fueran similares al de las pilas de barricas almacenadas en la sala (ver Figura 1); este planteamiento es similar al adoptado previamente por Benni et al. [10].

Para las simulaciones energéticas se fijaron unos intervalos de temperatura y humedad deseables de 10-18 °C y 70-85 %, respectivamente, y se tomaron los datos climáticos de la estación meteorológica de Agoncillo, que es la más cercana a Logroño. En cuanto a las cargas térmicas, se consideró una renovación de aire al día, una ocupación de 2 personas durante 8 h/día y una carga por iluminación de 6,20 W/m^2 durante 8 h/día.

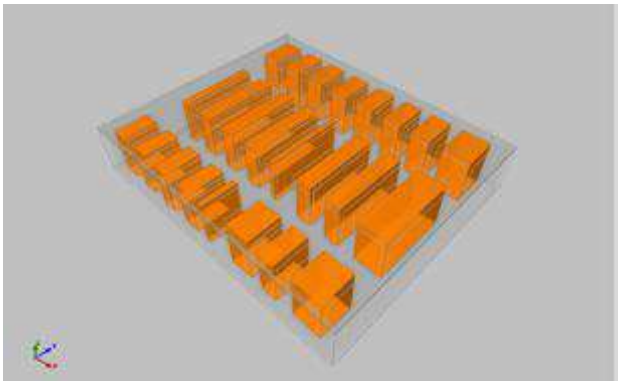


Figura 1. Modelo BIM de la sala de crianza con los espacios que simulan las pilas de barricas resaltados en color naranja.

2.3. Coste de construcción

Los costes de construcción han sido calculados tomando como referencia la base de precios PREOC [11] y con el apoyo de la aplicación informática Presto. Únicamente se han considerado las partidas relativas al coste de excavación, en su caso, y al de ejecución de la envolvente. El coste se ha expresado en forma de presupuesto de ejecución material. No se han incluido aquellas partidas y capítulos constructivos comunes a todas las bodegas y que son independientes de las

variables constructivas que se están analizando aquí, como por ejemplo fontanería, saneamiento, electricidad, incendios, pinturas y acabados, etc.

3. Resultados y discusión

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en relación a la demanda energética anual. Se puede observar que las soluciones más eficientes serían las salas de crianza enterradas, luego las semienterradas y, por último, las aéreas. El caso con menor demanda energética es el caso nº 9; también se indica en la Tabla 2 el incremento (%) de la demanda energética total en relación con dicho caso.

La Tabla 3 presenta el presupuesto de ejecución material de los distintos casos de estudio considerando el movimiento de tierras, la ejecución de la envolvente (fachadas y cubierta) y, en su caso, los muros sótano incluyendo su impermeabilización y drenaje. Los resultados indican que el coste constructivo más reducido corresponde a los casos nº 3 y nº 4.

Tabla 2. Demanda energética anual de calefacción (C), refrigeración (R) y total para las salas de crianza analizadas

Caso nº	Cota	Envolvente	C (kW·h)	R (kW·h)	Total (kW·h)	Δ (%)
1	0,00 m	R1W1	30.811	163.409	194.221	83
2	0,00 m	R1W2	27.532	147.378	174.910	65
3	0,00 m	R2W1	31.519	168.816	200.335	89
4	0,00 m	R2W2	33.663	147.161	180.824	70
5	-3,50 m	R1W1	23.795	146.583	170.378	60
6	-3,50 m	R1W2	22.132	137.532	159.664	50
7	-3,50 m	R2W1	27.162	151.048	178.210	68
8	-3,50 m	R2W2	25.805	142.892	168.697	59
9	-7,00 m	R3W3	20.620	85.603	106.223	0
10	-7,00 m	R4W3	23.539	95.104	118.643	12

La demanda energética anual presentada en la Tabla 2 da una indicación sobre el coste energético asociado a cada solución de diseño. Si se consideran las instalaciones concretas y fuentes de energía con las que se cubrirá dicha demanda energética (equipos mecánicos con consumo de energía eléctrica, bombas de calor con apoyo geotérmico o solar, biomasa, etc.), se podría determinar el coste anual en euros asociado a dicha demanda; esa es una línea de trabajo que servirá para complementar y ampliar el presente estudio. Con ello, se podrían comparar en euros los costes energéticos y de construcción para la toma de decisiones en la fase de diseño de un proyecto.

Tabla 3. Coste de construcción de las salas de crianza analizadas

Caso nº	Cota	Envolvente	Coste (€)	Δ (%)
1	0,00 m	R1W1	214.330,51	24
2	0,00 m	R1W2	219.985,80	27
3	0,00 m	R2W1	173.305,51	0
4	0,00 m	R2W2	178.960,80	3
5	-3,50 m	R1W1	309.513,59	79
6	-3,50 m	R1W2	312.341,24	80
7	-3,50 m	R2W1	268.488,59	55
8	-3,50 m	R2W2	271.316,24	57
9	-7,00 m	R3W3	693.749,12	300
10	-7,00 m	R4W3	615.109,47	255

4. Conclusiones

El presente estudio ha permitido obtener información sobre el coste de construcción y la demanda energética de climatización de salas de barricas aéreas, semienterradas y subterráneas, considerando varias soluciones constructivas habituales para los distintos elementos de la envolvente del edificio. La metodología de estudio utilizada puede ser fácilmente aplicada en proyectos reales, por lo que puede ser empleada para la selección de alternativas de proyecto y la toma de decisiones de diseño. De los resultados obtenidos se puede concluir que la cota seleccionada para la ejecución de la bodega tiene una influencia significativa, tanto en la demanda energética como en los costes de ejecución. Como línea de trabajo para continuar el presente estudio, la selección de instalaciones y equipos energéticos concretos permitiría calcular el coste anual asociado a la demanda energética y así poder comparar y seleccionar el diseño más óptimo para cada situación.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha contado con financiación del Instituto de Estudios Riojanos mediante el proyecto Análisis de los costes de construcción y climatización en las bodegas de Rioja: optimización de tipologías constructivas.

Referencias

1. Hidalgo Togores J. Tratado de Enología. Ed. Mundi-Prensa, 2003.
2. Blouin J., Maron J.M. Control de las temperaturas y calidad de los vinos. Ed. Acribia, 2008.
3. Mazarrón F.R., López-Ocón E., Garcimartín M.A., Cañas I. Assessment of basement constructions in the winery industry. Tunnelling and underground space technology. 2013, vol. 35, 200–206.
4. Yravedra Soriano M.J. Arquitectura y cultura del vino. Ed. Munilla-Lería, 2003.
5. Gómez J., Ruiz de Adana M.M., Altuzarra A. Análisis de costes de implantación y climatización de bodegas de crianza aéreas, semienterradas y enterradas. VI Foro Mundial del Vino, Logroño, España, 2008. Libro de Actas, CD-ROM, ISBN: 978-84-8125-306-1.
6. Gómez J., Tascón A., Ayuga F. Systematic layout planning of wineries: the case of Rioja region (Spain). Journal of Agricultural Engineering. 2018, vol. 49, 34–41.
7. ASHRAE Handbook, Vol. 1: Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.
8. CYPETHERM LOADS. Carga térmica de los edificios. CYPE Ingenieros. En Internet: <http://cypetherm-loads.cype.es/>
9. Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción. Catálogo de elementos constructivos del CTE. Ministerio de Vivienda, 2009.
10. Benni S., Torreggiani D., Barbaresi A., Tassinari P. Thermal performance assessment for energy-efficient design of farm wineries. Transactions of the ASABE. 2013, vol. 56, 1483–1491.
11. PREOC 2018. Base de precios de edificación y obra civil. Atayo, 2018. En internet: <http://www.preoc.es>

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Estudio del comportamiento de silos de chapa corrugada mediante modelos de elementos discretos

J.M. Fuentes[1], E. Gallego[1], F. Ayuga[1]

[1] Grupo de investigación EIPIRMA, Universidad Politécnica de Madrid; jm.fuentes@upm.es

Resumen: Los silos metálicos son estructuras ampliamente utilizadas para el almacenamiento y manejo de productos agrícolas. El correcto diseño de estas estructuras requiere predecir correctamente las presiones ejercidas por el material almacenado sobre el silo y otros parámetros tales como el patrón de flujo, la velocidad de las partículas durante el vaciado y la tasa de descarga.De acuerdo con la norma EN 1991-4, las presiones que actúan en las paredes de un silo pueden obtenerse utilizando las ecuaciones clásicas de Janssen o Reimbert. Aunque las fórmulas clásicas anteriormente citadas y la mayor parte de la investigación en el campo de los silos se han desarrollado para ejemplares de paredes lisas, la mayor parte de los silos comerciales se construyen en la actualidad con chapa corrugada, dada su mayor rigidez frente a la flexión.El método de los elementos discretos (DEM) se ha utilizado con éxito para simular el movimiento de sólidos disgregados y determinar las fuerzas que estos sólidos ejercen sobre los elementos que los contienen.El propósito de este trabajo es aprovechar las ventajas del método de elementos discretos para el análisis de paredes corrugadas. Utilizando el software EDEM Academic 2018, se ha modelado un silo a escala con paredes de chapa corrugada y se comparan los resultados (tasas de descarga, velocidades de partículas, rozamiento en las paredes y fricción movilizada entre partículas) con los obtenidos en un silo similar de paredes lisas.

Palabras clave: silos; chapa corrugada; rozamiento; DEM

1. Introducción

Los silos de acero con paredes de chapa corrugada representan una solución técnica muy utilizada por los fabricantes, dada la mayor rigidez a la flexión y resistencia al pandeo que ofrece este tipo de paredes frente a una pared de chapa lisa de similar espesor. La geometría del corrugado, sin embargo, determina el rozamiento existente entre el material almacenado y la pared, condicionando, por tanto, las presiones ejercidas por el material almacenado sobre la pared, así como la tasa de descarga y el flujo de las partículas durante el vaciado del silo.

La norma europea EN 1991-4 [1] plantea la existencia en silos de paredes corrugadas de una zona próxima a la pared, correspondiente aproximadamente al espacio situado entre las crestas de las ondulaciones, en la que el material almacenado permanece en reposo durante el vaciado del silo. La separación con el restante material en movimiento se produce a través de una superficie de rotura denominada "banda de corte". Dicho mecanismo para explicar la fricción se basa en los resultados obtenidos en trabajos experimentales previos [2-5].

De acuerdo con esos trabajos, el rozamiento ejercido por el grano sobre una superficie corrugada de acero puede explicarse como una combinación de fricción del grano sobre una superficie de chapa lisa y de fricción entre partículas. El coeficiente de rozamiento efectivo a

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3355

utilizar en ese caso para determinar las fuerzas tangenciales ejercidas por el grano sobre la pared del silo tomaría un valor comprendido entre dos valores límite: el coeficiente de fricción ejercido por el grano sobre una superficie lisa de metal (límite inferior) y el coeficiente de fricción entre las partículas (límite superior). A pesar de las bases teóricas anteriormente descritas, existen distintos factores tales como la geometría del corrugado o las dimensiones de las partículas, entre otros, cuya influencia detallada en el mecanismo de rozamiento requieren aún estudios adicionales.

El Método de Elementos Discretos (DEM) se ha utilizado con éxito para simular el movimiento de sólidos disgregados en el interior de los silos y determinar las fuerzas que las partículas ejercen sobre las paredes en los procesos de llenado y vaciado del silo [6-12].

El propósito de este trabajo es aprovechar las ventajas que ofrece el método de elementos discretos para el análisis de las paredes de chapa corrugada en silos. Utilizando el software *EDEM Academic 2018* [13], se ha modelado un silo a escala con paredes de chapa corrugada y se comparan los resultados obtenidos (tasas de descarga, velocidad de las partículas, rozamiento en las paredes y fricción movilizada entre partículas), con los que se producirían en otro silo de similar geometría y paredes lisas del mismo material.

2. Materiales y métodos

El método de los elementos discretos (Discrete Element Method, DEM) es una técnica numérica utilizada para simular el comportamiento mecánico de medios granulares. Se basa en un esquema numérico explícito en el que la interacción entre partículas está monitorizada contacto a contacto y en el que el movimiento de las partículas se modeliza partícula a partícula [14]. La interacción entre las partículas en sus puntos de contacto estará modelizada mediante una ley de fuerza-desplazamiento, a través de la cual se relaciona la magnitud del solape entre dos partículas o entre una partícula y una pared con la fuerza desarrollada en el contacto. La relación entre el movimiento de las partículas y las fuerzas actuantes en ellas se obtiene mediante la segunda ley de Newton.

El modelo tridimensional de silo a escala utilizado en las simulaciones presenta una sección transversal cuadrada de 0,25 x 0,25 m y una altura de 0,50 m. La boca de salida está situada en la posición central del fondo plano, y presenta unas dimensiones de 0,057 x 0,057 m. (Figura 1). Como material granular de llenado se utilizaron partículas esféricas de vidrio cuyo diámetro sigue una distribución normal de diámetro medio igual a 13,8 mm y una desviación estándar de ±0,55 mm, limitada al intervalo 0,91·d–1,11·d. Las paredes delantera y trasera del silo se simularon de metacrilato y las dos paredes laterales de chapa de acero.

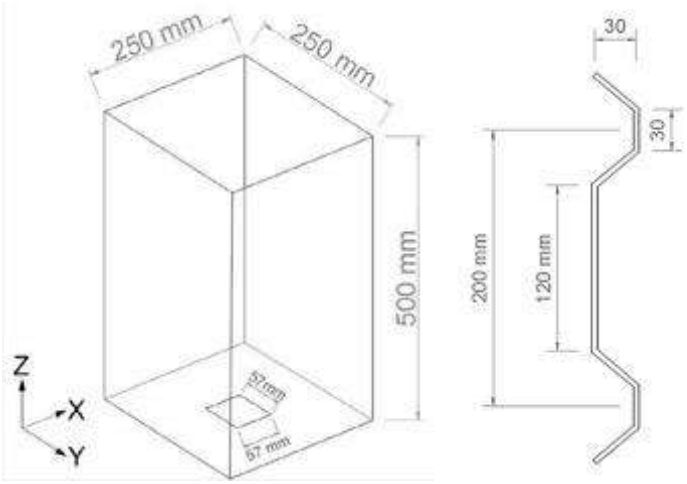


Figura 1. Modelo de silo a escala utilizado en las simulaciones.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos, se desarrollaron dos modelos diferentes, cuya única diferencia reside en las paredes laterales, en un caso de chapa lisa de acero galvanizado y en el otro formadas por chapa corrugada de perfil trapezoidal con una altura de corruga de 41,4 mm (3 veces el diámetro medio de las partículas utilizadas) y el resto de parámetros de su geometría los indicados en la Figura 1.

Tanto para los contactos partícula-partícula como para los contactos partícula-pared, se utilizó el modelo de Hertz-Mindlin, con amortiguación viscosa y deslizamiento en la dirección tangencial del contacto [15]. Las características mecánicas de los materiales y los parámetros de interacción considerados en los modelos se tomaron de la literatura [16-18] y son los expuestos en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del material empleados en los modelos DEM.

Propiedades mecánicas de los materiales			
Material	Densidad (kg/m^3)	Módulo de elasticidad (Pa)	Módulo de Poisson
Canicas de vidrio	2530	$3{,}15\cdot10^{9}$	0,22
Chapa de acero	7860	$2{,}1\cdot10^{11}$	0,3
Metacrilato	1190	$4{,}1\cdot10^{10}$	0,45
Parámetros de interacción entre materiales			
Materiales que interactúan	Coeficiente de restitución	Coeficiente de fricción estática	Coef. de fricción por rodadura
Partícula-partícula	0,75	0,3	0
Partícula – pared (acero)	0,71	0,251	0
Partícula – pared (metacrilato)	0,62	0,3	0

La masa total de las partículas utilizadas en ambos modelos fue de 29,3 kg y el tiempo total de descarga resultó ser de 16 segundos.2.1. Subapartados

3. Resultados y discusión

3.1. Tasas de descarga del material granular

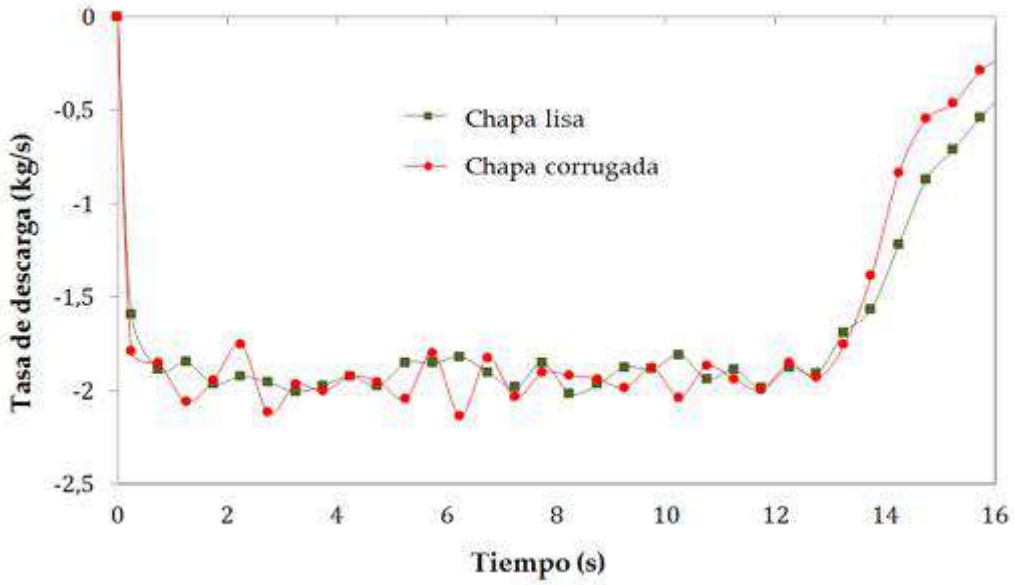


Figura 2. Caudales másicos durante la descarga

El gráfico de la figura 2 muestra la evolución del caudal másico de descarga en los dos modelos de elementos discretos desarrollados. Como puede observarse, el caudal másico de descarga aumenta rápidamente en ambos modelos desde el comienzo de la descarga, hasta alcanzar un valor más o menos estable a partir de los 2 s (0,125·T), en torno a 1,9-2 kg/s, que se mantienen más o menos estable y constante hasta completarse las ¾ partes de la descarga (0,75·T). A partir de ese momento, el caudal másico disminuye de forma rápida hasta el instante final del vaciado.

La Tabla 2 muestra el valor promedio del caudal másico en cuatro intervalos de tiempo del proceso de descarga. Según puede observarse, el modelo con chapa corrugada presenta un mayor caudal másico durante el período de descarga comprendido desde el inicio hasta el instante 0,75·T. En la última parte de la descarga (0.75 T - 1.00 T), sin embargo, los caudales másicos son mayores en el modelo de chapa lisa.

Tabla 2. Caudal másico promedio (kg/s) durante la descarga

Intervalo de la descarga	Modelo de pared lisa	Modelo de pared corrugada
0 T – 0,25 T	1.90	1.95
0,25 T – 0,5 T	1.91	2.02
0,5 T – 0,75 T	1.92	1.97
0,75 T – 1 T	1.20	1.05

3.2. Velocidad de las partículas

En la figura 3 se representa gráficamente el campo de velocidad de las partículas en la sección central del silo, equidistante de ambas paredes de metacrilato, para el instante de descarga 0.25·T (correspondiente a 4s). En ambos modelos, las velocidades más altas las muestran las partículas situadas justo encima de la boca de salida del silo. Sin embargo, puede observarse que las partículas con velocidades superiores a 0,1 m/s (10 cm/s) alcanzan una mayor altura sobre el fondo en el modelo de pared corrugada, lo que resulta consistente con la mayor tasa de descarga previamente reportada en ese instante para el modelo de pared corrugada. La existencia de una zona de material en reposo en la proximidad de la pared se muestra, asimismo, con claridad en ambos modelos.

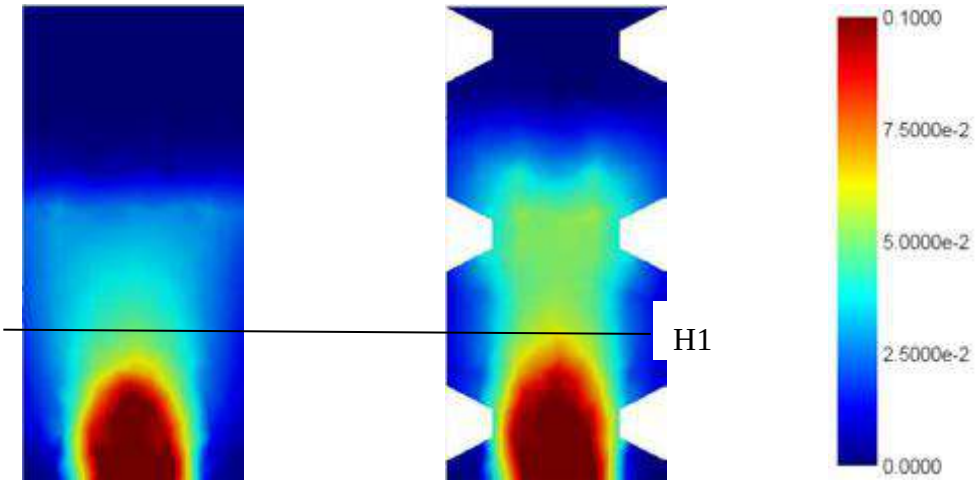


Figura 3. Velocidad de las partículas en m/s correspondientes al instante de descarga 0,25·T. Izquierda: silo de pared lisa; derecha: silo de pared corrugada.

La Figura 4 muestra el perfil de velocidades de las partículas obtenido en ambos modelos en un corte efectuado a la altura H1 situada a 160 mm sobre el fondo del silo (0,32·H) en el instante 0,25·T. En ambos modelos, las gráficas de velocidades ofrecen patrones similares, con un pico de velocidades en la posición central más alejada de las paredes y velocidades que se reducen progresivamente para las partículas localizadas en las proximidades a la pared del silo, cuya velocidad es cercana a 0 m/s, ofreciendo un valor más bajo en el modelo de pared corrugada. En el modelo de pared corrugada, asimismo, el pico de velocidades alcanzado en la posición central del silo es considerablemente mayor que en modelo de paredes lisas (6,1 cm/s vs 4.9 cm/s).

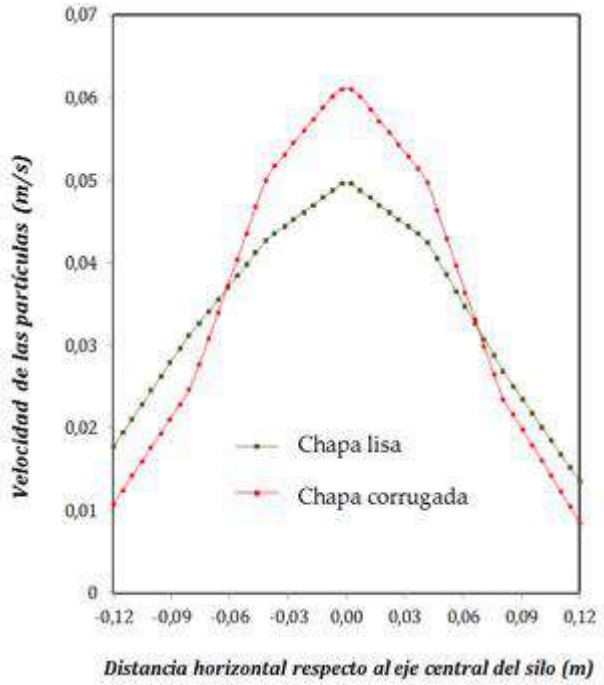


Figura 4. Perfil de velocidades de las partículas a una altura H1 de 160 mm respecto al fondo del silo, correspondiente al instante de descarga 0,25·T.

3.3. Rozamiento en las paredes

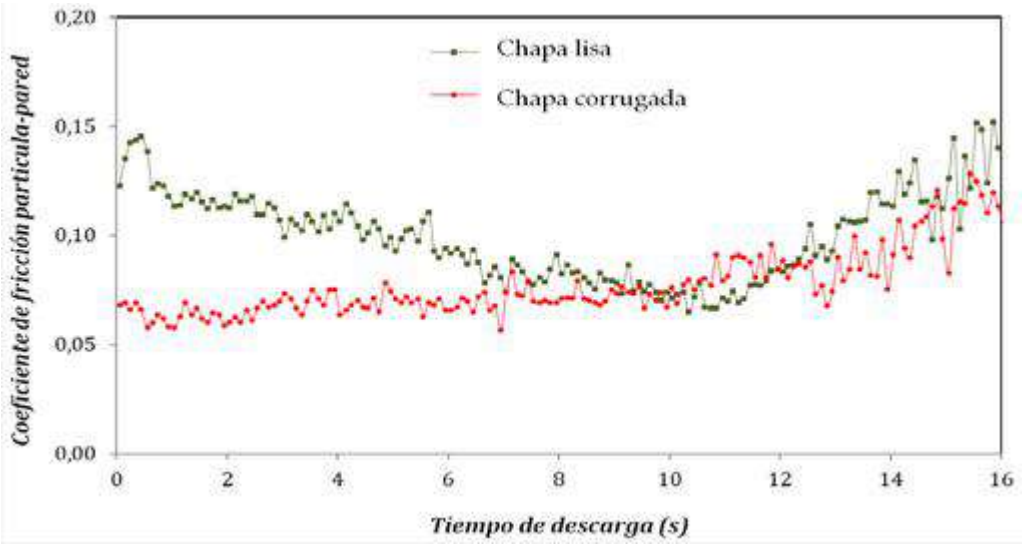


Figura 5. Coeficiente de fricción entre las partículas y la pared a lo largo de la descarga

La figura 5 muestra la evolución del coeficiente de fricción partícula-pared durante la descarga en los dos modelos desarrollados. El modelo de silo con paredes corrugadas ofrece menores coeficientes de fricción durante el intervalo de descarga 0-0,5T, sin diferencias significativas en la segunda mitad de la descarga.

El valor promedio del coeficiente de rozamiento global entre las partículas y la pared en el intervalo de descarga comprendido entre 3 y 5 s. fue de 0,092 para el modelo de pared corrugada y de 0,117 para el modelo de pared lisa. El rozamiento partícula pared resultó ser, por tanto, un 21,3% menor en el modelo de pared corrugada que en el similar de pared lisa.

3.4. Fricción movilizada entre las partículas

El rozamiento entre las partículas se ha analizado estudiando los contactos existentes en una rebanada virtual de espesor igual a 3 veces el tamaño medio de la partícula situada el centro del silo y a lo largo de toda su altura, suficientemente alejada de las paredes de metacrilato situadas en ambos fondos. Para determinar el coeficiente de rozamiento entre las partículas, se obtuvieron las fuerzas tangenciales y normales para todos los contactos producidos en el interior de la rebanada virtual, y posteriormente se sumaron para calcular el valor deseado del coeficiente de rozamiento como el cociente de ambas fuerzas (tangenciales frente a normales).

Como puede observarse en la figura 6, el coeficiente de fricción entre las partículas tiende a aumentar progresivamente a lo largo de la descarga en ambos modelos y, en general, ofrece valores ligeramente superiores en el modelo de pared corrugada. En el modelo de pared corrugada el valor promedio del coeficiente de fricción entre las partículas obtenido en el período comprendido entre el inicio y las ¾ partes del tiempo de descarga fue de 0,218 y el modelo de pared lisa el valor promedio obtenido fue de 0,205. Estos valores representarían respectivamente una movilización de la fricción microscópica entre partículas en la sección central vertical del silo del 72,7% y del 68,3%, considerando un valor de entrada de 0,3 para el coeficiente microscópico de fricción entre partículas. Dicho nivel de movilización de fricción entre partículas está de acuerdo con los valores reportados por otros autores [19].

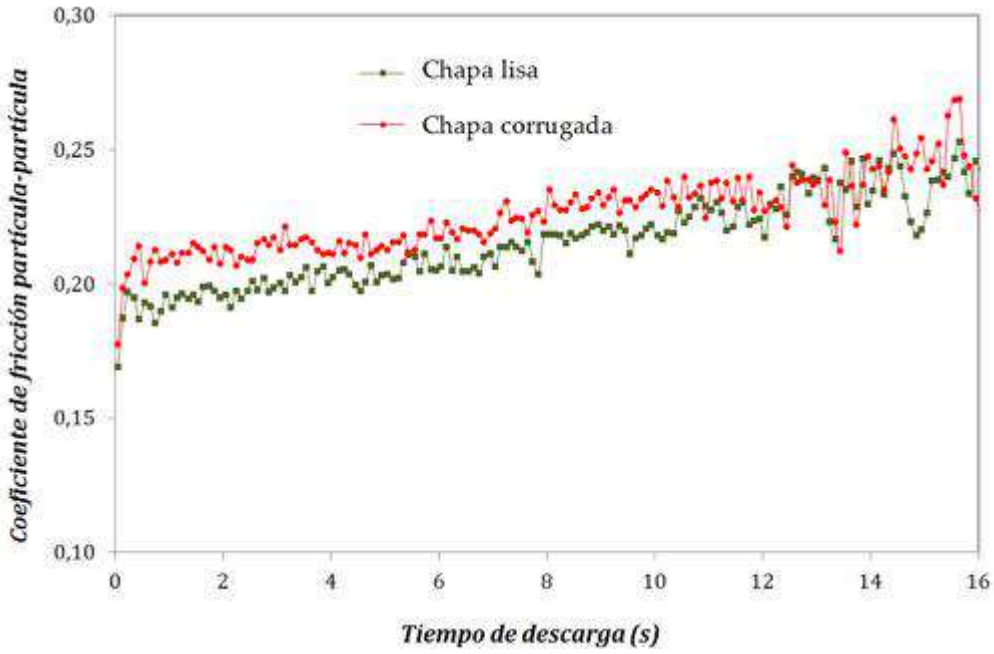


Figura 6. Coeficiente de rozamiento entre partículas en la sección central del silo

La figura 7 muestra cómo varía la fricción movilizada de partícula a partícula a lo largo del eje horizontal a la altura H1 en el momento de descarga 0,25 T. Con independencia de cuál sea el modelo considerado, la fricción entre partículas se moviliza en menor medida en las proximidades de las paredes, con valores comprendidos entre el 59% y el 65,2%. Los valores máximos de la movilización de fricción entre partículas producen cerca del centro del silo, con valores comprendidos en el intervalo entre el 65 y el 70%.

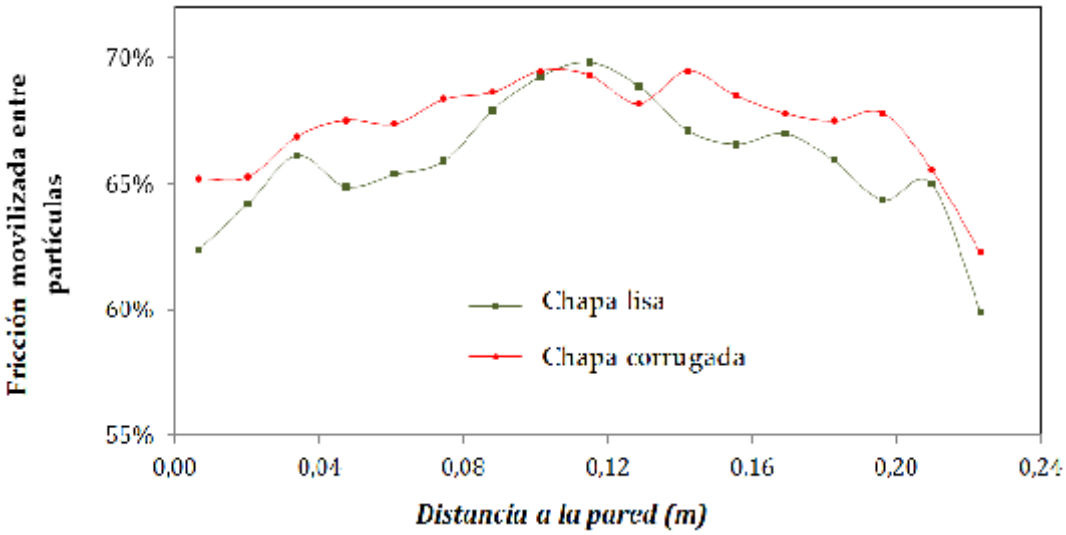


Figura 7. Movilización del rozamiento microscópico entre partículas a la altura H1 (0,32·H) correspondiente al instante de descarga 0,25·T

4. Conclusiones

En este trabajo se ha analizado el efecto del uso de paredes de chapa corrugada en los silos sobre la fricción ejercida por el material almacenado sobre la pared. El análisis se ha realizado mediante simulaciones en un silo modelo utilizando el método de los elementos discretos (DEM). Las principales conclusiones del trabajo se resumen a continuación:

- Los caudales másicos de descarga son mayores en el modelo de pared corrugada que en el de pared lisa, especialmente durante el período inicial de descarga, cuando la mayor parte del material se encuentra aún almacenado el silo.
- El modelo de pared ondulada respecto al de pared lisa ofrece una mayor velocidad de las partículas, especialmente en la parte central del silo, validando así las observaciones encontradas para la tasa de descarga. El material situado en la proximidad de las paredes se encuentra en reposo.
- El modelo de pared corrugada ofrece menores coeficientes de fricción entre las partículas y la pared durante la descarga, especialmente durante la parte inicial de la misma.
- El coeficiente de fricción global entre partículas en la sección central del silo aumentó progresivamente en ambos modelos desde el comienzo de la descarga. Los valores promedio obtenidos en el modelo de pared corrugada fueron 6,3% superiores a los obtenidos en el modelo de pared lisa. Los valores obtenidos representan una movilización de la fricción entre partículas en la sección central del silo en torno al 70% del valor del coeficiente de fricción microscópica entre partículas. Dicho nivel de movilización está de acuerdo con los valores reportados por otros autores.
- Los resultados obtenidos con este trabajo son prometedores para entender el mecanismo de fricción existente en las paredes de los silos corrugados y permitir la

validación de las ecuaciones propuestas en las normas. Sin embargo, se deben realizar trabajos adicionales teniendo en cuenta otros aspectos como las diferentes características o formas de las partículas, o el tipo y tamaño de las corrugas.

Referencias

1. EN 1991-4. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras - Parte 4: Silos y depósitos. 2011. Madrid: AENOR.
2. Moore, D.M., White, G.M., Ross, I.J. Friction of wheat on corrugated metal surfaces. Transactions of the ASAE. 1984, 27 (6), 1842 – 1847.
3. Versavel, P.A.; Britton, M.G. Interaction of Bulk Wheat with Bin Wall Configuration in Model Bins. Transactions of the ASAE. 1986, 29(2), 533–537.
4. Zhang, Q., Britton, M.G., Kieper, R. J. Interactions between wheat and a corrugated steel surface. Transactions of the ASAE. 1994, 37 (3), 951-956.
5. Molenda, M., Thompson, S.A., Ross, I.J. Friction of wheat on corrugated and smooth galvanized steel surfaces. Journal of Agricultural Engineering Research. 200, 77 (2), 209-219.
6. Goda, T.J., Ebert, F. Three-dimensional discrete element simulations in hoppers and silos. Powder Technology. 2005, 158(1-3), 58–68.
7. González-Montellano, C., Gallego, E., Ramírez-Gómez, A., Ayuga, F. Three dimensional discrete element models for simulating the filling and emptying of silos: Analysis of numerical results. Comput. Chem. Eng. 2012, 40, 22- 32.
8. Wang, P.; Zhu, L.; Zhu, X. Flow pattern and normal pressure distribution in flat bottom silo discharged using wall outlet, Powder Technology. 2016, 295, 104-114.
9. Weinhart, T., Labra, C., Luding, S., Ooi. J. Influence of coarse-graining parameters on the analysis of DEM simulations of silo flow. Powder Technology. 2016, 293: 138–148.
10. Balevicius, R., Sielamowicz, I., Mroz, Z., Kacianauskas, R. Investigation of wall stress and outflow rate in a flat-bottomed bin: A comparison of the DEM model results with the experimental measurements. Powder Technology. 2011, 214(3), 322–336.
11. Kobyłka, R., Molenda, M. DEM simulations of loads on obstruction attached to the wall of a model grain silo and of flow disturbance around the obstruction. Powder Technology. 2014, 256: 210–221.
12. González-Montellano, C., Ramírez, A., Fuentes, J. M., Ayuga, F. Numerical effects derived from en masse filling of agricultural silos in DEM simulations. Computers and Electronics in Agriculture. 2012, 81 (1), 113-123.
13. EDEM (2018). DEM Solutions Ltd. User Guide. Edimburgo (Reino Unido).
14. Cundal, P., Strack, O. A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique. 1979, 29(2), 47-65.
15. Tsuji, Y., Tanaka, T., Ishida, T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesion-less particles in a horizontal pipe. Powder Technology. 1992, 71(3), 239-250.
16. Chung, Y.C. Discrete element modelling and experimental validation of a granular solid subjected to different loading conditions. 2006. University of Edinburgh. PhD thesis.
17. Chung, Y.C., Ooi, J.Y. Confined compression and rod penetration of a dense granular medium: discrete element modelling and validation. Modern Trends in Geomechanics. 2006, 106, 223–239.
18. González-Montellano, C., Fuentes, J.M., Ayuga-Téllez, E., Ayuga, F. Determination of the mechanical properties of maize grains and olives required for use in DEM simulations. Journal of Food Engineering. 2012, 111 (4): 553-562.
19. Horabik, J., Parafiniuk, P., Molenda, M. Stress profile in bulk of seeds in a shallow model silo as influenced by mobilisation of particle-to-particle and particle-to-wall friction: experiments and DEM simulations. Powder Technology. 2018, 327: 320-334.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Evaluación experimental de un nuevo composite de caña común (*Arundo donax* L) utilizando ácido cítrico como ligante natural

A. Ferrández-García[1]; C.E. Ferrández-García[1]; M. Ferrández-Villena[1]; T. García-Ortuño, M.T. Ferrández-García[1]

[1] Departamento de Ingeniería. Escuela Politécnica Superior de Orihuela (Alicante). Universidad Miguel Hernández de Elche. España. Ctra. Beniel km 3,2. Orihuela (Alicante).

Resumen: El diseño de materiales destinados al aislamiento térmico se está convirtiendo en una parte esencial de la edificación. Las materias primas empleadas actualmente para su elaboración consumen gran cantidad de energía, lo que ha creado la necesidad de incrementar el uso de recursos renovables y ecológicos como las fibras vegetales para reducir los problemas medioambientales generados. Los adhesivos para madera desarrollados por la industria petroquímica tienen un excelente rendimiento, buenas propiedades de trabajo y son económicamente satisfactorios. Sin embargo, su uso tiene fecha de caducidad y en el futuro serán rechazados por los problemas ambientales y de salud que pueden causar y por la disminución de las reservas naturales de recursos fósiles de las que son extraídos. Este trabajo tuvo como objetivo el desarrollo de un nuevo material biocompuesto ecológico que pudiera ser utilizado como aislamiento térmico en edificaciones. Investigar experimentalmente el efecto del tamaño de las fibras de caña sobre la conductividad térmica y las propiedades mecánicas. En la elaboración se usó como materia prima partículas de caña de 2 a 6 mm y el contenido de ácido cítrico se fijó en el 5 y 10 wt % basado en las partículas secadas al aire. Se utilizaron tiempos de 7 y 15 minutos en la prensa de platos calientes. Los tableros con partículas se hicieron de una sola capa con una presión de 2.5 MPa y 150ºC. Los resultados mostraron que la adición de ácido cítrico mejora la estabilidad dimensional y las propiedades mecánicas de los tableros debido a la reacción entre el ácido cítrico y la caña, La resistencia a tracción interna y flexión de los biocompuestos se puede mejorar añadiendo el contenido adecuado de ácido cítrico. Este nuevo tipo de composite presenta buenas prestaciones térmicas y mecánicas que permiten su aplicación como materiales de aislamiento.

Palabras clave: aislantes térmicos, tableros de partículas, propiedades mecánicas y físicas.

1. Introducción

Los edificios son los responsables del 30% del consumo energético global y del 28% de las emisiones de CO_2. Una forma pasiva de potenciar el ahorro energético es mediante actuaciones que mejoren la envolvente térmica de las edificaciones. Actualmente existen en el mercado materiales tecnificados con buenas propiedades aislantes, pero consumen gran cantidad de energía en su elaboración.

Debido a los problemas ambientales que genera su fabricación se está incrementando el uso de recursos renovables y ecológicos, lo que ha producido un destacado aumento en las investigaciones que emplean fibras vegetales en el desarrollo de nuevos productos aislantes térmicos y el uso de adhesivos naturales.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3465

Hay gran cantidad de residuos vegetales que actualmente se queman, se trituran, se entierran o tienen que ser llevados a vertederos. De esta forma, el empleo de estas fibras vegetales como elemento natural y renovable en materiales aislantes conllevaría un gran beneficio ambiental y económico pues además de fijar el CO_2 durante toda la vida del edificio supondrían un producto totalmente reciclable en la fase final del mismo. En la selección de un aislamiento natural se deben considerar varios factores como su rendimiento térmico, la disponibilidad, el coste, la forma de aplicación y el impacto ecológico.

Existen trabajos sobre las propiedades aislantes de residuos vegetales: cáscara de coco [1], residuos de fabricación de papel y médula de maíz [2], fibras de kenaf [3], fibras de tallo de algodón [4, 5], cáscara de coco y bagazo [6], fibras de cáñamo [7, 8], fibras de palmera datilera y yeso [9], lino [10], lino y cáñamo [11], tallo de arroz [12], sisal [13], bagazo de caña de azúcar [14], caña común [15, 16], palmera canaria [17] y palmera washingtonia [18].

La caña común (*Arundo donax* L.) se utilizó como material de construcción en muchos países mediterráneos. En el sur de la provincia de Alicante se usó en todas las construcciones hasta principios del siglo XX, fundamentalmente formando parte de los forjados de cubierta y de piso. Hasta los años sesenta se siguió empleando para pequeñas construcciones unifamiliares y alojamientos ganaderos. En la actualidad, ha dejado de utilizarse, provocando un crecimiento desmesurado de su población en la ribera de los ríos que conlleva un grave peligro en las crecidas de agua, pues se dejan arrancar muy fácilmente por la fuerza de las aguas y generan problemas de obturación de puentes y otras infraestructuras. Luego el empleo de cañas en usos industriales ocasionaría una la mejora ambiental.

La mayoría de los adhesivos de madera actuales como resinas a base de formaldehído, resinas de acetato de vinilo y resinas a base de isocianato están compuestos por diversos materiales derivados de recursos fósiles. Los adhesivos de madera se han desarrollado en la industria petroquímica y tienen un excelente rendimiento, buenas propiedades de trabajo y son económicamente satisfactorios. Sin embargo, se cree que el uso de los adhesivos de madera actuales será inevitablemente restringido en el futuro debido a las disminuciones en las reservas de recursos fósiles. Esto ha originado investigaciones con distintos tipos de adhesivos naturales para la formación de diferentes paneles aislantes: lignina [19], almidón [15] y taninos [20]. Recientemente se ha estudiado el ácido cítrico como un adhesivo natural para la madera [14]. El ácido cítrico es un ácido policarboxílico orgánico que contiene tres grupos carboxilo. Está contenido en cítricos como limones y limas y se produce comercialmente por la fermentación de glucosa o glucosa y sacarosa.

En este trabajo se discute el uso de una mala hierba como es la caña común, en la fabricación de tableros de partículas con propiedades aislantes térmicas, utilizando ácido cítrico como ligante natural y fabricados con menor consumo de energía que los tableros industriales convencionales. Estos paneles serían totalmente ecológicos y producirían un destacado beneficio ambiental.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Los materiales utilizados en este estudio fueron partículas de caña común, ácido cítrico monohidrato y agua.

La biomasa de caña se obtuvo de la limpieza de la ribera del río Segura. Las cañas se pusieron a secar durante 12 meses al aire libre. Posteriormente se cortaron y se trituraron en una desfibradora de cuchillas. Las partículas se obtuvieron en una tamizadora vibradora y se seleccionaron las partículas que atravesaron el tamiz de 4 mm y quedaron retenidas en el tamiz de 2 mm. Las partículas tenían una humedad relativa del 9%.

El ácido cítrico monohidrato empleado tenía una pureza mínima del 99.5% y fue suministrado por la empresa Diasa Industrial S.A.

El agua se usó directamente de la red de agua potable municipal.

2.2. Métodos

2.2.1. Fabricación de los tableros de partículas

El proceso de fabricación consistió en mezclar en seco partículas de caña con diferentes proporciones en peso de ácido cítrico en función del peso de las partículas de caña (5% y 10%). Posteriormente se pulverizó un 10% de agua sobre la masa, removiéndola durante 15 minutos para su homogeneización. La manta se formó en un molde de dimensiones 600 mm x 400 mm y se sometió a presión y calor en una prensa de platos calientes. Se utilizó una temperatura de 150º C y se prensaron durante 7 min. Se varió la presión de la prensa para obtener paneles de distinta densidad (600, 650, 700, 750, 800, 850 kg/m3). Posteriormente, se dejaron los paneles enfriar en posición vertical. Los tableros tenían unas dimensiones aproximadas de 600 x 400 x 10 mm. Una vez enfriados, se cortaron las probetas para realizar los ensayos necesarios para la caracterización de las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de cada uno de los 12 tipos de tableros sometidos a estudio. Para cada tipo se elaboraron 4 paneles. Las características de cada tipo de tablero se indican en la tabla 1.

Tabla 1. Tipos de tableros elaborados.

Tipo de tablero	Nº de tableros	Densidad (kg/m³)	Tiempo (min)	Dosificación en peso		
				Caña	Agua	Ácido cítrico
A1	4	600	7	1	0.10	0.05
A2	4	650	7	1	0.10	0.05
A3	4	700	7	1	0.10	0.05
A4	4	750	7	1	0.10	0.05
A5	4	800	7	1	0.10	0.05
A6	4	850	7	1	0.10	0.05
B1	4	600	7	1	0.10	0.10
B2	4	650	7	1	0.10	0.10
B3	4	700	7	1	0.10	0.10
B4	4	750	7	1	0.10	0.10
B5	4	800	7	1	0.10	0.10
B6	4	850	7	1	0.10	0.10

En la figura 1 se observan algunos tableros fabricados.



Figura 1. Tableros de partículas de caña con ácido cítrico.

2.2.2. Ensayos realizados

El método seguido para evaluar los tableros fue experimental mediante ensayos en el laboratorio de resistencia de materiales. Sus propiedades se determinaron siguiendo las normas europeas establecidas para los tableros de partículas de madera [21]. Antes de proceder a los ensayos se cortaron las probetas de cada tablero con las dimensiones adecuadas según indican las normas europeas y se acondicionaron en una cámara de conservación a una temperatura de 20ºC y una humedad relativa del 65%.

Se midieron las propiedades de los tableros siguiendo las normas estándares europeas: hinchamiento en espesor (TS) y absorción de agua (WA) tras 2 y 24 horas de inmersión en agua [22], cohesión interna o resistencia a tracción (IB) [23], módulo de ruptura a flexión (MOR) y módulo de elasticidad a flexión (MOE) [24].

Los ensayos mecánicos se realizaron en la máquina de ensayos marca Imal (Modelo IB600), que cumple con la velocidad requerida en cada ensayo, según indican las normas europeas aplicables.

La conductividad se determinó mediante el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor [25]. Los ensayos térmicos se realizaron en un medidor de flujo de calor marca NETZSCH instruments, Inc, USA. En este ensayo se utilizó una probeta de cada tablero con dimensiones de 300 x 300 x 10 mm. De los valores medios de los ensayos se obtuvo la desviación estándar. El análisis estadístico se realizó con el programa informático SPSS v.25.0 de IBM.

3. Resultados y discusión

3.1. Propiedades físicas

Los resultados del ensayo de hinchamiento en espesor se indican en la figura 2. Los tableros con densidad 600 y 650 kg/m^3 fabricados con un 5% de ácido cítrico se deshacían en el agua antes de 2 h y los de densidad de 600 kg/m^3 fabricados con un 10% se destruían antes de 24 h. En el ensayo después de 2 y 24 h de inmersión en agua de los tableros se observa que el TS depende de la densidad y del porcentaje de ácido cítrico añadido. Con mayor densidad y proporción de ácido cítrico se obtienen mejores propiedades.

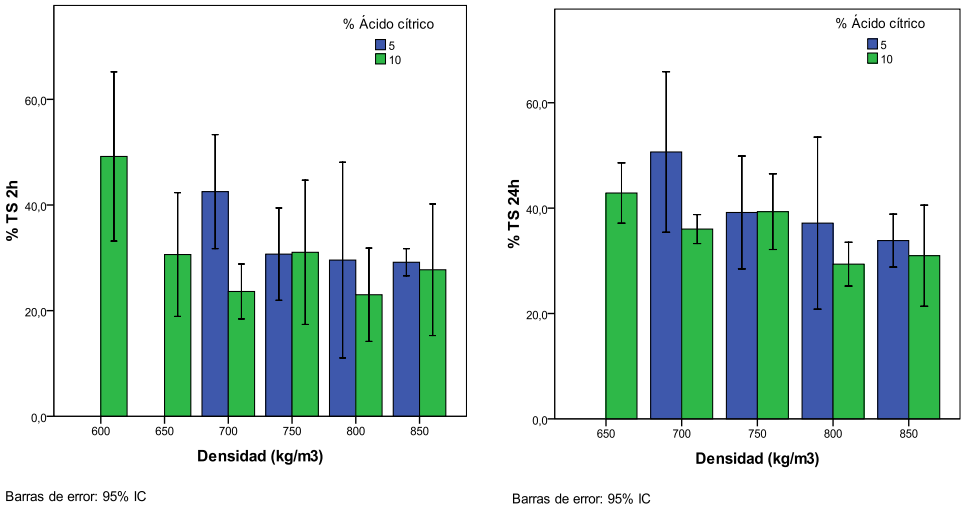


Figura 2. % Hinchamiento en espesor a las 2 y 24 h en función del tipo de tablero.

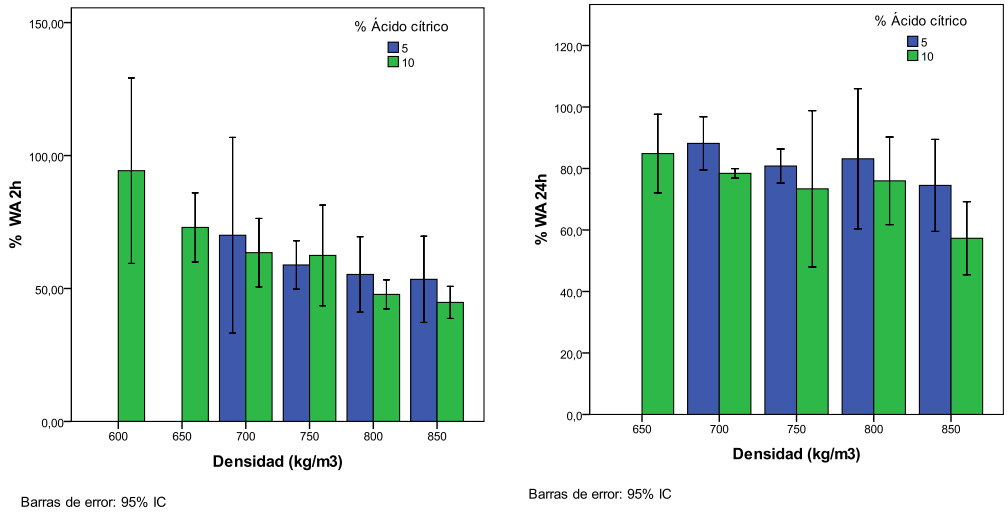


Figura 3. % Absorción de agua después de inmersión a las 2 y 24 h en función del tipo de tablero.

Como se observa en la figura 3, en el comportamiento de los tableros sobre la absorción de agua después de inmersión hay diferencias significativas entre los 8 tipos de tableros. La WA depende del porcentaje de ácido cítrico añadido, cuanto mayor es la proporción se obtienen menor WA. Los tableros que menos agua absorben son el tipo B6 con un WA del 57.30 % y el que más agua absorbe es el A3 con un WA del 88.16 %. Los tableros tipo A1, A2 y B1 con un 5% de ácido cítrico se deshacían en el agua antes de 24 h.

3.2. Propiedades mecánicas

Los resultados del ensayo a flexión se muestran en las figuras 4 y 5. Se muestran valores desde 1.7 N/mm² hasta 12.5 N/mm². Se observa que en los tipos de tableros con menor densidad tienen un MOR muy bajo y aumenta con la densidad. Con mayor contenido de ácido cítrico aumenta el valor de MOR.

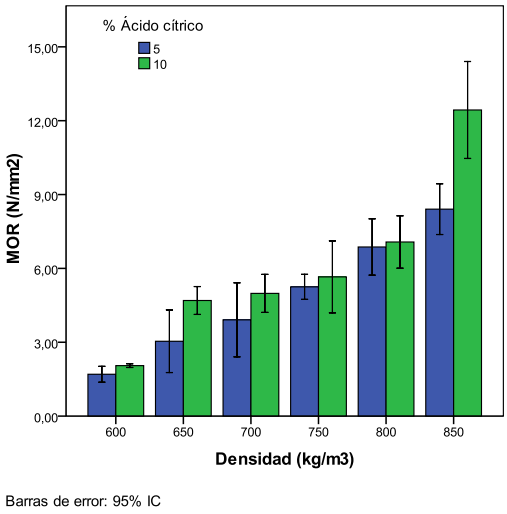


Figura 4. Resistencia a flexión en función del tipo de tablero.

En la figura 5 se observan los valores obtenidos del módulo de elasticidad en flexión (MOE) y depende del ácido cítrico utilizada y de la densidad. El MOE tiene una gran variación entre unos tipos de tableros y otros, variando desde 260 N·mm^{-2} a 2440 N·mm^{-2}. La densidad tiene gran influencia en el valor de MOE. Se han obtenido mejores propiedades usando biomasa de caña con resina Urea Formaldehido [26], pero esta resina sintética está considerada como tóxica y los tableros de este trabajo son totalmente ecológicos y elaborados con productos naturales.

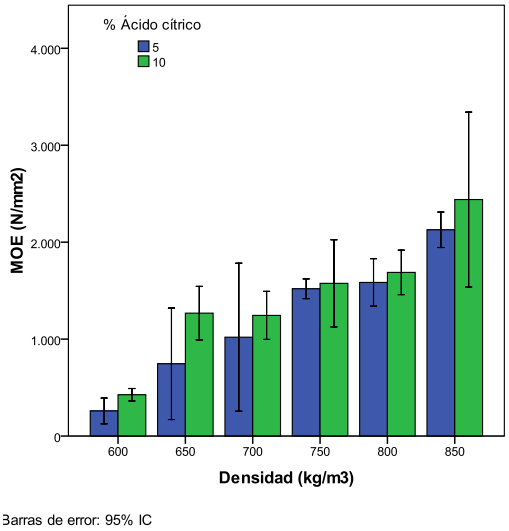


Figura 5. Módulo de elasticidad a flexión en función del tipo de tablero.

Los valores de cohesión interna (IB) se muestran en la figura 6 destacando que aumentan con densidades mayores y en proporción al ácido cítrico añadido. Con tableros tipo B5 se alcanzan valores medios de 0.61 N·mm^{-2} y con tableros tipo A1 se llega a valores medios de 0.07 N·mm^{-2}.

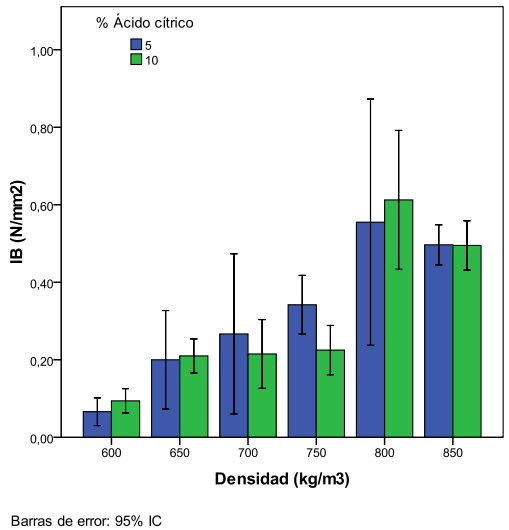


Figura 6. Cohesión interna en función del tipo de tablero.

3.3. Propiedades térmicas

En la figura 7 se exponen los valores obtenidos de conductividad térmica. No hay diferencias significativas entre los tableros ensayados, ni en la densidad ni en la cantidad de ácido cítrico

aportada. Los tableros tienen una conductividad térmica media de 0.084 a 0.096 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Este valor indica que podrían utilizarse como aislantes térmicos. Para la resistencia térmica también se observa que no hay diferencias relevantes entre los diferentes tipos de tableros fabricados.

En la tabla 2 se comparan los valores de conductividad térmica obtenidos por otros autores con otras fibras vegetales. Para ensayos de tableros con densidades de características afines a las de este estudio, se observa que se obtienen valores similares.

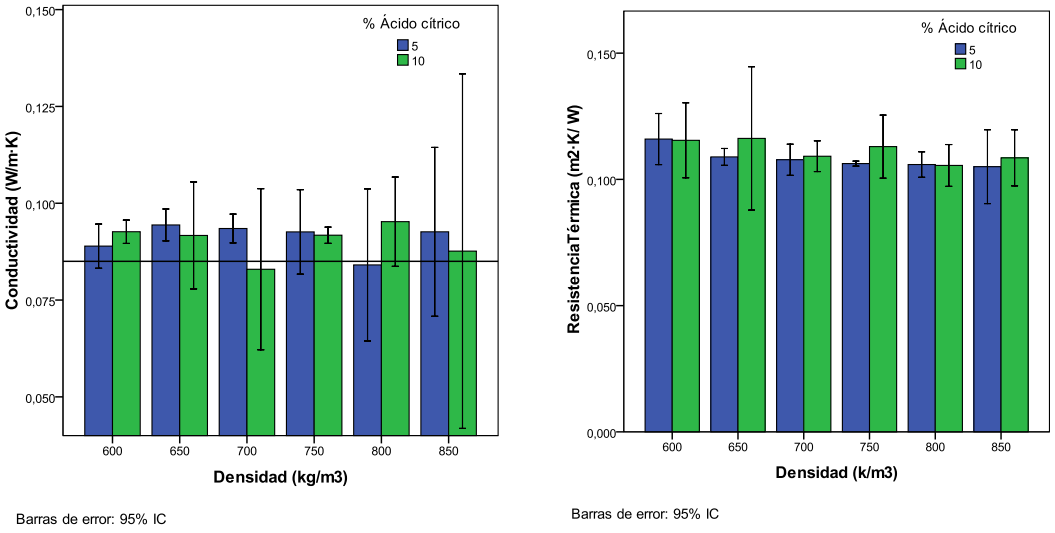


Figura 7. Conductividad y resistencia térmica en función del tipo de tablero.

Tabla 2. Coeficientes de conductividad térmica obtenidas en ensayos con diferentes fibras orgánicas.

Nombre	Conductividad Térmica λ (W/m K)	Fuente
Cáñamo	0.111	[7]
	0.040 a 0.094	[11]
Lino	0.035 a 0.075	[11]
	0.042	[1]
Algodón	0.040 a 0.069	[27]
Raquis palmera datilera	0.083	[28]
Paja de arroz	0.078 a 0.090	[12]
Sisal	0.070	[13]
Bagazo de caña de azúcar	0.075	[14]
Paneles de virutas de madera	0.070 a 0.090	[29]
Caña con ácido cítrico	0.084 a 0.096	Este trabajo

El ácido cítrico puede ser un buen adhesivo debido a que se produce esterificación durante el proceso de elaboración de los tableros [14]. En este trabajo se ha observado que las partículas de caña se cohesionan, pero habrá que seguir investigando sobre este tipo de adhesivo para intentar mejores sus propiedades.

Los tableros tipo B4 alcanzan las propiedades de tableros no estructurales para uso en interior incluidos en la fabricación muebles [30]. Además presentan buenas propiedades térmicas por lo que podrían emplearse en la construcción de las divisiones interiores de las edificaciones.

4. Conclusiones

Las propiedades mecánicas y térmicas obtenidas en este trabajo permiten afirmar que todos los tableros podrían emplearse como material aislante.

Los tableros tipo B4 podrían utilizarse como elemento divisorio interior de las edificaciones.

Los tableros con un 10% de ácido cítrico tienen buen comportamiento frente al agua y podrían usarse en el exterior.

El secado del material se ha realizado al exterior (sin consumo de energía) y la temperatura de la prensa (150º C) es inferior que la temperatura utilizada en la elaboración de tableros industriales (180º C).

El empleo de residuos de caña común para producir tableros de partículas aglomeradas conllevaría una doble ventaja, por un lado se obtendría un destacado beneficio ambiental y por otro, su fabricación generaría un menor coste energético que el requerido en la industria convencional.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad de España (MINECO, AGL2013-41612-R).

Referencias

1. Alavez-Ramirez, R., Chinas-Castillo, F., Morales-Dominguez, V.J., Ortiz-Guzman, M. Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels. Constr. Build. Mater **2012**; 37, 425–431.
2. Lertsutthiwong, P., Khunthon, S., Siralertmukul, K., Noomun, K., Chandrkrachang, S. New insulating particleboards prepared from mixture of solid wastes from tissue paper manufacturing and corn peel. Biores Tech **2008**; 99(11), 4841-4845.
3. Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., Mistretta, M. Building energy performance: a LCA case study of kenaf-fibres insulation board. Energy and Buildings **2008**; 40 (1), 1–10.
4. Zhou, X. Y., Zheng, F., Li, H.G., Lu, C.L. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. Energy and Buildings **2010**; 42(7), 1070-1074.
5. Ferrandez-Garcia, M.T., Ferrandez-Garcia, C.E., Andreu-Rodriguez, J., Ferrandez-Villena, M., Garcia-Ortuño, T. The suitability of utilising cotton stalk for low cost binderless panels. In Actual Tasks on Agricultural Engineering. Proceedings of the 41. International Symposium on Agricultural Engineering, Opatija, Croatia, 19-22 February **2013** (pp. 383-387). University of Zagreb Faculty of Agriculture.
6. Panyakaew, S., Fotios, S. New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. Energy and Buildings **2011**; 43(7), 1732-1739.
7. Behzad, T., Sain M. Measurement and prediction of thermal conductivity for hemp fiber reinforced composites. Polymer Engineering and Science **2007**; 47 (7), 977–983.
8. Benfratello, S., Capitano, C., Peri, G., Rizzo, G., Scaccianoce, G., Sorrentino, G. Thermal and structural properties of a hemp-lime biocomposite. Constr. Build Mater **2013**; 48, 745–754.
9. Chikhi, M., Agoudjil, B., Boudenne, A., Gherabli, A. Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation. Energy and Buildings **2013**; 66, 267–273.
10. Murphy, R.J. Norton, A. Life Cycle Assessments of Natural Fibre Insulation Materials, National Non-Food Crops Centre - NNFCC, **2008**. Londres, Angleterre, p. 79.
11. Kymalainen, H.R., Sjoberg, A.M. Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations, University of Helsinki - Department of Agrotechnology, Helsinki, Finlande, **2008**; 1261-1269.
12. Ferrandez-Garcia, C.C., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, M. T., Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-Garcia, C.E. Fire-resistance, Physical, and Mechanical Characterization of Binderless Rice Straw Particleboards. BioRes **2017**; 12(4), 8539-8549.

13. Kalaprasad, G., Pradeep, P., Mathew, G., Pavithran, C., Thomas, S. Thermal conductivity and thermal diffusivity analyses of low-density polyethylene composites reinforced with sisal, glass and intimately mixed sisal/glass fibres. Comp Sci Tech **2000**; 60(16), 2967-2977.
14. Liao, R., Xu, J., Umemura, K. Low density sugarcane bagasse particleboard bonded with citric acid and sucrose: effect of board density and additive content. BioRes **2016**; 11(1), 2174-2185.
15. Ferrandez-Garcia, C. E., Andreu-Rodríguez, J., Ferrandez-Garcia, M. T., Ferrandez-Villena, M., García-Ortuño, T. Panels made from giant reed bonded with non-modified starches. BioReso **2012**; 7(4), 5904-5916.
16. Ferrández Garcia, C.E., Ferrández-Villena, M., Cuartero, J., Garcia-Ortuño, T., Ferrández-Garcia, M.T., Andreu-Rodríguez, J. Manufacture and Properties of Three-Layered Low Density Particleboard from Giant Reed. In Structures and Environmental Technologies. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: Agriculture and engineering for a healthier life, Valencia, Spain, 8-12 July **2012**. CIGR-EurAgEng.
17. Ferrández-Garcia, A., Ferrández-Villena, M., Ferrández-Garcia, C.E., Garcia-Ortuño, T., Ferrández-Garcia, M.T. Potential Use of *Phoenix canariensis* Biomass in Binderless Particleboards at Low Temperature and Pressure. BioRes **2017**; 12(3), 6698-6712.
18. Ferrández-Garcia, C.C., Ferrández-Garcia, C.E., Ferrández-Villena, M., Ferrández-Garcia, M.T., and Garcia-Ortuño, T. Acoustic and Thermal Evaluation of Palm Panels as Building Material. BioRes **2017**; 12(4), 8047-8057.
19. El Mansouri, N. E., Salvadó, J. Structural characterization of technical lignins for the production of adhesives: Application to lignosulfonate, kraft, soda-anthraquinone, organosolv and ethanol process lignins. Ind Crops Prod **2006**; 24(1), 8-16.
20. Guimarães Carvalho, A., Costa Lelis, R. C., do Nascimento, A. M. (2014). Avaliação de adesivos à base de taninos de Pinus caribaea var. bahamensis e de Acacia mearnsii na fabricação de painéis aglomerados. Ciência Florestal **2014**; 24(2).
21. EN 309. **2005**. Tableros de partículas. Definición y clasificación. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
22. EN 317. **1993**. Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la hinchazón en espesor después de inmersión en agua. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
23. EN 319. **1993**. Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las caras del tablero. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
24. EN 310. **1993**. Tableros derivados de la madera. Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
25. EN 12667. **2001**. Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
26. García-Ortuño, T, Andréu-Rodríguez, J., Ferrández-Garcia, M.T., Ferrández-Villena, M., Ferrández-García, C.E. Evaluation of the physical and mechanical properties of particleboard made from giant reed (*Arundo donax* L.). BioRes **2011**; 6(1), 477-486.
27. Nicolajsen, A. Thermal transmittance of a cellulose loose-fill insulation material. Build Environ **2005**; 40(7), 907-914.
28. Agoudjil, B., Benchabane, A., Boudenne, A., Ibos, L., Fois, M. Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood. Energy and Buildings **2011**; 43(2), 491-497.
29. EN ISO 10456. **2007**. Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values.
30. EN 312. **2010**. Tableros de partículas. Especificaciones. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Metodología y aplicación práctica para la inspección de edificios agroindustriales mediante drones

J. Gómez[1], A. Tascón[2]

[1] Faber 1900 - Estudio de Ingeniería y Arquitectura; javier@faber1900.com
[2] Dpto. Agricultura y alimentación, Universidad de La Rioja; alberto.tascon@unirioja.es

Resumen: Los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), comúnmente conocidos como drones, representan una tecnología potencialmente disruptiva en muchos sectores. Aunque su uso ya es bastante habitual en la agricultura, el sector de la construcción, por el contrario, todavía no ha incorporado de manera significativa esta herramienta a pesar de las ventajas potenciales que ofrece. El principal objetivo de este trabajo ha sido evaluar la capacidad de esta tecnología como herramienta en las tareas de inspección de edificios agroindustriales. Con este fin, se ha desarrollado un protocolo consistente en 5 fases a partir de la bibliografía, estudios previos y regulaciones existentes. También se han identificado una serie de precauciones a adoptar en el uso de esta técnica, dificultades prácticas y factores que pueden influir en su correcta aplicación, así como líneas de trabajo para el futuro. Igualmente, se ha comparado el uso de esta técnica con la inspección tradicional de edificios.

Palabras clave: vehículos aéreos no tripulados, inspección técnica de edificios, eficiencia energética, construcciones agroindustriales, RPAS

1. Introducción

Durante la última década se ha producido un rápido desarrollo e implantación de tecnologías relacionadas con el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) o "Remotely Piloted Aircraft Systems" (RPAS), comúnmente conocidos como drones [1]. Su uso es ya habitual en el sector agrícola [2-5] y forestal [6] y en la inspección de infraestructuras [7, 8].

Sin embargo, en el sector de la edificación – y más particularmente en la edificación agroindustrial – esta herramienta todavía no se ha incorporado de manera significativa a pesar de las ventajas potenciales que ofrece. Los drones podrían aplicarse a la realización de tareas vinculadas con los planes de conservación y mantenimiento de los edificios o con la realización de auditorías energéticas para la mejora de la eficiencia de la industria. A priori, los drones presentan el potencial para la obtención de información relevante con una reducción del tiempo, el coste y los riesgos para el personal respecto a una inspección convencional.

El objetivo principal de este trabajo ha sido evaluar la capacidad de esta tecnología para la inspección de edificios agroindustriales, desarrollando para ello un protocolo e identificando dificultades, aspectos a tener en cuenta y precauciones a adoptar. El protocolo propuesto ha sido además contrastado y validado mediante un vuelo real en campo.

2. Desarrollo del protocolo

El desarrollo del protocolo se ha realizado a partir de estudios previos contrastados y regulaciones existentes. En concreto, se han tomado como referencia las metodologías aplicadas por Seo et al. a la inspección de puentes [7] y por Entrop y Vasenev al estudio termográfico de

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3340

edificios [9]. También se ha tenido en cuenta la normativa vigente relativa al uso de drones en España [10], el modelo existente para el Informe de Inspección Técnica de Edificios [11] y la documentación que se imparte en los cursos oficiales de piloto de drones.

Esta información previa se ha adaptado al caso concreto de las edificaciones agroindustriales para así desarrollar una metodología sistemática que permita una inspección eficiente de estas construcciones. El protocolo desarrollado se ha articulado en 5 Fases, que a su vez se componen de diversas tareas, tal y como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Protocolo recomendado para la inspección de edificios agroindustriales

Fases y tareas a realizar
1. Información previa del edificio
Estudio de planos y emplazamiento
Identificación de envolventes a inspeccionar
Identificación de puntos críticos y detalles a inspeccionar
2. Estudio de seguridad de las operaciones y plan de vuelo
Identificación de riesgos potenciales
Selección de la/s posición/es del piloto
Selección de área de despegue y aterrizaje y zonas de recuperación
Establecimiento de plan de vuelo incluyendo distancias a obstáculos
3. Revisión y calibración del dron y sus accesorios
Selección del dron e instrumentación más adecuados
Revisión de los componentes del dron y carga de la batería
Calibración y revisión de GPS, sensores y cámaras
Comprobación de la unidad de control y la conectividad
4. Realización del vuelo
Selección de día, horario y condiciones meteorológicas adecuadas
Montaje del dron
Realización del plan de vuelo previamente definido
Comprobación de la información obtenida por el dron
5. Análisis de la información
Identificación de deficiencias en la envolvente
Identificación de anomalías térmicas
Preparación de informe de resultados

La Fase 1 consiste en una revisión de la información previa disponible sobre el edificio que va a ser inspeccionado, lo cual permite al piloto identificar las localizaciones críticas de cara a la inspección, así como establecer estrategias de vuelo que permitan una aproximación segura.

La Fase 2 es el estudio de seguridad de las operaciones y el establecimiento del plan de vuelo a realizar. Dicho estudio pretende identificar riesgos potenciales, como árboles, líneas eléctricas, vías de circulación de vehículos, etc., con el objeto de poder desarrollar el vuelo con el dron de forma segura. También comprende la definición del plan de vuelo, con establecimiento de la zona de despegue y aterrizaje, la ruta y desplazamientos a realizar con el dron y las distancias a mantener, tanto en horizontal como en vertical, con los distintos obstáculos y el propio edificio a inspeccionar. A partir de este estudio se puede redactar el correspondiente estudio aeronáutico de seguridad, que es obligatorio realizar según la normativa vigente [10].

La Fase 3 sería la revisión y puesta a punto del dron. Se recomienda realizar una inspección del dron previamente al primer vuelo, revisando los distintos elementos fundamentales (baterías, rotores, sensores, control remoto, etc.). También es indispensable revisar el funcionamiento y calibrar adecuadamente la cámara y/o sensores, el GPS, etc.

La Fase 4 comprendería la inspección del edificio mediante el vuelo del dron, siguiendo el plan de vuelo previamente establecido y respetando lo establecido en el estudio aeronáutico de seguridad.

Por último, la Fase 5 consiste en el estudio y análisis de la información recogida por el dron, pudiéndose identificar deficiencias en la envolvente y anomalías térmicas (puentes térmicos). Finalmente, se preparará el informe de resultados a presentar al cliente.

3. Aplicación del protocolo a la inspección de una industria agroalimentaria

La metodología de trabajo propuesta fue aplicada a la inspección de un edificio agroindustrial. Para ello se utilizó un dron DJI MAVIC 2 Enterprise DUAL, que se muestra en la Figura 1. Es un cuadricóptero de 0,9 kg de peso. Está dotado con una cámara para captar imágenes de 12 megapixeles y grabar vídeo 4K Ultra HD (3840×2160) y con una cámara térmica (resolución 120 x 160, campo visual de 57°, rango de -10° a 140°, precisión de ±5%).



Figura 1. Dron utilizado para la validación del protocolo.

Los resultados obtenidos usando el dron (ver Figura 2) permitieron detectar puentes térmicos en la envolvente del edificio, así como disponer de información visual con suficiente detalle del estado de la cubierta y la parte superior de la fachada, que son puntos de difícil acceso y con riesgo para el inspector.

La aplicación práctica ha servido para validar el protocolo propuesto, así como para identificar dificultades, precauciones y aspectos a tener en cuenta:

- El plan de vuelo se puede ver dificultado por la presencia de obstáculos muy próximos, otros edificios, etc.
- Es frecuente que el edificio a inspeccionar esté muy próximo a edificios de otra titularidad, a vías de circulación, u otros supuestos que puedan limitar la actuación a espera de los permisos de AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea).
- Las condiciones meteorológicas son determinantes: viento, visibilidad, lluvia, etc.
- La radiación solar directa y reflejos procedentes de superficies metálicas, ventanas o paneles solares – del mismo o de otros edificios – debe ser evitada. Por lo general, la mejor opción para la realización del vuelo es a primera hora de la mañana antes de que la luz del sol incida directamente, también días nublados o al atardecer cuando el sol se ha puesto. Igualmente es importante seleccionar un momento en el que haya suficiente diferencia entre la temperatura interior del edificio y la temperatura exterior.

- Es necesario tener en consideración la distancia y el ángulo al que está operando el dron, así como la resolución y campo visual de las cámaras usadas, para determinar el plan de vuelo y también para ejecutarlo correctamente.
- El número de pases sobre una determinada superficie, la velocidad de vuelo y los solapes necesarios son también aspectos a considerar.
- La correcta ejecución de las Fases 1, 2 y 3 son fundamentales para optimizar el tiempo de trabajo en campo y la duración de las baterías del dron.

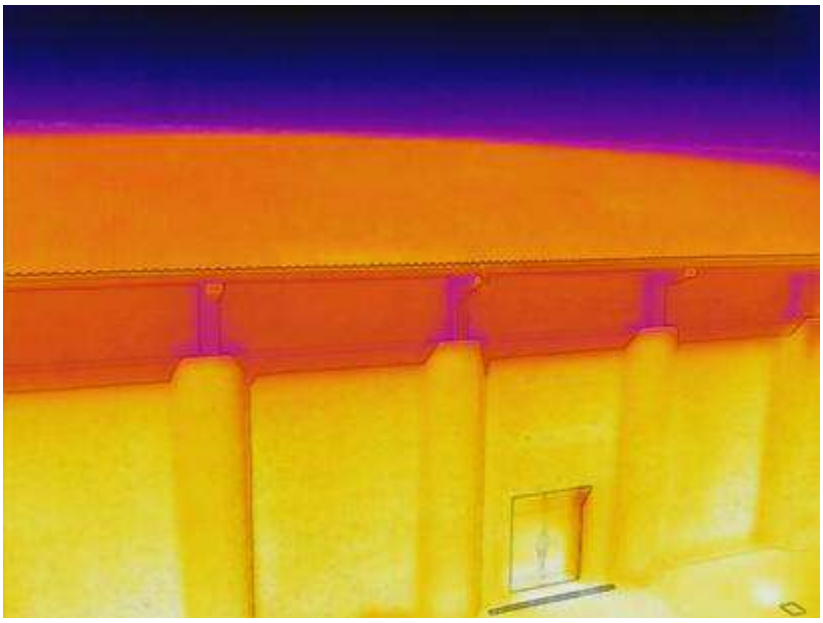


Figura 2. Imagen térmica captada por el dron del exterior de la bodega inspeccionada.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha desarrollado un protocolo para la inspección de edificios agroindustriales mediante el uso de un dron. Se compone de 5 fases, que a su vez se desglosan en diversas tareas, que establecen los principios fundamentales a seguir y consideraciones relevantes para la adquisición correcta de datos en la inspección de la envolvente exterior de edificios agroindustriales. El protocolo propuesto ha sido validado con un caso práctico real mediante un dron con dos cámaras, una para la toma de fotos y vídeos y la otra de tipo térmico. Este estudio resalta la utilidad de los drones para la inspección de edificios agroindustriales, ya que permiten obtener información sobre zonas de difícil acceso, reduciendo los riesgos y el tiempo empleado, y, además, si dispone de cámara térmica, permite detectar puentes térmicos u otras anomalías.

Referencias

1. Hassanalian M., Abdelkefi A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress in Aerospace Sciences. 2017, vol. 91, 99–131.
2. Malveaux C., Hall S., Price R.P. Using drones in agriculture: unmanned aerial systems for agricultural remote sensing applications. ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting, Montreal, Canada, 2014. Paper number 141911016.
3. Pérez-Ruiz M., Agüera-Requena P., Martínez J., Polo M.A., Apolo-Apolo O.E. Estimación de producción de fruta en cítricos a través de tecnologías basadas en drones y visión artificial. IX Congreso Ibérico de Agroingeniería, Braganza, Portugal, 2017. Libro de Resúmenes, 145, ISBN: 978-972-745-229-3.

4. Huuskonen J., Oksanen T. Soil sampling with drones and augmented reality in precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture. 2018, vol. 154, 25–35.
5. Vayssade J.A., Arquet R., Bonneau M. Automatic activity tracking of goats using drone camera. Computers and Electronics in Agriculture. 2019, vol. 162, 767–772.
6. Tang L., Shao G. Drone remote sensing for forestry research and practices. Journal of Forestry Research. 2015, vol. 26, 791–797.
7. Seo J., Duque L., Wacker J. Drone-enabled bridge inspection methodology and application. Automation in Construction. 2018, vol. 94, 112–126.
8. Inzerillo L., Di Mino G., Roberts R. Image-based 3D reconstruction using traditional and UAV datasets for analysis of road pavement distress. Automation in Construction. 2018, vol. 96, 457–469.
9. Entrop A.G., Vasenev A. Infrared drones in the construction industry: designing a protocol for building thermography procedures. Energy Procedia. 2017, vol. 132, 63–68.
10. Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre, por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto, y se modifican el Real Decreto 552/2014, de 27 de junio, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea y el Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Aérea. Ministerio de la Presidencia y para las Administraciones Territoriales.
11. Real Decreto 233/2013, de 5 de abril, por el que se regula el Plan Estatal de fomento del alquiler de viviendas, la rehabilitación edificatoria, y la regeneración y renovación urbanas, 2013-2016. Ministerio de Fomento.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Presiones normales sobre tolvas oblicuas en silos de acero

E. Gallego[1], J.M. Fuentes[1], A. Sadowski[2], F.Ayuga[1]

[1] Grupo de investigación EIPIRMA, Universidad Politécnica de Madrid; eutiquio.gallego@upm.es
[2] Department of Civil and Environmental Engineering. Imperial College London

Resumen: Los silos se emplean desde hace mucho tiempo para el almacenamiento en altura de materiales agrícolas e industriales muy diversos. Se trata de una estructura con características muy particulares, derivadas en gran medida del rozamiento entre el material almacenado y la pared. Los silos de acero constituyen una de las tipologías más empleadas, y a veces disponen de una boca de salida oblicua para mejorar el flujo del material durante la descarga del silo. La versión actual del Eurocódigo EN 1991-4 empleado para el cálculo de empujes sobre las paredes de los silos pero las tolvas oblicuas no están cubiertas por ella. Se ha desarrollado un modelo de elementos finitos en tres dimensiones para calcular las presiones normales producidas sobre tolvas oblicuas. Se han tenido en cuenta variables como la excentricidad de la tolva, la posición circunferencial de la línea de la pared a analizar, o tres materiales agrícolas que presentan propiedades mecánicas muy diferentes: trigo, azúcar y bolas de hierro. Se ha comprobado la influencia de la posición circunferencial y la excentricidad de la boca de salida en la variación de presiones existentes en tolvas oblicuas con respecto a tolvas concéntricas. Se espera que los resultados de esta investigación sean de interés en la futura actualización de EN 1991-4.

Palabras clave: silos de acero; tolvas oblicuas; presiones normales; Elementos Finitos

1. Introducción

Los silos son estructuras especiales que se utilizan para almacenar diferentes tipos de productos que exhiben un comportamiento complejo debido a la existencia de fenómenos específicos como el "efecto silo", consistente en la aparición de fuerzas de rozamiento entre la pared y el material almacenado.

Los silos de acero son ampliamente utilizados por su optimización en el diseño y la facilidad para su ejecución. Existen numerosas tipologías, aunque predomina el diseño de silos cilíndricos de fondo plano. Sin embargo, los silos se diseñan a veces con un cuerpo vertical cilíndrico y una tolva oblicua para facilitar el flujo del material almacenado durante la descarga del silo. Es importante señalar que el término "tolva oblicua" se refiere a una tolva cuyo centro no coincide con el centro del cuerpo cilíndrico vertical del silo.

La distribución de las presiones normales ejercidas por el material almacenado sobre las paredes de tolvas concéntricas es un fenómeno que fue descrito inicialmente por Dąbrowski [1], aunque se le atribuya generalmente a Walker [2], y que se encuentra contemplado en la versión actual del Eurocódigo [3]. Sin embargo, esta norma no incluye actualmente ninguna propuesta para el cálculo de presiones normales sobre tolvas oblicuas.

Las presiones normales existentes sobre una tolva concéntrica, p_{nf}, y teniendo en cuenta una situación de llenado simétrica, se calculan según la Ecuación 1. En una situación de llenado,

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3353

el valor de F_f se obtiene según la Ecuación 2, donde μ es el coeficiente de rozamiento partícula - pared, β es la mitad del ángulo de inclinación de la tolva con respecto al eje vertical (Figura 1), y a es una constante empírica. Se adopta un valor a = 0.8 para el cálculo de presiones normales durante el proceso de llenado.

$$p_{nf} = F_f p_{vf} \quad [1]$$

$$F_f = \frac{1+a\cdot\mu\cdot cot\beta}{1+\mu\cdot cot\beta} \quad [2]$$

El valor de la presión vertical de llenado, p_{vf}, que existe en la coordenada vertical x desde el vértice del cono de la tolva se calcula según la Ecuación 3, donde γ es el peso específico del material almacenado y p_{vft} es la presión vertical media existente en la transición cuerpo cilíndrico – tolva. El exponente n empleado para el cálculo de la presión vertical se obtiene a partir de la Ecuación 4.

$$p_{vf} = \frac{\gamma h_h}{n-1}\left\{\left(\frac{x}{h_h}\right) - \left(\frac{x}{h_h}\right)^n\right\} + p_{vft}\left(\frac{x}{h_h}\right)^n \quad [3]$$

$$n = 2\left(F_f \mu_h cot\beta + F_f - 1\right) \quad [4]$$

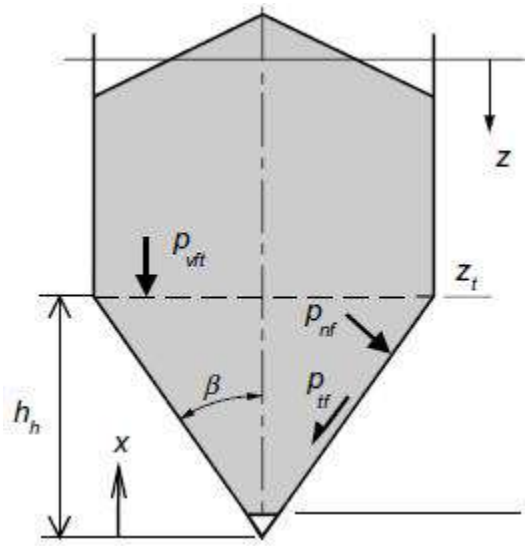


Figura 1. Distribución de presiones sobre tolvas (EN 1991-4, 2006)

Los trabajos de investigación existentes acerca de la medición de presiones sobre las paredes de tolvas son escasos, y la mayoría se refieren al caso de tolvas concéntricas [4-6]. Los trabajos realizados por Ramirez et al. [7] sí incluían la medición de empujes del material almacenado sobre 3 silos cilíndricos de 5.0 m de altura y 1.9 m de diámetro, que disponían de tolvas con diferentes excentricidades: 0%, 50% y 100%. En este trabajo, se compararon los empujes producidos sobre las tolvas oblicuas (50% y 100% de excentricidad) con respecto a los registrados en la tolva concéntrica (0% de excentricidad). Así, se observó la aparición de mayores presiones sobre la pared opuesta a la boca de salida, mientras que se detectaba una reducción de la presión sobre la pared más cercana a la boca de salida.

Estos resultados concordaban con los hallazgos previos de varios autores [8,9] que habían desarrollado modelos de elementos finitos para estudiar los posibles efectos de la excentricidad en la posición de la boca de salida en tolvas oblicuas.

2. Materiales y métodos

2.1. Modelo numérico de elementos finitos

Se desarrolló un modelo de elementos finitos con ANSYS [10], considerando la existencia de una pare rígida y para el proceso de llenado. La simulación del material almacenado se realizó mediante el uso de un elemento cúbico isoparámetrico de 8 nodos (SOLID45), que permite considerar plasticidad, endurecimiento por deformación, y grandes deformaciones. Por otro lado, la interacción entre el material almacenado y la pared se simuló mediante un contacto superficial a través de los elementos TARGE170 y CONTA173, y empleando la teoría de rozamiento de Coulomb. Una descripción más detallada de este procedimiento puede encontrarse en Gallego et al. [11].

Se empleó un modelo de comportamiento elastoplástico para el material almacenado, empleándose una relación lineal para la parte elástica, mientras que se usó el criterio de Drucker-Prager [12] para la parte plástica. Las propiedades mecánicas del material que caracterizan la parte elástica del modelo son el coeficiente de Poisson, ν, y el módulo de elasticidad, E, mientras que el ángulo de rozamiento interno, ϕ, la cohesión, c, y el ángulo de dilatancia, ψ, son las propiedades mecánicas que definen la parte plástica del modelo. El valor del coeficiente de Poisson se dedujo (Ecuación 5) a partir de la relación de presiones laterales, K, definida en el Eurocódigo, de forma que se facilitara la comparación de presiones calculadas con el modelo numérico con las obtenidas según la normativa.

$$\nu = \frac{K}{1+K} \qquad [5]$$

Los valores de peso específico, γ, y ángulo de rozamiento interno, ϕ, fueron también extraídos del Eurocódigo, mientras que el resto de parámetros fueron adoptados de trabajos publicados en la literatura [13,14]. Las simulaciones se realizaron para tres materiales diferentes: trigo, azúcar y bolas de hierro, cuyas propiedades mecánicas aparecen recogidas en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales considerados en las simulaciones

Parámetro	Trigo	Azúcar	Bolas de hierro
Peso específico (γ, en kN/m^3)	9.0	9.5	22
Módulo de elasticidad (E, en kPa)	10674	22053	55570
Relación de presiones laterales (K)	0.54	0.50	0.52
Coeficiente de Poisson (ν)	0.35	0.33	0.34
Ángulo de rozamiento interno (ϕ)	30	32	31
Cohesión (c, en kPa)	2	0	0
Ángulo de dilatancia (ψ)	10	0	10
Coeficiente de rozamiento con la pared (μ)	0.38	0.46	0.49

2.2. Geometría del silo

Se consideró un silo formado por un cuerpo cilíndrico vertical y una tolva oblicua (Figura 2a), cuya proyección en planta puede apreciarse en la Figura 2b. Las variables geométricas empleadas para construir el modelo son las siguientes:

- D: diámetro del cuerpo cilíndrico del silo (m)
- R: radio del cuerpo cilíndrico del silo (m)
- D_o: diámetro de la boca de salida (m)
- R_o: radio de la boca de salida (m)
- H: altura del cuerpo cilíndrico vertical del silo (m)

- T: altura de la tolva (m)
- H_h: distancia vertical entre el vértice del cono de la tolva y la transición con el cuerpo cilíndrico (m)
- E_{cc}: excentricidad de la tolva oblicua (m)
- θ: posición circunferencial de la línea de la pared de la tolva oblicua considerada (º)

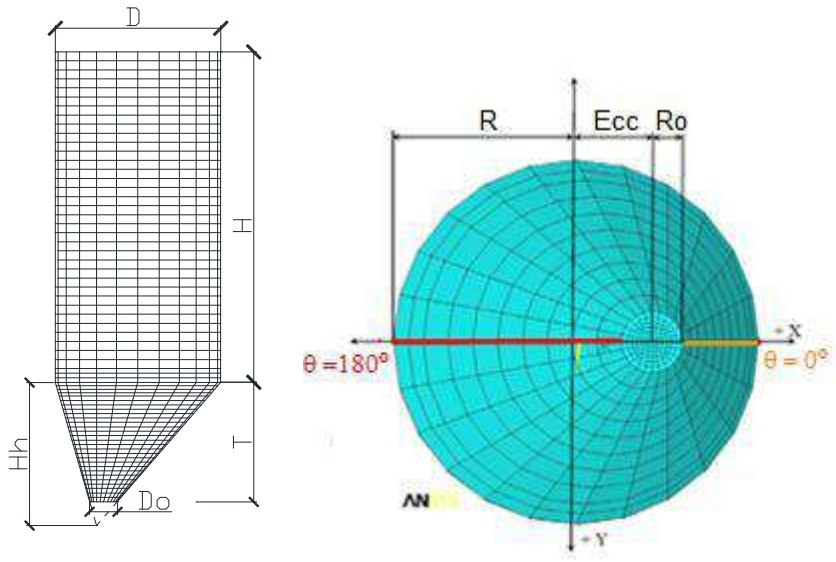


Figura 2. Geometría del silo considerada

La Tabla 2 muestra los valores adoptados para las variables necesarias para construir el modelo geométrico del silo analizado. La relación de aspecto adoptada para la tolva (R/H_h) se corresponde con un ángulo de inclinación de ésta de 60º con respecto al eje horizontal, que es el valor límite que se adopta en los diseños comerciales de silos con tolva para facilitar el flujo del material durante su descarga.

Por otro lado, se puede obtener el porcentaje de excentricidad, e_o, de la boca de salida en tolvas oblicuas aplicándose la ecuación 6. En la representación de los resultados de presiones sobre la tolva se han convertido las alturas a valores de altura adimensional, empleándose la ecuación 7, y partiendo de la distancia vertical H_h de la tolva desde su cono. De igual forma, para facilitar la comparación de los resultados obtenidos con diferentes materiales, se ha obtenido un valor adimensional de presión (Ecuación 8). Este valor es el cociente de la presión normal sobre la pared calculado según el MEF, p_n, y el correspondiente valor de presión normal calculado en cada caso aplicándose el Eurocódigo, $p_{n,EN}$.

$$e_o = \left(\frac{2 \cdot E_{cc}}{D - D_o}\right) \cdot 100 \qquad [6]$$

$$\bar{Z} = \left(\frac{z}{H_h}\right) \qquad [7]$$

$$\bar{p} = \left(\frac{p_n}{p_{n,EN}}\right) \qquad [8]$$

Tabla 2. Dimensiones consideradas en la geometría de silo analizada

Parámetro	Valor
Diámetro del cuerpo cilíndrico (D)	6 m
Radio del cuerpo cilíndrico (R)	3 m
Diámetro de la boca de salida (D_o)	1 m
Radio de la boca de salida (R_o)	0.5 m
Altura del cuerpo cilíndrico vertical (H)	12 m
Altura de la tolva (T)	4.33 m
Relación de aspect de la tolva (R/H_h)	0.58
Excentricidad de la boca de salida de la tolva (Ecc, en %)	0, 25, 50, 75, 100

3. Resultados y discusión

3.1. Efecto de la excentricidad de la tolva

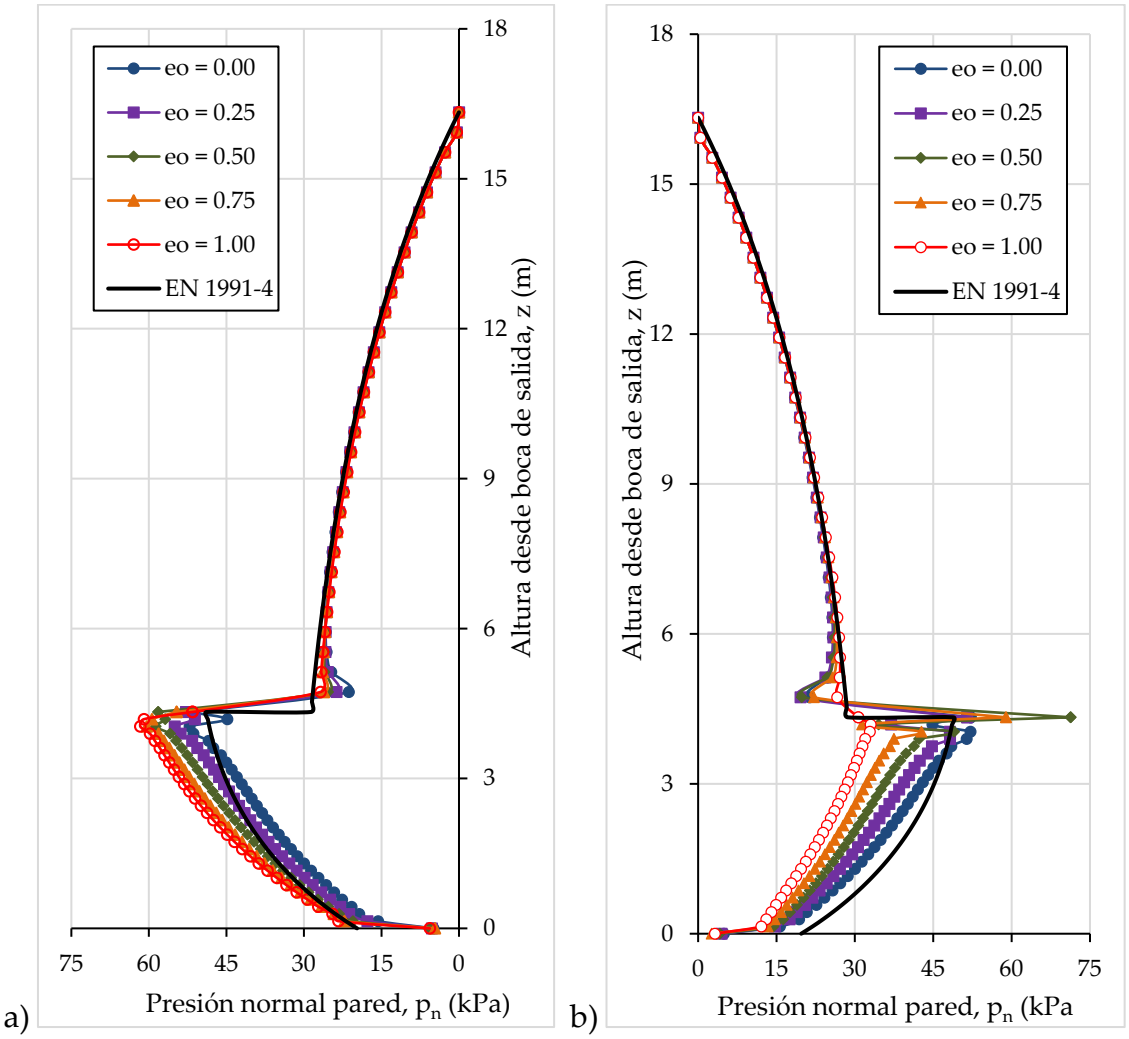


Figura 3. Presiones normales obtenidas con trigo como material almacenado, y según la posición circunferencial a) θ = 180º b) θ = 0º

La figura 3 muestra las presiones normales calculadas, según el modelo de elementos finitos, sobre las paredes del silo en las dos posiciones circunferenciales extremas θ = 0º y θ = 180º (Figura

2), en el caso del trigo, y variándose la excentricidad en la tolva oblicua. Se puede observar que se corroboran los resultados obtenidos por otros investigadores [8,9]. Además, también se comprueba que no hay variación de empujes sobre el cuerpo cilíndrico vertical del silo para distintas excentricidades.

Se produce un efecto paulatino de reducción de la presión en la pared más cercana a la boca de salida (θ = 0º) según aumenta la excentricidad, que se mantiene a lo largo de toda la altura de la tolva, y que llega a producir una reducción de hasta un 30% de la presión (para e_o = 100%) correspondiente a la tolva centrada.

Por el contrario, las presiones aumentan progresivamente en la pared opuesta (θ = 180º) conforme se incrementa la excentricidad de la tolva oblicua. Así, para el caso de máxima excentricidad (e_o = 100%) llegan a registrarse sobrepresiones de hasta 1,3 veces la presión normal obtenida para el caso de la tolva centrada.

3.2. Efecto del material

Por otro lado, resulta interesante comprobar el posible efecto de otros materiales en las presiones normales producidas sobre los silos, al igual que comparar los resultados con respecto a las previsiones del Eurocódigo. Así, en la Figura 4 se muestran las presiones normalizadas sobre la tolva exclusivamente, correspondientes a una tolva oblicua con excentricidad e_o = 100%, y para los tres materiales considerados en este estudio.

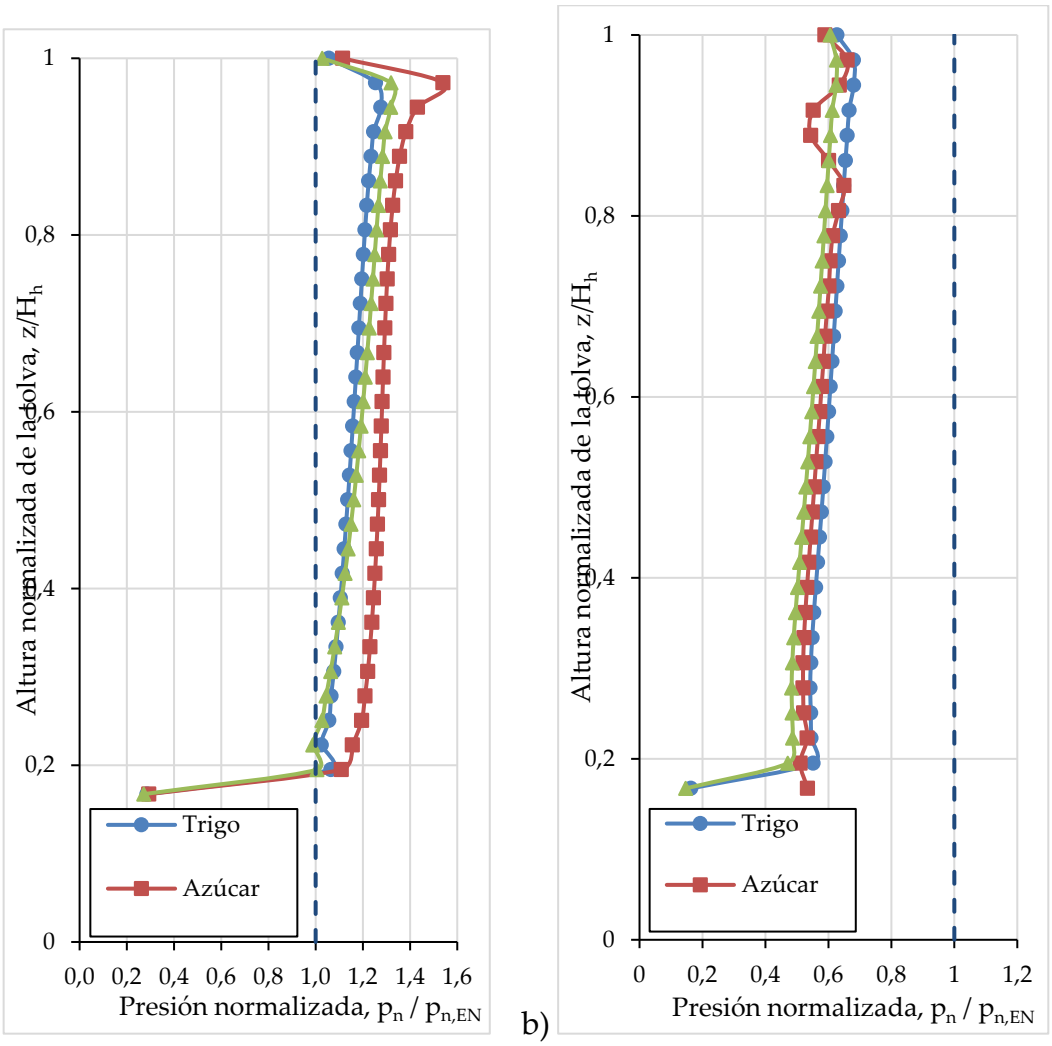


Figura 4. Presiones normalizadas obtenidas sobre la tolva, para distintos materiales, y según la posición circunferencial a) θ = 180º b) θ = 0º

Los tres materiales considerados exhiben el mismo comportamiento que el descrito anteriormente, con relación a la posición circunferencial de la pared de la tolva oblicua. En lo que respecta a la posición circunferencial $\theta = 0º$, el modelo numérico prevé la existencia de una presión normal sobre la tolva entre el 50-70% de la prevista por el eurocódigo en todos los materiales, con ligeras variaciones en función de la altura de la tolva considerada. Además, esta reducción de la presión es bastante uniforme para toda la altura de la tolva, a excepción de la parte superior e inferior, pero que son zonas afectadas por las condiciones de borde aplicadas al modelo numérico, por lo que los valores no son completamente representativos.

En cambio, si se analizan los resultados para la posición circunferencial $\theta = 180º$ se aprecian algunas diferencias. En primer lugar, en el tramo superior de la tolva (intervalo 1.0 – 0.5 para z/H_h) el modelo numérico prevé un incremento de presión con respecto al Eurocódigo, con coeficientes de sobrepresión en el rango 1,2 – 1,4 para los tres materiales, que se mantiene constante en este tramo de tolva. En cambio, a partir de una altura equivalente de la tolva $z/H_h = 0,5$ se produce una ligera disminución en todos los materiales del coeficiente de sobrepresión, que llega a alcanzar valores en torno a 1,0 cerca de la boca de salida. El valor obtenido en la boca de salida no resulta representativo debido a las condiciones de borde del modelo numérico.

No se aprecia una diferencia significativa entre los tres materiales considerados, si bien el coeficiente de sobrepresión registrado para el azúcar parece ligeramente superior al obtenido para el trigo o las bolas de hierro.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos con el modelo de Elementos Finitos permiten obtener las siguientes conclusiones:

- Existe una influencia de la posición circunferencial en la presión ejercida por el material sobre la pared de tolvas oblicuas: se produce una reducción de presión en la pared próxima a la boca de salida, y un aumento en la pared opuesta, tal y como habían observado otros autores.
- Se ha detectado una influencia de la excentricidad en la variación de las presiones ejercidas sobre tolvas oblicuas. Si aumenta la excentricidad de la boca de salida, entonces las sobrepresiones producidas en $\theta = 180º$ son mayores, a la vez que se disminuye la presión en la posición $\theta = 0º$.
- No se ha detectado una influencia significativa de la altura de la presión sobre el coeficiente de sobrepresión.
- El material almacenado en el silo no influye en el valor del coeficiente de sobrepresión para la pared de la tolva.

Referencias

1. Dąbrowski A. Parcie Materiałów Sypkich w Leju. (In Polish: Pressures in bulk solids in hoppers). Archiwum Inżynierii Lądowej. 1957, Z.3, 325-328.
2. Walker D.M. An Approximate Theory for Pressure and Arching in Hoppers. Chemical Engineering Science. 1966, 21, 957-997. https://doi.org/10.1016/0009-2509(66)85095-9
3. EN 1991-4. 2006. Eurocode 1 - Actions on structures. Part 4: Silos and tanks. European Committee for Standardization, Brussels.
4. Aoki R., Tsunakawa H. The pressure in a granular material at the wall of bins and hoppers. Journal of Chemical Engineering of Japan. 1969, 2 (1), 126 – 130.
5. Munch-Andersen J., Askegaard V., Brink A. Silo model tests with sand. Bull. Dan. Build. Res. Ins. 1992, 91.

6. Ding S., Ying J., Senbin Y., Rotter, J.M., Qi L. Measurements of pressure and frictional tractions along walls of a large-scale conical shallow hopper and comparison with Eurocode 1991-4. Thin-Walled Structures. 2014, 80, 231–238.
7. Ramírez A., Nielsen J., Ayuga F. Pressure measurements in steel silos with eccentric hoppers. Powder Technology. 2010, 201, 7–20.
8. Ayuga F., Guaita M., Aguado P. J., Couto A. Discharge and the eccentricity of the hopper influence on the silo wall pressures. ASCE Journal of Engineering Mechanics. 2001, 127 10), 1067-1074. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:10(1067).
9. Guaita M., Couto A., Ayuga F. 2003. Numerical Simulation of Wall Pressure during Discharge of Granular Material from Cylindrical Silos with Eccentric Hoppers. Biosystems Engineering. 2003, 85 (1), 101–109. doi:10.1016/S1537-5110(03)00037-0.
10. ANSYS. 2012. ANSYS User's Manual. Version 13.0. Houston: Swanson Analysis Systems Inc.
11. Gallego E., Rombach G. A., Neumann F., Ayuga F. Simulations of granular flow in silos with different finite element programs: ANSYS vs. SILO. Trans. ASABE. 2010, 53 (3), 819-829.
12. Drucker D.C., Prager W. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. Quart. Appl. Math. 1952, 10 (2), 157-165.
13. Couto A., Ruiz A., Aguado P. J. Experimental study of the pressures exerted by wheat stored in slender cylindrical silos, varying the flow rate of material during discharge. Comparison with Eurocode 1. Part 4. Powder Technology. 2013, 237, 450–467. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.030
14. Moya M., Ayuga F., Guaita M., Aguado P. Mechanical Properties of Granular Agricultural Materials. Transactions of the ASAE. 2002, 45 (5), 1569–1577. https://doi.org/10.13031/2013.11062

Área temática:

Energía



X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Análisis del impacto ambiental y económico vinculado a la energía fotovoltaica frente al uso de energías convencionales en el regadío

A. Mérida García[1], J. Gallagher[2], A. McNabola[2], E. Camacho Poyato[1], P. Montesinos Barrios[1], J. Rodríguez Díaz[1].

[1] Universidad de Córdoba (España). Departamento de Agronomía, Área Ingeniería Hidráulica y Riegos; g82megaa@uco.es; ecamacho@uco.es; pmontesinos@uco.es; jarodriguez@uco.es
[2] Trinity College Dublin (Ireland). Department of Civil & Environmental Engineering; J.Gallagher@tcd.ie; AMcNabola@tcd.ie

Resumen: Los sistemas de sincronización de la potencia fotovoltaica (fv) generada con la demanda de la red de riego minimizan el problema vinculado a la variabilidad en la radiación disponible. Así el sistema resulta energéticamente independiente, reduciendo el impacto ambiental y coste durante la fase de funcionamiento de la instalación. Sin embargo, los procesos de producción e instalación y costes de inversión deben ser valorados. En este trabajo se ha analizado el ciclo de vida de un sistema de riego fv (SRfv), comparándolo con las fuentes de energía tradicionales (generador diésel y red eléctrica). Se establecieron dos posibles escenarios: con y sin acceso a la red eléctrica, considerando una vida útil del proyecto de 30 años. El análisis de impacto ambiental siguió la metodología CML (Leiden University), seleccionando las 5 categorías más representativas: potencial de -calentamiento global (GWP) -agotamiento de recursos abióticos (ARDP) -acidificación (AP) -toxicidad humana (HTP) y -agotamiento de recursos fósiles (FRDP). Los resultados mostraron el SRfv como la opción con menor impacto para todas las categorías, excepto para ARDP, donde la demanda de materiales en la fabricación tuvo una importante repercusión. El SRfv presentó la mayor inversión inicial, aunque el menor coste total vinculado a toda la vida útil del proyecto, gracias al bajo coste asociado a la etapa de funcionamiento del sistema.

Palabras clave: energías renovables, riego fotovoltaico, evaluación del ciclo de vida

1. Introducción

El calentamiento global y las consecuencias derivadas del mismo [1], así como la subida en los precios de la energía, hacen que el interés en el uso de las energías renovables en el sector de la agricultura sea cada vez mayor. En concreto, la energía fotovoltaica (fv) presenta una alternativa económica de baja emisión de gases efecto invernadero (GEI), con un gran potencial en zonas con adecuados niveles de radiación. El principal inconveniente de esta tecnología radica en su dependencia de las variables climáticas [2]. Para hacer frente a este problema, se han desarrollado modelos de gestión del riego fv basados en la sincronización de la potencia fv generada y la demandada por la red de riego, consiguiendo así un sistema autónomo y energéticamente independiente [3]. Sin embargo, a pesar de la nula emisión de GEI de esta tecnología durante la etapa de funcionamiento, sí que hay un impacto ambiental vinculado a la etapa de producción, transporte e instalación de los elementos que componen el sistema, que debe ser considerado [4]. Numerosos estudios han evaluado el impacto vinculado a distintos

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3372

tipos de paneles fv [3, 4, 5, 6], destacando la carga ambiental vinculada al potencial de agotamiento de los recursos abióticos (ARDP-Abiotic resource depletion potential) como la más significativa. Estas cargas ambientales son normalmente expresadas en relación a 1 kWh de energía aprovechado. Por ello, la particularidad en los proyectos de riego radica en la estacionalidad de la actividad como tal, la cual afecta directamente a este valor, puesto que no toda la energía producida es utilizada. Así, el objetivo de este trabajo ha sido llevar a cabo una evaluación de impacto ambiental y económico de un sistema de riego fv, comparándolo con el impacto asociado al uso de las fuentes de energía tradicionales (generador diésel y red eléctrica). Para ello, se establecieron dos escenarios, con y sin conexión a la red, considerando en el primero de ellos la posibilidad de exportar a la red el excedente de energía fv generada y no consumida por la instalación de riego.

2. Materiales y métodos

2.1. Alcance del estudio

El análisis de impacto ambiental (Life Cycle Assessment-LCA) se llevó a cabo siguiendo la metodología CML [9], la cual incluye una gran variedad de flujos involucrados en la producción de las distintas tecnologías a evaluar [10]. De todas las categorías de impacto, se seleccionaron 5 como las más representativas [11], las cuales quedan brevemente definidas en la Tabla 1.

Tabla1. Categorías de impacto evaluadas

Categoría de impacto		Descripción
GWP	Global Warming Potential (kg CO_2 eq.)	Potencial de Calentamiento Global, relacionado con las emisiones de GEI que contribuyen al calentamiento global
ARDP	Abiotic Resource Depletion Potential (kg Sb eq.)	Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos, relacionado con la protección de la salud humana y ecosistemas. Relacionado con la extracción de minerales y reservas globales.
AP	Acidification Potential (kg SO_2 eq.)	Potencial de Acidificación. Relaciona el efecto de las sustancias acidificantes en el suelo, aguas subterráneas, organismos y ecosistemas.
HTP	Human Toxicity Potential (kg 1,4-DCBe eq.)	Efecto de sustancias tóxicas en el entorno humano. Los riesgos de exposición en el entorno de trabajo no se incluyen en esta evaluación. Expresado como emisiones de 1,4-diclorobenceno eq. kg^{-1}. Calculado con USES-LCA.
FRDP	Fossil Resource Depletion Potential (kJ eq.)	Agotamiento de las reservas de combustible fósil empleado para producir electricidad. Medido en kilojulios eq.

Para ambos análisis (ambiental y económico), se consideró un periodo de vida útil del proyecto de 30 años, puesto que la vida esperada para los paneles fv normalmente oscila en torno a los 25-30 años [10, 11, 12].

2.2. Caso de estudio

El caso de estudio seleccionado fue la parcela de olivar experimental de la Universidad de Córdoba, la cual incluye una instalación fv que abastece de energía a la red de riego. El sistema en su conjunto está formado por: una parcela de 13,4 ha de olivar intensivo con riego por goteo,

organizada en 3 sectores; una planta fv de 15,36 kW de potencia pico (120 paneles de capa fina); una bomba sumergida de 13 kW de potencia; y el sistema de control y filtrado. Esta instalación trabaja de forma autónoma, sin incluir ningún elemento de almacenamiento de energía, gracias al sistema de sincronización de la potencia fotovoltaica generada y la demandada por la red, previamente desarrollado [3]. La campaña de riego considerada fue de abril a septiembre, por lo que el sistema de riego únicamente trabaja durante este periodo.

2.3. Inventario de materiales y procesos

Para llevar a cabo el LCA, se generó una base de datos que incluía todos los materiales y procesos involucrados en la producción, transporte, instalación y funcionamiento de cada una de las opciones a evaluar. Para ello, se hizo uso de la base de datos Ecoinvent [15], siguiendo los estándares establecidos por la ISO 14040 [16]. En este trabajo, no se incluyeron las labores de mantenimiento para ninguna de las opciones analizadas.

2.3.1. Planta fotovoltaica

En este caso, la planta fv del caso de estudio estaba compuesta por paneles de capa fina (Sharp thin-film) con una potencia pico unitaria de 128 W y un peso total de 26 kg por módulo. Además de los paneles fv, también se consideraron el inversor, el cableado y la estructura metálica sobre la que se apoyan los paneles, instalados en la cubierta de una nave agrícola.

2.3.2. Generador diésel

Para evaluar la opción de suministro energético mediante generador diésel, se seleccionó uno comercial de 15 kW de potencia. Dada la complejidad en la lista de materiales incluidos en la fabricación del generador, ésta se sintetizó en aquellos con mayor representación (acero, aluminio, hierro forjado, polietileno, etc.). Además, también se contabilizaron los requerimientos de energía para su producción, y el combustible consumido durante las horas anuales de trabajo, para el periodo de vida útil estimado. Así mismo, también se incluyeron los materiales y energía necesarios para la fabricación del tanque de almacenamiento del combustible, así como el transporte.

2.3.3. Red eléctrica.

El impacto ambiental derivado del uso de la red eléctrica está condicionado por la contribución de las distintas fuentes de energía en la generación de electricidad en cada país. Para este estudio se consideraron los datos disponibles de estructura de generación de la energía en España en 2017. Así, destacaron las energías renovables, que representaron un 34,4% del total, la nuclear, con un 21,7% y el carbón, que representó un 14,5% [17]. Además se consideró la posible evolución en esta estructura de generación a lo largo de los 30 años evaluados, estimando un aumento en la contribución de las energías renovables [18]. Para esta opción de suministro, se consideró que la conexión a la red ya estaba disponible en parcela, por lo que únicamente se evaluó el impacto asociado a la energía consumida.

2.4. Coste asociado al ciclo de vida

El coste del ciclo de vida de cada una de las opciones fue calculado como la suma de los correspondientes costes de instalación y funcionamiento. Para ello, en el caso de la opción fotovoltaica, se consideró como único coste de funcionamiento el reemplazo del inversor. En el caso del generador diésel, los costes de funcionamiento fueron, además del asociado al reemplazo del generador, los vinculados al consumo de combustible. Finalmente, para la opción de

suministro a partir de la red eléctrica, únicamente se consideró el coste de la energía consumida, así como el coste fijo vinculado a la potencia contratada.

Para poder considerar las posibles oscilaciones en el precio del combustible y la electricidad proveniente de la red, el estudio se acompañó de un análisis de sensibilidad, incluyendo un rango de posibles precios, que fueron entre 0,8 y 1,3 € l^{-1} y 0,14 y 0,24 € kWh^{-1}, para el combustible y la electricidad, respectivamente.

2.5. Análisis de escenarios

La evaluación de las distintas tecnologías se llevó a cabo estableciendo previamente dos posibles escenarios. En el primero de ellos, el uso de un sistema de riego fv aislado de la red, fue comparado con el uso de un generador diésel. En el segundo escenario, el sistema de riego fv conectado a la red, fue comparado con el uso de la red eléctrica. Por ello, en este último caso, se consideró que el exceso de energía producida, era inyectado a la red, y con ello, el 100% de la energía generada se consideró aprovechada. Además, también se incluyó un análisis de sensibilidad, en el que se evaluó la influencia de la duración de la vida útil del proyecto, valorando posibles escenarios entre 5 y 30 años. Finalmente, también se analizó el impacto derivado de añadir conexión a la red a un sistema de riego fotovoltaico inicialmente aislado, así como distintos precios para el combustible y electricidad dentro de la evaluación económica de las distintas alternativas.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de contribución

La Fig. 1 muestra la carga ambiental acumulada para las distintas categorías de impacto analizadas en los dos escenarios previamente establecidos, para una vida útil del proyecto de 30 años. Los resultados obtenidos para ambas opciones de riego fv muestran diferencias significativas entre escenarios. Esta diferencia es debida a que, bajo las condiciones del escenario 1, la energía fv producida no es aprovechada en su totalidad, y al no existir conexión a la red, el exceso de la misma no puede ser exportado. Este exceso de energía se debe a que el riego para el cultivo de olivar es estacional, centrándose en un único periodo del año (abril a septiembre en este caso), así como al tiempo de riego diario, cuya media estuvo en torno a las 4 h. De esta forma, la instalación de riego fv aislada tuvo una repercusión ambiental 6 veces superior a la correspondiente instalación fv conectada a red. En ambos casos, la mayor carga ambiental estuvo asociada al periodo de instalación, y en concreto a la categoría de impacto ARDP, debido a la fabricación de los paneles [19]. Los resultados obtenidos para el escenario 2 son comparables con otros trabajos previos, puesto que todos ellos consideran el total de energía producida por los módulos. Así, las conclusiones de los mismos muestran que la carga ambiental asociada a los paneles fv de capa fina es menor que la correspondiente a los paneles cristalinos [20, 21], debido a la menor demanda energética y de materiales para su fabricación. La opción correspondiente al uso del generador diésel presentó importantes cargas ambientales para las categorías GWP, AP, HTP y FRDP, lo que coincide con resultados obtenidos en estudios previos [22, 23]. En el caso de la red eléctrica, toda la carga ambiental estuvo asociada al total de energía consumida durante el funcionamiento del sistema de riego. El análisis de las distintas categorías de impacto mostró que para todas ellas, excepto para la ARDP, la carga ambiental asociada a esta última alternativa fue significativamente superior a la correspondiente a la instalación fv conectada a red.

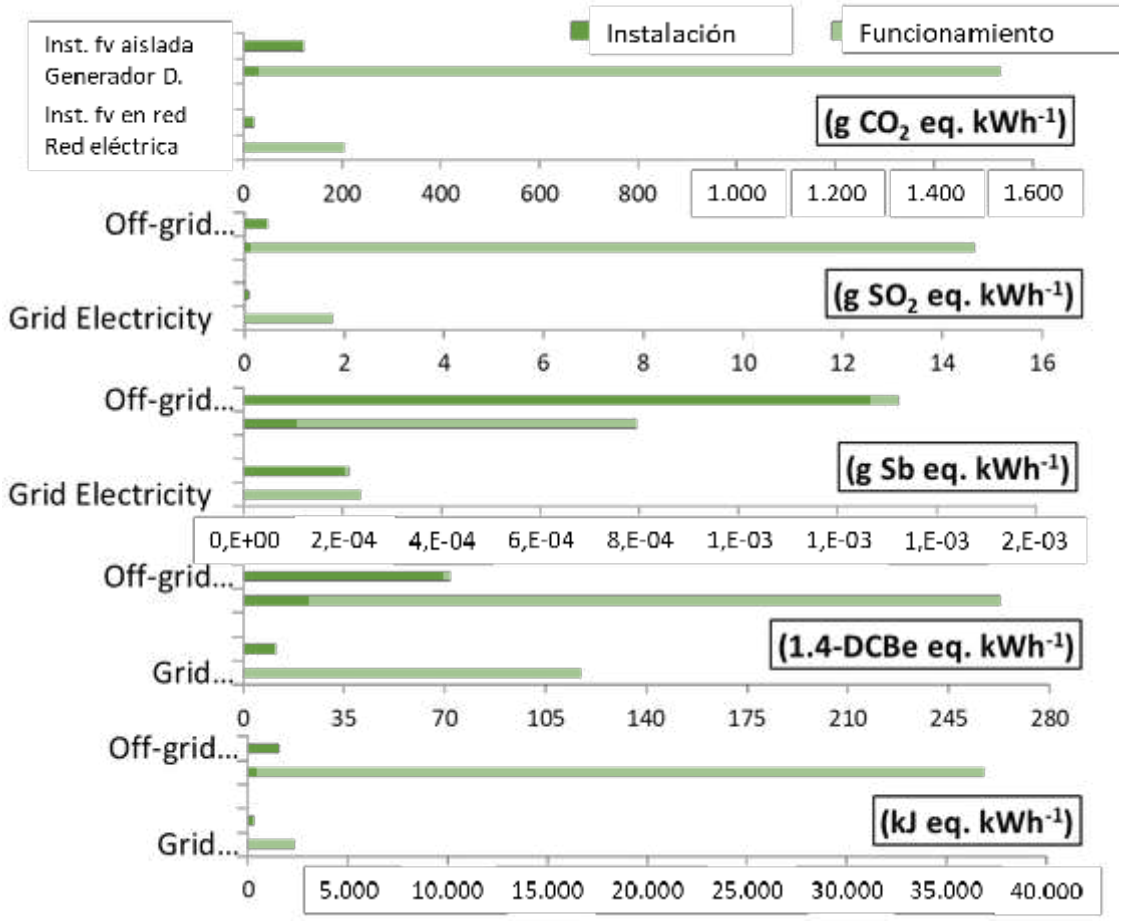


Figura 1. Carga ambiental asociada a las etapas de instalación y funcionamiento para las distintas opciones y categorías de impacto analizadas en relación a un kWh de energía aprovechado

En relación a la contribución asociada a los distintos materiales y procesos, en el caso de la instalación fv, el 29% del total de las emisiones de CO_2 fue debida a los materiales empleados en la fabricación, mientras que el 60% fue debida a los requerimientos de energía. Esto ocurrió para el resto de categorías, excepto para el ARDP, en el que el uso de metales representó un 80% de la carga asociada. La mayor contribución para el caso del uso del generador diesel estuvo vinculada al cosumo de combustible durante los 30 años de funcionamiento de la instalación, lo que representó el 77% de la carga asociada al HTP y entre un 92-97% para el resto de categorías.

3.2. Coste del ciclo de vida

La evaluación económica se llevó a cabo asumiendo los precios de la energía en España, donde se localiza el caso de estudio, asumiendo estos precios como media para los próximos 30 años, como aproximación para la comparativa económica entre escenarios. Para el inversor necesario para la instalación de riego fv, así como el generador diésel, se estimó una vida útil de 15 años, por lo que ambos fueron reemplazados una vez.

Los resultados mostraron que, la opción de riego fv, a pesar de presentar el mayor coste de inversión inicial, fue la alternativa con menor coste total asociado, con 26.444 €, frente a 41.593 € y 70.748 €, correspondientes al uso de la red eléctrica y generador diésel, respectivamente. A pesar de que la diferencia entre la opción fv y el uso de la red eléctrica no fue significativa, la posibilidad de vender el excedente de energía en instalaciones fv conectadas a red permitiría tener un ingreso económico extra al agricultor. Además, el periodo de amortización fue estimado en torno a los

8,6 años para la instalación fv aislada, mientras que para la conectada a la red, debería considerarse la posibilidad de vender el excedente de energía, lo cual dependerá de la legislación vigente en cada país. No obstante, esta última situación permitiría reducir considerablemente los costes de amortización.

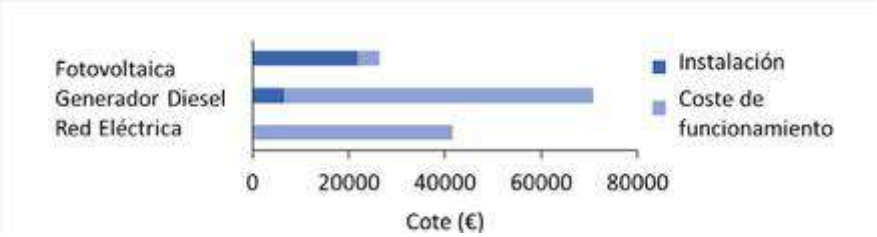


Figura 2. Coste del ciclo de vida asociado a las distintas opciones de suministro energético analizadas.

Por otra parte, en función de la zona de emplazamiento del caso de estudio y las condiciones concretas de radiación, el tiempo de recuperación energético (energy payback time- EPBT) para la instalación fv fue estimado en 0,5 y 3,1 años, para el escenario conectado y aislado de la red, respectivamente. Estos valores se mostraron dentro de los rangos de resultados obtenidos en trabajos anteriores [19, 24, 21].

Finalmente, el tiempo de retorno ambiental (environmental/carbon payback time) para la instalación fv aislada fue de 2,4 años, teniendo como referencia el generador diesel, mientras que este valor ascendió a 18 años al compararla con el uso de la red eléctrica.

3.3. Análisis de sensibilidad

El análisis de un rango de valores de vida útil del proyecto permitió observar la influencia del mismo sobre la carga ambiental asociada a 1 kWh de energía aprovechado por los distintos sistemas. De esta forma, valores de vida útil inferiores a 15 años implicaron el uso de un solo inversor (en el sistema fv) y generador diesel. En el caso del generador diésel, no se apreciaron diferencias significativas para los distintos supuestos, debido a que la mayor parte de la carga ambiental estaba asociada al tiempo de funcionamiento. Esto mismo fue observado para el caso del uso de la red eléctrica, donde el impacto total es proporcional a la energía consumida. En este último caso, las pequeñas variaciones entre años únicamente reflejan la evolución en la estructura de generación de la electricidad. Sin embargo, para las opciones de riego fv, cuanto mayor es el periodo de vida útil considerado, menor es la carga asociada a 1 kWh de energía aprovechado, puesto que la mayor parte del impacto ambiental está asociado a la etapa de instalación, y los mismos módulos mantienen su actividad durante los 30 años considerados.

La evaluación de la influencia derivada de añadir conexión a la red a una instalación de riego fv originalmente aislada mostró que la carga ambiental, en comparación con la instalación fv aislada, podría disminuir en torno a un 73-77% para todas las categorías de impacto, excepto para el HTP, donde mostró una reducción menor, del 54%. Esta evaluación consideró el efecto de añadir 1 km de cableado, así como los elementos de sujección necesarios.

Por último, el análisis del coste del ciclo de vida para las alternativas correspondientes al uso del generador diésel o red eléctrica, considerando distintos precios para el combustible fósil y electricidad, dio costes totales siempre superiores al obtenido para el riego fotovoltaico.

4. Conclusiones

La energía fv es una tecnología que ofrece una solución económicamente rentable para el agricultor, con un impacto ambiental despreciable durante el periodo de funcionamiento. Sin embargo, para evaluar el coste ambiental asociado a la energía producida, el proceso de fabricación de los paneles debe ser también considerado. De esta forma, en este trabajo se ha llevado a cabo el análisis económico y ambiental de un sistema de riego fv así como de los sistemas de suministro energético tradicionales (red eléctrica y generador diésel). Los resultados mostraron la opción fv como la de menor impacto ambiental asociado a todas las categorías de impacto analizadas salvo para el ARDP, para el cual el sistema fv aislado mostró el valor más alto. Además, cabe destacar que el sistema de riego fv en red obtuvo resultados 6 veces menores a los asociados al sistema fv aislado, debido al uso parcial de la energía para el riego. En cuanto a los aspectos económicos, la opción de riego fv fue la que mostró un menor coste total, aún implicando un mayor coste de inversión, en todos los escenarios analizados, estimando un periodo de vida útil del proyecto de 30 años. Por su parte, el tiempo de retorno energético supuso entre 0,5 y 3,1 años, para la instalación fv en red y aislada, respectivamente. La influencia del valor asociado a la vida útil del proyecto mostró una reducción gradual en la carga asociada a la energía producida al aumentar el número de años considerados, mientras que para las dos opciones restantes (generador diésel y red eléctrica) no se observaron diferencias significativas. Finalmente, cabe destacar que las características del proyecto a evaluar tienen una gran influencia sobre los resultados obtenidos, desde el punto de vista económico y ambiental. Así, la duración del periodo de vida útil, la disponibilidad de conexión a la red eléctrica, la posibilidad de vender el excedente de energía y los requerimientos anuales de energía por parte de la instalación de riego juegan un papel fundamental a la hora de seleccionar la mejor alternativa. Para el caso de estudio analizado, se demostró que la alternativa del riego fv presenta la mejor opción desde el punto de vista económico y ambiental, incluso si no existiera la posibilidad de vender el excedente de energía generada.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (AGL2017-82927-C3-1-R), la iniciativa "Interreg Volunteer Youth Programme", y los Fondos Europeos de Desarrollo Regional a través del Interreg Atlantic Area programme (REDAWn Project).

Referencias

1. FAO Climate change and food security: Risks and responses; 2016; ISBN 9789251089989.
2. López-Luque, R.; Reca, J.; Martínez, J. Optimal design of a standalone direct pumping photovoltaic system for deficit irrigation of olive orchards. Appl. Energy 2015, 149, 13–23.
3. Mérida García, A.; Fernández García, I.; Camacho Poyato, E.; Montesinos Barrios, P.; Rodríguez Díaz, J.A. Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system. J. Clean. Prod. 2018, 175, 670–682.
4. Desideri, U.; Proietti, S.; Zepparelli, F.; Sdringola, P.; Bini, S. Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems. Appl. Energy 2012, 97, 930–943.
5. Berger, W.; Simon, F.G.; Weimann, K.; Alsema, E.A. A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules. Resour. Conserv. Recycl. 2010, 54, 711–718.
6. Evans, A.; Strezov, V.; Evans, T.J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. Renew. Sustain. Energy Rev. 2009, 13, 1082–1088.
7. Gerbinet, S.; Belboom, S.; Léonard, A. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2014, 38, 747–753.

8. Gallagher, J.; Basu, B.; Browne, M.; Kenna, A.; McCormack, S.; Pilla, F.; Styles, D. Adapting Stand-Alone Renewable Energy Technologies for the Circular Economy through Eco-Design and Recycling. 2017, 00, 1–8.
9. CML Characterization Factors database available online from Institute of Environmental Sciences (CML). 2010.
10. Chen, W.; Hong, J.; Yuan, X.; Liu, J. Environmental impact assessment of monocrystalline silicon solar photovoltaic cell production: A case study in China. J. Clean. Prod. 2016, 112, 1025–1032.
11. Gallagher, J.; Styles, D.; McNabola, A.; Williams, A.P. Life cycle environmental balance and greenhouse gas mitigation potential of micro-hydropower energy recovery in the water industry. J. Clean. Prod. 2015, 99, 152–159.
12. Knapp, K.; Jester, T. Empirical investigation of the energy payback time for photovoltaic modules. Sol. Energy 2001, 71, 165–172.
13. Fthenakis, V.; Alsema, E. Photovoltaics Energy Payback Times, Greenhouse Gas Emissions and External Costs: 2004–early 2005 Status. Prog. Photovolt Res. Appl. 2006, 14, 275–280.
14. Fu, Y.; Liu, X.; Yuan, Z. Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. J. Clean. Prod. 2015, 86, 180–190.
15. Ecoinvent In:SimaPro, a.v (Ed.). Ecoinvent Database Version 3. 2014.
16. ISO ISO 14040: Environmental Management e Life Cycle Assessment e Principles and Framework. ISO, Geneva. 2006.
17. REE Estructura de Generación de Energía Anual Nacional. Red Eléctrica España 2016.
18. Gallagher, J.; Basu, B.; Browne, M.; Kenna, A.; McCormack, S.; Pilla, F.; Styles, D. Can circular economy impact on the environmental performance of stand-alone renewable energy system? Examining future recycling eco-design opportunities. J. Ind. Ecol. 2017.
19. Peng, J.; Lu, L.; Yang, H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. Renew. Sustain. Energy Rev. 2013, 19, 255–274.
20. Kittner, N.; Gheewala, S.H.; Kamens, R.M. An environmental life cycle comparison of single-crystalline and amorphous-silicon thin-film photovoltaic systems in Thailand. Energy Sustain. Dev. 2013, 17, 605–614.
21. Sumper, A.; Robledo-García, M.; Villafáfila-Robles, R.; Bergas-Jané, J.; Andrés-Peiró, J. Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain). Renew. Sustain. Energy Rev. 2011, 15, 3888–3896.
22. Smith, C.; Burrows, J.; Scheier, E.; Young, A.; Smith, J.; Young, T.; Gheewala, S.H. Comparative Life Cycle Assessment of a Thai Island's diesel/PV/wind hybrid microgrid. Renew. Energy 2015, 80, 85–100.
23. Amante-García, B.; Grimau, V.L.; Casals, L.C. LCA of different energy sources for a water purification plant in Burkina Fasso. Desalin. Water Treat. 2017, 76, 375–381.
24. Wetzel, T.; Borchers, S. Update of energy payback time and greenhouse gas emissions data for crystalline silicon photovoltaic modules. Prog. photovoltaics Res. Appl. 2015, 23, 1429–1435.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Indicadores clave de rendimiento (KPIs) sobre eficiencia energética en la industria agroalimentaria

C. J. Porras-Prieto[1], F. Ruiz-Mazarrón[1], J. Fuentes-Pila[2], J. L. García[1]

[1] Dpto. Ingeniería Agroforestal, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid; carlosjavier.porras@upm.es, f.ruiz@upm.es, joseluis.garciaf@upm.es
[2] Dpto. Economía Agraria, Estadística y Gestión de Empresas, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid; jfuentespila@gmail.com

Resumen: La eficiencia energética es un tema de interés creciente en la industria agroalimentaria. Un problema habitual en este tipo de industrias es la escasez de información sobre los indicadores clave de rendimiento (Key Performance Indicators –KPIs- en inglés) en el aspecto energético, información que sería útil para que una industria individual evaluara si sus índices de eficiencia energética están dentro de los rangos habituales en su sector. El estudio se ha realizado en el marco de los proyectos europeos SCOoPE (https://scoope.eu/) y TESLA (https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/tesla). Se ha realizado en los sectores de la industria cárnica, láctea, secaderos de cereales y forraje, y la industria de transformación de productos hortofrutícolas. La Universidad Politécnica de Madrid, dentro del proyecto SCOoPE, identificó 50 parejas de indicadores eléctricos (parejas valor medio/ valor óptimo): 18 de tipo general, 7 del sector cárnico, 8 del sector lácteo, 7 del sector de secado, y 10 del sector hortofrutícola. Para cada indicador o KPI eléctrico se identificó el valor medio en el sector, y el valor óptimo o valor de la mejor industria del sector en ese indicador. La metodología utilizada incluyó una amplia revisión bibliográfica, y la validación de parte de los indicadores obtenidos en la revisión bibliográfica, con datos reales de 67 cooperativas. En cada caso se identificaron los factores implicados más relevantes. Se espera que la relación de indicadores obtenida será útil a los cuatro sectores estudiados para la evaluación de su eficiencia, y para la identificación de objetivos realistas en sus procesos de mejora energética.

Palabras clave: energía, sector cárnico, sector lácteo, secaderos, procesado de frutas y hortalizas

1. Introducción

La identificación de indicadores clave de rendimiento (KPIs en inglés), y de sus valores medios y óptimos, es un problema habitual en todo tipo de instalaciones, y también en la industria alimentaria. En algunos casos la información existente es antigua o muy escasa [1], [2], [3]. En parámetros eléctricos, Siemens [4] ha publicado una serie de indicadores clave respecto a las instalaciones eléctricas. El presente estudio es un trabajo preliminar, que trata de aportar información actualizada en este ámbito, para la mejora de la eficiencia energética en la industria agroalimentaria.

En el proyecto europeo SCOoPE (https://scoope.eu/), la Universidad Politécnica de Madrid identificó 50 parejas de indicadores eléctricos, que se describen en el presente trabajo:

https://scoope.eu/wp-content/uploads/2019/04/D.2.3_Electric-KPIs.pdf

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3304

En paralelo, dentro del mismo proyecto SCOoPE, el organismo de investigación italiano ENEA identificó 50 parejas de indicadores térmicos:
https://scoope.eu/wp-content/uploads/2017/03/D.2.2_Thermal-KPIs.pdf

2. Materiales y métodos

Dentro del proyecto SCOoPE, se elaboraron documentos con una descripción detallada de los procesos productivos de los cuatro sectores estudiados (industria cárnica, láctea, secaderos de cereales y forraje, y la industria de transformación de productos hortofrutícolas). Se realizaron mapas del flujo de valor (https://scoope.eu/publications-reports/) disponibles en la WEB del proyecto. Con esta información se comenzó una amplia revisión bibliográfica, parte de la cual figura al final de este documento. Con la revisión bibliográfica y consultas a expertos y empresas de los sectores implicados, se identificaron los indicadores más importantes, y se realizaron las primeras tablas de valores medios y óptimos. El KPI "medio" es el valor promedio identificado; El KPI "óptimo" es el valor más favorable del indicador que se encuentra en el sector o la industria, y la referencia para una evaluación comparativa.

Posteriormente se realizó una validación de parte de los indicadores obtenidos, con datos reales de 67 cooperativas (51 del sector de secaderos, y 16 del sector lácteo) de siete países europeos (Dinamarca, España, Francia, Grecia, Italia, Portugal y Suecia). Con esta información adicional, y nuevas consultas a expertos y empresas, se corrigieron parte de los KPIs obtenidos.

3. Resultados y discusión

En las tablas que aparecen a continuación se muestran las 50 parejas de indicadores eléctricos identificados en el estudio. En todas las tablas de este documento figuran los KPIs corregidos. Se puede encontrar información ampliada en:
https://scoope.eu/wp-content/uploads/2019/04/D.2.3_Electric-KPIs.pdf

Tabla 1. Valores medios y óptimos de indicadores eléctricos de ámbito general en la industria agroalimentaria.

Indicador (*KPI*)	**Valor medio / óptimo**
Coste de la electricidad	0.12 / 0.05 euros/kWh
Factor de carga	50% / 80%
Demanda mínima general	30% / 0%
Factor de potencia	0.95 / 1
Costes fijos de la electricidad	15% / 8%
Electricidad generada *in situ*	25.5% / 100%
Electricidad generada de fuentes renovables	24.9% / 100%
Consumo eléctrico en iluminación	40 / 10 kWh/m^2 año
Consumo eléctrico en aire comprimido por tonelada de producto	5 / 2 kWh/t
Consumo eléctrico en climatización	30 / 10 kWh/m^2 año
Uso medio del volumen en cámaras frigoríficas	0.7 / 2.5 t/m^3
Potencia instalada por unidad de volumen de cámaras frigoríficas	0.1 / 0.032 kW/m^3
Consumo eléctrico por unidad de volumen de cámaras frigoríficas	350 / 120 kWh/m^3 año
Eficiencia (COP) de una unidad de aire acondicionado	4 / 6
Eficiencia (COP) de una enfriadora	4 / 6
Eficiencia (COP) de una bomba de calor	4 / 6
Rendimiento de un compresor eléctrico	0.8 / 0.9
Rendimiento de un motor eléctrico	0.85 / 0.99

Tabla 2. Indicadores eléctricos del sector lácteo, con valores medios y óptimos. [5] entre otras fuentes

Indicador (*KPI*)	**Valor medio / óptimo**
Consumo eléctrico total (se incluyen procesos auxiliares) por m^3 de leche UHT	110 / 55 kWh/m^3
Consumo eléctrico total por m^3 de leche pasteurizada	50 / 20 kWh/m^3
Consumo eléctrico total por m^3 de leche desnatada	120 / 60 kWh/m^3
Consumo eléctrico total por m^3 de leche condensada	120 / 60 kWh/m^3
Consumo eléctrico total por tonelada de leche en polvo	800 / 400 kWh/t
Consumo eléctrico total por m^3 de yogur	80 / 50 kWh/m^3
Consumo eléctrico total por tonelada de queso	500 / 350 kWh/t para queso fresco 1200 / 800 kWh/t para queso semicurado
Consumo eléctrico total por m^3 de mantequilla	220 / 90 kWh/m^3

Tabla 3. Indicadores eléctricos del sector de secado de cereales y forraje, con valores medios y óptimos. [6] y [7] entre otras fuentes

Indicador (*KPI*)	**Valor medio / óptimo**
Consumo eléctrico total (se incluyen procesos auxiliares) por tonelada de agua evaporada en secado de maíz	200 / 80 kWh/t agua
Consumo eléctrico total por tonelada de agua evaporada en secado de arroz	1000 / 80 kWh/t agua
Consumo eléctrico total por tonelada de agua evaporada en secado de cereales de invierno	400 / 80 kWh/t agua
Consumo eléctrico total por tonelada de agua evaporada en secado de forraje	400 / 40 kWh/t agua
Consumo eléctrico en secado, en el proceso de aspiración, por tonelada de producto	2 / 1 kWh/t
Consumo eléctrico en secado, en el proceso de manejo, por tonelada de producto	2 / 1 kWh/t
Consumo eléctrico en secado, en el proceso de ventilación, por tonelada de producto	4 / 2 kWh/t

Tabla 4. Indicadores eléctricos del sector de procesado de frutas y hortalizas, con valores medios y óptimos. [8] entre otras fuentes

Indicador (*KPI*)	**Valor medio / óptimo**
Consumo eléctrico total (se incluyen procesos auxiliares) por tonelada de concentrado de tomate	200 / 100 kWh/t
Consumo eléctrico total por tonelada de tomate cortado en dados	60 / 30 kWh/t
Consumo eléctrico total por tonelada de tomate fresco	40 / 20 kWh/t
Consumo eléctrico total por tonelada de zumo de naranja	135 / 60 kWh/t
Consumo eléctrico total por tonelada de zumo de fruta	60 / 30 kWh/t
Consumo eléctrico total por tonelada de fruta en conserva	80 / 40 kWh/t
Consumo eléctrico total por tonelada de zumo concentrado congelado	800 / 400 kWh/t
Consumo eléctrico total por tonelada de fruta congelada	600 / 300 kWh/t
Consumo eléctrico total por tonelada de patata congelada	600 / 300 kWh/t
Consumo eléctrico total por tonelada de puré de fruta	1200 / 800 kWh/t

Tabla 5. Indicadores eléctricos del sector de procesado de productos cárnicos, con valores medios y óptimos. [9] entre otras fuentes

Indicador (*KPI*)	**Valor medio / óptimo**
Consumo eléctrico total (se incluyen procesos auxiliares) por tonelada de carcasa de porcino	300 / 36 kWh/t canal
Consumo eléctrico total por tonelada de carcasa de vacuno	220 / 36 kWh/t canal
Consumo eléctrico total por tonelada de carcasa de ovino	356 / 36 kWh/t canal
Consumo eléctrico total por tonelada de carcasa de aves de corral	100 / 60 kWh/t canal
Consumo eléctrico total por tonelada de carcasa de conejo	100 / 60 kWh/t canal
Consumo eléctrico total por tonelada de jamón curado	500 / 300 kWh/t
Consumo eléctrico total por tonelada de carne cortada, deshuesada y congelada	60 / 50 kWh/t producto terminado (cortado y deshuesado) + 300 / 250 kWh/t producto terminado (vacuno, congelación) + 400 / 350 kWh/t producto terminado (porcino, congelación) + 900 / 800 kWh/t producto terminado (aves, congelación)

En la validación de los indicadores, con datos reales de 67 cooperativas, se obtuvieron datos reales de KPIs, información que se añadió al proceso. Como ejemplos, se muestran a continuación dos gráficas con KPIs eléctricos en la producción de leche y queso:



Figura 1. Valores de los KPIs reales en la producción de leche, en seis cooperativas del estudio. Consumo eléctrico total, incluyendo consumos eléctricos de procesos auxiliares.

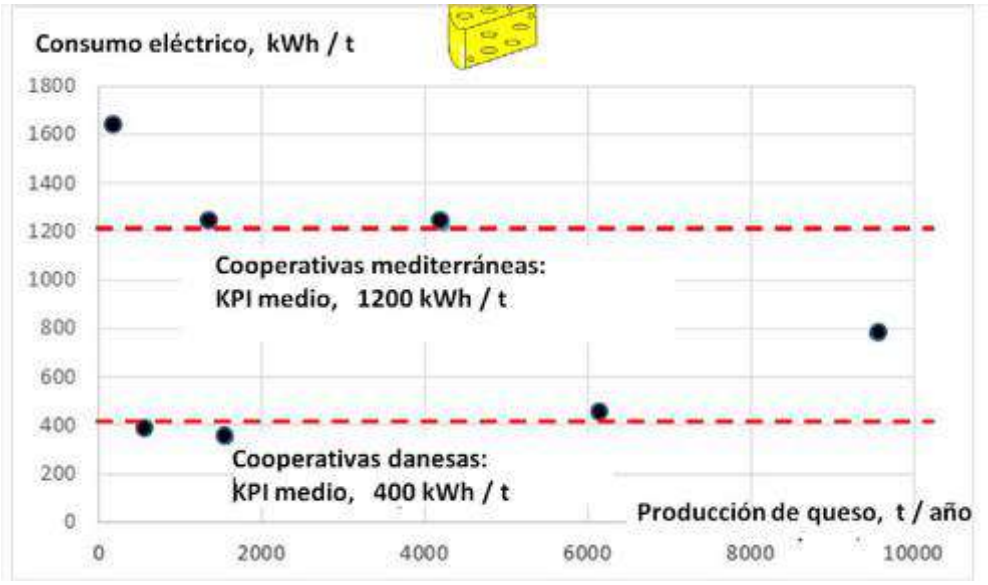


Figura 2. Valores de los KPIs reales en la producción de queso, en siete cooperativas del estudio. Consumo eléctrico total, incluyendo consumos eléctricos de procesos auxiliares.

Comparando los valores iniciales de la revisión bibliográfica, con los valores obtenidos en las industrias, se ha podido constatar que los valores en industrias reales muestran una gran dispersión, encontrándose a veces valores muy elevados respecto a los valores de la revisión; y que parte de esta dispersión se debe a las variaciones en la tipología del producto. Como ejemplo, y como cabía esperar, cada tipo de queso tiene sensibles diferencias respecto al KPI de la energía eléctrica consumida por tonelada de producto. Esto complica la elaboración de un listado útil de KPIs, aunque se pueden definir rangos de valores habituales.

4. Conclusiones

El presente estudio es un trabajo preliminar, que trata de aportar información, en un marco de colaboración amplio que incluya el tejido productivo y los sectores que lo apoyan (como las entidades gubernamentales y los organismos académicos y de investigación), para la mejora de la eficiencia energética en la industria agroalimentaria. Se espera que la relación de indicadores obtenida será útil a los cuatro sectores estudiados para la evaluación de su eficiencia, y para la identificación de objetivos realistas en sus procesos de mejora energética.

5. Agradecimientos

El presente estudio se ha realizado dentro del proyecto europeo SCOoPE, coordinado por Cooperativas Agroalimentarias de España. Este proyecto ha sido financiado por el programa de investigación e innovación Horizon 2020 de la Unión Europea en virtud del *grant agreement* Nº 695985.

Referencias

1. FAO Corporate Document Repository. Energy requirements in food processing. 1992. http://www.fao.org/docrep/004/t0515e/T0515E03.htm
2. California Energy Commission. 2008. California's Food Processing Industry. Energy efficiency initiative: adoption of industrial best practices. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.183.9144&rep=rep1&type=pdf
3. European Commission. Reference document on best available techniques for energy efficiency. February 2009. http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ENE_Adopted_02-2009.pdf

4. Siemens Retail & Commercial Systems. Managing energy using key performance indicators. White Paper, June 2014. http://w3.usa.siemens.com/buildingtechnologies/us/en/energy-efficiency/retail-and-commercial-systems/pages/manage-energy-using-kpi.aspx
5. Agencia Extremeña de la Energía. Eficiencia energética en empresas del sector agroalimentario. 2014. http://www.agenex.net/guias-altercexa/2_EF_ENERG_EN_EMPRESAS_DEL_SECTOR_AGROALIMENTARIO.pdf
6. Billiris M.A., Siebenmorgen T.J., Baltz G.L. Energy use and efficiency of rice-drying systems I. On-farm cross-flow dryer measurements. Applied Engineering in Agriculture. 2014, 30(2): 205-215
7. Billiris M.A., Siebenmorgen T.J. Energy use and efficiency of rice drying systems II. Commercial, cross-flow dryer measurements. Applied Engineering in Agriculture. 2014, 30(2): 217-226
8. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California. Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the fruit and vegetable processing industry. 2008. https://www.energystar.gov/ia/business/industry/Food-Guide.pdf
9. Nunes J., Silva P.D., Andrade L.P., Gaspar P.D. Key points on the energy sustainable development of the food industry – Case study of the Portuguese sausages industry. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016, 57: 393–411

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Integración de modelos hidráulicos y fotovoltaicos en bombeo solar

J. Cervera [1], A. Del Castillo [2], J. Montero [1], J.M. Tarjuelo [1], M.A. Moreno [1]

[1] Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, Ctra de Las Peñas km. 3.2, 02071 Albacete; Jorge.Cervera@uclm.es; Jesus.Montero@uclm.es; Jose.Tarjuelo@uclm.es; MiguelAngel.Moreno@uclm.es

[2] Instituto de Desarrollo Regional (IDR), UCLM, Paseo de los Estudiantes, s/n, 02006 Albacete; Amaro.Castillo@uclm.es

Resumen: Uno de los aspectos clave que condicionan el buen funcionamiento de los sistemas de bombeo solar es la gestión que se hace de ellos. Esta gestión debe englobar tanto a la instalación fotovoltaica, siendo capaz de transformar la gran variabilidad de la radiación solar en potencia útil disponible, como a la instalación hidráulica, para poder conseguir una adecuada gestión de riego en cuanto a uniformidad y dosis a aplicar. Por tanto, el presente estudio tiene como objetivo el desarrollo de una herramienta de análisis inteligente de bombeos solares, tanto en sistemas de inyección directa como en almacenamiento a embalse, compuesta por un modelo fotovoltaico de alta precisión que permita obtener la potencia generada en tiempo real, integrado con un modelo hidráulico, para poder reproducir el comportamiento del sistema de riego frente a las posibles variaciones de presión y caudal descargado según la potencia eléctrica disponible.

Palabras clave: riego, energías renovables, gestión, optimización.

1. Introducción

Los principales aspectos que deben ser considerados en el proceso de diseño y gestión de un sistema de riego son: maximizar la uniformidad y obtener el mínimo coste total del sistema y determinar los requerimientos del sistema control y telemetría.

Daccache et al. [1] implementaron algoritmos para analizar la relación entre la uniformidad del riego y la presión en el hidrante. Carrión et al. [2, 3] desarrollaron una herramienta de ayuda en la toma de decisiones (ATD) llamada PRESUD, para el diseño y dimensionamiento óptimo de sistemas fijos de aspersión y de riego localizado con coste total mínimo (inversión + operación) por unidad de superficie regada teniendo en cuenta el tipo y tamaño de la bomba junto con el sistema de riego. El uso de estas herramientas hace que sea posible determinar con precisión la uniformidad del sistema, que está directamente relacionado con el rendimiento de los cultivos y, por lo tanto, con el uso eficiente del agua. También es importante para poder determinar el efecto de la presión de trabajo de los emisores en el adecuado equilibrio entre el consumo de energía y el coste total de la aplicación de agua.

En el sector agrícola, la aplicación de las energías renovables es cada vez más frecuente, como la energía solar en sistemas de bombeo para el suministro del agua de riego. En estos momentos se necesita realizar un análisis completo de la aplicabilidad de la energía fotovoltaica en cada país, que está muy influenciada por la estructura y condicionantes de las redes de distribución de energía, junto con la estacionalidad de la demanda de energía del regadío.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3441

Así, el objetivo del trabajo es desarrollar una herramienta inteligente que permita la integración de un modelo hidráulico y fotovoltaico preciso para analizar la calidad del riego en las distintas subunidades en que esté dividido el sistema, con cualquier forma y topografía irregular, estableciendo la secuencia optima de apertura de subunidades que garanticen una buena gestión de la uniformidad y dosis de riego, tanto para el caso de inyección directa a red como con la utilización de un depósito de regulación y almacenamiento intermedio, utilizando energía fotovoltaica.

2. Materiales y métodos

Para la realización, calibración y validación de estos modelos se ha utilizado una parcela comercial de 90 ha de almendros regada por goteo con sistema de bombeo solar. La finca está situada en el término municipal de Hellín (Albacete) y está dividida en 20 subunidades, que están ubicadas en una topografía y forma muy irregular.

Los goteros utilizados son autocompensantes, con un caudal de diseño de 2 l/h, habiéndolos ensayado en laboratorio para obtener su curva de descarga y el coeficiente de variación de fabricación. El agua suministrada a la plantación procede de un sondeo con nivel dinámico situado a 180 m, utilizando una bomba sumergida de 30 kW alimentada con energía fotovoltaica. Además, la finca cuenta con un embalse de 12.500 m^3.

En la figura 1 se muestra el plano con las subunidades, la red de distribución, ubicación de las paneles solares, pozo y embalse.



Figura 1. Plano de la finca con las subunidades, la red de distribución, ubicación de los paneles solares, pozo y embalse.

En la cubierta de una nave, que se encuentra en la parte central de la finca, están instalados 152 módulos fotovoltaicos, con una disposición de 8 ramales en paralelo con 19 módulos fotovoltaicos por ramal que aportan una potencia máxima de 40 kW, siendo la potencia unitaria por módulo fotovoltaico de 265 W, con la que se alimenta la bomba a través de un variador de velocidad de 30 kW. El cableado está dividido en cuatro tramos: el primero de ellos es de corriente continua y recorre todos los módulos fotovoltaicos. El segundo de ellos, también en corriente continua, va desde los módulos fotovoltaicos al variador, con 2 m longitud y una sección de 150 mm2, siendo ambos de cobre. El tercer tramo, en corriente alterna, va del variador a la bomba, con una longitud 450 m y una sección de 150 mm2 y el cuarto tramo, también en corriente alterna, está comprendido desde la entrada del pozo hasta el motor

sumergido con una longitud de 225 m y una sección de 25 mm2, Siendo estos últimos de aluminio.

La instalación permite tanto el bombeo directo desde el sondeo a las subunidades de riego como la elevación desde el sondeo a la balsa de regulación y almacenamiento situada 28 m por encima de la cota de salida del sondeo. Desde la balsa se puede regar por gravedad cerca del 60% de las subunidades de riego, existiendo un sistema de re-bombeo solar adicional para el riego del resto de subunidades de riego por goteo.

Los datos de entrada de irradiación (W/m^2), temperatura ambiente (ºC) y velocidad del viento (m/s) han sido obtenidos de un piranómetro (Middleton) y de una estación meteorológica (WS-600) respectivamente instalados junto a los módulos fotovoltaicos, permitiendo obtener datos muy fiables y representativos. La adquisición de estos datos permite simular potencias en tiempo real disponibles a la entrada de la bomba.

Con el fin de tener una precisa caracterización de la finca, se ha realizado un levantamiento topográfico con GPS-RTK, y precisión centimétrica en altimetría, identificando además el inicio y fin de cada ramal, y la localización de cada una de las válvulas de apertura de las subunidades, consiguiendo así una muy buena caracterización del sistema de riego instalado. En la figura 2 se muestra una ortoimagen con todos los puntos obtenidos con GPS-RTK.



Figura 2. Medición de puntos de inicio y final de ramal así como de las válvulas de apertura de cada subunidad mediante GPS-RTK.

Además, se han realizado diferentes vuelos mediante vehículos aéreos no tripulados (drones) utilizando un drone de tipo cuadracóptero md-400 con el fin de obtener el modelo digital del terreno (MDT), lo que ha permitido determinar la cota de cada uno de los goteros con precisión centimétrica (< 7 cm).

La herramienta generada está compuesta por la integración de dos submodelos, uno fotovoltaico y otro hidráulico. Posteriormente estos dos modelos se han unificado creando un único modelo denominado PRESUD-Solar. A continuación, se desarrolla la metodología utilizada en ambos modelos.

2.1. Modelo Hidráulico

La información obtenida ha permitido reproducir el diseño hidráulico de la red de distribución y de las distintas subunidades de riego mediante un programa de dibujo y diseño asistido por ordenador (CAD) permitiendo trazar los límites de la subunidad, así como su punto de alimentación y todas las tuberías que la conforman. Posteriormente, para la obtención modelo hidráulico de la instalación se ha utilizado el motor de cálculo EPANET [4], implementado en un software propio desarrollado en Matlab®.

La descarga de los goteros se ha estimado con la ecuación de Karmeli y Keller [5], obtenida en laboratorio:

$$qh = K \cdot h_e^x \qquad (1)$$

Siendo qh el caudal del emisor, K el coeficiente del emisor, x el exponente de descarga del emisor y he la presión en cabecera del emisor.

Con ayuda de la herramienta PRESUD-irregular se ha deducido la ecuación de descarga de cada subunidad, que determina el caudal descargado por el conjunto de goteros en función de la presión a la entrada de la subunidad, así como la presión y caudal descargado por cada uno de los goteros. Esto permite calcular los correspondientes coeficientes de uniformidad de emisión, y los coeficientes de variación de caudal y presión en cada una de las subunidades, teniendo una muy buena caracterización de la calidad del riego.

Para la caracterización del funcionamiento del sondeo se ha realizado una evaluación para obtener datos de niveles dinámicos y caudales en función de potencias disponibles en la bomba. Además, la herramienta permite conocer la evolución de las curvas características de la bomba utilizando las leyes de semejanza.

La simulación hidráulica de la red de distribución, figura 3 (a), permite establecer la presión en cada uno de los nudos o hidrantes a partir de la presión y caudal en cabecera. En la figura 3 (b) se puede ver la curva de la bomba y la curva de la instalación calculadas en tiempo real junto a su punto óptimo de funcionamiento. El modelo hidráulico de la red y de las subunidades de riego permite identificar las subunidades que podían ser regadas adecuadamente desde el embalse, situado en la parte más alta de la finca, así como establecer el valor de presión adicional que sería necesario tener en el origen de la red para obtener un mínimo valor de uniformidad de emisión en cada subunidad de riego.

Toda esta información permitió determinar el punto exacto para la instalación de una válvula reductora de presión a 50 mca con el fin de proteger la zona más baja de la finca del exceso de presión generado para el riego de otras subunidades que así lo requieren y evitar superar la presión soportada por la tubería de la red de distribución de 60 mca.

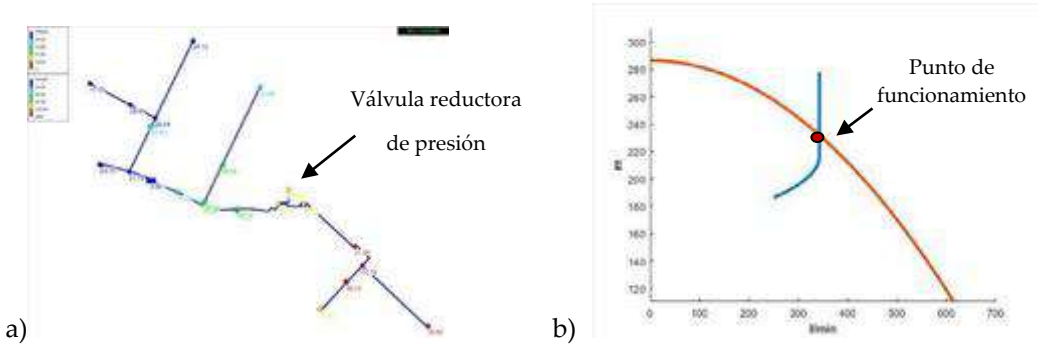


Figura 3. (a) Simulación de la red de distribución con presión en cada uno de los nudos y (b) curva de de bomba y de la instalacion junto a punto de funcionamiento óptimo.

Para la calibración y validación del modelo hidráulico se han tomado medidas de presión en puntos estratégicos de la red y de las subunidades de riego, realizando los ajustes con los valores de rugosidad para obtener una pérdida de carga equivalente a la real, lo que permite tener en cuenta de forma indirecta las singularidades del conjunto de la instalación. Además, en la caseta del pozo se encuentra instalado un transductor de presión y un caudalímetro con el fin de obtener las presiones y caudales de salida de la bomba que, junto a los datos horarios de nivel dinámico obtenidos mediante un sistema compuesto por un compresor y una electroválvula accionada por un dataloger, permite caracterizar de forma precisa la evolución del nivel dinámico y el caudal bombeado a lo largo del tiempo.

2.2. Modelo Fotovoltaico

2.2.1. Conversión de la irradiancia solar sobre superficie inclinada.

La irradiancia solar sobre superficie inclinada (GTI) se obtiene mediante la irradiancia solar sobre superficie horizontal (GHI) medida con un piranómetro (expresada en W·m-2) instalado en la cubierta de la caseta teniendo en cuenta que, la inclinación de los paneles fotovoltaicos es de 8,5º, medidos con un GPS-RTK, y orientación 0º Sur. Para ello se ha utilizado un modelo de conversión de irradiancias desarrollado por Perez et.al [6] que permite obtener la irradiancia directa sobre plano horizontal (DHI). La irradiancia difusa sobre plano horizontal (DHI) es posible obtenerla mediante la siguiente expresión, ya que los otros valores son conocidos.

$$GHI = DHI + DNI \cdot \cos(\theta z) \qquad (2)$$

Finalizado el cálculo de las componentes de irradiancia horizontales podemos calcular las componentes de irradiancia inclinadas. El proceso de conversión de irradiancia directa sobre superficie inclinada se basa en un planteamiento geométrico, el cual depende de los ángulos de inclinación y orientación de la superficie y las coordenadas solares.

Para la conversión de irradiancia difusa sobre superficie inclinada se ha utilizado el modelo propuesto por Pérez et al [7] siendo uno de los modelos más utilizados para la estimación como descripción más detallada del comportamiento anisotrópico de la irradiancia difusa.

Otra componente que hay que tener en cuenta en el cálculo total de la irradiancia es la irradiancia reflejada sobre superficie inclinada, produciéndose el fenómeno de reflexión con el suelo e incidiendo en la superficie inclinada.

La suma de todas las componentes de irradiancia sobre superficie horizontal proporciona el valor de irradiancia total sobre superficie inclinada.

2.2.2. Cálculo de la potencia máxima del generador según el nivel de irradiación.

Los fabricantes de paneles fotovoltaicos normalmente proporcionan los parámetros eléctricos que operan en una misma condición. Por tanto, para describir el comportamiento de forma precisa del generador fotovoltaico según la variabilidad de las condiciones ambientales [8] se ha utilizado la siguiente expresión.

$$I = I_L - I_O\left[e^{\frac{V+IR_S}{a}} - 1\right] - \frac{V+IR_S}{R_{sh}} \qquad (3)$$

Para la determinación de la curva de Intensidad –Tensión (I-V) se han utilizado los valores proporcionados por el fabricante, que indican las características de los paneles fotovoltaicos. Además, se ha tenido en cuenta la velocidad del viento para el cálculo de la temperatura de trabajo de la célula, siendo este último un parámetro muy importante para el rendimiento global de la instalación.

Otro aspecto importante tenido en cuenta es la degradación de los módulos fotovoltaicos que ha sido calculada en función del año de vida útil que estos presentan en el momento del estudio aplicándose para la obtención de la producción energética final de la instalación fotovoltaica.

Normalmente, las instalaciones fotovoltaicas se encuentran sobredimensionadas por diversas razones. Es por ello, que la herramienta incorpora un algoritmo de control de la potencia generada mediante la selección del punto de funcionamiento en condiciones de máxima potencia.

2.2.3. Cálculo de la potencia del Variador.

Para el cálculo de la eficiencia del variador se ha utilizado una expresión polinomial generada con datos proporcionados por un analizador de corriente continua Chauvin Arnoux modelo PEL 103 instalado a la entrada del variador y por un analizador de redes AR5 (CIRCUTOR) instalado a la salida del variador permitiendo caracterizar de forma muy precisa el modelo fotovoltaico generado.

2.2.4. Cálculo de las pérdidas de potencia que se producen en el cableado.

Para el cálculo de las pérdidas de potencia en el cableado se distinguen dos tramos según sea en corriente continua (Módulos fotovoltaicos - Variador) o en corriente alterna trifásica (Variador – Bomba). Su cálculo general se basa en el criterio de la resistencia del conductor empleando además la intensidad máxima circulante por el conductor y el número de conductores.

2.2.5. Cálculo de la potencia de entrada de la bomba.

Con todas las fases calculadas obtenemos finalmente la potencia disponible a la entrada de la bomba.

Del mismo modo que con el modelo hidráulico, el modelo fotovoltaico se ha implementado en software propio desarrollado en Matlab® integrándose ambos modelos y generando una herramienta que permita analizar y optimizar todo el proceso de bombeo solar.

3. Resultados y discusión

A modo de ejemplo, se presentan los resultados obtenidos con la herramienta generada para la combinación de dos subunidades diferentes, ya que las características de la bomba permiten el riego directo desde la bomba de dos subunidades simultáneamente.

La herramienta establece limitaciones de presión tanto en las tuberías de distribución (60 mca), como en los goteros de las subunidades (35 mca) con el fin de no superar la presión de trabajo en estos elementos. Además, con el fin de obtener riegos eficientes y de calidad se ha establecido un tiempo mínimo de riego, en este caso de una hora, de modo que la herramienta selecciona solamente aquellas combinaciones que cumplen este requisito.

Si alguna de las combinaciones no cumple las condiciones anteriormente mencionadas, automáticamente es descartada para el riego.

El número de combinaciones realizadas con dos subunidades diferentes es de 190 generándose una matriz de resultados con respecto al periodo en tiempo real de riego escogido.

Con el fin de tener una mejor comprensión de la herramienta generada se establecen dos vías de análisis de resultados. En la primera de ellas, la herramienta permite analizar cualquier periodo de tiempo (anual, mensual, diario, etc.), sin embargo, a modo de ejemplo se ha seleccionado un instante dado correspondiente al día 03-05-2017 a las doce del mediodía alcanzando una potencia máxima del generador fotovoltaico de 27,98 kW, tal y como se puede ver en la figura 4.

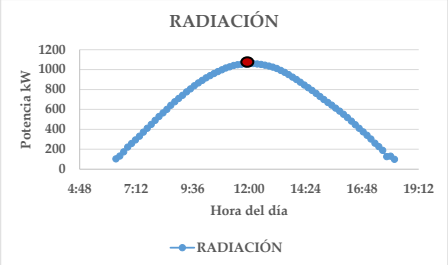


Figura 4. Curva de radiacion Solar para el dia 03-05-2017.

Tabla 1. Tabla de posibles combinaciones de subunidades para el dia 03-05-2017 a las 12 del mediodia.

	Combinaciones de Subunidades																			
	Sub 1	Sub 2	Sub 3	Sub 4	Sub 5	Sub 6	Sub 7	Sub 8	Sub 9	Sub 10	Sub 11	Sub 12	Sub 13	Sub 14	Sub 15	Sub 16	Sub 17	Sub 18	Sub 19	Sub 20
Sub 1																				
Sub 2																				
Sub 3																				
Sub 4																				
Sub 5																				
Sub 6		Si																		
Sub 7																				
Sub 8																				
Sub 9																				
Sub 10	Si	Si	Si		Si	Si			Si											
Sub 11	Si	Si	Si	Si	Si	Si		Si	Si	Si										
Sub 12										Si										
Sub 13	Si	Si	Si	Si	Si	Si		Si	Si	Si	Si	Si								
Sub 14	Si	Si	Si	Si	Si	Si		Si	Si	Si	Si	Si	Si							
Sub 15		Si								Si	Si		Si	Si						
Sub 16										Si	Si		Si	Si						
Sub 17	Si	Si	Si		Si	Si			Si	Si	Si		Si	Si	Si	Si				
Sub 18		Si	Si	Si	Si			Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si		Si			
Sub 19	Si	Si	Si		Si	Si			Si	Si	Si		Si	Si	Si		Si	Si		
Sub 20	Si	Si	Si	Si	Si	Si		Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	

Como se puede ver en la tabla 1, se ha generado una matriz para ese instante concreto del día 03-05-2017 en donde aparecen todas las subunidades que podrían ser regadas con los requisitos establecidos anteriormente. Existen subunidades que no pueden ser regadas utilizando dos combinaciones. Estas subunidades corresponden con los primeros lugares de la tabla (Sub 1, Sub 2, etc.), ya que o bien se encuentran situados en posiciones geográficas más elevadas o debido a su gran tamaño son demandantes de mucha potencia. Por tanto, la herramienta nos está indicando que ciertas subunidades tendrán que ser regadas de forma individual.

La segunda de las vías de análisis corresponde a la selección de una combinación en concreto, siendo en este caso, a modo de ejemplo, la combinación formada por las subunidades 2 y 11. En la figura 5 se puede ver la posición que ocupan las subunidades 02-11 en el plano de la finca.

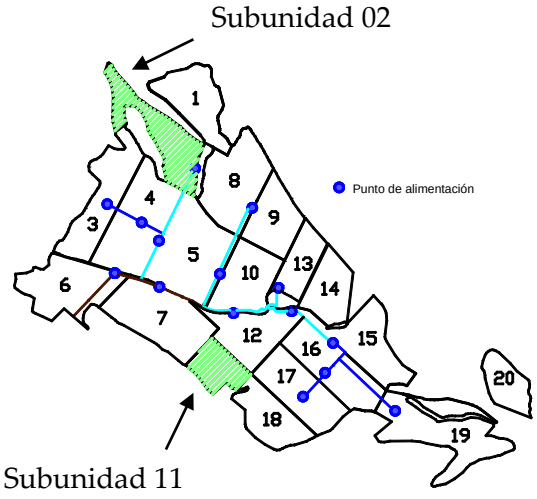


Figura 5. Posición de las subunidades de riego.

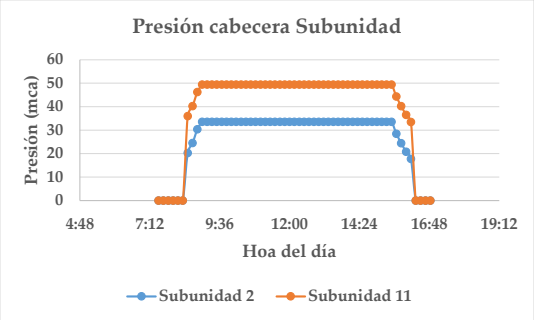


Figura 6. Simulacion de presion en hidrante para las subunidades 02 y 11.

En la figura 6 se comprueba como la presión en el hidrante de la subunidad 11 es mayor que la presión en el hidrante de la subunidad 02. Esto es debido a que la subunidad 11 está situada a menor cota, compensando buena parte de las pérdidas de carga por las tuberías. Se observa que, en los primeros y últimos momentos de la mañana y de la tarde respectivamente, la presión en las subunidades es 0 debido a que no existe suficiente potencia para que puedan ponerse en funcionamiento. Sin embargo, a medida que la potencia disponible aumenta. la presión alcanza un máximo, y se mantiene durante gran parte del día, al ser la potencia generada igual o superior a la que necesita la bomba.

De esta manera la herramienta calcula los intervalos de potencias útiles para el funcionamiento de cada combinación de subunidades, permitiendo clasificar aquellos instantes y combinaciones con potencias en exceso que podrían utilizarse para otras combinaciones más restrictivas.

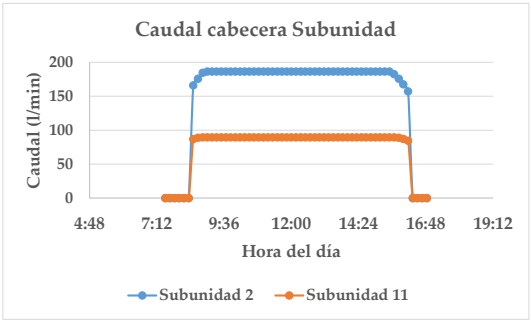


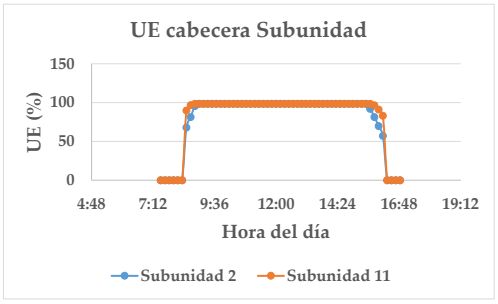
Figura 7. Simulacion de caudal en hidrante para las subunidades 02 y 11.

En la figura 7 se muestran los caudales a la entrada de las subunidades 11 y 02, siendo esta segunda de mayor tamaño y estando situada a mayor cota, lo que genera mayor demanda de caudales. No obstante, se alcanza el máximo caudal con irradiancias muy altas y en consecuencia a potencias muy elevadas.

Además, a partir de los datos medidos en el sondeo, se han calculado los caudales extraídos con el fin de no comprometer el aforo máximo del sondeo y comprobar que no sea superado por la combinación de subunidades seleccionada, estableciendo contadores que cuantifiquen el volumen aplicado.

En este caso, la suma de caudales máximos de las subunidades se encuentra dentro de los límites establecidos, siendo adecuada la combinación de las dos subunidades.

a)



b)

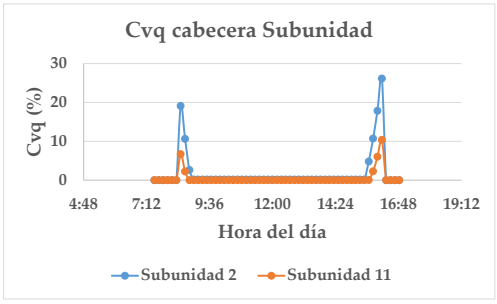


Figura 8. (a) Simulacion de UE (%) y (b) Cvq (%) en hidrante para las subunidades 02 y 11.

En la figura 8 a) se puede ver como la UE (Uniformidad de emisión %) para ambas subunidades es máxima conforme la irradiación máxima al ser goteros autocompensantes que trabajan en el rango de compensación, y la potencia disponible es máxima. Se observa que la UE (Uniformidad de Emisión %) en la subunidad 02 tiene valores más bajos en los extremos que la subunidad 11 debido a la mayor demanda de caudales que hace que la potencia generada sea inferior a la necesaria para mantener el caudal máximo de compensación en todos los goteros de la subunidad al inicio y final del riego. Esto se refleja también en la figura 8 b, en donde el Cvq (Coeficiente de variación de caudales %) es mayor en la subunidad 02, y a la posición geográfica que ocupa. No obstante, existe una relación muy clara entre estos dos valores, con lo que la herramienta permite establecer un nivel mínimo de uniformidad de emisión, 85 %, para que puedan realizarse riegos de calidad.

Además, la herramienta permite conocer las horas de riego totales para cualquier combinación, pudiendo hacer un reparto más equitativo de los recursos disponibles teniendo en cuenta las necesidades y requisitos de cada combinación de subunidades. Esta información permitirá, en el caso de que sea necesario, realizar una priorización en el riego de unas subunidades frente a otras.

En este ejemplo se comprueba que para poder realizar el riego de ambas subunidades simultáneamente es necesario hacerlo con valores de irradiación muy elevados correspondiéndose con las horas centrales del día.

4. Conclusiones

Se ha generado una herramienta muy robusta capaz de analizar, gestionar y optimizar, de forma integral, las instalaciones de bombeo solar, en cualquier ubicación y características, partiendo de un modelo fotovoltaico que permite cuantificar las potencias a la entrada de la bomba con precisión, teniendo en cuenta las grandes variaciones climáticas que afectan a su rendimiento, y acoplarse a las demandas de un modelo hidráulico para alcanzar los requisitos de caudal, presión, uniformidad de emisión y coeficiente de variación de caudales, entre otros, que se requieren en cada subunidad, lo que permite cuantificar la calidad del riego. De forma automática, la herramienta realiza la selección de las mejores subunidades bajo unos requisitos de calidad y eficiencia en el riego que, por otra parte, contribuirán a reducir el problema adicional de la tendencia a usar más agua de la necesaria para el cultivo al ser prácticamente nulo el coste de la energía fotovoltaica.

Por tanto, esta herramienta ayudará al adecuado diseño y manejo de este tipo de instalaciones, evitando la existencia de serios problemas en el control de agua aplicada y la uniformidad de aplicación debido a programaciones de riego inadecuadas.

Referencias

1. Daccache, A., Lamaddalena, N,. and Fratino, U. (2010b), 'On-demand pressurized water distribution system impacts onsprinkler network design and performance', Irrigation Science,Vol 28, No 4, pp 331–339
2. Carrión, F., Tarjuelo, J.M., Hernández, D., & Moreno, M.A. (2013). Design of microirrigation subunit of minimum cost with proper operation. Irrig. Sci. DOI 10.1007/s00271-013-0399-8
3. Carrión, F., Montero, J., Tarjuelo, J.M., & Moreno, M.A. (2014). Design of sprinkler irrigation subunit of minimum cost with proper operation. Application at corn crop in Spain. Water Resources Management DOI: 10.1007/s11269-014-0793-x.
4. Rossman, L.A. (2000). EPANET 2, users' manual, Water supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, U.S. Enviromental Protection Agency, Cincinnati.
5. Karmeli, D., Keller, J. (1975). Trickle irrigation design. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corp. Glendora, 133p.
6. Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R., 1990. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. Solar Energy 44 (5), 271–289.
7. Perez, R., P. Ineichen, E. Maxwell, R. Seals and A. Zelenka, (1992). "Dynamic Global-to Direct Irradiance Conversion Models". ASHRAE Transactions-Research Series, pp. 354-369.
8. W. De Soto et al., "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", Solar Energy, vol 80, pp. 78-88, 2006.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Mejoras en los sistemas de aprovechamiento de la energía térmica de los efluentes residuales

J.M. Magide[1], H. Varela[2]

[1] Área de Máquinas y Motores Térmicos, Departamento de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Santiago de Compostela. C/ Benigno Ledo, s/n. 27002 Lugo (España); josemanuel.magide@usc.es
[2] Investigador colaborador externo del Grupo de Investigación Biomodem de la Universidad de Santiago de Compostela; hiram.varela@udc.es

Resumen: Vivimos una época en la que la sostenibilidad energética, la protección del medio ambiente y las energías limpias son el centro de atención de todo debate sobre ingeniería e industria. Una consecuencia son los innumerables esfuerzos que se destinan al aprovechamiento de las fuentes de energía residual generadas en los procesos industriales. Un ejemplo de los mismos son los efluentes residuales, un producto con frecuencia contaminante y cuya temperatura a veces es elevada. En este artículo se realiza una revisión de las principales técnicas actuales para aprovechar su energía, y se propone una nueva tecnología que mejora sustancialmente dicho aprovechamiento. Esta tecnología ha sido objeto de patente por la Universidad de Santiago, y está encaminada a mejorar la eficiencia energética de los procesos de precalentamiento de fluidos industriales; esto lo logramos aprovechando el calor de los efluentes residuales para conseguir la deshidratación de algún producto alimentario. Como es sabido, muchos alimentos incrementan su valor de mercado una vez deshidratados; el caso de más interés en esta investigación es el secado de sangre de mataderos para su conversión en la llamada harina de sangre, que es un producto de alto valor añadido. Se comprueba que la tecnología aquí divulgada supera el rendimiento económico de las principales alternativas del estado del arte.

Palabras clave: energía residual, valorización, secado, vacío, evaporación de múltiple efecto

1. Introducción

1.1. Definiciones

En el presente documento se empleará la nomenclatura definida a continuación:

Efluente residual: un fluido de desecho del cual queremos aprovechar su energía térmica. Se emplearán como sinónimos los términos efluente, foco caliente, fluido caliente o fluido calefactor.

Fluido de proceso: un fluido que sea consumido por una industria para formar parte de un procedimiento industrial, caracterizado por entrar a una temperatura inferior a la del efluente residual. Se usarán como sinónimos, fluido a precalentar, fluido frío o foco frío.

Tercer fluido: un fluido que sea revalorizable mediante la eliminación de humedad. Como sinónimo se emplearán los términos producto, fluido a secar o concentrar.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3463

1.2. Principales métodos de aprovechamiento energético

En lo sucesivo se hará referencia a las tres principales formas de aprovechar la energía térmica de los efluentes residuales: acondicionamiento térmico, producción de energía eléctrica y precalentamiento de fluidos de proceso. Esta investigación ha desarrollado una tecnología patentada que se deriva de la tercera forma.

Cuando los efluentes a aprovechar poseen temperaturas elevadas, entendiendo por tales las superiores a 80ºC, su valorización resulta muy sencilla y poseen gran cantidad de aplicaciones. Los 80ºC están muy por encima de muchas temperaturas de referencia de procesos industriales. Esto facilita la transferencia de energía térmica entre un foco caliente (el efluente) y un foco frío.

Una aplicación inmediata es el empleo del efluente como fluido calefactor para el acondicionamiento y confort térmico de habitáculos. Además de la inmediata utilidad en instalaciones ocupadas por personas, otro uso muy interesante es la calefacción en granjas de explotación animal. Por ejemplo, en instalaciones destinadas a la crianza de cerdos es necesaria una fuente de energía térmica para la calefacción de las placas metálicas sobre las que duermen los animales. En conversaciones con empresarios del sector, los autores han comprobado la gran potencialidad de esta aplicación.

Otra posibilidad es el aprovechamiento para producir energía eléctrica mediante máquinas de ciclo Rankine orgánico. Estos dispositivos emplean un foco caliente, consistente en fluidos a temperaturas normalmente por encima de 70ºC, y un foco frío, por ejemplo agua de red a 10-15ºC. Utiliza un fluido de trabajo de tipo orgánico, el cual evapora y condensa de forma alternativa, y como resultado se produce el movimiento de un eje mecánico conectado a un generador eléctrico. La eficiencia de estos sistemas alcanza un techo determinado por la eficiencia de un ciclo de Carnot aplicado para los mismos focos frío y caliente. Una consecuencia de ello es que el rendimiento energético es muy bajo. En los equipos comerciales más comunes, solamente entre un 8% y un 10% de la energía térmica aportada por el fluido caliente es transformada en energía eléctrica [2]. Otra desventaja de estos sistemas consiste en la elevada temperatura mínima que ha de alcanzar el fluido caliente. Los fabricantes aconsejan un rango de entre 70 y 150ºC, alcanzándose los mejores rendimientos para las mayores temperaturas. Esta característica descarta el aprovechamiento de la mayor parte de los fluidos residuales industriales, que se producen a temperaturas por debajo de este rango.

Una alternativa muy extendida para el aprovechamiento eficaz de la energía térmica de efluentes residuales es el precalentamiento de fluidos fríos que entran a un proceso. Esta solución, a diferencia de las máquinas de ciclo Rankine, permite aprovechar temperaturas por debajo de 70ºC [4]. El precalentamiento con efluentes es muy rentable porque suele ser un proceso que consume mucha energía, y en este caso la aportan los efluentes de forma gratuita. Incluso para pequeños aumentos de temperatura, la opción de precalentar suele ser más rentable que las máquinas de ciclo Rankine. Es común que los fluidos de proceso entren a temperatura ambiente o ligeramente inferior, en el rango 10-25ºC. Si suponemos una entrada a 15ºC, podemos obtener un ahorro energético importante con la simple elevación de su temperatura hasta 25ºC. Esta elevación se puede conseguir con un intercambio térmico con efluentes residuales a tan sólo 30ºC, lo que contrasta con los 70ºC necesarios para producir electricidad. No es obligatorio que los apartados sean coincidentes con los propuestos en este modelo.

2. Mejoras introducidas

La presente investigación propone una alternativa o complemento a las técnicas hasta aquí mencionadas, con la finalidad de mejorar la eficiencia en el aprovechamiento de energía residual. La idea general es transferir calor desde efluentes residuales hacia fluidos de proceso

para ser precalentados, pero interponiendo entre ambos focos una o más cámaras a vacío en las cuales hierva un fluido que alguna industria quiera deshidratar, para su revalorización. De esta manera, se genera un beneficio económico por dos vías: precalentamiento de un fluido de proceso y secado de un tercer fluido o materia prima, por ejemplo leche, salmuera, zumos, sangre, etc.

Este artículo es de especial interés en las industrias agroalimentarias, ya que éstas suelen disponer de productos líquidos cuya revalorización consiste en ser deshidratados. La deshidratación puede consistir tanto en la eliminación de la mayor parte de la humedad, en cuyo caso se habla de secado, como en la eliminación de una parte del agua pero no la bastante para impedir la fluidez del producto, en cuyo caso se habla de concentrado. Ambas situaciones se contemplan en la presente invención. Una posibilidad de gran interés económico es el secado de la sangre producida en los mataderos, para formar la llamada harina de sangre. Esta harina contiene un grado de humedad de en torno al 8-12% en base seca, y su valor en el mercado es muy elevado, oscilando en la actualidad entre 500 y 1.300 €/t. Sus aplicaciones industriales son muy variadas, destacando su uso como ingrediente en la formulación de piensos para perros y gatos, pero también se emplea para elaborar filtros antigás, emulsiones asfálticas, panadería, cosméticos, vacunas y la industria química y farmacéutica en general.

La tecnología que aquí se explica es objeto de las patentes P201730019 y P201630675, tituladas "Dispositivo y procedimiento para la obtención de un producto desecado a partir de sangre o derivados" y "Sistema de desecado de sangre líquida". Ambas son propiedad de la Universidad de Santiago de Compostela, y el lector que desee conocerlas en mayor detalle puede acceder a ellas desde la base de datos de la OEPM. El proceso técnico se detallará en los apartados sucesivos. Se hará referencia entre paréntesis a diversos elementos de las figuras, y las llamadas capas límite se señalan mediante líneas con trazo discontinuo. Dichas capas están comprendidas entre estas líneas y las superficies metálicas adyacentes. El grosor de las mismas está exagerado por motivos de claridad.

3. El principio de la capa límite y las resistencias térmicas

La tecnología divulgada toma como punto de partida los sistemas de aprovechamiento de energía de efluentes mediante el precalentamiento de fluidos de proceso consumidos por una industria. La novedad principal consiste en intercalar un fluido a deshidratar entre el efluente residual (foco caliente) y el fluido a precalentar (foco frío). Resulta de especial interés poder comparar los fenómenos predominantes en los supuestos con presencia y ausencia del mencionado tercer fluido. Se detallan en los apartados 3.1 y 3.2.

3.1. Calentamiento directo de un fluido de proceso con un efluente residual (figura 1)

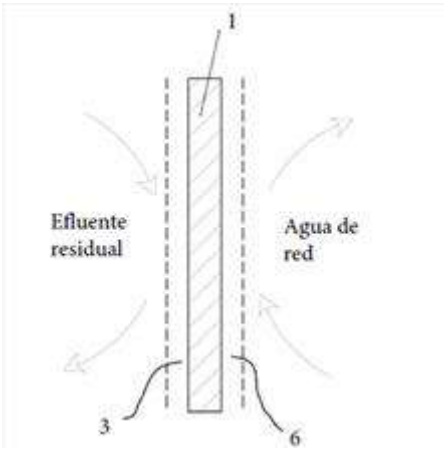


Figura 1. Caso 3.1. Transmisión de calor con presencia de 3 resistencias térmicas.

En este caso el fluido de proceso y el residual se encuentran separados por una superficie metálica (1), a través de la cual el calor pasa del primero al segundo, y no interviene ningún tercer fluido a deshidratar. La superficie metálica (1) se diseña con el menor espesor posible, para minimizar la resistencia al paso de calor y permitir un eficaz intercambio del mismo desde el fluido caliente (efluente residual) hasta el fluido frío (agua de red en la figura). El calor ha de atravesar 3 resistencias térmicas: la capa límite del fluido caliente (3), el espesor de la placa metálica (1), y la capa límite del fluido frío (6). Las capas límite son unas finas películas de fluido que permanecen adheridas sin apenas movimiento a la placa metálica (1), por efecto de la viscosidad. A través de ellas el calor se transmite mucho peor que en el resto del fluido, ya que su transferencia está gobernada por el mecanismo de la conducción térmica. Cuanto mayor sea el grosor de la capa límite, mayor será la resistencia que ésta ejerce al paso del calor. Dicho grosor depende de parámetros como la viscosidad y la velocidad del fluido.

3.2. Calentamiento de un fluido con interposición de un tercer fluido (figura 2)

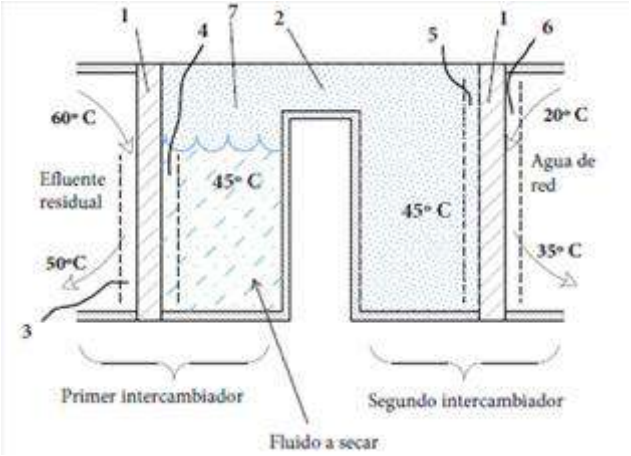


Figura 2. Representación del caso 3.2. Transmisión de calor con 6 resistencias térmicas.

En este caso, como ya se ha comentado, entre el fluido caliente y el frío se interpone un tercer fluido que hierve a vacío, el cual se desea deshidratar. En esta configuración, el número de resistencias térmicas en serie que ha de atravesar el calor es de 6, y no de 3 como en el caso anterior. Más específicamente se encuentran: capa límite del efluente residual (3), espesor de la pared metálica (1) del primer intercambiador, capa límite del tercer fluido (4) en el primer intercambiador, capa de condensados (5) del vapor en el segundo intercambiador, espesor de la pared metálica (1) del segundo intercambiador y capa límite del fluido frío (6) en su paso por él. En el caso 3.2 se encuentran por tanto el doble de resistencias térmicas que en el caso 3.1. Para paliar esta desventaja, en la presente investigación se propone la incorporación de mecanismos agitadores en el interior del primer y segundo intercambiador. Estos agitadores ejercen un efecto de rascado sobre las paredes metálicas (1), de modo que rompen mecánicamente las capas límite del tercer fluido en el primer intercambiador (4) y la capa de condensado en el segundo intercambiador (5). El modelo térmico que gobierna la transferencia de calor en capas límite rotas de forma continuada es el de conducción en estado no estacionario. Este modelo se caracteriza por unos coeficientes de transferencia de calor muy elevados, hasta el punto de hacer su resistencia térmica despreciable.

Por razones de operatividad, los agitadores sólo se contemplan en el seno del tercer fluido, si bien podrían situarse en el seno de los tres fluidos (efluente residual, fluido de proceso y tercer fluido). Con el efecto ya comentado de los agitadores, el número de resistencias térmicas

del caso 3.2 se reduce de 6 a 4, quedando muy próximo al caso 3.1, con 3 resistencias. Así, en ambos casos estarían presentes las resistencias de las capas límite del fluido caliente y frío (3 y 6), y a mayores la resistencia de la pared/paredes metálicas (1). En el caso 3.1 se trata de una única pared, y en el caso 3.2 de dos. Por tanto, en este último caso la resistencia térmica global es superior al caso 3.1, debido a que existe una pared metálica más. Sin embargo, en los procesos de transferencia térmica la resistencia de las capas límite de los fluidos suele ser notablemente mayor que la resistencia de las paredes metálicas, habitualmente de poco grosor y con conductividades térmicas elevadas, y por ende ejerciendo una resistencia térmica pequeña. Como resultado, la transferencia de calor viene principalmente determinada por los dos fluidos y no por las paredes metálicas, cuyas resistencias térmicas podríamos despreciar en primera aproximación. Así, la resistencia térmica total en ambos casos 3.1 y 3.2 será parecida.

En definitiva, se interpone entre el fluido caliente y el frío un tercer fluido, que queremos revalorizar mediante deshidratación. Al existir elementos agitadores, la resistencia al paso de calor que ejerce este tercer fluido es despreciable. En otras palabras, apenas empeoramos las ventajas del caso 3.1 y añadimos a mayores el beneficio de estar deshidratando un fluido interpuesto. Como ya se ha comentado, un caso muy rentable es aquel en el que dicho tercer fluido es la sangre producida en un matadero se deshidrata hasta un 8-12% de humedad y la harina así resultante toma un valor muy alto, de en torno a 500-1300 €/t, en función de la demanda y la temperatura del proceso.

4. Un caso práctico

Es frecuente encontrar efluentes residuales con una temperatura baja, como por ejemplo 60ºC. Se puede considerar aguas sucias de limpieza, efluentes de una depuradora, etc. Se describe a continuación el funcionamiento de un equipo de dos intercambiadores de acuerdo con el caso 3.2 anterior. Se indican entre paréntesis referencias a elementos de la figura 2.

Un efluente residual a 60ºC se bombea a través de un primer intercambiador de calor que posee dos cámaras estancas. La primera es aquella recorrida por el propio efluente. La segunda cámara, llamada cámara de ebullición (7), se encuentra a vacío y en ella se halla el tercer fluido, para ser secado o concentrado. El nivel de vacío es tal que permita la ebullición de este fluido por debajo de la temperatura del efluente residual. La ebullición genera vapor de agua que es conducido a través de una conducción (2) hasta un segundo intercambiador de calor, el cual posee igualmente dos cámaras estancas. En la primera de ellas circula el mencionado vapor de agua, que condensa sobre la pared (1), y en la segunda circula un fluido frío, típicamente el agua de red que consume la industria. Esta agua suele estar en el rango entre 10 y 20ºC, y una proporción importante de la misma habitualmente debe ser calentada. Tal es el caso del agua que alimenta a una caldera de vapor o el agua de red que se emplea como agua de limpieza, la cual debe utilizarse a temperaturas superiores a 60ºC por cuestiones de higiene y para garantizar la muerte de ciertas especies microbianas patógenas.

Existe una presión absoluta de 0,1 bar en la cámara de ebullición (7), lo cual implica una temperatura de ebullición del producto a secar/concentrar de en torno a 45ºC [1]. Con estos saltos de temperatura la transferencia de calor desde el efluente residual hasta el agua de red transcurre sin problemas. En una situación típica, el efluente entra en el primer intercambiador de calor a 60ºC y lo abandona a 50ºC. El calor que pierde lo absorbe el producto de la cámara de ebullición (7), que hierve a 45ºC. Éste produce un vapor de agua a la misma temperatura, el cual llega por una conducción (2) hasta el segundo intercambiador y allí condensa sobre la correspondiente pared metálica (1). En este proceso cede su calor de condensación a una temperatura constante de 45ºC. Este calor lo absorbe el agua de red, que en un caso habitual entra al intercambiador con 20ºC y lo abandona con 35ºC.

El vacío presente en la cámara de ebullición (7) se mantiene por el efecto de la condensación del vapor en el segundo intercambiador, y con la ayuda de una bomba de vacío.

En un caso ideal, en el cual la evaporación del producto no produjese gases incondensables (CO2, aire, etc.), no sería necesaria la bomba de vacío, pues el propio efecto de condensar, hacer líquido, el gas presente en una cámara hermética produce una pérdida de presión de dicho gas, en tanto que deja de serlo para convertirse en un líquido. Sin embargo, en los casos reales en la industria todas las sustancias en ebullición desprenden algún gas no condensable a las temperaturas de trabajo. Por tanto, no es suficiente el condensador, haciendo falta la cooperación de una bomba de vacío que succione al exterior los gases no condensables [3]. Una desventaja de tener que emplear una bomba de vacío consiste en que además de los gases incondensables succiona también parte del vapor de agua producido con la ebullición del producto, ya que ambos gases se encuentran mezclados. Succionar el vapor de agua implica que éste no condensará en el segundo intercambiador y por tanto se pierde su energía de condensación [1]. Estas pérdidas energéticas variarán en función de la proporción de vapor de agua que succione la bomba de vacío. Una forma de minimizarlas consiste en conocer la zona de la cámara de ebullición (7) en la que se acumula una mayor proporción de incondensables, para situar en ella el punto de succión de la bomba de vacío. De esta forma se trata de disminuir la proporción de vapor de agua de la mezcla succionada. De manera estándar, suponiendo una ubicación óptima del punto de succión, se puede suponer que las pérdidas energéticas rondarán el 10% [4].

En la figura 3 se muestra una perspectiva 3D del tipo de intercambiador de calor divulgado en la patente P201630675. Se trata de un intercambiador del tipo de placas verticales, que se corresponden con las superficies metálicas (1) de intercambio térmico descritas hasta aquí. Se hallan en el interior de una carcasa (10). El intercambiador se representa seccionado para permitir visualizar su interior. Destacan especialmente los agitadores (11), que ejercen un rascado sobre las placas verticales (1), de modo que rompen mecánicamente las capas límite según lo explicado. Los agitadores se fijan sobre un eje (9) rotatorio, accionado por un motor (8) externo al intercambiador.

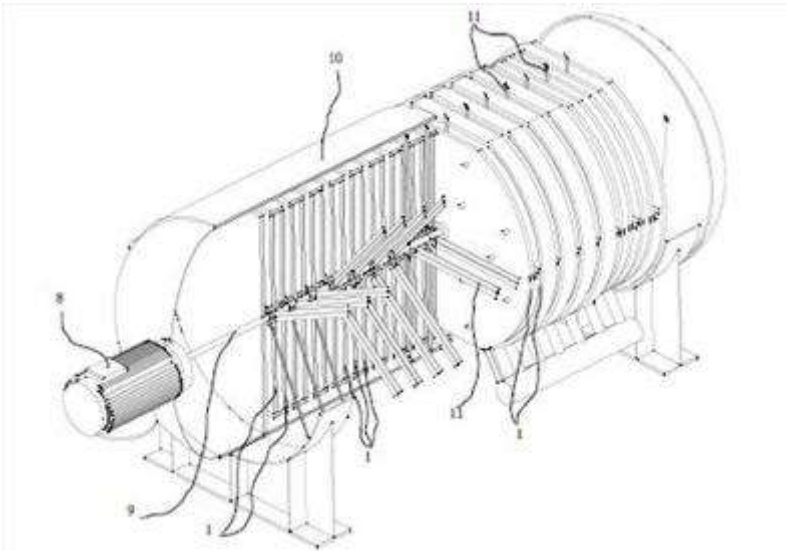


Figura 3. Intercambiador de calor con presencia de agitadores.

5. Adaptaciones técnicas

Cabe destacar el caso particular en el que la temperatura del fluido caliente está por debajo de cierto umbral que dificulta la aplicación de la tecnología aquí divulgada. Un ejemplo serían los efluentes residuales con temperaturas en el rango entre 40 y 50ºC. Fluidos a estas temperaturas se producen en grandes cantidades en muchas industrias [1]. Un caso típico son

nuevamente los mataderos o industrias alimentarias en general, donde el agua de limpieza consumida se ha de aplicar a temperaturas normalmente superiores a 60ºC, pero una vez utilizada se ha enfriado a temperaturas en ese rango mencionado. Para estos casos de temperaturas demasiado bajas, sigue siendo posible el aprovechamiento energético de los fluidos mediante la tecnología de la bomba de calor. En ella, un fluido refrigerante es bombeado a través de un circuito cerrado, en el cual sufre sucesivas compresiones y expansiones, con el objetivo de poder absorber la energía térmica de un fluido a baja temperatura y entregarla en otra ubicación a una temperatura superior a la de este fluido [3].

Otra variante del sistema divulgado consiste en dividir la cámara de evaporación en una pluralidad de cámaras conectadas en serie, conformando así lo que se conoce como un evaporador de múltiple efecto. En estos equipos se consigue un ahorro energético sustancial; la energía necesaria para evaporar 1Kg de agua se reduce de manera proporcional al número de evaporadores situados en serie. Así, por ejemplo, con un sistema de dos evaporadores de múltiple efecto, y despreciando las pérdidas energéticas, el coste energético de la evaporación se reduciría a en torno a la mitad, y para tres evaporadores en torno a la tercera parte [2]. Para permitir el intercambio térmico entre cada evaporador y el siguiente, sus temperaturas de ebullición respectivas serán diferentes, lo cual se consigue manteniendo niveles de vacío decrecientes. En un ejemplo típico de tres evaporadores, las temperaturas de ebullición de cada uno de ellos podrían ser de 55, 45 y 35ºC respectivamente [3]. Estas diferencias de temperatura se corresponderían con diferentes presiones; como es sabido, una menor temperatura de ebullición se corresponde con una menor presión. Para el lector que desee profundizar más en la teoría de los evaporadores de múltiple efecto se le recomienda la obra de Warren McCabe, Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.

En la figura 4 se muestra un esquema unifilar del equipo de la patente P201630675, empleando la simbología común en Ingeniería Química. Se indican el primer y segundo intercambiador; se observa un sistema de tres evaporadores conectados en serie. Cada evaporador posee dos cámaras: una interna, de condensación, y una externa, donde hierve el producto a secar o concentrar. Se identifican por colores los distintos circuitos. El circuito del producto a secar, en este caso sangre de mataderos, está en color rojo; el vapor de agua que se desprende de la ebullición de la sangre, en azul oscuro; y el foco frío, en este caso agua de red a precalentar, azul claro. El efluente residual se representa en color marrón y la bomba de calor en verde; ésta es necesaria porque el efluente llega a una temperatura tan baja como 45ºC. La bomba recircula el fluido refrigerante R-134a, que evapora a 10ºC en el primer intercambiador, absorbiendo energía del efluente, y después un compresor eleva su presión para lograr que condense a 65ºC en el primer evaporador. En trazo negro se representa el drenaje de condensados y la succión de los gases incondensables.

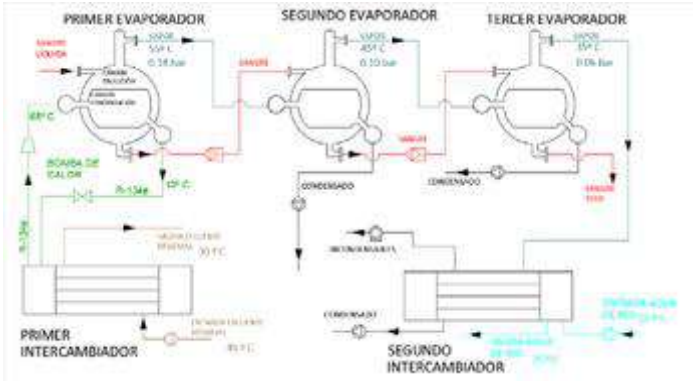


Figura 4. Esquema unifilar de instalación para aprovechamiento de energía de efluentes residuales. Comprende bomba de calor y tres evaporadores.

6. Comparativa de las diversas técnicas

La tabla 1 refleja los rangos de la temperatura del efluente residual que permiten un correcto funcionamiento de las técnicas de aprovechamiento energético explicadas hasta aquí. Los sistemas de producción de energía eléctrica están en clara desventaja, pues efluentes por debajo de 70ºC dejan de ser aprovechables. Su aprovechamiento resulta muy bajo y por eso no se incluye en la tabla. Los sistemas de acondicionamiento y precalentamiento ofrecen una sustancial mejora, alcanzándose las temperaturas más bajas para los sistemas con bombas de calor. La patente P201630675 contempla una bomba de calor con capacidad de emplear un refrigerante que evapora por debajo de 10ºC, con lo cual temperaturas del efluente por encima de 20ºC empiezan a ser útiles.

Tabla 1. Comparación entre las técnicas más importantes para aprovechar energía de efluentes.

Técnica	Rango de temp.(ºC)	Valoriz. (€/t)
Acondicionamiento de habitáculos	80-40	2,95
Precalentamiento de fluidos de proceso	80-40	2,95
Secado con bomba de calor	80-20	9,20
Secado, con bomba y 3 evaporadores	80-20	13,41

En cuanto a la valorización, con el fin de poder comparar todos los procesos, se ha considerado que se dispone de una tonelada de efluente a 80ºC, el cual es enfriado hasta la menor temperatura de cada rango. Para el cálculo se considera una equivalencia con el gasoil C necesario para generar la misma energía. Se toma un precio de 0,7€/l. En los procesos de secado se ha considerado el caso particular de la harina de sangre, a un precio de venta de 500€/t, y unos costes de fabricación de 287€/t con un evaporador y 115€/t en el caso con 3 evaporadores. Se aprecia que los mayores beneficios son generados cuando se interpone entre efluente y fluido de proceso un tercer fluido a secar o concentrar.

7. Conclusiones

Los efluentes residuales de la industria suelen poseer una carga energética importante, la cual puede generar cuantiosos beneficios si es correctamente valorizada. De entre todas las técnicas con presencia en la actualidad, la que parece ofrecer mayor rentabilidad es el precalentamiento de fluidos de proceso. Si además se intercala entre los fluidos caliente y frío un tercer fluido a deshidratar, la rentabilidad puede aumentar a más del triple del valor original.

Referencias

1. Del Arco Vicente L. Termotecnia. Calor industrial. 1985, 85-120.
2. Magide J.M., Méndez M., González X.P. Termotecnia. 2010, 3.1-3.16
3. McCabe W., Smith J., Harriot P. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. 2007, 482-517.
4. Moran M., Shapiro H. Fundamentos de termodinámica técnica. 2012, 315-395.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Modelado de producción, consumo y almacenamiento de recursos heterogéneos de un distrito agroindustrial con energías renovables

J. Ramos-Teodoro[1], F. Rodríguez[1], M. Castilla[1], M. Berenguel[1]

[1] Departamento de Informática, Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, Almería 04120, España
Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario (ceiA3), CIESOL Centro de Investigación en Energía Solar; {jeronimo.rt, frrodrig, mcastilla, beren}@ual.es

Resumen: Este trabajo plantea la aplicación de una metodología de modelado ampliamente utilizada en el ámbito de los «energy hubs» para un distrito agroindustrial ubicado en la provincia de Almería. Debido a que en este se usan recursos renovables de disponibilidad intermitente, se precisan estrategias de gestión eficiente que, mediante técnicas de optimización que emplean modelos simplificados de este tipo, determinen el reparto de recursos entre las diferentes plantas que integran el distrito. Para ello, es necesario implementar un entorno de simulación con el fin de analizar casos concretos, testar nuevos enfoques y desarrollar aplicaciones de ayuda para la toma de decisiones, por lo que se presentan los resultados preliminares del desarrollo de una librería de componentes en Simulink. Asimismo, se ejemplifica el uso del modelo propuesto mediante la resolución de un problema de optimización, en un escenario simplificado, consistente en determinar la cantidad de recursos de entrada y el almacenamiento que se requiere en cada instante de tiempo para minimizar el coste de operación de un invernadero tradicional alimentado por un parking fotovoltaico.

Palabras clave: «energy hubs», concentradores de energía, simulación, gestión óptima de recursos, sistemas multi-energía.

1. Introducción

Un distrito agroindustrial se puede entender como una entidad socio-territorial caracterizada por la presencia de comunidades de personas y empresas que comparten intereses, y constituida por explotaciones agrícolas, industrias de transformación y de suministro de insumos, e instalaciones de apoyo, localizadas un mismo espacio geográfico [1]. El problema que se aborda en este trabajo se centra en el funcionamiento sinérgico de estos distritos, donde se encuentran sistemas con diferentes objetivos contrapuestos y necesidades de recursos heterogéneos, tanto energéticos (electricidad y calor/frío) como de materiales (agua y CO_2). En especial, cuando se trata de fuentes renovables, de naturaleza intermitente, es necesario gestionar de forma eficiente el uso de todos los recursos, así como coordinar el flujo entre ellos.

El impulso de la generación distribuida en el sistema eléctrico con el fin de dotar al mismo de flexibilidad, modularidad y eficiencia ha acabado por extenderse a otros sistemas de producción y abastecimiento como las redes de calor y frío o las redes de dióxido de carbono e hidrógeno [2]. La investigación relacionada con conceptos como el de «energy hubs» (concentradores de energía) [3] o sistemas multi-energía [4] pretenden asentar las bases teóricas para tratar agrupaciones de entidades, localizadas en un mismo espacio geográfico, que cuentan con sistemas con objetivos contrapuestos y diferentes necesidades de recursos heterogéneos,

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3383

tanto energéticos como materiales. Tal es el caso de los distritos agroindustriales, caracterizados por la presencia de comunidades de personas y empresas que comparten intereses, y constituida por explotaciones agrícolas, industrias de transformación y de suministro de insumos, e instalaciones de apoyo [5].

En este sentido, es habitual el empleo de modelos simplificados basados en primeros principios para tratar problemas de dimensionado de instalaciones, diseño de las redes distribución o la gestión eficiente de recursos [6]. Aunque existen diversas formulaciones y casos de ejemplo, como se expone en [7], escasean las aplicaciones en distritos agroindustriales, en las que una gestión coordinada de los elementos involucrados puede tener un impacto importante a nivel económico y medioambiental.

En este trabajo se presenta la metodología de modelado, basada en el paradigma empleado en «energy hubs», y los modelos conceptuales y numéricos obtenidos como resultados derivados del mismo. Todo ello particularizado para un distrito productivo agrícola localizado en la provincia de Almería. Finalmente, también se ejemplifica su utilidad en un escenario de simulación del reparto económico de recursos.

El artículo está estructurado de la siguiente forma: en el segundo apartado se describe el conjunto de plantas empleadas y sus principales componentes (para más información se remite a los lectores a la web del proyecto [8]), así como la metodología de modelado aplicada a la misma, basada en balances de masa y energía; en el tercer apartado se presentan los modelos conceptuales y numéricos obtenidos como resultado, junto con su implementación en el entorno MATLAB/Simulink; finalmente, en el cuarto apartado, se resaltan las principales conclusiones y líneas de trabajo para el futuro.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción del distrito agroindustrial

El distrito agroindustrial que se va a utilizar como ejemplo se enmarca en el proyecto CHROMAE [8] y se compone de los elementos ilustrados en la Figura 1, que a continuación se describen brevemente:

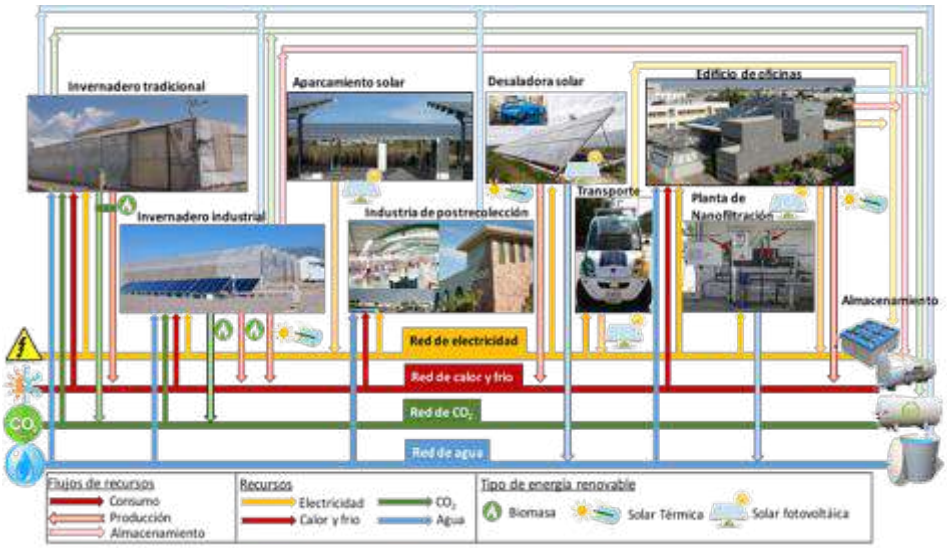


Figura 1. Flujo de recursos entre los diferentes elementos del distrito agroindustrial

- Instalaciones de producción de la Fundación Cajamar. Situadas en la Estación Experimental "Las Palmerillas" en El Ejido (Almería). Se compone de un invernadero tipo parral de 877 m^2

con ventilación automatizada y un sistema de deshumidificación de 18 kW. La calefacción es híbrida, constituida por un aerotermo de propano de 95 kW y una caldera de 174 kW que emplea biomasa y almacena el CO_2 producido en tanques de carbón activo. Dispone de un sistema para el control del aporte de agua y de fertilizantes, así como de su almacenamiento.

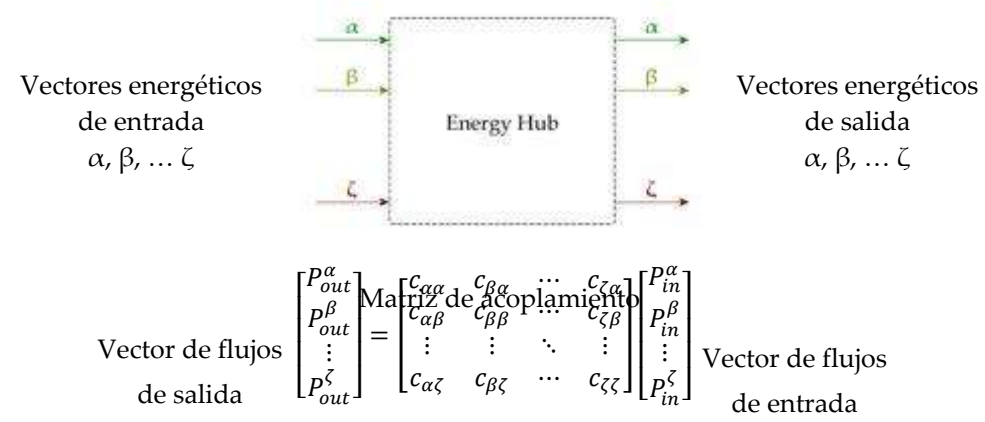
- Instalaciones de producción del Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA). Situadas en el Centro La Mojonera (Almería), dispone de un invernadero semicerrado industrial de 1000 m^2 de altas prestaciones con control de clima dual. La generación térmica está constituida por un campo solar de captadores térmicos planos de gran formato (superficie activa 100 m^2), un tanque de almacenamiento térmico con capacidad para 7000 L, una caldera de biomasa de 225 kW con recuperación y almacenamiento de CO_2 y un acumulador de 2000 L.
- Industria de post-recolección y comercialización Hortofrutícola Mabe S.A.T. Ubicada en el término municipal de El Ejido (Almería), dispone de unas instalaciones para el lavado y calibrado de productos hortícolas procedentes de la producción bajo invernadero.
- Edificio de trabajo CIESOL. Se trata de un edificio bioclimático, ubicado en el campus de la Universidad de Almería. Dispone de un sistema de refrigeración y calefacción solar apoyado por fuentes convencionales (con un campo de 80 captadores planos, una máquina de absorción de 70 kW; una torre de refrigeración de 170 kW; dos tanques de almacenamiento de agua caliente de 5000 L cada uno; un calentador auxiliar de 100 kW; dos intercambiadores de placas de 100 kW; dos tanques de agua fría de 2000 L y 3000 L de capacidad); una instalación fotovoltaica (formada por un total de 42 módulos de 60 células solares de una potencia unitaria de 222 Wp), y dos módulos de baterías de litio-ferrofosfato de 44 Ah y 51,2 V con una capacidad nominal de almacenamiento energético de 4,9 kWh y una potencia de descarga de 5 kW.
- Vehículo eléctrico eCARM. En el campus de la Universidad de Almería se dispone, para tareas de investigación, de un vehículo eléctrico autónomo con un motor DC de 48 V (4,3 kW) y un banco de ocho baterías a 6V (210 Ah) en serie.
- Aparcamiento solar de la Universidad de Almería. Se trata del aparcamiento del campus, en cuyas marquesinas se ha realizado una instalación fotovoltaica distribuida en trece inversores. La potencia pico total de la instalación es de 1176,48 kW y la potencia nominal de 1015 kW.
- Plantas de desalación solar. Las plantas de desalación solar se encuentran ubicadas en la Plataforma Solar de Almería, en el término municipal de Tabernas. Cuenta con el sistema de desalación AQUASOL, que se compone de una unidad de destilación multi-efecto, un campo de captadores de tipo Concentrador Parabólico Compuesto (CPC), unos tanques de almacenamiento y el apoyo de una caldera de gas pirotubular. La producción de destilado es de 3 m^3/h para una alimentación nominal de 8 m^3/h. También se trabajará con la plataforma de ensayos para módulos de destilación por membranas, compuesta por un campo solar de captadores planos (10 colectores de 2 m^2 de superficie cada uno), un tanque de almacenamiento térmico (1,5 m^3) y un sistema de distribución.
- Planta de nanofiltración. Ubicada en la Plataforma Solar de Almería, consiste en un sistema de tres membranas cuyo objetivo será retener compuestos orgánicos, micro-contaminantes y otras sustancias que contenga el agua residual para su posterior uso como agua de riego e industrial. Para su funcionamiento es necesario mantener un caudal en unas condiciones óptimas de presión que proporciona una bomba centrífuga de 4 kW. La producción en esta planta se puede realizar de forma continua con un caudal de agua reutilizable de unos 60 L/h.

2.2. Modelado de concentradores de energía

Un enfoque que se adapta a este sistema es el de los concentradores de energía, «energy hubs» [3], término utilizado para designar sistemas que producen, convierten y almacenan diferentes tipos de energía y recursos, sirviendo como interfaz entre productores, consumidores y la propia infraestructura de transporte. La clave de este enfoque reside en su capacidad para

modelar sistemas de diversa naturaleza y su aplicación a problemas como diseño y dimensionado de sistemas, planificación de recursos o diseño de redes de distribución [6].

En términos generales, los modelos de concentradores de energía se obtienen a partir de balances de masa y energía entre diferentes flujos de recursos de entrada y salida. Estos flujos se representan matemáticamente a través de variables que constituyen los respectivos elementos de los vectores de entrada y salida (Figura 2).



$$\begin{bmatrix} P_{out}^{\alpha} \\ P_{out}^{\beta} \\ \vdots \\ P_{out}^{\zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\alpha\alpha} & c_{\beta\alpha} & \cdots & c_{\zeta\alpha} \\ c_{\alpha\beta} & c_{\beta\beta} & \cdots & c_{\zeta\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{\alpha\zeta} & c_{\beta\zeta} & \cdots & c_{\zeta\zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{in}^{\alpha} \\ P_{in}^{\beta} \\ \vdots \\ P_{in}^{\zeta} \end{bmatrix}$$

Figura 2. Concepción del modelo genérico de un «energy hub». Fuente: [3]

Las primeras formulaciones [6] definieron la llamada matriz de acoplamiento para establecer la relación entre ellas. Generalmente, se requieren términos adicionales cuando aparecen elementos de almacenamiento, por lo que existe una distinción entre la conversión y el modelo de almacenamiento [9]. Cuando se asume que los dispositivos están lo suficientemente cercanos las pérdidas de recursos solo ocurren en los procesos de conversión y almacenamiento. Para formular un modelo lineal, debe evitarse el uso de coeficientes de reparto; así pues, algunos autores sugirieron introducir tantas variables como dispositivos de conversión, reorganizar el vector de entrada y la matriz de acoplamiento en una nueva ecuación que los relaciona con el vector de salida [10]. Al igual que en [9], este trabajo se considerará al sistema en estado estacionario, en tiempo discreto y con pérdidas exclusivamente en los procesos de almacenamiento y conversión. Los vectores de entrada y salida están formados por las variables que representan la cantidad de energía o recursos intercambiados en cada intervalo de tiempo por el «energy hub», y la matriz de acoplamiento (cuyas dimensiones dependen de éstos).

3. Resultados y discusión

3.1. Modelo de conversión y almacenamiento

La mayoría de las publicaciones revisadas emplean una formulación lineal del problema por razones de computación. Así lo han hecho también los autores de este trabajo en trabajos previos, por lo que se basándose en el modelo empleado [11], que se expone a continuación, se realizarán adaptaciones sobre este para considerar la inclusión de las redes de distribución en el desempeño del distrito. Considerando que cada uno de los elementos mencionados en el apartado anterior constituye un concentrador de energía, según la definición de los mismos [3], en la Figura 3 se identifican los ocho elementos que componen el distrito (h1-h8) y las características estructurales de cada uno (entradas, salidas y dispositivos).

En cualquiera de ellos, se ha de cumplir el balance de recursos establecido por las ecuaciones (1)-(3) en cada instante de muestreo, definiendo el tiempo de muestreo como el lapso entre dos instantes consecutivos: $T = t(k+1) - t(k)$. La primera expresa que el flujo representado por cada elemento del vector de entrada $\boldsymbol{I}(k)$ ha de ser la suma de todos los flujos posibles asociados

a una entrada y contenidos en el vector de recorridos $\boldsymbol{P}(k)$, para lo que se define una matriz de coeficientes constantes (ceros y unos) $\boldsymbol{C_i}$.

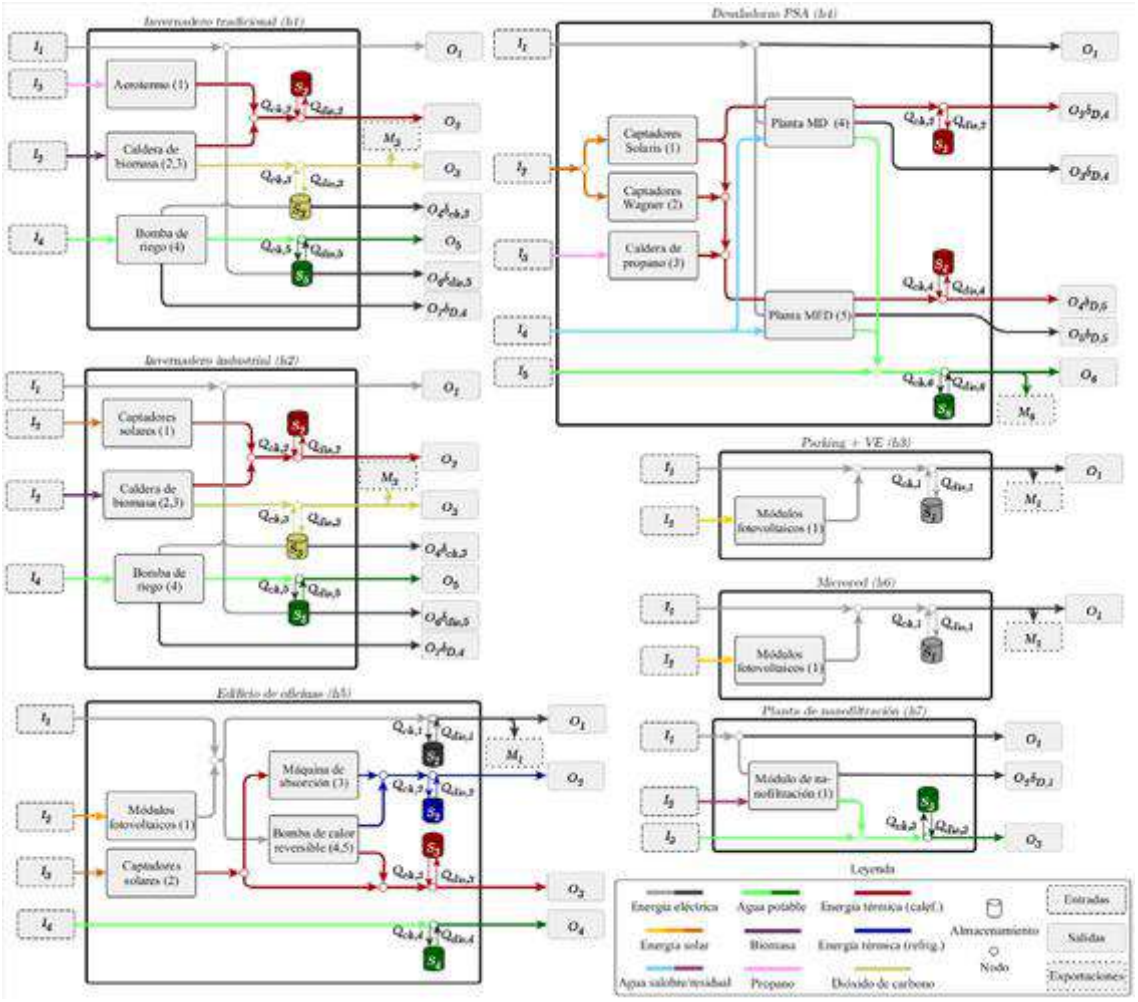


Figura 3. Diagrama de los componentes del distrito basado en el modelo de conversión y almacenamiento empleado

$$\boldsymbol{I}(k) = \boldsymbol{C_i}\boldsymbol{P}(k) \tag{1}$$

La segunda ecuación relaciona, a través de $\boldsymbol{P}(k)$, los flujos de entrada con respecto a los flujos de salida en forma de demanda propia del concentrador de energía $\boldsymbol{O}(k)$ y en forma de exportaciones al exterior $\boldsymbol{M}(k)$, y con respecto a los flujos de carga $\boldsymbol{Q_{ch}}(k)$ y descarga $\boldsymbol{Q_{dis}}(k)$ de los dispositivos de almacenamiento. Nótese la aparición de las matrices de acoplamiento $\boldsymbol{C}(k)$, cuyos elementos representan la eficiencia en la conversión de recursos de los diferentes dispositivos de producción, y la matriz diagonal de activación de salidas $\boldsymbol{\delta_O}(k)$, cuya diagonal se compone de variables binarias para aquellas demandas de recursos que solo se producen en determinadas circunstancias (por ejemplo, la activación de un sistema de bombeo auxiliar) y de unos para el resto de las salidas.

$$\boldsymbol{\delta_O}(k)\boldsymbol{O}(k) + \boldsymbol{M}(k) = \boldsymbol{C}(k)\boldsymbol{P}(k) - \boldsymbol{Q_{ch}}(k) + \boldsymbol{Q_{dis}}(k) \tag{2}$$

La tercera ecuación se emplea para definir los flujos de entrada a cada dispositivo de conversión $\boldsymbol{D}(k)$ por medio de una matriz de acoplamiento $\boldsymbol{C_d}(k)$ cuyos elementos, al igual que los de $\boldsymbol{C}(k)$, dependen del recorrido del flujo y de la eficiencia de cada equipo.

$$\boldsymbol{D}(k) = \boldsymbol{C_d}(k)\boldsymbol{P}(k) \tag{3}$$

Las ecuaciones anteriores se complementan con la ecuación (4) empleada para reflejar la dinámica de los sistemas de almacenamiento, relacionando el estado de carga $\boldsymbol{S}(k)$ de los mismos con los flujos de carga y descarga, teniendo en cuenta la eficiencia en ambos procesos ($\boldsymbol{C_{ch}}(k), \boldsymbol{C_{dis}}(k)$) y la degradación de los recursos almacenados ($\boldsymbol{L}(k)$).

Nótese la aparición del tiempo de muestreo (expresado en minutos) para relacionar las magnitudes correspondientes a los flujos con magnitudes acumuladas.

$$\boldsymbol{S}(k+1) = \boldsymbol{L}(k)\boldsymbol{S}(k) + \boldsymbol{C_{ch}}(k)\boldsymbol{Q_{ch}}(k)T/60 - \boldsymbol{C_{dis}}(k)\boldsymbol{Q_{dis}}(k)T/60 \quad (4)$$

Sobre algunos de los vectores anteriores es necesario añadir restricciones a partir de los límites y estado de operación de cada dispositivo, mediante las ecuaciones (5)-(10). Los primeros dependen de las características de los equipos e instalaciones, mientras que para determinar la activación o desactivación de los mismos se definen matrices diagonales de variables binarias (δ) para los dispositivos de conversión ($\boldsymbol{\delta_D}$), entradas del sistema ($\boldsymbol{\delta_I}$), exportaciones ($\boldsymbol{\delta_M}$), carga ($\boldsymbol{\delta_{ch}}$) y descarga ($\boldsymbol{\delta_{dis}}$).

$$\boldsymbol{\delta_I}(k)\boldsymbol{I^{mín}}(k) \le \boldsymbol{I}(k) \le \boldsymbol{\delta_I}(k)\boldsymbol{I^{máx}}(k) \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\delta_M}(k)\boldsymbol{M^{mín}}(k) \le \boldsymbol{M}(k) \le \boldsymbol{\delta_M}(k)\boldsymbol{M^{máx}}(k) \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\delta_D}(k)\boldsymbol{D^{mín}}(k) \le \boldsymbol{D}(k) \le \boldsymbol{\delta_D}(k)\boldsymbol{D^{máx}}(k) \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\delta_{ch}}(k)\boldsymbol{Q_{ch}^{mín}}(k) \le \boldsymbol{Q_{ch}}(k) \le \boldsymbol{\delta_{ch}}(k)\boldsymbol{Q_{ch}^{máx}}(k) \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\delta_{dis}}(k)\boldsymbol{Q_{dis}^{mín}}(k) \le \boldsymbol{Q_{dis}}(k) \le \boldsymbol{\delta_{dis}}(k)\boldsymbol{Q_{dis}^{máx}}(k) \quad (9)$$

$$\boldsymbol{S^{mín}}(k) \le \boldsymbol{S}(k) \le \boldsymbol{S^{máx}} \quad (10)$$

Finalmente, se han de considerar restricciones para los flujos simultáneos (debidos a dispositivos con más de un producto de salida), imponiendo que la suma de variables correspondientes a flujos (p) de un mismo dispositivo sea igual para cada flujo, mediante la ecuación (11); así como restricciones para procesos no simultáneos, como la carga y descarga de dispositivos de almacenamiento, mediante la ecuación (12); el funcionamiento de dispositivos (d) de conversión incompatibles como una bomba de calor reversible, mediante la ecuación (13); y la importación en forma de entradas (i) y exportación en forma de salidas (o) de recursos utilizando un mismo medio, mediante la ecuación (14). Una explicación más detallada de estas restricciones puede encontrarse en [11].

$$P_{p^{(1)}}(k) + \cdots + P_{p^{(n)}} = P_{p^{(n+1)}}(k) + \cdots + P_{p^{(m)}} \quad (11)$$

$$\delta_{D,d^{(1)}}(k) + \cdots + \delta_{D,d^{(n)}}(k) \le 1 \quad (12)$$

$$\delta_{I,i}(k) + \delta_{M,o}(k) \le 1 \quad (13)$$

$$\delta_{ch,o}(k) + \delta_{dis,o}(k) \le 1 \quad (14)$$

3.2 Modelo de distribución de recursos en sistemas interconectados

El modelo descrito en el apartado anterior, particularizado para un «energy hub», puede emplearse para representar un conjunto de ellos que compartan recursos a través de diferentes redes de distribución, si se realizan algunas modificaciones. En primer lugar, las ecuaciones (1)-(14) ya no solo serían función del instante de muestreo k, sino que habrían de cumplirse para los h sistemas considerados. Además de esto, en las ecuaciones (1)-(2) se introducirían variables adicionales para tener en cuenta los recursos importados $\boldsymbol{N_{h'-h}}(k,h)$ y exportados $\boldsymbol{N_{h-h'}}(k,h)$ dentro de la red, resultando las ecuaciones (15)-(16), respectivamente.

$$\boldsymbol{I}(k,h) + \sum \boldsymbol{N_{h'-h}}(k,h) = \boldsymbol{C_i}\boldsymbol{P}(k,h) \quad \forall\, h,h' : h' \neq h \quad (15)$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\delta_O}(k,h)\boldsymbol{O}(k,h) + \boldsymbol{M}(k,h) + \sum \boldsymbol{N_{h-h'}}(k,h) \\ = \boldsymbol{C}(k,h)\boldsymbol{P}(k,h) - \boldsymbol{Q_{ch}}(k,h) + \boldsymbol{Q_{dis}}(k,h) \quad \forall\, h,h' : h' \neq h\end{aligned} \quad (16)$$

Asimismo, es necesario introducir límites para las nuevas variables junto a variables binarias en forma de matrices diagonales, mediante las ecuaciones (17)-(18), así como impedir que puedan existir flujos bidireccionales, mediante ecuación (19), en la $\mathbf{1}$ es la matriz identidad, y considerar las pérdidas o eficiencia en la transmisión a través de una matriz de acoplamiento ($\boldsymbol{C_N}(k,h,h')$). La Figura 3 contempla las variables mencionadas sobre un diagrama ilustrativo de cada planta tratada.

$$\boldsymbol{\delta_{h'-h}}(k,h)\boldsymbol{N_{h'-h}^{mín}}(k,h) \le \boldsymbol{N_{h'-h}}(k,h) \le \boldsymbol{\delta_{h'-h}}(k,h)\boldsymbol{N_{h'-h}^{máx}}(k,h) \quad \forall\, h,h' : h' \neq h \quad (17)$$

$$\boldsymbol{\delta_{h-h'}}(k,h)\boldsymbol{N_{h-h'}^{mín}}(k,h) \le \boldsymbol{N_{h-h'}}(k,h) \le \boldsymbol{\delta_{h-h'}}(k,h)\boldsymbol{N_{h-h'}^{máx}}(k,h) \quad \forall\, h,h' : h' \neq h \quad (18)$$

$$\boldsymbol{\delta_{h-h'}}(k,h) + \boldsymbol{\delta_{h'-h}}(k,h) \le \mathbf{1} \quad \forall\, h,h' : h' \neq h \quad (19)$$

$$\boldsymbol{N_{h-h'}}(k,h) = \boldsymbol{C_N}(k,h,h')\boldsymbol{N_{h-h'}}(k,h') \quad \forall\, h,h' : h' \neq h \quad (20)$$

3.3 Implementación en MATLAB y Simulink: ejemplo de reparto económico de recursos

Debido a que uno de los objetivos del proyecto CHROMAE es la creación de una librería de componentes de cada uno de los elementos del distrito agroindustrial, en este trabajo se presenta como ejemplo la interfaz utilizada para el aparcamiento fotovoltaico (Figura 4). A la izquierda de la figura 4 se presenta la vista del bloque de Simulink en el editor, mientras que a la derecha aparece desplegado el menú que permite parametrizarlo a partir de sus características físicas (número de paneles conectados en serie y en paralelo, intensidad y voltajes de circuito abierto…). La combinación de diferentes bloques como este permitiría simular el comportamiento de cualquier otro distrito, al igual que añadir nuevos elementos parametrizables.

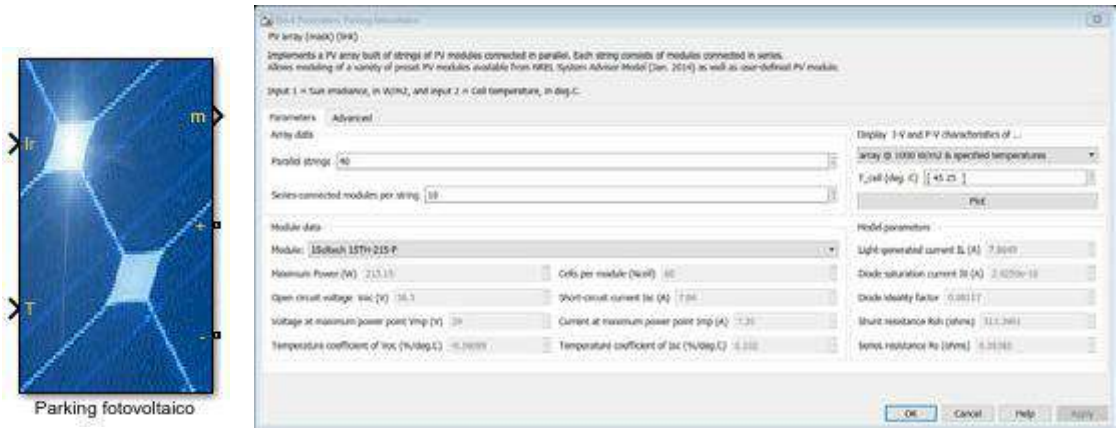


Figura 4. Apariencia de los bloques en Simulink correspondiente al aparcamiento fotovoltaico

Por otro lado, las ecuaciones anteriores pueden constituir las restricciones en un problema de optimización como es el reparto económico de recursos, donde la función objetivo estaría dada por la ecuación (21), siendo $\boldsymbol{c}(k,h)$ el coste de adquisición de cada tipo de recurso en cada sistema y $\boldsymbol{s}(k,h)$ el coste de venta de los recursos producidos. La producción de cada dispositivo, así como el uso de los sistemas de almacenamiento se determinan al resolver el problema y obtener los perfiles de producción que minimizan dicha función.

$$mín \sum_{k=1}^{H} (\boldsymbol{c}(k,h)\boldsymbol{I}(k,h) - \boldsymbol{s}(k,h)\boldsymbol{M}(k,h)) \quad (21)$$
$$s.t.\ \ ec.\ (1)\text{-}(20)$$

En la Figura 5 se han incluido los gráficos resultantes (a-f) al ejecutar el algoritmo que se ha desarrollado en código MATLAB para el problema de reparto. Se han empleado datos históricos del invernadero ubicado en la finca experimental «Las Palmerillas», así como, los parámetros característicos de las instalaciones involucradas. Para simplificar, únicamente se ha considerado la interconexión de dos sistemas sin pérdidas en el intercambio de energía: el parking fotovoltaico junto al invernadero tradicional. Por cuestiones prácticas se ha obviado la salida correspondiente a la activación de la bomba de riego para vaciar el depósito de agua, debido a que para el escenario planteado esta no se activa a lo largo del día.

La Figura 5 (a-f) muestra los resultados obtenidos, donde para cada elemento representado se emplea un color asociado al recurso según la leyenda de la Figura 3. Cada figura, organiza la información de la siguiente forma: en ella se hace referencia a la demanda un recurso de salida en cada instante de tiempo, es decir, representan un elemento del vector $\boldsymbol{O}(k)$, y se representan en línea continua gruesa. Para satisfacer dicha demanda, se requieren una cantidad de recursos de entrada (elementos del vector $\boldsymbol{I}(k)$), determinada al resolver el problema de optimización, y que se representa en forma de barras apiladas para cada instante de muestreo y para cada recurso.

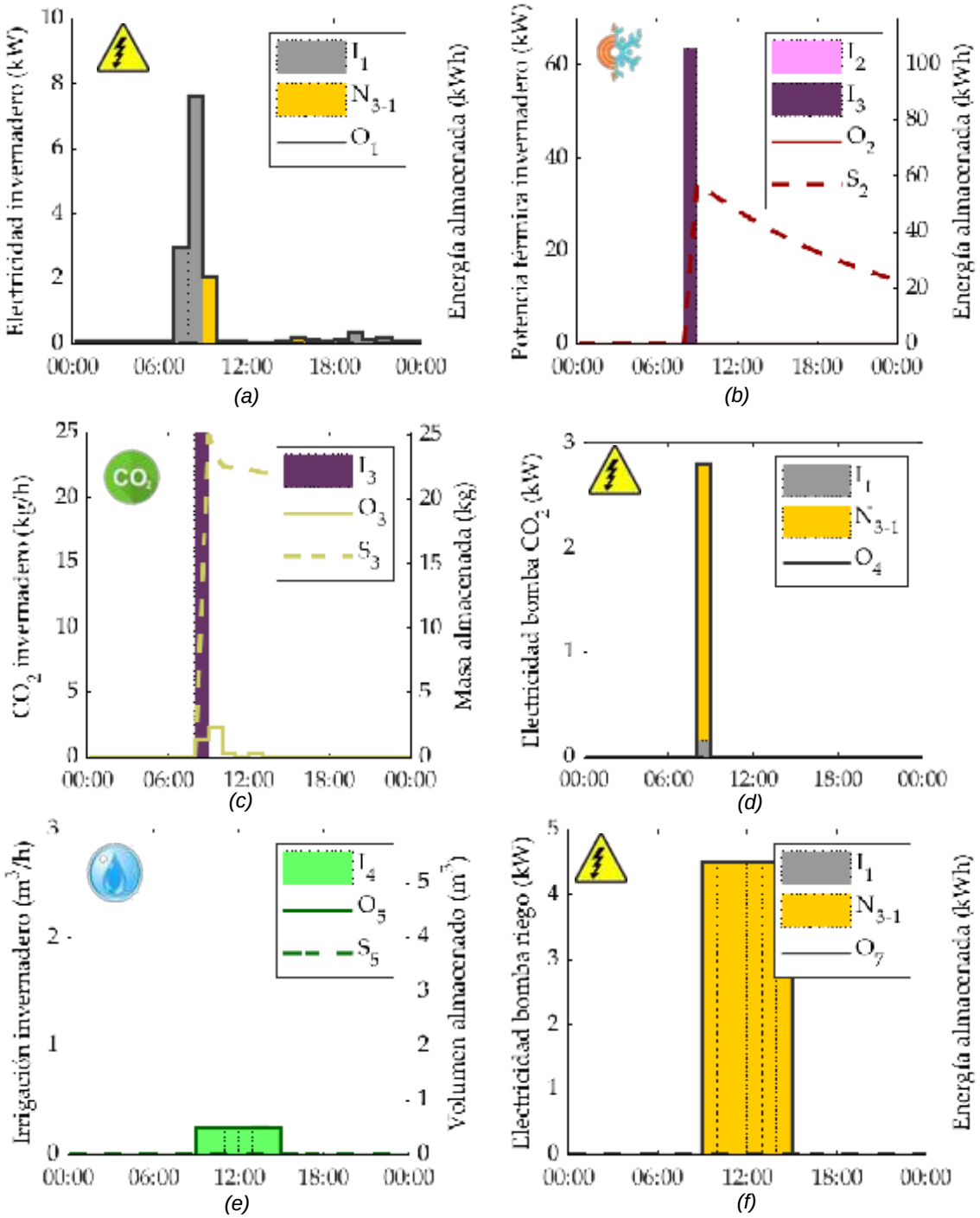


Figura 5. Reparto de recursos entre la planta fotovoltaica y el invernadero el 25/11/2014 (UTC +1)

La diferencia entre el valor de la demanda y la producción a partir de los recursos de entrada (incluyendo el intercambio eléctrico entre los concentradores h1 y h3, $N_{3-1}(k)$) determina las operaciones de carga y descarga de los sistemas de almacenamiento, cuya dinámica se representa en línea discontinua: teniendo tendencia creciente durante la carga y decreciente durante la descarga. Finalmente, puede observarse que el aporte solar cubre la demanda eléctrica debida a la activación de la bomba de riego, que está concentrada entre las 9 h y las 15 h del día 24 de noviembre de 2014. Asimismo, se observa que, para cubrir las demandas de CO_2, la caldera de biomasa se enciende una única vez durante el día lo cual permite también reducir el número de veces que actúa el sistema de captura de dióxido de carbono.

4. Conclusiones

Aunque por razones de espacio únicamente se ha limitado a un caso concreto el número de pruebas realizadas, el modelo desarrollado podría hacerse funcionar con conjuntos de datos reales diferentes a los empleados y adaptarlo a cualquier otra estructura de «energy hub». Además, esta formulación del problema contempla la posibilidad de sustituir los submodelos de proceso empleados por otros de mayor o menor complejidad en función de la precisión requerida en los resultados y la capacidad de computación disponible.

Como líneas de investigación futuras, se prevé la adición de nuevos elementos a la librería ya disponible, como resultados del proyecto en el enmarca este trabajo. Por otro lado, se plantean problemas como la gestión eficiente del vehículo eléctrico utilizado en el proyecto, así como la experimentación con sistemas de riego inteligentes, que aprovechen la disponibilidad de recursos para programar el funcionamiento de la bomba del invernadero.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto I+D+i del Plan Nacional DPI2017-85007-R del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y Fondos FEDER.

Referencias

1. Becattini G. Dal settore industriale al distretto industriale. Rivista di Economia e Politica Industriale. 1979, vol. 1, pp. 1-8.
2. Mukherjee U. *et al.* Techno-economic, environmental, and safety assessment of hydrogen powered community microgrids; case study in Canada. International Journal of Hydrogen Energy. 2017, vol. 42, n.º 20, pp. 14333-14349.
3. Geidl M. *et al.* Energy Hubs for the Future. IEEE Power and Energy Magazine. 2007, vol. 5, n.º 1, pp. 24-30.
4. Mancarella P. MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. Energy. 2014, vol. 65, pp. 1-17.
5. Caldentey Albert P. El distrito agro-comercial del campo de Dalías (España). Agroalimentaria. 1998, vol. 7, pp. 21-28.
6. Geidl M. y Andersson G. Optimal power flow of multiple energy carriers. IEEE Transactions on Power Systems. 2007, vol. 22, n.º 1, pp. 145-155.
7. Mohammadi M., Noorollahi Y., Mohammadi-Ivatloo B., y Yousefi H. Energy hub: From a model to a concept -- A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017, vol. 80, pp. 1512-1527.
8. ARM-TEP197. CHROMAE Project (DPI2017-85007-R). [En línea]. Disponible en: http://www2.ual.es/chromae/. [Accedido: 14-may-2018].
9. Parisio A., Del Vecchio C., y Vaccaro A. A robust optimization approach to energy hub management. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2012, vol. 42, n.º 1, pp. 98-104.
10. Evins R., Orehounig K., Dorer V., y Carmeliet J. New formulations of the 'energy hub' model to address operational constraints. Energy. 2014, vol. 73, pp. 387-398.
11. Ramos-Teodoro J., Rodríguez F., Berenguel M., y Torres J. L. Heterogeneous resource management in energy hubs with self-consumption: Contributions and application example. Applied Energy. 2018, vol. 229, pp. 537-550.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Predicción de la irradiación solar global diaria horizontal mediante redes neuronales artificiales en la región de Castilla y León, España

F.J. Diez[1], L.M. Navas-Gracia[1], A. Martínez-Rodríguez[1], A. Correa-Guimaraes[1], L. Chico-Santamarta[1]

[1] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid. Campus La Yutera, 34071 Palencia. España; x5pino@yahoo.es, lmnavas@iaf.uva.es, andresmr@iaf.uva.es, acg@iaf.uva.es, letichs0805@gmail.com

Resumen. Este artículo, se centra en la predicción de la irradiación solar global diaria horizontal, por ser el caso más interesante en la meteorología agrícola, por ejemplo, en las previsiones de necesidades de riego, utilizando la técnica de las redes neuronales artificiales (RNAs) de la inteligencia computacional, a partir de variables accesibles en las estaciones agrometeorológicas. El lugar donde fueron medidos los datos, utilizados para entrenar las RNAs, caracterizan donde se pueden volver a utilizar este tipo de modelos, en este estudio fueron las estaciones meteorológicas de la red SIAR en Castilla y León, en concreto la situada en Mansilla Mayor (León), durante los años 2004-2010. Los modelos RNAs se construyeron en la entrada con los datos medidos de irradiación solar global diaria de uno, dos y tres días anteriores, añadiendo el día del año J(t)=1..365, para predecir su valor el día siguiente. Los resultados obtenidos, validados durante el año 2011 completo RMSE=3,8012 MJ/(m²d), concluyen que las RNAs estudiadas mejoran los métodos clásicos comparados: 1) año típico CENSOLAR RMSE=5,1829 MJ/(m²d), 2) media móvil ponderada con la autocorrelación parcial de 11 días de retardo RMSE=3,9810 MJ/(m²d), 3) regresión lineal sobre el valor del día anterior RMSE=4,2434 MJ/(m²d), 4) año típico Fourier utilizado el 1er armónico RMSE=4,2747 MJ/(m²d), y 5) las matrices de transición de Markov para 33 estados posibles RMSE=4,3653 MJ/(m²d). Durante los días de cambio brusco en el nivel de irradiación solar, se observan los mayores errores de predicción. Se plantea utilizar en la entrada otras variables para mejorar la eficacia del modelo RNA. Una de las variables probadas fue el índice de claridad diario K_t=H/H_0, resultando una mejora RMSE=3,7703 MJ/(m²d).

Palabras clave: insolación, evapotranspiración, agrometeorología, inteligencia computacional.

1. Introducción

El modelado de la irradiación solar comprende múltiples variantes según se trate con su valor global o sus componentes (directa o difusa), el tipo de variables predictivas utilizadas (meteorológicas o geográficas), la resolución espacial o temporal (minuto, horaria, diaria o mensual) dada al modelo, el ancho de banda estudiado, la metodología o algoritmo (determinista o estocástica) aplicado, la superficie estudiada (horizontal, inclinada o con seguimiento solar) y el tipo de cielo.

Los modelos de irradiación solar se pueden clasificar de diferentes maneras, a partir de una revisión exhaustiva [1] identifica nueve criterios de clasificación, como siguen: 1) Tipo de datos de salida como la irradiación directa, difusa y global. 2) Tipo de datos de entrada de las variables

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.4229

meteorológicas y componentes de la irradiación solar. 3) Resolución espacial para un lugar concreto o con resultados reticulados. 4) Tiempo de resolución para cada minuto utilizado en concentradores solares, horaria para simulaciones de sistemas solares, o diaria en meteorología agrícola, además de los promedios horarios o diarios mensuales. 5) Resolución espectral de onda corta, ultravioleta, para dos o más bandas. 6) Tipo de metodología como puede ser determinista durante un tiempo específico, pasado, presente o futuro, y estocástica respetando las propiedades estadísticas de las series de tiempo de la irradiación solar. 7) Tipo de algoritmo entre modelos derivados de los principios físicos y los modelos empíricos basados en los datos de irradiancia solar medidos en un lugar y periodo específico. 8) Geometría de la superficie con datos de la irradiación solar sobre superficies (horizontales, inclinadas o con seguimiento solar). 9) Tipos de cielo (despejado, parcialmente nuboso y cubierto) según el efecto de las nubes. Los resultados finales pueden requerir del uso de varios modelos sucesivamente cuyos resultados están vinculados.

Las técnicas de la inteligencia artificial (redes neuronales artificiales, algoritmos genéticos, lógica borrosa y sistemas híbridos) han sido utilizadas de diferentes formas para la estimación de la irradiación solar, en diferentes escalas de tiempo (mensual, diaria u horaria), utilizando variables meteorológicas, como por ejemplo (temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, nubosidad, duración de la insolación, índice de claridad, presión atmosférica) y las coordenadas geográficas (latitud, longitud y altura). También han sido utilizadas para la predicción de la irradiación solar (global, directa o difusa) futura, sobre la base de los últimos datos observados [2].

Los resultados obtenidos por las redes neuronales artificiales (RNAs) se han comparado con las técnicas estadísticas clásicas, describiendo las ventajas de las RNAs en las ciencias atmosféricas [3], cuando las situaciones ambientales de interés son lo suficientemente complejas y no lineales, haciendo a estos modelos RNAs de utilidad por su dinámica, que solo se pueden obtener a través de datos empíricos, no a través de ecuaciones analíticas [4], y donde las relaciones subyacentes son poco conocidas [5]. [6] investiga la estructura óptima para las RNAs utilizadas en la predicción de las series de tiempo, de las cuales, los datos ambientales son un buen ejemplo. A continuación se exponen diversos estudios con referencia al lugar de los datos utilizados para la construcción de los modelos.

Las RNAs se han utilizado para la estimación de la irradiación solar en lugares que no cuentan con instrumentos de medida. En Omán [7] analiza la relación de la irradiación solar global mensual y las variables climatológicas (localización, mes, presión media, temperatura media, presión de vapor media, humedad relativa media, velocidad del viento media y duración de la insolación media) y [8] con una primera estimación del índice de claridad, en función de su latitud, longitud, horas de sol y el mes del año.

En la India [9] realiza la estimación de la irradiación solar difusa diaria y horaria media mensual, bajo diferentes condiciones climáticas, las neuronas de la capa de entrada reciben nueve entradas (latitud, longitud, altura, mes del año, temperatura del aire, humedad relativa, precipitación, velocidad del viento y longitud de onda larga), y [10] mejorando otros modelos de correlación.

Las RNAs se han utilizado para obtener mapas de la irradiación solar mensuales en Turquía [11] y en la provincia de Jaén, España [12] cuando la calidad de los datos y su densidad espacial no es tan buena como debería ser para la mayoría de los propósitos.

En Eslovenia [13] estima la irradiación solar global cada media hora con las entradas al modelo (irradiación solar extraterrestre, ángulo cenital solar, día del año, temperatura y presión atmosférica relativa) con buen resultado para los días claros. En Arabia Saudí [14,15,16] utilizando diferentes combinaciones.

La ecuación de regresión de Ångström es mejorada por la lógica borrosa en la parte occidental de Turquía [17] y por las RNAs en Athalassa, Chipre [18], en Irán [19] con un modelo independiente para seis ciudades, y en Dehful, Irán [20].

Las RNAs son aplicadas para la generación de series sintéticas de irradiación solar horaria en varias ciudades de España [21] y diaria en Sao Paulo y Río Grande del Sur, Brasil [22]. En Argelia [23] presenta un sistema de inferencia neuro-difuso adaptativo ANFIS para la estimación de las secuencias del índice de claridad media mensual y la irradiación solar global en lugares aislados sobre la base de las coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud) obteniendo 12 valores del índice de claridad medio mensual, posteriormente las matrices de Markov se utilizan para generar las secuencias de datos de irradiación solar global diaria.

En Desert Rock, USA [24] utiliza el método bayesano para evaluar la importancia relativa de las variables atmosféricas y radiométricas como entradas a un modelo de RNAs, resultando el índice de claridad y la masa relativa del aire en la estimación de la irradiación solar directa horaria. En Mahasarakham, Tailandia [25] estudia sobre todos los tipos de cielo la disponibilidad de la iluminación e irradiación solar global horizontal para un clima tropical, desarrollando un modelo senoidal que consta de funciones polinómicas o exponenciales y una RNA se propone como modelo alternativo.

Por otra parte, está la predicción de la irradiación solar mediante las técnicas de la inteligencia artificial [26], utilizando diferentes estructuras de RNAs en Argelia [27] realiza la predicción de la irradiación solar global diaria en base de los valores anteriores y con un modelo hibrido (RNA y matrices de transición de Markov) [28]. En Shanghái, China [29,30,31] utilizan las redes neuronales wavelet. La predicción de la irradiación solar se ve afectada por muchos factores como la masa de aire, las nubes y otras condiciones de entorno de la tierra de acuerdo a diferentes frecuencias de la luz solar [32].

En tres zonas de Egipto [33] predice la fracción difusa diaria y horaria, mejorando los modelos de regresión. En Dakhla, Marruecos [34] utiliza datos de hasta el quinto día, comparando con los resultados de los modelos ARMA. En Brue, UK [35] utiliza la prueba Gamma para seleccionar las variables de entrada y la longitud de los datos de entrenamiento. En Jeddah, Arabia Saudí [36] utiliza RNAs para predecir la irradiancia solar horaria global, directa y difusa.

En Golden, Colorado, USA [37] utiliza la RNA recurrente echo state para realizar predicciones a corto y medio plazo de la irradiación solar a 30, 60, …, 270 minutos. En Uganda [38] desarrolla un modelo con RNAs para predecir la irradiación solar global diaria media mensual para ubicaciones sobre la base de datos geográficos y meteorológicos (latitud, longitud, altitud, duración de la insolación, humedad relativa y temperatura máxima). En Omaezaki, Japón [39] desarrolla una RNA en varias etapas para predecir la insolación del día siguiente utilizando la previsión de la presión atmosférica media.

En Eskisehir, Turquía [40] utiliza un modelo de representación 2D de los datos de irradiancia solar horaria, proporcionando una visualización única y compacta de los datos. En Triestre, Italia [41] predice la irradiancia solar en una base de 24 horas para cada hora del día de mañana, usando los valores actuales del día de hoy de la irradiación diaria y la temperatura del aire diaria media, comprobando que el modelo funciona satisfactoriamente para días soleados y baja ligeramente su rendimiento en los días nublados.

En Córcega, Francia [42] utiliza una normalización sobre los datos de irradiación solar respecto a los datos de irradiación solar extraterrestre mejorando la correlación entre las mediciones y los datos predichos, utilizando de una a 15 entradas de los valores diarios anteriores y [43] predice a un paso por delante la irradiancia solar horaria media.

En Madrid, Lleida, Albacete y Murcia, España [44] compara los modelos estadísticos basados en series de tiempo aplicados a la predicción de la irradiación solar global diaria con un horizonte temporal de tres días, utilizando el valor mitad diario. En Atenas, Grecia [45] utiliza seis estados de nubosidad diferentes y el número de periodos de 10 minutos de tiempo desde el que se realiza

la predicción y el mediodía solar y con predicciones de la irradiación solar global horaria [46] encuentra que de cinco a ocho valores anteriores aumenta la eficiencia y que con más de nueve se mantiene.

En este artículo, se realiza la predicción de la irradiación solar global diaria mediante redes neuronales artificiales (RNAs), utilizando la base de datos de la red SIAR en Castilla y León, en concreto de la estación agrometeorológica situada en Mansilla Mayor (León). El objetivo principal es realizar la mejor predicción utilizando como variables, las propias medidas registradas en la estación, ya que estos modelos representan al propio lugar de los datos utilizados para entrenar las RNAs. Para ello, se probaron RNAs con los datos de uno, dos y tres días de retardo, resultando un rendimiento similar a los modelos clásicos, pero que se mejora añadiendo como predictor el día del año J(t)=1..365, que sitúa la predicción en la época del año, y/o el índice de claridad diario $K_t=H/H_0$ como relación del irradiación solar global diaria, que incide sobre la superficie, y la irradiación solar extraterrestre, que llega al tope de la atmósfera para cada día concreto, calculada para cada latitud [47].

2. Equipo experimental

Los datos irradiación solar global diaria utilizados de los años 2004-2011 están recogidos por la estación agrometeorológica de la red SIAR, situada en la localidad de Mansilla Mayor (León) [Coordenadas: 42°30′32″N 5°26′31″O. Altitud: 790 msnm. Hora local: GMT-21,725555], proyecto de la Dirección General de Desarrollo Rural del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. En Castilla y León esta información está gestionada por el servicio InfoRiego de asesoramiento al regante desde el Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL), que pretende fomentar el acceso del público a la información relativa de la meteorología en Castilla y León, además de facilitar a los regantes recomendaciones que sirvan para ahorrar agua en el riego.

La irradiancia solar está medida con un piranómetro Skye SP1110 Campbell, que es una fotocélula de silicio sensible a la radiación entre 350-1100 nm, los cambios son detectados, linealizados y amplificados por un circuito electrónico situado en la sonda Vaisala HMP45C Campbell.

3. La predicción de la irradiación solar global diaria mediante redes neuronales artificiales (RNAs)

En este artículo, para la predicción de la irradiación solar global se utilizan varios modelos black-box, implementados con la técnica de las redes neuronales artificiales (RNAs). El preprocesamiento y el posprocesamiento automático de los datos medidos en la estación agrometeorológica se realiza mediante la interfaz gráfica de usuario (GUI) Neural Network Fitting Toolbox *'nftool'* Matlab. La arquitectura diseñada para ocho modelos RNA 1..8 con diferentes combinaciones de entradas para la predicción de la irradiación solar global del día de mañana [H(t+1)] son las presentadas en Figura 1-8.

La capa de salida de los modelos RNA 1..8 tiene una neurona correspondiente a la predicción de la irradiación solar global del día de mañana [H(t+1)] en el mismo lugar. En la capa oculta, se probaron diferente número de neuronas, calculando el valor RMSE obtenido para la salida, para seleccionar la arquitectura con los mejores resultados.

La creación de las RNAs se realiza mediante la función *'feedforwardnet'* con los vectores de datos de entrada y salida que determinan el tamaño de sus respectivas capas, para crear una RNA multilayer feed-forward perceptron (MLP), con una capa oculta, donde la función de transferencia de sus neuronas es la tangente sigmoidal hiperbólica *'tansig'* y en la neurona de la capa de salida como lineal *'purelin'*.

El algoritmo back-propagation (BP) Levenberg-Marquardt (LM) se aplica para lograr una optimización rápida *'trainlm'*, la función de aprendizaje del sesgo y el momento del peso con gradiente descendente '*learngdm'*, la función normalizada de error cuadrado *'mse'*, las funciones de procesamiento de los elementos de la matriz de entrada como el procesamiento de datos para recodificar las filas con datos desconocidos *'fixunknowns'* y los vectores de datos repetidos en la entrada que no proporcionan información útil *'removeconstantrows'*, y el procesamiento de matrices para normalizar los vectores con valores mínimos y máximos en el rango [-1 1] *'mapminmax'*.

El entrenamiento de las RNAs se realiza mediante la función *'train'*, para cada modelo RNA 1..8, con la matriz de vectores de datos de entrada y la matriz de vectores de datos de salida de los años 2004-2010, registrando el proceso de entrenamiento (*epoch* and *performance*).

La función *'sim'* se utiliza con las RNAs previamente entrenadas, para realizar la predicción de [H(t+1)], con una matriz de vectores de datos de entrada del año 2011.

La GUI Neural Network Fitting Toolbox *'nftool'* Matlab muestra los resultados del entrenamiento y la simulación, la arquitectura RNA elegida, los algoritmos de entrenamiento, el rendimiento, cómo se realizaron los conjuntos de datos, la evolución de la progresión en el entrenamiento y la validación.

3.1. Modelo RNA 1

Un modelo RNA 1 con una entrada para la irradiación solar global diaria del día anterior [H(t)] en Figura 1.

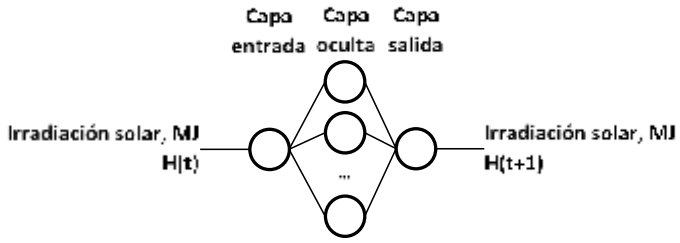


Figura 1. Modelo RNA 1 con una entrada [H(t)].

3.2. Modelo RNA 2

Un modelo RNA 2 con dos entradas para la irradiación solar global diaria de los dos días anteriores [H(t-1),H(t)] en Figura 2.

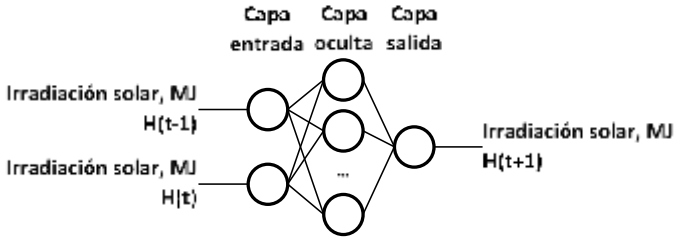


Figura 2. Modelo RNA 2 con dos entradas [H(t-1),H(t)].

3.3. Modelo RNA 3

Un modelo RNA 3 con tres entradas para la irradiación solar global diaria de los tres días anteriores [H(t-2),H(t-1),H(t)] en Figura 3.

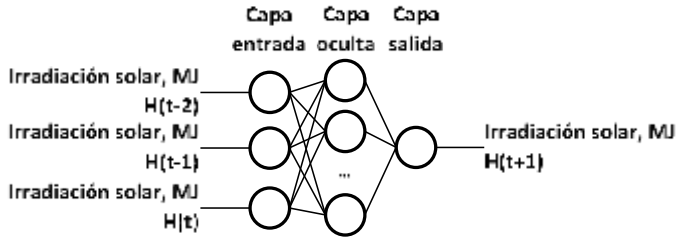


Figura 3. Modelo RNA 3 con tres entradas [H(t-2),H(t-1),H(t)].

3.4. Modelo RNA 4

Un modelo RNA 4 con dos entradas para la irradiación solar global diaria del día anterior y el día del año [H(t),J(t)] en Figura 4.

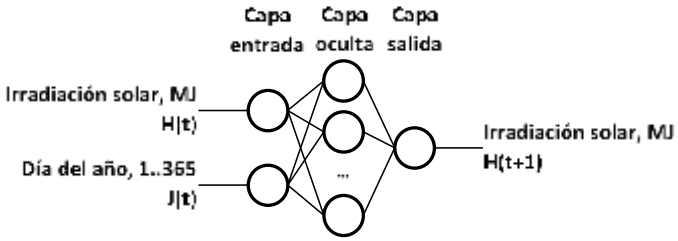


Figura 4. Modelo RNA 4 con dos entradas [H(t),J(t)].

3.5. Modelo RNA 5

Un modelo RNA 5 con tres entradas para la irradiación solar global diaria de los dos días anteriores y el día del año [H(t-1),H(t),J(t)] en Figura 5.

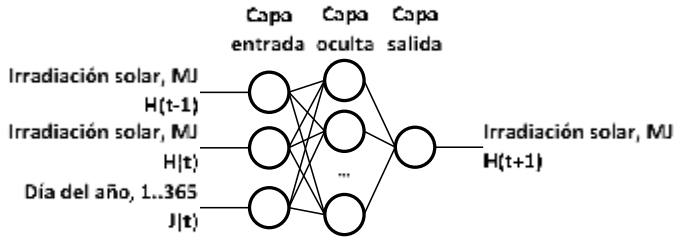


Figura 5. Modelo RNA 5 con tres entradas [H(t-1),H(t),J(t)].

3.6. Modelo RNA 6

Un modelo RNA 6 con cuatro entradas para la irradiación solar global diaria de los tres días anteriores y el día del año [H(t-2),H(t-1),H(t),J(t)] en Figura 6.

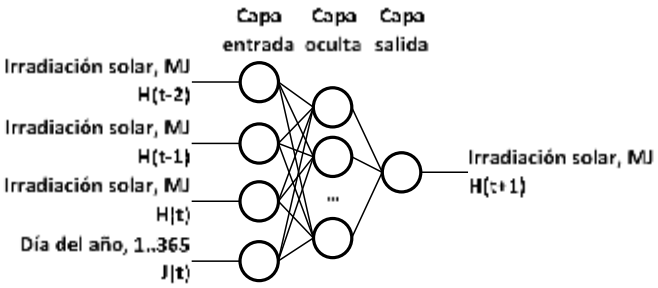


Figura 6. Modelo RNA 6 con cuatro entradas [H(t-2),H(t-1),H(t),J(t)].

3.7. Modelo RNA 7

Un modelo RNA 7 con dos entradas para la irradiación solar global diaria y el índice de claridad $K_t=H/H_0$ del día anterior [H(t),K_t(t)] en Figura 7.

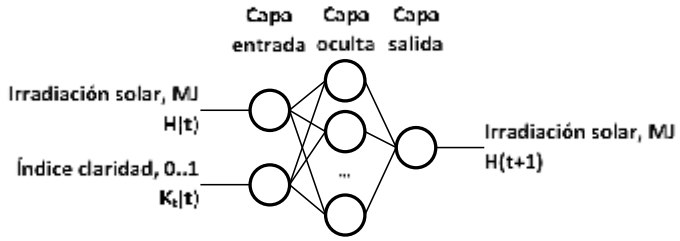


Figura 7. Modelo RNA 7 con dos entradas [H(t),Kt(t)].

3.8. Modelo RNA 8

Un modelo RNA 8 con tres entradas para la irradiación solar global diaria, el índice de claridad $K_t=H/H_0$ del día anterior y el día del año [H(t),K_t(t),J(t)] en Figura 8.

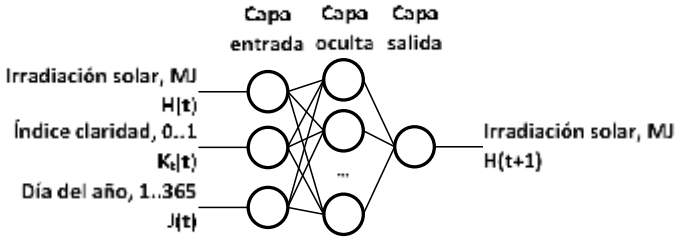


Figura 8. Modelo RNA 8 con tres entradas [H(t),Kt(t),J(t)].

4. La predicción de la irradiación solar global diaria mediante modelos clásicos

En este apartado se presentan los modelos clásicos de predicción de la irradiación solar global diaria sobre la superficie horizontal: 1) año típico CENSOLAR a escala provincial, 2) media móvil ponderada, en este caso, con la autocorrelación parcial de 2 a 20 días de retardo, 3) regresión lineal del valor diario de irradiación solar, sobre el valor del día anterior, 4) año típico del análisis de Fourier para 1 a 8 armónicos, y 5) análisis de Markov para 33 estados posibles de irradiación solar diaria. La construcción de los modelos se realizó con la serie de datos de los años 2004-2010 y para la comparación de sus predicciones se utilizaron los datos del año 2011.

4.1. Año típico CENSOLAR

Los valores de la irradiación solar global horizontal de las tablas CENSOLAR [48] representan un año típico a escala provincial de un día medio para cada mes del año.

4.2. Media móvil ponderada con la autocorrelación parcial

La autocorrelación parcial hace referencia a la dependencia del valor de una determinada variable estadística con valores de esa misma variable precedentes en el tiempo. La media móvil ponderada se utiliza dando más peso a los valores más próximos y menos a los más alejados intentando que la media se comporte de forma más ágil en relación a una media móvil simple.

En este artículo, se utilizaron los coeficientes de autocorrelación parcial de la serie de datos de los años 2004-2010 de irradiación solar global diaria, obtenidos con la función *'parcorr'* Matlab, para realizar la media móvil ponderada con retardos de tiempo de 2 a 20 días durante el año 2011.

Los coeficientes de autocorrelación parcial se aplican con el valor de irradiación solar correspondiente a su día de retardo, realizando el sumatorio de sus productos y dividiendo por el sumatorio de los pesos asignados por los coeficientes de autocorrelación parcial del orden utilizado, dando más importancia a los valores más próximos que a los valores más alejados.

4.3. Regresión lineal

La predicción de la irradiación solar global diaria del día de mañana se realizó mediante la regresión lineal, que modela la relación entre una variable dependiente en este caso el valor de la irradiación solar global del día de mañana H(t+1), la variable independiente, en este caso, con el valor de la irradiación solar global del día de hoy H(t) y un término aleatorio calculado con Curve Fitting Toolbox *'cftool'* Matlab, aplicando la serie de datos de los años 2004-2010.

4.4. Análisis de Fourier

El análisis de Fourier se aplica a las variables que muestran frecuencias significativas como es el caso de la irradiación solar global diaria. La ecuación representativa del año se obtiene con varios armónicos. Para el cálculo de los coeficientes de los ocho primeros armónicos se utilizó Curve Fitting Toolbox *'cftool'* Matlab, aplicando la serie de datos de los años 2004-2010.

4.5. Análisis de Markov

En un proceso aleatorio donde se produce un cambio de estado entre ciertos estados en el tiempo, teniendo un número finito de estados posibles, surge una sucesión o cadena de situaciones, donde cada una es igual a uno de los estados, este proceso se llama cadena de Markov.

En este artículo, se definieron los estados, uno por cada valor entero de la irradiación solar global diaria en los valores enteros de la unidad en Megajulios (MJ) posibles de la serie de datos de los años 2004-2010, para ello:

1. Se redondea todos los valores y se les asignó ese estado, para ello se utilizó la función *'round'* MATLAB.
2. Se busca el valor máximo y mínimo de la serie de datos de la irradiación solar global diaria resultando 33 estados posibles, con las funciones *'max'* y *'min'* Matlab.
3. Se crea una matriz con las transiciones, existentes en la serie de datos de los años 2004-2010, una para cada fila en la matriz *b*.

$$b = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ x_2 & x_3 \\ \dots & \dots \\ x_{n-1} & x_n \end{bmatrix}$$

4. Se crea una matriz de probabilidades, matriz de transiciones de Markov (MTM), con el número de transiciones para cada estado en la serie de datos mediante la función Matlab en Figura 9, que recorre los cambios de estado de la serie de datos matriz *b* y actualiza la matriz de transición de Markov (MTM), donde cada elemento de la matriz tiene el número de cambios habidos en la serie de datos entre el estado representado por el número de la fila hacia el estado representado por el número de la columna.

$$\mathrm{MTM} = \begin{bmatrix} 1 \to 1 & 1 \to 2 & \cdots & 1 \to 33 \\ 2 \to 1 & 2 \to 2 & \cdots & 2 \to 33 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 33 \to 1 & 33 \to 2 & \cdots & 33 \to 33 \end{bmatrix}$$

```
function a=mtm(b) %Matriz de Transición de Markov
a=zeros(33);
for i=1:2556 %Recorrer cambios estados de la base de datos
    x=b(i,1);
    y=b(i,2);
    a(x,y)=a(x,y)+1; %Actualiza la Matriz de Transición de Markov
end
```

Figura 9. Función Matlab para crear la matriz de probabilidades, Matriz de Transiciones de Markov *MTM*.

5. Se normaliza la matriz de transición de Markov (MTM) para cada fila, dividiendo cada elemento de la fila por el valor de la suma de todos sus elementos, resultando la matriz de transición de Markov normalizada (MTMN), que tiene como suma de los elementos en todas las filas el valor 1.
6. Se calcula la probabilidad de cambio de estado para el día de mañana a partir del estado de hoy, multiplicando el vector del estado inicial de hoy con la matriz de transición de Markov normalizada (MTMN), resultando un vector, en el que la posición, donde se encuentre el valor más alto, será el estado, que tenga más probabilidad de suceder mañana, mediante la función Matlab en Figura 10.

```
function p=pmarkov(a,d) %Pronóstico para un año, respecto del día anterior
p=zeros(365,1);
r=zeros(1,33);
for i=1:365
    x=d(i,1);
    r(1,x)=1;
    m=r*a; %Multiplica vector del estado inicial por matriz de transición
    [ymax,posimax]=max(m);
    p(i,1)=posimax; %Estado de la máxima probabilidad
    r=zeros(1,33);
end
```

Figura 10. Función Matlab para realizar la predicción [H(t+1)] multiplicando el vector de estado del día [H(t)] con la matriz de transición de Markov normalizada (MTMN).

5. Resultados y discusión

En este apartado se aplican las metodologías desarrolladas, propuestas para la predicción de la irradiación solar global diaria. Los resultados de las metodologías de predicción se aplican y validan con la base de datos SIAR en la estación de Mansilla Mayor (León) durante el año 2011, mediante el estadístico Root Mean Square Error (RMSE) para realizar una primera selección de los modelos predictivos, encontrando el modelo de predicción que presente el mínimo error con la ventaja de que sus resultados están en las unidades originales de la información. También se utiliza el Coeficiente de Determinación (R^2) para describir la bondad o ajuste del modelo, Durbin-Watson (DW) para detectar la autocorrelación de primer orden, Mean Percentage Error (MPE) para el sesgo del error de la predicción, Forecast Accuracy (FA) para realizar una medida de la precisión de los modelos de predicción a corto plazo, y Akaike Information Criterion (AIC) para seleccionar el mejor modelo tomando en cuenta el número de variables penalizando la complejidad del modelo.

Los resultados de la metodología para la predicción de la irradiación solar global diaria mediante los modelos RNA 1,2,3 a partir de los datos de la irradiación solar global diaria con uno, dos o tres días de retardo, implementadas con distinto número de neuronas en la capa oculta se estudian mediante el estadístico RMSE en Figura 11. Los mejores resultados de la predicción realizada para el modelo RNA 1 fue con la red (1-1-1) RMSE=4,26 MJ/(m^2d), para el modelo RNA 2 fue con la red (2-7-1) RMSE=4,12 MJ/(m^2d) y para el modelo RNA 3 fue con la red (3-20-1) RMSE=3,96 MJ/(m^2d).

El rendimiento de los modelos aumenta, al considerar la irradiación solar global diaria de más días de retardo de forma parecida a la media móvil ponderada. El ajuste es similar a los métodos clásicos de la literatura probados.

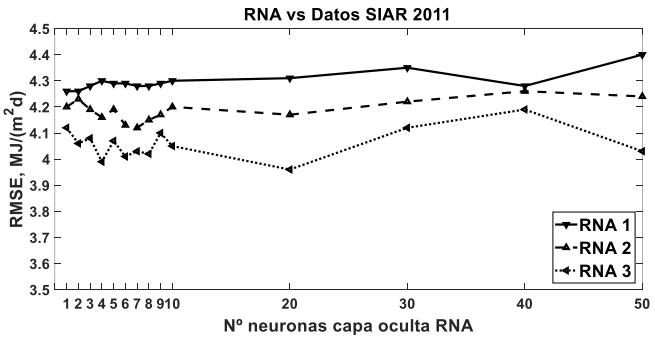


Figura 11. Eficacia de los modelos RNA 1,2,3 con diferente número de neuronas en la capa oculta vs Datos año 2011 SIAR.

Los resultados de la metodología para la predicción de la irradiación solar global diaria mediante los modelos RNA 4,5,6 a partir de los datos de la irradiación solar global diaria con uno, dos o tres días de retardo y el día del año, implementadas con distinto número de neuronas en la capa oculta se estudia mediante el estadístico RMSE en Figura 12. Los mejores resultados de la predicción realizada para el modelo RNA 4 fue con la red (2-2-1) RMSE=3,75 MJ/(m^2d), para el modelo RNA 5 fue con la red (3-4-1) RMSE=3,78 MJ/(m^2d) y para el modelo RNA 6 fue con la red (4-4-1) RMSE=3,80 MJ/(m^2d).

El rendimiento de los modelos, para estos casos, no varía significativamente al considerar la irradiación solar global diaria de más días de retardo. El ajuste es mejor que la primera serie de modelos RNA 1,2,3 que no utilizan el día del año como variable predictiva, mejorando a los métodos clásicos de la literatura probados. También se observa, que utilizar el día del año como predictor mejora el rendimiento del modelo, ya que se introduce un parámetro que indica la época o estación del año cuando se realiza la predicción, porque la irradiación solar extraterrestre diaria en el tope de la atmosfera varía anualmente en forma senoidal.

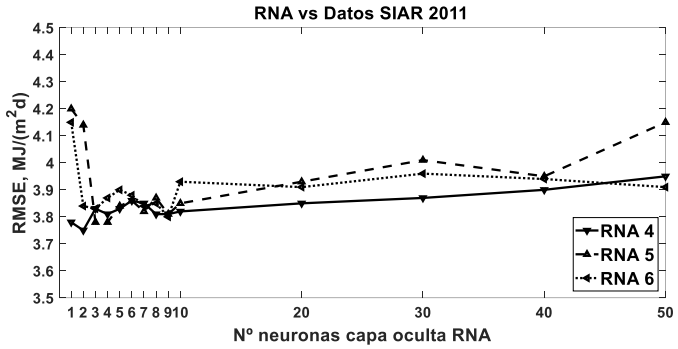


Figura 12. Eficacia de los modelos RNA 4,5,6 con diferente número de neuronas en la capa oculta vs Datos año 2011 SIAR.

Los resultados de la metodología para la predicción de la irradiación solar global diaria mediante los modelos RNA 7,8 a partir de los datos de la irradiación solar global diaria con un de retardo, el día del año o el índice de claridad, implementadas con distinto número de neuronas en la capa oculta se estudia mediante el estadístico RMSE en Figura 13. Los mejores resultados de la predicción realizada para el modelo RNA 7 fue con la red (2-4-1) RMSE=3,76 MJ/(m²d) y para el modelo RNA 8 fue con la red (3-7-1) RMSE=3,80 MJ/(m²d).

El rendimiento del modelo mejora al considerar el índice de claridad diario, pero utilizar el día del año o el índice de claridad como predictor obtiene resultados parecidos, con lo que utilizar el día del año es un valor más sencillo de manejar que el índice de claridad y produce rendimientos similares.

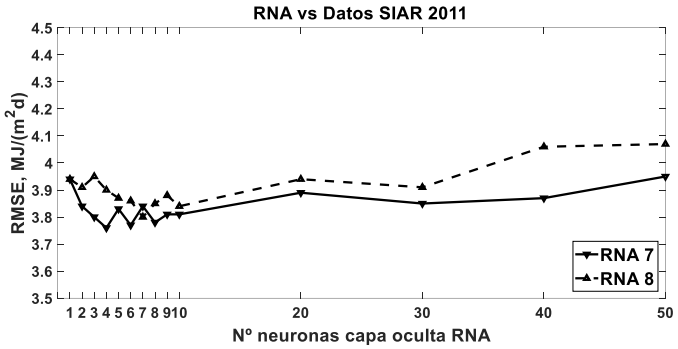


Figura 13. Eficacia de los modelos RNA 7,8 con diferente número de neuronas en la capa oculta vs Datos año 2011 SIAR.

Por lo que se observa de las predicciones realizadas con los modelos RNA 1..8 durante el año 2011 en Figura 14 y los resultados estadísticos evaluados para comprobar su efectividad en Tabla 1.

Los modelos RNA 2 [H(t-1),H(t)], RNA 4 [H(t),J(t)] y RNA 7 [H(t),Kt(t)] presentan el menor grado de autocorrelación mediante el estadístico DW.

La efectividad del modelo RNA 7 [H(t),Kt(t)] y RNA 6 [H(t-2),H(t-1),H(t),J(t)] consigue los mejores resultados, mediante el estadístico FA que analiza las predicciones a corto plazo y mediante el estadístico MPE que valora el sesgo del error la predicción.

La efectividad del modelo RNA 7 [H(t),Kt(t)] y RNA 4 [H(t),J(t)] obtiene los mejores resultados, respecto al mínimo error RMSE, a su ajuste mediante el estadístico R^2 y a su complejidad mediante el estadístico AIC.

Tabla 1. Efectividad de los modelos RNA 1..8 de predicción vs Datos SIAR en Mansilla Mayor (León) para el año 2011

Modelos RNA 1..8 [H(t+1)] vs Irradiación solar global diaria horizontal año 2011 Mansilla Mayor (León)							
	Red	**RMSE, MJ/(m2d)**	**R2**	**DW**	**MPE**	**FA**	**AIC**
RNA 1 [H(t)]	(1-1-1)	4,2609	0,7862	2,2632	-0,2523	0,5884	4,2835
RNA 2 [H(t-1),H(t)]	(2-6-1)	4,1292	0,7988	1,9703	-0,2517	0,5940	4,1733
RNA 3 [H(t-2),H(t-1),H(t)]	(3-8-1)	4,0204	0,8088	1,8543	-0,2507	0,5938	4,0830
RNA 4 [H(t),J(t)]	(2-5-1)	3,8012	0,8299	1,9263	-0,2154	0,6196	3,8427
RNA 5 [H(t-1),H(t),J(t)]	(3-10-1)	3,8467	0,8253	1,9061	-0,2232	0,6160	3,9106
RNA 6 [H(t-2),H(t-1),H(t),J(t)]	(4-7-1)	3,8431	0,8253	1,8007	-0,2032	0,6277	3,9261
RNA 7 [H(t),Kt(t)]	(2-6-1)	3,7703	0,8326	1,9183	-0,2022	0,6324	3,8118
RNA 8 [H(t),Kt(t),J(t)]	(3-7-1)	3,8043	0,8297	1,8716	-0,2273	0,6098	3,8662

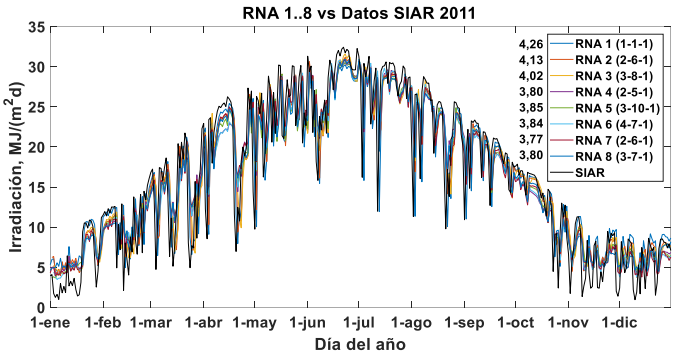


Figura 14. Modelos RNA 1..8 vs Datos año 2011 SIAR.

Los valores de la irradiación solar global diaria horizontal para la provincia de León en las tablas CENSOLAR, se representan junto a los datos del año 2011 SIAR en Mansilla Mayor (León) con un RMSE=5,1829 MJ/(m²d) en Figura 19. Este año típico ofrece una buena aproximación, además de ser rápida y sencilla su aplicación, pero no tienen en cuenta las variaciones diarias para cada día del mes.

Los coeficientes de autocorrelación parcial resultantes de la serie de datos de los años 2004-2010 SIAR en Mansilla Mayor (León) para retardos de tiempo de 1 a 20 días en Figura 15, muestran que la dependencia de la irradiación solar global diaria en un determinado día es máxima con la del día anterior 0,8747, disminuyendo esa dependencia rápidamente con la irradiación solar recibida en días anteriores: 0,2622 para 2 días, 0,1777 para 3 días, 0,0843 para 4 días.

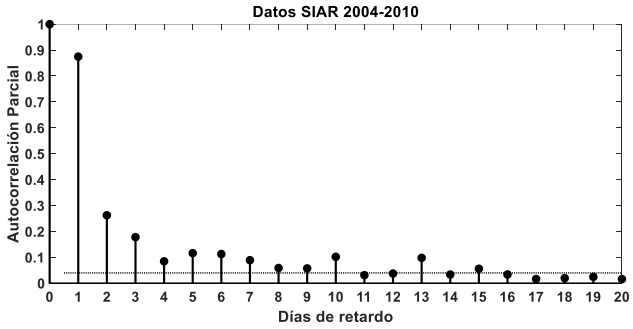


Figura 15. Autocorrelación parcial para retardos de tiempo de 1-20 días en los datos de los años 2004-2010 SIAR de irradiación solar global diaria.

La media móvil ponderada con los coeficientes de autocorrelación parcial de 2 a 20 días de retardo se utiliza para la predicción de la irradiación solar global diaria durante el año 2011 con un error para cada predicción RMSE en Figura 16. Obteniendo el mejor resultado para 11 días de retardo mediante la ecuación (Ec. 1) con un valor RMSE=3,9810 MJ/(m²d) en Figura 19.

$$H_{t+1} = \frac{0{,}8747\,H_t + 0{,}2622\,H_{t-1} + 0{,}1777\,H_{t-2} + 0{,}0843\,H_{t-3} + 0{,}1158\,H_{t-4} + 0{,}1123\,H_{t-5} + 0{,}0888\,H_{t-6} + 0{,}0585\,H_{t-7} + 0{,}0570\,H_{t-8} + 0{,}1018\,H_{t-9} + 0{,}0309\,H_{t-10}}{0{,}8747 + 0{,}2622 + 0{,}1777 + 0{,}0843 + 0{,}1158 + 0{,}1123 + 0{,}0888 + 0{,}0585 + 0{,}0570 + 0{,}1018 + 0.0309} \quad (1)$$

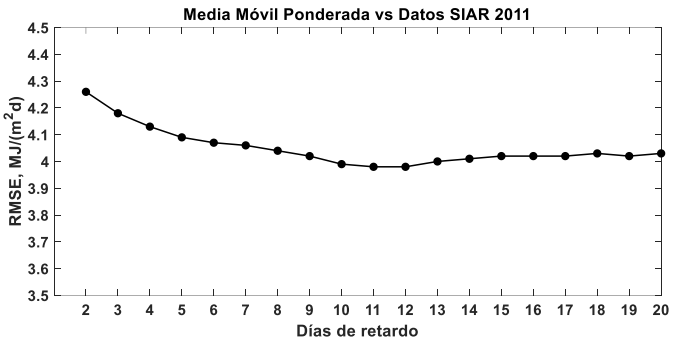


Figura 16. Eficacia de la media móvil ponderada de 2-20 días de retardo vs Datos año 2011 SIAR.

Se pueden utilizar estas correlaciones para una buena predicción, mejorando los resultados de las tablas CENSOLAR, al realizar una predicción diaria sobre los valores registrados en los días anteriores. La autocorrelación parcial más fuerte se produce con un día de retardo, que confirma la persistencia radiativa de un día para el siguiente, disminuyendo drásticamente para los días siguientes, pero que se pueden utilizar para mejorar ligeramente las predicciones.

La regresión lineal respecto a un día de retardo mediante la ecuación (Ec. 2) obtenida de los datos de la irradiación solar global de los años 2004-2010 SIAR en Mansilla Mayor (León) con un valor RMSE=4,32 MJ/(m²d) en Figura 17. Se utiliza para la predicción de la irradiación solar global diaria durante el año 2011 con un valor RMSE=4,2434 MJ/(m²d) en Figura 19. Se puede utilizar esta regresión para una buena predicción, similar a la media móvil ponderada, debido a la persistencia radiativa diaria.

$$H(t+1) = 0{,}8748\,H(t) + 2{,}048 \quad (2)$$

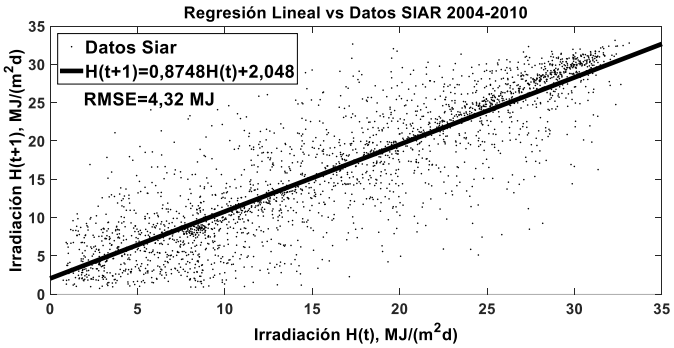


Figura 17. Regresión lineal de un día de retardo vs Datos de los años 2004-2010 SIAR.

El análisis de Fourier efectuado con el cálculo de los coeficientes de los datos de la irradiación solar global diaria de los años 2004-2010 SIAR en Mansilla Mayor (León), obtienen las funciones anuales típicas que se muestran en la Tabla 2 desde el primer al octavo armónico, el error producido para cada función disminuye ligeramente con el número de armónicos considerados. En Figura 18 se muestra el caso del primer armónico respecto a los datos de los años 2004-2011 con un valor RMSE=4,417 MJ/(m²d) y respecto a los datos del año 2011 con un valor RMSE=4,2747

MJ/(m²d) en Figura 19. El ajuste es similar a la media móvil ponderada, pero la utilización de más de un armónico no aporta mejora significativa.

Tabla 2. Funciones anuales típicas de Fourier de los datos de los años 2004-2010 de la irradiación solar global diaria en Mansilla Mayor (León), del primer al octavo armónico y el RMSE

Irradiación solar global diaria años 2004-2010 SIAR Mansilla Mayor		
N° de armónicos	**Función anual típica de Fourier**	**RMSE, MJ/(m2d)**
1	$H(t) = 16{,}31 - 10{,}9\cos(0{,}01712\,t) + 1{,}383\,\mathrm{sen}(0{,}01712\,t)$	4,417
2	$H(t) = 16{,}79 - 10{,}75\cos(0{,}01792\,t) - 0{,}1918\,\mathrm{sen}(0{,}01792\,t) - 0{,}4302\cos(2\cdot 0{,}01792\,t) + 0{,}9119\,\mathrm{sen}(2\cdot 0{,}01792\,t)$	4,372
3	$H(t) = 16{,}82 - 10{,}72\cos(0{,}01795\,t) - 0{,}2652\,\mathrm{sen}(0{,}01795\,t) - 0{,}4444\cos(2\cdot 0{,}01795\,t) + 0{,}9129\,\mathrm{sen}(2\cdot 0{,}01795\,t) - 0{,}1614\cos(3\cdot 0{,}01795\,t) - 0{,}2203\,\mathrm{sen}(3\cdot 0{,}01795\,t)$	4,370
4	$H(t) = 14 - 8{,}82\cos(0{,}01374\,t) + 7{,}663\,\mathrm{sen}(0{,}01374\,t) + 0{,}4119\cdot\cos(2\cdot 0{,}01374\,t) - 1{,}859\,\mathrm{sen}(2\cdot 0{,}01374\,t) - 1{,}071\cos(3\cdot 0{,}01374\,t) + 0{,}2203\,\mathrm{sen}(3\cdot 0{,}01374\,t) - 0{,}1655\cos(4\cdot 0{,}01374\,t) + 0{,}1346\,\mathrm{sen}(4\cdot 0{,}01374\,t)$	4,365
5	$H(t) = 15{,}95 - 10{,}9\cos(0{,}01659\,t) + 2{,}442\,\mathrm{sen}(0{,}01659\,t) + 0{,}4894\cos(2\cdot 0{,}01659\,t) + 0{,}62\,\mathrm{sen}(2\cdot 0{,}01659\,t) - 0{,}2298\cos(3\cdot 0{,}01659\,t) - 0{,}438\,\mathrm{sen}(3\cdot 0{,}01659\,t) - 0{,}08166\cos(4\cdot 0{,}01659\,t) - 0{,}2479\,\mathrm{sen}(4\cdot 0{,}01659\,t) - 0{,}4204\cos(5\cdot 0{,}01659\,t) - 0{,}1472\,\mathrm{sen}(5\cdot 0{,}01659\,t)$	4,360
6	$H(t) = 15{,}59 - 10{,}71\cos(0{,}01601\,t) + 3{,}58\,\mathrm{sen}(0{,}01601\,t) + 0{,}8222\cos(2\cdot 0{,}01601\,t) + 0{,}2469\,\mathrm{sen}(2\cdot 0{,}01601\,t) - 0{,}3552\cos(3\cdot 0{,}01601\,t) - 0{,}5187\,\mathrm{sen}(3\cdot 0{,}01601\,t) - 0{,}1731\cos(4\cdot 0{,}01601\,t) - 0{,}2608\,\mathrm{sen}(4\cdot 0{,}01601\,t) - 0{,}3646\cos(5\cdot 0{,}01601\,t) + 0{,}01903\,\mathrm{sen}(5\cdot 0{,}01601\,t) + 0{,}1542\cos(6\cdot 0{,}01601\,t) - 0{,}2483\,\mathrm{sen}(6\cdot 0{,}01601\,t)$	4,358
7	$H(t) = 15{,}62 - 10{,}77\cos(0{,}01608\,t) + 3{,}439\,\mathrm{sen}(0{,}01608\,t) + 0{,}7548\cos(2\cdot 0{,}01608\,t) + 0{,}3084\cdot\mathrm{sen}(2\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}3652\cos(3\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}502\cdot\mathrm{sen}(3\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}1898\cos(4\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}2505\,\mathrm{sen}(4\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}4033\cos(5\cdot 0{,}01608\,t) + 0{,}0155\,\mathrm{sen}(5\cdot 0{,}01608\,t) + 0{,}1429\cos(6\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}2134\,\mathrm{sen}(6\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}2898\cos(7\cdot 0{,}01608\,t) + 0{,}05327\,\mathrm{sen}(7\cdot 0{,}01608\,t)$	4,355
8	$H(t) = 15{,}9 - 10{,}88\cos(0{,}01608\,t) + 2{,}604\,\mathrm{sen}(0{,}01608\,t) + 0{,}5436\cos(2\cdot 0{,}01608\,t) + 0{,}5728\,\mathrm{sen}(2\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}243\cos(3\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}4557\,\mathrm{sen}(3\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}09469\cos(4\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}2583\,\mathrm{sen}(4\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}4202\cos(5\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}1266\,\mathrm{sen}(5\cdot 0{,}01608\,t) + 0{,}2067\cos(6\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}1177\,\mathrm{sen}(6\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}2595\cos(7\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}1288\,\mathrm{sen}(7\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}1798\cos(8\cdot 0{,}01608\,t) - 0{,}04178\,\mathrm{sen}(8\cdot 0{,}01608\,t)$	4,355

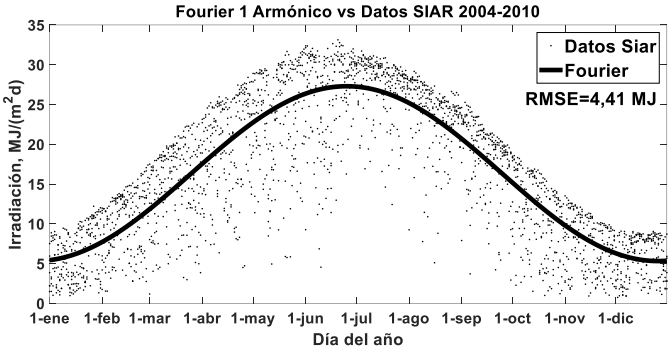


Figura 18. Función anual típica de Fourier con el primer armónico vs Datos de los años 2004-2010 SIAR.

El análisis de Markov utilizado para la predicción de la irradiación solar global diaria del año 2011 resulta con un valor RMSE=4,3653 MJ/(m²d) en Figura 19. El ajuste es similar al análisis de Fourier, pero en este caso se basa en las probabilidades de cambio de estado de un día para otro.

Por lo que se observa de las predicciones realizadas con los modelos clásicos durante el año 2011 en Figura 19 y los resultados estadísticos evaluados para comprobar su efectividad en Tabla 3.

Los modelos Media Móvil [H(t-1),H(t)], Media Móvil [H(t-10),…,H(t)] y Regresión Lineal [H(t)] presentan el menor grado de autocorrelación mediante el estadístico DW.

La efectividad del modelo Media Móvil [H(t-10),…,H(t)] consigue el mejor resultado, respecto al mínimo error RMSE, a su ajuste mediante el estadístico R^2 y a su complejidad mediante el estadístico AIC. Pero, los demás modelos clásicos les siguen con resultados parecidos, excepto el año típico CENSOLAR, que obtiene el peor resultado, salvo mediante el estadístico MPE que valora el sesgo del error la predicción, al ser una media diaria mensual.

La efectividad del modelo Media Móvil [H(t-1),H(t)] consigue el mejor resultado, mediante el estadístico FA que analiza las predicciones a corto plazo, al utilizar dos días de retardo.

Tabla 3. Efectividad de los modelos clásicos de predicción vs Datos SIAR en Mansilla Mayor (León) para el año 2011

Modelos Clásicos [H(t+1)] vs Irradiación solar global diaria horizontal año 2011 Mansilla Mayor (León)						
	RMSE, MJ/(m²d)	**R^2**	**DW**	**MPE**	**FA**	**AIC**
CENSOLAR [León]	5,1829	0,6837	0,7092	-0,1342	0,5286	5,2105
Media Móvil [H(t-1),H(t)]	4,2582	0,7865	2,0952	-0,1366	0,6589	4,3048
Media Móvil [H(t-10),…,H(t)]	3,9810	0,8134	1,7265	-0,1682	0,6493	4,2283
Regresión Lineal [H(t)]	4,2434	0,7880	2,2880	-0,2234	0,6103	4,2666
Fourier 1er Armónico	4,2747	0,7848	1,0439	-0,2692	0,5294	4,2974
Fourier 2° Armónico	4,2626	0,7861	1,0498	-0,2629	0,5381	4,3086
Fourier 3° Armónico	4,2675	0,7856	1,0474	-0,2617	0,5388	4,3374
Fourier 4° Armónico	4,2618	0,7861	1,0499	-0,2560	0,5466	4,3562
Fourier 5° Armónico	4,2465	0,7877	1,0575	-0,2580	0,5439	4,3642
Fourier 6° Armónico	4,2552	0,7868	1,0532	-0,2577	0,5444	4,3971
Fourier 7° Armónico	4,2537	0,7869	1,0539	-0,2547	0,5490	4,4199
Fourier 8° Armónico	4,2557	0,7867	1,0529	-0,2543	0,5495	4,4463
Markov [H(t)]	4,3653	0,7756	2,4099	-0,1525	0,6497	4,3892

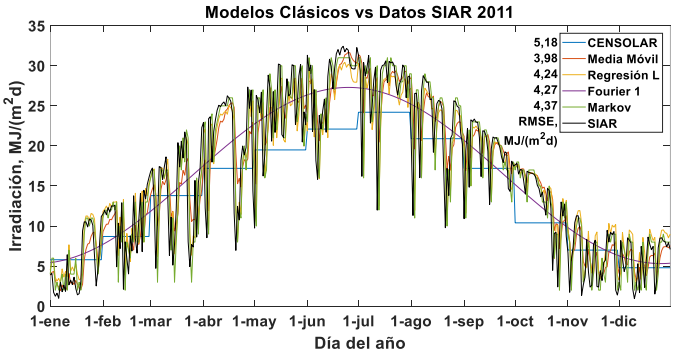


Figura 19. Modelos clásicos vs Datos año 2011 SIAR.

6. Conclusiones

Una de las características más interesantes de las redes neuronales artificiales es su capacidad de aprender y modelar un fenómeno. Para establecer la predicción, un número fijo de valores anteriores se establece como entradas de la RNA, la salida es la predicción del valor futuro de la serie de tiempo.

La predicción de la irradiación solar global que recibirá la superficie horizontal el día de mañana, se realizó utilizando las redes neuronales artificiales (RNAs), procurando el mínimo número de entradas para facilitar su uso, con datos de una estación agrometeorológica local. Se probaron los modelos más sencillos posibles, para que su utilización sea práctica en cualquier lugar, donde se disponga de una serie de datos de irradiación solar global diaria horizontal, ya sea medida en el propio lugar o como alternativa, la estimada por los satélites artificiales o desde otras variables ambientales (temperatura ambiente y horas de insolación).

En las predicciones realizadas se utilizaron los datos de irradiación solar global del día anterior, dos días y tres días de retardo, con lo que se mejora su rendimiento respecto a los modelos clásicos estudiados (año típico CENSOLAR, media móvil con 2 días de retardo, regresión lineal, análisis de Fourier y Markov), salvo la media móvil con 11 días de retardo que obtiene mejor resultado. Pero, que los modelos RNA superan a este último cuando la red utiliza como variable de entrada el día del año J(t)=[1..365] al tener conocimiento de la época del año en la que se hace la predicción. Se observa para este caso, que utilizar los datos de irradiación solar de más días de retardo ya no aporta mejora en la predicción como en los primeros modelos.

Una segunda mejora en el modelo RNA se consigue utilizando el índice de claridad $K_t=H/H_0$ como relación de la irradiación solar que incide en la superficie y la irradiación solar que llega al tope de la atmosfera, al tener conocimiento de la proporción de irradiación solar diaria que es absorbida y dispersada por la atmósfera.

Para mejorar la predicción de la irradiación solar global diaria sobre la superficie horizontal, se pretende seguir desarrollando nuevos modelos RNA: 1) Utilizando otras variables explicativas como pueden ser la humedad, la presión atmosférica, la nubosidad,… que contribuyan a detectar cambios en su evolución, principalmente, durante los días de cambios bruscos, que es donde presenta los peores resultados los modelos RNA utilizados en este artículo. 2) El estudio por separado de los datos para cada época del año que tienen características similares. 3) La mejora del rendimiento de los modelos neurales también puede realizarse a partir de las predicciones de los servicios meteorológicos en lugar de utilizar únicamente los datos históricos registrados en la zona. 4) Otra posibilidad de mejora en las predicciones es la combinación de los modelos de predicción para el aumento de su rendimiento.

Referencias

1. Gueymard C.A., Myers D.R. Validation and ranking methodologies for solar radiation models. En: Badescu V. Modeling solar radiation at the earth's surface. Springer, Berlin, 2008.
2. Camacho E.F., Berenguel M., Rubio F.R., Martínez D. Control of solar energy systems. Springer, New York, NY, 2012.
3. Gardner M.W., Dorling S.R. Artificial neural networks (the multilayer perceptron)—a review of applications in the atmospheric sciences. Atmospheric Environment. 1998, 32(14-15): 2627-2636.
4. Aitkenhead M.J., McDonald A.J.S., Dawson J.J., Couper G., Smart R.P., Billett M., Hope D., Palmer S. A novel method for training neural networks for time-series prediction in environmental systems. Ecological Modelling. 2003, 162(1-2): 87-95.
5. Lek S., Guégan J.F. Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction. Ecological Modelling. 1999, 120(2–3): 65-73.
6. Oliveira K.A., Vannucci Á., da Silva E.C. Using artificial neural networks to forecast chaotic time series. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2000, 284(1–4): 393-404.
7. Al-Alawi S.M., Al-Hinai H.A. An ANN-based approach for predicting global radiation in locations with no direct measurement instrumentation. Renewable Energy. 1998, 14(1-4): 199-204.
8. Dorvlo A.S.S., Jervase J.A., Al-Lawati A. Solar radiation estimation using artificial neural networks. Applied Energy. 2002, 71(4): 307-319.
9. Shah A., Kaushik S.C., Garg S.N. Assessment of diffuse solar energy under general sky condition using artificial neural network. Applied Energy. 2009, 86(4): 554-564.
10. Reddy K.S., Ranjan M. Solar resource estimation using artificial neural networks and comparison with other correlation models. Energy Conversion and Management. 2003, 44(15): 2519-2530.
11. Sözen A., Arcaklioglu E., Özalp M. Estimation of solar potential in turkey by artificial neural networks using meteorological and geographical data. Energy Conversion and Management. 2004, 45(18-19): 3033-3052.
12. Hontoria L., Aguilera J., Zufiria P. An application of the multilayer perceptron: Solar radiation maps in Spain. Solar Energy. 2005, 79(5): 523-530.
13. Seme S., Štumberger G., Pihler J. Predicting daily distribution of solar irradiation by neural networks. International Conference on Renewable Energies and Power Quality ICREPQ'09, Valencia, Spain, April 15-17: 275.
14. Mohandes M., Rehman S., Halawani T.O. Estimation of global solar radiation using artificial neural networks. Renewable Energy. 1998, 14(1-4): 179-184.
15. Mohandes M., Balghonaim A., Kassas M., Rehman S., Halawani T.O. Use of radial basis functions for estimating monthly mean daily solar radiation. Solar Energy. 2000, 68(2): 161-168.
16. Benghanem M., Mellit A., Alamri S.N. ANN-based modelling and estimation of daily global solar radiation data: A case study. Energy Conversion and Management. 2009, 50(7): 1644-1655.
17. Sen Z. Fuzzy algorithm for estimation of solar irradiation from sunshine duration. Solar Energy. 1998, 63(1): 39-49.
18. Tymvios F.S., Jacovides C.P., Michaelides S.C., Scouteli C. Comparative study of Ångström's and artificial neural networks' methodologies in estimating global solar radiation. Solar Energy. 2005, 78(6): 752-762.
19. Azadeh A., Maghsoudi A., Sohrabkhani S. An integrated artificial neural networks approach for predicting global radiation. Energy Conversion and Management. 2009, 50(6): 1497-1505.
20. Behrang M.A., Assareh E., Ghanbarzadeh A., Noghrehabadi A.R. The potential of different artificial neural network (ANN) techniques in daily global solar radiation modeling based on meteorological data. Solar Energy. 2010, 84(8): 1468-1480.
21. Hontoria L., Aguilera J., Zufiria P. Generation of hourly irradiation synthetic series using the neural network multilayer perceptron. Solar Energy. 2002, 72(5): 441-446.
22. Siqueira A.N., Tiba C., Fraidenraich N. Generation of daily solar irradiation by means of artificial neural networks. Renewable Energy. 2010, 35(11): 2406-2414.

23. Mellit A., Kalogirou S.A., Shaari S., Salhi H., Hadj Arab A. Methodology for predicting sequences of mean monthly clearness index and daily solar radiation data in remote areas: Application for sizing a stand-alone PV system. Renewable Energy. 2008, 33(7): 1570-1590.
24. López G., Batlles F.J., Tovar-Pescador J. Selection of input parameters to model direct solar irradiance by using artificial neural networks. Energy. 2005, 30(9): 1675-1684.
25. Pattanasethanon S., Lertsatitthanakorn C., Atthajariyakul S., Soponronnarit S. An accuracy assessment of an empirical sine model, a novel sine model and an artificial neural network model for forecasting illuminance/irradiance on horizontal plane of all sky types at Mahasarakham, Thailand. Energy Conversion and Management. 2008, 49(8): 1999-2005.
26. Mellit A. Artificial intelligence technique for modelling and forecasting of solar radiation data: A review. International Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing. 2008, 1(1): 52-76.
27. Mellit A., Benghanem M., Kalogirou S.A. An adaptive wavelet-network model for forecasting daily total solar-radiation. Applied Energy. 2006, 83(7): 705-722.
28. Mellit A., Benghanem M., Arab A.H., Guessoum A. A simplified model for generating sequences of global solar radiation data for isolated sites: Using artificial neural network and a library of Markov transition matrices approach. Solar Energy. 2005, 79(5): 469-482.
29. Cao S., Cao J. Forecast of solar irradiance using recurrent neural networks combined with wavelet analysis. Applied Thermal Engineering. 2005, 25(2-3): 161-172.
30. Cao J., Lin X. Application of the diagonal recurrent wavelet neural network to solar irradiation forecast assisted with fuzzy technique. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2008, 21(8): 1255-1263.
31. Cao J., Lin X. Study of hourly and daily solar irradiation forecast using diagonal recurrent wavelet neural networks. Energy Conversion and Management. 2008, 49(6): 1396-1406.
32. Cao J.C., Cao S.H. Study of forecasting solar irradiance using neural networks with preprocessing sample data by wavelet analysis. Energy. 2006, 31(15): 3435-3445.
33. Elminir H.K., Azzam Y.A., Younes F.I. Prediction of hourly and daily diffuse fraction using neural network, as compared to linear regression models. Energy. 2007, 32(8): 1513-1523.
34. Iqdour R., Zeroual A. The multi-layered perceptrons neural networks for the prediction of daily solar radiation. International Journal of Information and Communication Engineering. 2007, 3(1): 24-29.
35. Moghaddamnia A., Remesan R., Kashani M.H., Mohammadi M., Han D., Piri J. Comparison of LLR, MLP, Elman, NNARX and ANFIS Models—with a case study in solar radiation estimation. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2009, 71(8-9): 975-982.
36. Mellit A., Eleuch H., Benghanem M., Elaoun C., Pavan A.M. An adaptive model for predicting of global, direct and diffuse hourly solar irradiance. Energy Conversion and Management. 2010, 51(4): 771-782.
37. Ruffing S.M., Venayagamoorthy G.K. Short to medium range time series prediction of solar irradiance using an echo state network. 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems ISAP'09, Curitiba, Brazil, November 8-12: 1-6.
38. Mubiru J. Predicting total solar irradiation values using artificial neural networks. Renewable Energy. 2008, 33(10): 2329-2332.
39. Kemmoku Y., Orita S., Nakagawa S., Sakakibara T. Daily insolation forecasting using a multi-stage neural network. Solar Energy. 1999, 66(3): 193-199.
40. Hocaoğlu F.O., Gerek Ö.N., Kurban M. Hourly solar radiation forecasting using optimal coefficient 2-D linear filters and feed-forward neural networks. Solar Energy. 2008, 82(8): 714-726.
41. Mellit A., Pavan A.M. A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy. Solar Energy. 2010, 84(5): 807-821.
42. Paoli C., Voyant C., Muselli M., Nivet M. Forecasting of preprocessed daily solar radiation time series using neural networks. Solar Energy. 2010, 84(12): 2146-2160.
43. Sfetsos A., Coonick A.H. Univariate and multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques. Solar Energy. 2000, 68(2): 169-178.

44. Martín L., Zarzalejo L.F., Polo J., Navarro A., Marchante R., Cony M. Prediction of global solar irradiance based on time series analysis: Application to solar thermal power plants energy production planning. Solar Energy. 2010, 84(10): 1772-1781.
45. Zervas P.L., Sarimveis H., Palyvos J.A., Markatos N.C.G. Prediction of daily global solar irradiance on horizontal surfaces based on neural-network techniques. Renewable Energy. 2008, 33(8): 1796-1803.
46. Mihalakakou G., Santamouris M., Asimakopoulos D.N. The total solar radiation time series simulation in Athens, using neural networks. Theoretical and Applied Climatology. 2000, 66(3): 185-197.
47. Allen R.G. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO, Roma, 2006.
48. IDAE. Pliego de condiciones técnicas de instalaciones de baja temperatura. Instalaciones de energía solar térmica. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid, 2009.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Simulación del uso compartido del terreno agrícola por paneles solares fotovoltaicos y cultivo

H. X. Wang[1], M.A. Muñoz-García[2], G.P. Moreda Cantero[2], I. Molina López[2]

[1] Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China.
[2] Dpto. Ingeniería Agroforestal. LPF-TAGRALIA. ETSIAAB, UPM. Av. Puerta de Hierro, 2-4, 28040 Madrid, Spain; miguelangel.munoz@upm.es, guillermo.moreda@upm.es.

Resumen: Para mitigar una eventual competencia por el recurso suelo entre la producción agrícola y la producción eléctrica fotovoltaica ("huerto solar"), existe la posibilidad de combinar ambas actividades en un mismo terreno o parcela. En este trabajo se analiza la producción combinada agrícola-eléctrica de diferentes configuraciones de explotación *agrivoltaica*. Para el caso de coexistencia con trigo duro, se comparan diferentes separaciones entre hileras de paneles fotovoltaicos. Para el caso de paneles elevados 4 m sobre el suelo, en hileras distanciadas 6 m, valores que permiten una fácil mecanización del cultivo, la disminución del rendimiento de trigo es de solo el 6,1%, con la ventaja respecto a *solo cultivo* de la energía eléctrica obtenida. Comparando el uso independiente de una determinada superficie de terreno con el uso combinado o compartido, el uso compartido supone un aumento conjunto de la productividad del 22%.

Palabras clave: Agrivoltaico/a; Energía solar; LER; Producción eléctrica

1. Introducción

El concepto de sistema agrivoltaico fue introducido por Goetzberger y Zastrow [1], al estudiar el uso combinado de la tierra para la producción concomitante agrícola-eléctrica. Dupraz et al. [2] combinaron los términos agricultura y fotovoltaico en la contracción *agrivoltaico* (AV). La idea de sistema AV está relacionada en cierto modo con el sistema agroforestal de *intercultivo*. Este último se refiere a la asociación en una misma parcela de un cultivo anual de porte bajo que se desarrolla en las calles de una plantación forestal en líneas. En el caso del sistema AV, las hileras de árboles son sustituidas por hileras de paneles fotovoltaicos.

Marrou et al. [3] implantaron una explotación experimental AV en Montpellier (Francia), con lechuga como cultivo. Dicha instalación fue diseñada teniendo en cuenta las dimensiones habituales de la maquinaria para la mecanización de ese cultivo hortícola.

Un aspecto clave para cualquier sistema AV es determinar en qué grado se ven afectados el rendimiento e incluso la calidad del cultivo. Las explotaciones AV están empezando a recibir atención por parte de las administraciones públicas en algunos países. Por ejemplo, la mancomunidad de Massachusetts [4] establece incentivos para la producción agropecuaria y eléctrica combinada. En este caso, una de las opciones contempladas son los pastos para aprovechamiento directo in-situ del ganado.

El objetivo de este trabajo es comparar el uso independiente del terreno con el compartido o agrivoltaico, para diferentes configuraciones de sistema AV.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3404

2. Materiales y Métodos

2.1. Configuración de la instalación agrivoltaica

El diseño del sistema agrivoltaico (AV) objeto de análisis se esquematiza en la Figura 1. Los paneles, rectangulares, son de azimut e inclinación fijos. Las hileras de paneles fotovoltaicos siguen una alineación Este-Oeste, de tal forma que la cara activa de los paneles queda orientada al Sur. Los paneles se colocan en posición apaisada, es decir con el lado más largo o base del rectángulo paralelo a la dirección Este-Oeste. Denominamos *S* a la distancia entre hileras de paneles; *H* a la altura mínima de los paneles (Figura 1); *T* al ángulo de inclinación de los paneles; y *W* a la anchura de los paneles medida en verdadera magnitud (dicha anchura corresponde al lado corto de los paneles o altura del rectángulo, por la disposición apaisada).

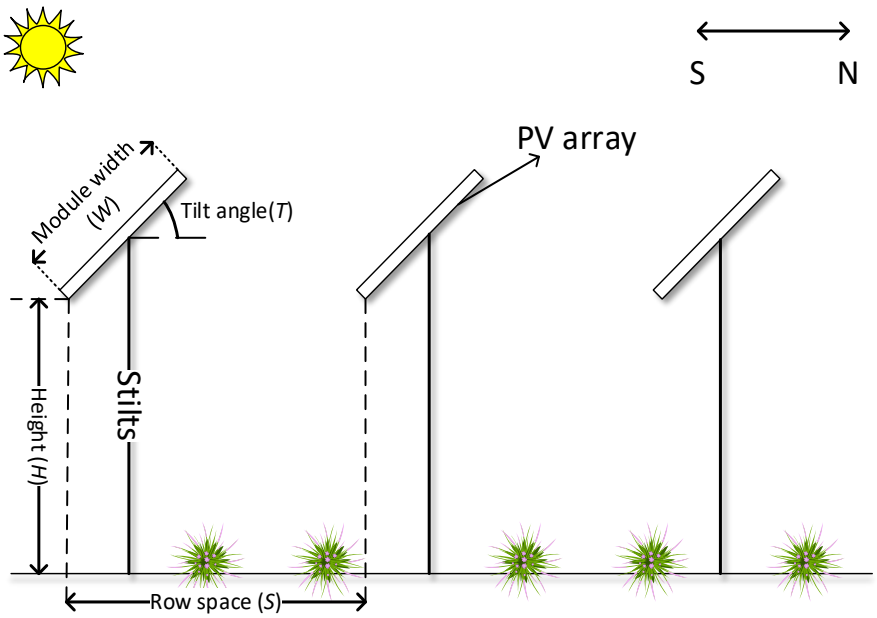


Figura 1. Configuración espacial de la instalación agrivoltaica. Los paneles fotovoltaicos se instalan elevados sobre postes (*stilts*).

Variando *S* y *H* se pueden comparar diferentes instalaciones. Cada instalación se identifica por un código alfanumérico, **S**x**H**y**T**z, en el que:

S = x (m),

H = y (m), y

T = 10·z (°)

Por ejemplo, en la Figura 2 se ha representado la instalación AV de tipo S6H4T3.

Conviene utilizar el índice conocido como grado o relación de cobertura del suelo, (*ground coverage ratio*, GCR), definido como:

GCR = W/S

En general, dependiendo del cultivo considerado y la maquinaria necesaria para la mecanización de las labores de cultivo, será preferible una geometría u otra de la instalación AV. En la Tabla 1 se han resumido algunos parámetros esenciales de tres instalaciones AV. Por ejemplo, el grado de cobertura del suelo (CGR) para la instalación S6H4T3 es del 17%.

Tabla 1. Configuración de tres posibles instalaciones agrivoltaicas.

Instalación	Nº paneles/fila	Nº de filas en paralelo	Potencia FV instalada (W)	Nº de inversores	Superficie del sistema FV (m^2)	Grado de cobertura del suelo, *GCR* (%)
S15H4T3	12	8	96×230	4	158,4	67
S3H4T3	12	4	48×230	2	79,2	33
S6H4T3	12	2	24×230	1	39,6	17

El panel fotovoltaico (FV) considerado para nuestro análisis es un módulo monofacial de silicio multicristalino, concretamente el 'Suntech STP 230', que mide 1,65 m × 1 m y desarrolla una potencia nominal de 230 Wp.

La localización considerada para el análisis es Madrid, concretamente una parcela de 240 m^2 (Figura 2) con una latitud de 40,4426 °N y una longitud de 3,7295 °O. Se ha tomado un ángulo de inclinación de los paneles de acuerdo con el criterio general de *la latitud menos 10 °*, es decir, aproximadamente 30 °.

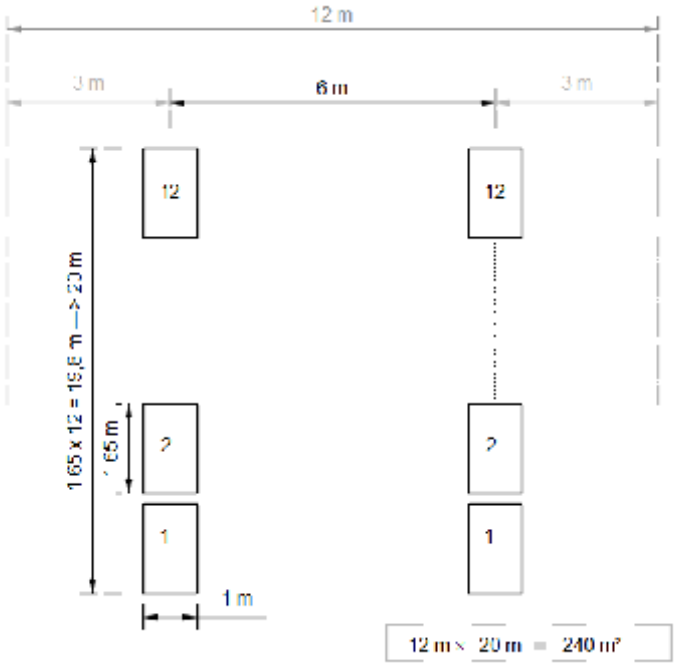


Figura 2. Vista en planta modificada* de la superficie correspondiente a dos hileras de paneles fotovoltaicos de la instalación agrivoltaica S6H4T3 (*modificación consistente en paneles proyectados en planta como si su ángulo de inclinación fuese nulo, para correspondencia con la fórmula de la GCR, o relación de cobertura del suelo).

3. Resultados y Discusión

3.1. Patrones de sombreo espacio-temporal

Se ha empleado el simulador SAM [5] para estimar la irradiación interceptada por el cultivo. Tanto H como S (Figura 3) afectan a la radiación que llega al suelo o al cultivo.

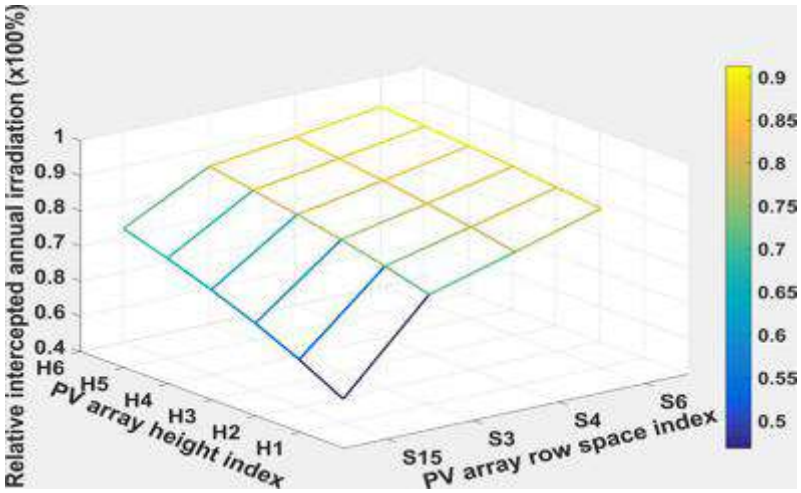


Figura 3. Resultado de la simulación con SAM [5] de la irradiación anual relativa interceptada por el cultivo en función de la separación entre hileras de paneles FV y su altura.

En promedio de las cuatro instalaciones comparadas, la desviación típica de la irradiación interceptada por el cultivo resultó del 12%, un valor mayor que el correspondiente a las seis alturas comparadas, 5,1%. De cara al diseño de instalaciones AV, esto sugiere que la separación entre hileras de paneles es más relevante que su altura.

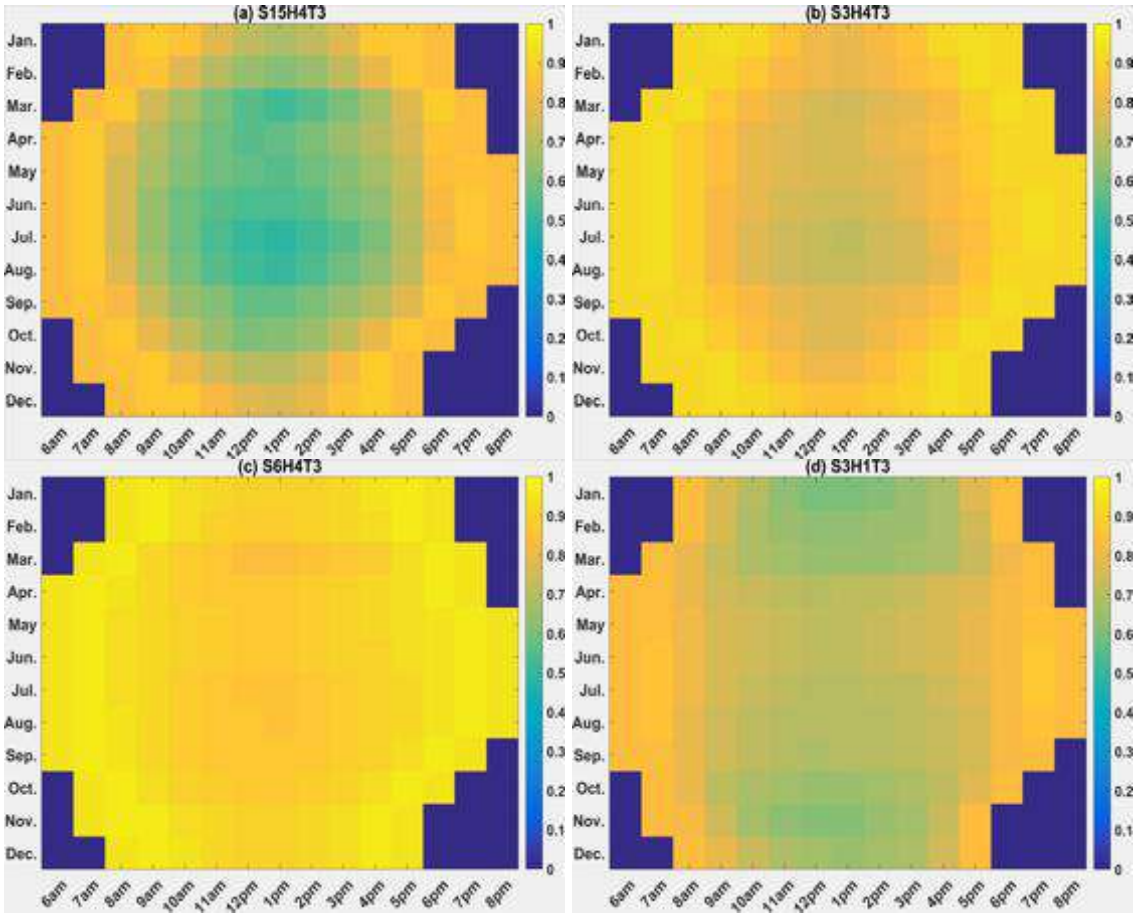


Figura 4. Fracción unitaria de irradiación interceptada por el cultivo en instalaciones AV con 30° de inclinación de paneles y de: (a) 1,5 m de separación S entre hileras de paneles y 4 m de altura H de los paneles; (b) 3 m de separación y 4 m de altura; análogo significado para (c) y (d).

La irradiación interceptada por el cultivo varía con el día-hora y la geometría de la instalación AV (Figura 4). Las instalaciones con la misma altura de paneles (H= 4 m en la Figura 4) muestran un patrón de sombreo temporal o cronológico similar. Esto se manifiesta en una menor irradiación disponible a nivel del suelo o del cultivo coincidiendo con la altura solar máxima (mediodía del solsticio de verano). En un día cualquiera del año, las instalaciones con la misma S pero distinta H (Figura 4 b y d) muestran un patrón de sombreo horario similar.

3.2. Estimación de la producción agrícola

La producción de trigo duro fue estimada mediante el simulador STICS [6]. Como datos para el modelo de simulación se estimó una densidad de cultivo de 221 plantas/m^2, explotación de regadío, tal que el agua no sea un factor limitante y tampoco lo sea el abonado nitrogenado. En la Tabla 2 se muestra el valor de *materia seca acumulada en el grano* obtenido para cada condición de cultivo (explotación AV), expresado en términos relativos respecto a uso del suelo solo para producción de trigo.

Tabla 2. Producción relativa de trigo duro de cuatro explotaciones agrivoltaicas respecto al uso exclusivo agrícola del suelo (trigo solo).

Explotación	Irradiación anual interceptada por el cultivo (%)	Producción de grano - materia seca- (%)
Trigo solo	100	100
S15H4T3	64,1	77,8
S3H1T3	71,2	82,7
S3H4T3	80,2	88,7
S6H4T3	89,2	93,9

Un aspecto a destacar de la Tabla 2 es que proporcionalmente la disminución del rendimiento es menor en comparación con la de la irradiación interceptada. Esto sugiere un posible aumento de la eficiencia del trigo duro en el aprovechamiento del recurso solar ante restricciones del mismo motivadas por el sombreo.

3.3. Estimación de la producción eléctrica

La producción eléctrica de tres explotaciones AV de 240 m^2, todas con una inclinación de paneles de 30° (Tabla 3), fue estimado con el simulador SAM [5].

Debido al menor auto-sombreamiento que acompaña a la disminución en la densidad de paneles, la correspondiente eficiencia del sistema FV se ve incrementada. Por ello, al comparar densidades de paneles que son doble unas de otras, la producción anual de energía eléctrica no es exactamente el doble (Tabla 3).

Tabla 3. Producción anual de energía eléctrica fotovoltaica e índices de eficiencia de tres explotaciones agrivoltaicas, para parcela de 240 m^2.

Explotación	EDC (kWh)	EAC (kWh)	Eficiencia del campo de paneles FV (%)	Eficiencia del sistema FV (%)	PR AC (%)
S15H4T3	31718	30215	10,80	10,29	74,03
S3H4T3	17731	16879	12,07	11,49	82,66
S6H4T3	8910	8479	12,13	11,55	83,09

3.4. Producción combinada agrícola-eléctrica

Para analizar la productividad conjunta del cultivo y la instalación FV, se ha utilizado el indicador conocido como *relación equivalente de suelo*, o *land equivalent ratio*, LER. Este índice, que típicamente toma valores en torno a 1, se utiliza habitualmente en asociaciones de cultivos como p. ej. las de tipo agroforestal. La expresión matemática de la LER para el caso que nos ocupa es, eq. [1] :

$$\mathrm{LER}=\frac{Y_{\text{cultivo, AV}}}{Y_{\text{cultivo solo}}}+\frac{Y_{\text{electricidad, AV}}}{Y_{\text{electricidad, FV}}} \quad [1]$$

siendo Y la producción o rendimiento (en inglés, *yield*)

La idea subyacente en la LER es que para una determinada superficie de terreno disponible, p. ej., 2 ha, puede resultar globalmente más productivo compartir el uso del suelo entre el cultivo y los paneles FV elevados que destinar 1 ha a un campo de trigo y la otra 1 ha a parque o 'huerto solar'.

Dado que la explotación AV S15H4T3 presenta la misma separación entre hileras de paneles que una planta FV convencional, su capacidad de producción eléctrica para una superficie de parcela AV de 240 m^2 es máxima. Suponiendo que el hecho de elevar 4 m los paneles sobre el suelo no altera la producción eléctrica en comparación con un parque solar convencional o S15H1T3 (quizá a 4 m el efecto perjudicial de las altas temperaturas sería menor, debido a la mayor velocidad del viento a esa distancia del suelo), ambas configuraciones se incluyen en la Tabla 4 como máximo al que referir las demás. Igualmente, la condición de *solo trigo* se toma como producción máxima a la que referir el resto.

A partir de los datos de las tablas 2 y 3 se ha obtenido la LER de cuatro explotaciones AV. Como se observa en la Tabla 4, las explotaciones AV son eficientes en el uso del suelo: Incluso la de menor densidad de paneles (S6H4T3), supone un aumento del 22% en dicha eficiencia. En particular, una ventaja productiva de una instalación o explotación AV es que en el periodo en el que la tierra descansa del cultivo, en nuestro caso desde la recolección del trigo hasta el comienzo de la preparación del suelo para la siguiente siembra (o la propia siembra si se practica *laboreo cero*), la parcela sigue produciendo energía eléctrica.

Tabla 4. Relación equivalente de suelo (LER) de cuatro explotaciones agrivoltaicas.

Sistema	**Producción eléctrica relativa**	**Fracción unitaria de producción de grano - materia seca- respecto al máximo posible**	**LER**
Trigo solo	0	1	1
Planta FV sin cultivo	1	0	1
S15H4T3	1	0,75	1,75
S3H1T3	0,56	0,82	1,38
S3H4T3	0,56	0,87	1,43
S6H4T3	0,28	0,94	1,22

4. Conclusiones

Se ha llevado a cabo una simulación de la producción concomitante de trigo duro y energía eléctrica para diferentes configuraciones de explotación agrivoltaica (AV), en Madrid. Se ha determinado que:

- El efecto de la separación entre hileras de paneles fotovoltaicos (FV) sobre la irradiación interceptada por el cultivo es mayor que el de la altura de los paneles
- En una explotación AV con una superficie de paneles FV del 17% del área de la parcela, el rendimiento de trigo duro disminuye un 6,1% respecto a un campo con solo el cultivo
- Para una superficie de paneles del 17% del área de la parcela, la productividad conjunta es un 22% mayor que con el cultivo y la instalación FV por separado, o lo que es lo mismo, se consigue la misma producción eléctrica y agrícola con un 22% menos de superficie si ambas actividades comparten terreno

Referencias

1. Goetzberger, A., Zastrow, A. On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy* 1(1). 1982, 55-69.
2. Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., Ferard, Y. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy* 36(10). 2011, 2725-32.
3. Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., Dupraz, C. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *Europ. J. Agronomy*, 44. 2013, 54-66.
4. Commonwealth of Massachusetts. Solar Massachusetts renewable target program: Guideline regarding the definition of agricultural solar tariff generation units. 2018.
5. National Renewable Energy Laboratory. System Advisor Model v. 2017.1.17 (SAM 2017.1.17). NREL, Golden, Colo., USA. 2017.
6. Institut National de la Recherche Agronomique. STICS v. 8.41. Simulateur mulTIdisciplinaire les Cultures Standard (STICS application). INRA Paris, France. 2017.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Sostenibilidad ambiental del riego con agua marina desalinizada y reutilización de drenajes en tomate bajo invernadero

B. Martin-Gorriz[1], J. F. Francisco Maestre-Valero[1], B. Gallego-Elvira[1], V. Martínez-Alvarez[1]

[1] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena, Spain; e-mail: b.martin@upct.es

Resumen: La incorporación de agua marina desalinizada (AMD) al sureste español es la principal estrategia recogida en la planificación hídrica española con el fin de hacer frente a su déficit estructural de agua, que afecta principalmente al regadío. Este trabajo analiza la sostenibilidad medioambiental del riego con AMD en sistemas hidropónicos con reutilización de drenajes para el cultivo de tomate bajo invernadero. La metodología aplicada se basa en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de acuerdo con la normativa ISO 14040. Esta metodología atribuye al producto final todos los efectos ambientales derivados del consumo de materias primas y de energías necesarias para su manufactura, las emisiones y residuos generados en el proceso de producción, así como los efectos ambientales procedentes del fin de vida del producto cuando éste se consume o ya no se puede utilizar. La metodología ha sido aplicada con los datos experimentales obtenidos mediante ensayos en el marco del proyecto LIFE-DESEACROP en la Fundación Finca Experimental UAL-ANECOOP, Retamar (Almería) y analiza específicamente y de forma comparativa los efectos de (1) las fuentes de agua convencionales frente al riego con AMD, y (2) los sistemas con reutilización de drenajes frente a los sistemas que vierten los drenajes al subsuelo. Los impactos ambientales analizados han sido el potencial de calentamiento global, el potencial de acidificación del suelo y el agua, el potencial de eutrofización, y el potencial de agotamiento de recursos abióticos. También se han incluido en el análisis dos indicadores de especial relevancia en la producción agrícola como la eficiencia del uso del agua y la demanda de energía acumulada. Como conclusiones del trabajo cabe destacar que, (1) el empleo de agua AMD supone un aumento leve del impacto ambiental en la mayoría de categorías de impacto analizadas (<5%); (2) el cultivo hidropónico tiene una mayor eficiencia del uso del agua que el cultivo en suelo (14%) y (3) la reutilización de drenajes reduce la acidificación, eutrofización y agotamiento de recursos, pero aumenta el calentamiento global y la demanda de energía acumulada.

Palabras clave: Análisis ciclo vida; sostenibilidad ambiental; emisiones de efecto invernadero; aguas no convencionales.

1. Introducción

La agricultura, además de ser competitiva para producir alimentos de alta calidad, debe ser sostenible [1, 2]. Para mejorar la sostenibilidad se requiere un mayor conocimiento sobre los impactos ambientales de las actividades agrícolas habituales. El análisis del ciclo de vida (ACV), es una metodología ampliamente aceptada para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad y, en base a ellas diagnosticar su sostenibilidad ambiental. Además, permite evaluar y llevar a la práctica estrategias de mitigación. Diversos autores han utilizado esta

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3289

metodología para comparar diferentes sistemas de producción de tomate bajo invernadero [3, 4, 5, 6]. Algunos de ellos se han centrado exclusivamente en determinar la huella de carbono en el cultivo hidropónico de tomate [4, 7], y muy pocos [8], en comparar la sostenibilidad del cultivo de tomate entre sistemas con sustrato y con recirculación de drenaje; por lo que la novedad que presenta este trabajo es la valoración conjunta del efecto del uso de agua desalinizada y la reutilización del drenaje en la sostenibilidad del cultivo de tomate en invernadero.

2. Materiales y métodos

Este trabajo analiza la sostenibilidad medioambiental del riego con AMD (agua marina desalinizada) en sistemas hidropónicos con reutilización de drenajes para el cultivo de tomate bajo invernadero, a partir de los datos experimentales obtenidos en un ensayo realizado en la Fundación Finca Experimental UAL-ANECOOP, Retamar (Almería).

En el estudio se analiza específicamente y de forma comparativa los efectos de (1) las fuentes de agua convencionales frente al riego con AMD, y (2) los sistemas con reutilización de drenajes frente a los sistemas que vierten los drenajes al subsuelo. Para cuantificar el punto (1), *i.e.* las diferencias entre el uso de AMD y aguas salobres disponibles en la zona de estudio, se realizaron tres tratamientos con diferente salinidad: uno con agua desalinizada suministrada por la planta desaladora de Carboneras (T1), y otros dos con aguas de mayor conductividad (T2 y T3) obtenidos por mezcla de AMD y agua salobre de pozo. Para cuantificar el punto (2), *i.e.* el impacto de la recirculación de drenajes frente a sistemas abiertos, se instaló un módulo de osmosis inversa alimentado por placas solares que permitió reutilizar parcialmente el agua de los drenajes.

Los ensayos se llevaron a cabo en un invernadero de raspa y amagado tipo Almería sin calefacción y con ventilación cenital natural automatizada. Se utilizaron dos sistemas de cultivo: enarenado tradicional de la zona como sistema sin reutilización de drenajes; y cultivo hidropónico en fibra de coco con sistema con reutilización de drenajes. Los resultados que se muestran en este estudio corresponden al cultivo con plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L. cv. Ramyle) realizado durante un ciclo otoño-primavera (2018-2019).

2.1. Analisis de ciclo de vida

Para el análisis se ha utilizado la metodología de ACV de acuerdo con la normativa ISO 14040. El ACV es un proceso objetivo que permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto o cultivo agrícola, identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno, con el fin de determinar el impacto que ese uso de recursos y esos vertidos producen al medio ambiente. Además, permite evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental, así como brindar soporte para la toma de decisiones más rentables, sostenibles y eficientes. Para ello es necesario cuantificar los consumos de materias primas y energía junto con todos los residuos sólidos, emisiones a la atmósfera y vertidos al agua derivados de cada uno de los dos sistemas de producción estudiados. En el caso de los sistemas agrícolas la principal función es la producción de alimentos [9], por tanto, se ha considerado como unidad funcional (FU) de referencia la producción comercial de tomate (1 kg de peso fresco comercial).

2.2. Categorias de impacto

Las categorías de impacto analizadas (Tabla 1) han sido seleccionadas por su relevancia en los procesos agrícolas. Las emisiones relacionadas con procesos agrícolas, las infraestructuras y los fertilizantes son los principales contribuidores al cambio climático. Las emisiones de amonio y nitratos debido al empleo de fertilizantes nitrogenados contribuyen de forma significativa a las categorías eutrofización y acidificación. El agotamiento de recursos abióticos y energéticos naturales se encuentra relacionado con la extracción de minerales y combustibles fósiles, que se producen en la fabricación de los materiales empleados en los sistemas de producción agrícola.

Por último, se ha considerado la eficiencia del uso del agua, que es un buen indicador del aprovechamiento de los recursos hídricos. Para la evaluación de las categorías de impacto (Tabla 1) se ha utilizado la metodología CML-IA [10] con el software SimaPro 8.5 [11].

Tabla 1. Categorías de impacto consideradas en el análisis.

Categoría de impacto	Acrónimo	Unidad
Agotamiento de recursos	ADP	kg Sb_{eq}/FU*
Calentamiento global	GWP	kg CO_2 eq/FU
Acidificación	AP	kg SO_2 eq/FU
Eutrofización	EP	kg $PO^{-3}{}_4$ eq/FU
Demanda de energía	CED	MJ/FU
Eficiencia del uso del agua	WU	FU/m^3

*UF: Unidad Funcional.

2.3. Inventario de entradas-salidas

El inventario del Ciclo de Vida permite cuantificar los consumos de materias primas y energía junto con todos los residuos sólidos, emisiones a la atmósfera y vertidos al agua (cargas medioambientales) derivados de todos los procesos que están dentro de los sistemas de producción del tomate considerados. En la Tabla 2 se muestra el inventario de entradas y salidas del ensayo para cada uno de los sistemas de cultivo.

Tabla 2. Inventario de entradas y salidas en los sistemas de cultivo analizados.

Entradas / salidas	Unidades por ciclo	Sistema de cultivo	
		Sin recirculación del drenaje (enarenado)	Con recirculación del drenaje (fibra de coco)
Agua para riego	L/m2	278	278
Drenaje (estimado)	%	5%	-
Lixiviado	%	-	20%
Consumo especifico por fuente de agua:			
- T1: agua desalada (1 ds/m)	kWh/m3	4.98	4.98
- T2 agua mezcla (2 ds/m)	kWh/m3	3.69	3.69
- T3: agua mezcla (3 ds/m)	kWh/m3	1.77	1.77
Fertilizantes:			
- N	g/m2	260	260
- P2O5	g/m2	180	180
- K2O	g/m2	490	490
Pesticidas:			
- Insecticidas	g/m2	38	38
- Fungicidas	g/m2	285	285
Sustratos:			
- Estiércol para enarenado	Kg/m2	2.53	-
- Fibra de coco	Kg/m2	-	1.0
Producción	Kg/m2	7.21	8.97
Duración ciclo	días	163	163
Densidad de plantación	Plantas/m2	2	2

Otros datos necesarios para el cálculo de las emisiones han sido obtenidos de la base de datos Ecoinvent 3.5. [12], incluyendo la fabricación de los materiales necesarios para la construcción del invernadero y material plástico utilizado en los sistemas de cultivo, y los materiales empleados en la instalación del equipo de riego, equipo de tratamiento de lixiviado,

etc., así como la fabricación de fertilizantes y pesticidas, producción de electricidad, transporte de materiales y residuos a planta de procesado. Por otra parte, las emisiones de N (NH_3; N_2O; NO_3) al aire y agua, y P (PO_4) al agua durante la fase de producción del tomate fueron calculadas siguiendo la metodología propuesta en [13, 14].

Para poder realizar una evaluación ambiental detallada, el proceso de producción ha sido dividido en cuatro fases: (1) Estructura del invernadero, (2) Equipo auxiliar, (3) Fertilizantes y pesticidas y (4) Manejo del cultivo. En la Fig. 1 se muestra el diagrama de flujo para las fases consideradas en la producción de tomate.

En la *estructura del invernadero* se ha tenido en cuenta la fabricación y transporte del material necesario para crear la estructura y construcción del invernadero y material plástico de la cubierta, pared etc. Esta información ha sido obtenida de la base de datos Ecoinvent 3.5 para un invernadero de características similares al utilizado en el ensayo. En dicha base de datos se consideran las emisiones producidas en la fabricación de los materiales empleados, su extracción y transporte hasta el lugar de producción; así como la gestión de todos los residuos generados al final de la vida útil de la estructura, incluyendo su transporte hasta planta gestora.

En el *equipo auxiliar* se han considerado todos los materiales empleados en la fabricación de los elementos necesarios en el sistema de riego, así como el transporte de los mismos y la energía consumida por el funcionamiento del sistema de riego. Los materiales empleados en este proceso fueron: acero en las bombas de riego e inyectores; polietileno en tuberías, válvulas y depósitos, incluido el transporte (tipo de vehículo y km recorridos); y el consumo eléctrico asociado al uso del agua, tanto dentro del invernadero para realizar el riego, como fuera para producirla y/o transportarla. De igual manera que en la fase de *estructura del invernadero*, se ha considerado la gestión de los residuos al final de la vida útil.

En *fertilizantes y pesticidas* se ha incluido, para los fertilizantes, su proceso de fabricación, las cantidades totales de nitrógeno (N), fósforo (P_2O_5) y potasio (K_2O) aplicadas durante el ciclo de cultivo, así como las emisiones de amoniaco (NH_3), monóxido de dinitrógeno (N_2O) y óxidos de nitrógeno (NO_x) al aire y lixiviación de nitratos (NO_3) y fosfatos (PO_4) al agua. En esta fase también se han considerado, para el sistema de reutilización de drenajes, la planta de osmosis para el tratamiento del lixiviado; con lo que se evita la contaminación de nitratos y fosfatos al subsuelo. En la planta de osmosis no se ha considerado el consumo de energía eléctrica puesto que disponía de paneles solares para su funcionamiento. Respecto a los pesticidas, se ha incluido su fabricación, transporte y el uso de maquinaria y energía consumida para su aplicación.

En *manejo del cultivo*, para ambos sistemas de cultivo se ha considerado el plástico del suelo, cuerdas, etc. En el cultivo enarenado se ha incluido el tractor y maquinaria empleada para realizar el enarenado, incluido el combustible; así como el estiércol y las emisiones producidas por el mismo [emisiones de amoniaco (NH_3) y monóxido de dinitrógeno (N_2O) y óxidos de nitrógeno (NO_x) al aire y lixiviación de nitratos (NO_3) al agua]. En el cultivo hidropónico se incluyen los sacos de fibra de coco; su procesado y transporte, así como las canaletas y otros materiales plásticos específicos para el riego en hidropónico. Como residuos, para ambos tipos de sustrato, se han considerado el transporte y gestión de la biomasa (40% humedad) de las plantas al final del ciclo, enviadas al centro de compostaje, y los plásticos al centro de gestión. Para el cultivo hidropónico se ha tenido en cuenta también el transporte de la fibra de coco y plásticos (canaletas, etc.) al centro de gestión.

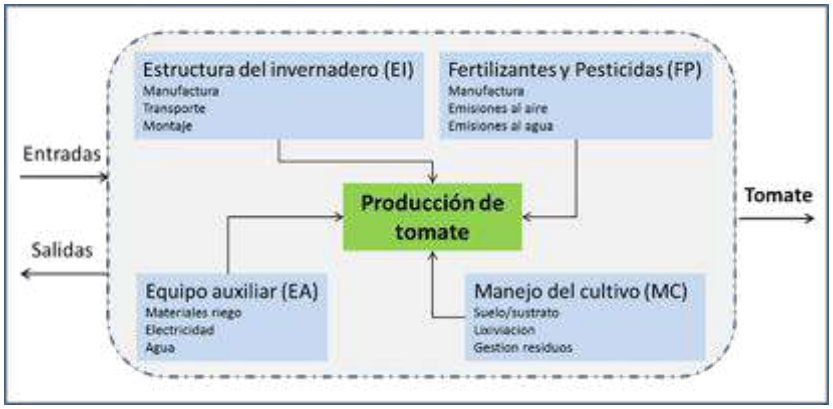


Figura 1. Diagrama de flujo para las fases consideradas en la producción de tomate.

3. Resultados y discusión

En la Tabla 3 se muestran los impactos ambientales de la producción de 1 kg de tomate en los dos sistemas de cultivo y tres tratamientos considerados. El uso de AMD frente a agua salobre, tanto en cultivo enarenado como en cultivo hidropónico, produjo un incremento leve del impacto ambiental en todas las categorías de impacto que se atribuyó principalmente a que el impacto asociado al volumen de agua empleado en el cultivo fue bajo en comparación con otros inputs. Incluso en los tratamientos que utilizaron mayor volumen de AMD (T1S y T1F frente a T3S y T3F), que conllevaron un mayor consumo de energía específica, los incrementos en todas las categorías de impacto fueron inferiores al 5%, exceptuando la CED, donde se alcanzó el 10% entre T1S y T3S. La intensificación de los sistemas agrícolas, como en el caso de los cultivos hidropónicos, incrementaron el requerimiento de energía fósil que repercutió directamente en las categorías de impacto relacionadas como CED y GWP [15, 16].

La reutilización de los drenajes en los sistemas de cultivo hidropónico redujo la AP, EP y ADP en un 28, 27 y 20 %, respectivamente, frente a los sistema de cultivo en suelo, independientemente del tratamiento de riego; pero aumentó el impacto en GWP y CED en un 14 y 6% respectivamente (Tabla 3). Nuestros resultados están en línea con los obtenidos por [8], quienes evaluaron el impacto ambiental de tres sistemas de cultivo de tomate en invernadero, *i. e.* cultivo en suelo y cultivo hidropónico en ciclo cerrado y abierto. Sin embargo, no es posible comparar directamente los valores obtenidos porque tanto la metodología utilizada como las fases del proceso fueron diferentes.

Tabla 3. Comparación de los impactos ambientales de la producción de 1 kg de tomate en los seis sistemas de cultivo considerados.

Categoría impacto	Unidad	T1S	T1F	T2S	T2F	T3S	T3F
ADP	kg Sb_{eq}/FU	1.07E-05	8.60E-06	1.06E-05	8.48E-06	1.03E-05	8.31E-06
GWP	kg $CO_{2\ eq}$/FU	0.383	0.432	0.380	0.430	0.375	0.426
AP	kg $SO_{2\ eq}$/FU	2.16E-03	1.58E-03	2.16E-03	1.58E-03	2.16E-03	1.58E-03
EP	kg $PO^{-3}{}_{4\ eq}$/FU	8.71E-04	6.34E-04	8.55E-04	6.21E-04	8.30E-04	6.02E-04
CED	MJ/FU	7.65	7.94	7.38	7.72	6.96	7.38
WU	FU/m^3	25.6	37.0	25.6	37.0	25.6	37.0

T1S: cultivo en enarenado regado con agua desalada; T1F: cultivo en fibra de coco regado con agua marina desalada; T2S: cultivo en enarenado regado con agua de pozo; T2F: cultivo en fibra de coco regado con agua de pozo; T3S: cultivo en enarenado regado con agua mezcla; T3F: cultivo en fibra de coco regado con agua mezcla.

WU fue mayor en los sistemas de cultivo hidropónico que en los sistemas de enarenado (37.0 frente a 25.6 kg/m^3), debido a la recuperación del 20% del lixiviado (Tabla 3). Este lixiviado fue tratado en la planta de osmosis, con un rechazo medio de un 30%, lo que supuso un ahorro de agua del 14%. Este resultado coincide con el obtenido por otros autores como [16], que indicaron una mayor eficiencia del uso del agua en el cultivo hidropónico de lechuga frente al cultivo en suelo.

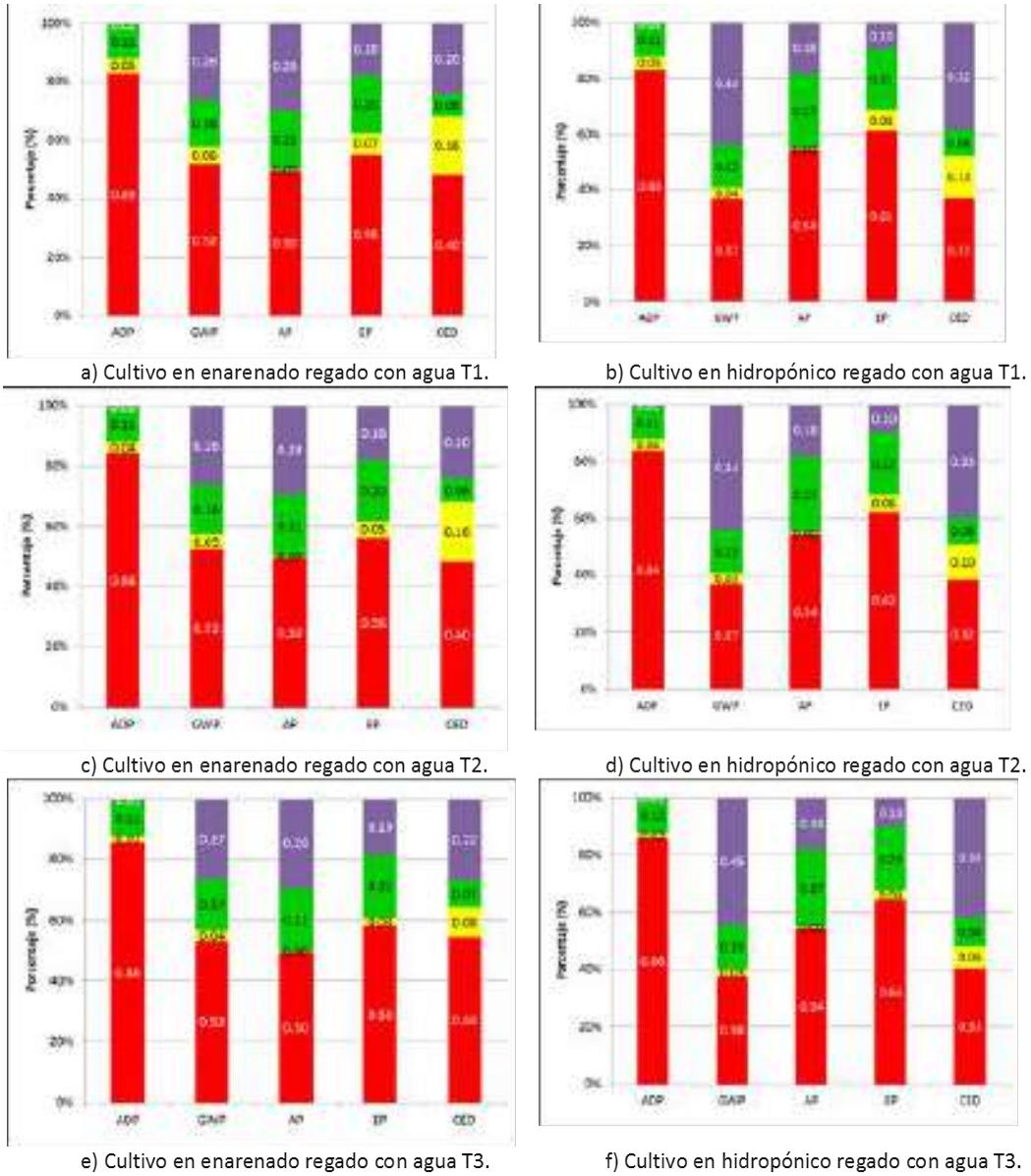


Figura 2. Contribución ambiental de cada fase (estructura del invernadero: barras rojas; equipamiento auxiliar: barras amarillas; fertilizantes y pesticidas: barras verdes; manejo del cultivo: barras lilas) para las categorías de impacto consideradas (ADP: agotamiento de recursos; GWP: calentamiento global, AP: acidificación, EP: eutrofización; CED: demanda de energía) en las 6 estrategias de producción de tomate bajo invernadero. T1: agua procedente de desaladora; T2 y T3 mezclas de agua de desaladora y agua de pozo.

La Fig. 2 muestra la contribución de cada fase del proceso en las categorías de impacto seleccionadas, para cada uno de los seis sistemas de producción de tomate bajo invernadero considerados. La *estructura de invernadero* (barras rojas en Fig. 2) es la fase con mayor carga ambiental en la mayoría de categorías. Destaca con mayor relevancia en la categoría de ADP debido a la alta cantidad de materiales empleados, como acero en la estructura y plástico en la cubierta. Por otra parte, la fase de *manejo del cultivo* (barras lilas en Fig. 2) comparativamente tiene mayor importancia en las categorías de impacto GWP y CED en los sistemas de cultivo hidropónico que en los sistemas de cultivo en suelo (sistemas *b, d* y *f* frente a sistemas *a, c* y *e* en Fig. 2); siendo el 44% en GWP y el 32% en CED en los sistemas de cultivo hidropónico, mientras que en los sistemas de cultivo en suelo fue del 27 (GWP) y 20% (CED). Esto se debió principalmente al elevado consumo de energía en la fabricación de los plásticos utilizados y al procesado y transporte de la fibra de coco. Sin embargo, en los sistemas de cultivo hidropónico (*b, d* y *f* en Fig. 2) se redujo el impacto ambiental frente al cultivo en suelo en las categorías AP y EP, que pasaron de AP = 29% y EP = 18% a AP = 18% y EP = 10% como consecuencia de la recuperación del lixiviado de NO_3 y PO_4 del agua de riego.

4. Conclusiones

Las principales conclusiones del presente trabajo son:

- El empleo de AMD supone un aumento leve (inferior al 5%) del impacto ambiental en la mayoría de categorías de impacto analizadas.
- La reutilización de drenajes reduce la acidificación, eutrofización y agotamiento de recursos, pero aumenta el calentamiento global y demanda de energía acumulada.
- El cultivo hidropónico con reutilización de drenajes permite incrementar en un 44% la eficiencia en el uso del agua con respecto al cultivo en suelo.

5. Agradecimientos

Trabajo financiado por el Programa LIFE de la Unión Europea a través del proyecto DESEACROP (LIFE16-ENV-ES-000341).

Referencias

1. CEC (Commission of the European Communities). Directions towards sustainable agriculture. 1999. Commission of the European Communities, Bruselas, Países Bajos.
2. UN-DSD (United Nations Division for Sustainable Development). 2000. Agenda 21. Chapter 14: Promoting sustainable agriculture and rural development. United Nations (UN), Nueva York, Estados Unidos.
3. Cellura M., Longo S., Mistretta M. Life cycle assessment (LCA) of protected crops: an Italian case study. 2012. J. Clean. Prod. 28, 56–62.
4. Ntinas G., Neumair M., Tsadilas C., Meyer J. Carbon footprint and cumulative energy demand of greenhouse and open-field tomato cultivation systems under Southern and Central European climatic conditions. 2017. J. Clean. Prod. 142, 3617–3626.
5. Perez D., Soler M., Delgado M., Reigada A. Energy use and carbon footprint of the tomato production in heated multi-tunnel greenhouses in Almeria within an exporting agri-food system context. 2018. Sci. Total Environ. 2018, 628, 1627–1636.
6. Torrellas M., Antón A., López J.C., Baeza E.J., Pérez-Parra J., Muñoz P., Montero J.I. LCA of a tomato crop in a multi-tunnel greenhouse in Almería. Int. J. Life Cycle Assess. 2012, 17, 863–875.
7. Page G., Ridoutt B., Bellotti B. Carbon and water footprint tradeoffs in fresh tomato production. 2012. J. Clean. Prod. 32, 219–226.
8. Antón A., Montero J.I., Muñoz P., Castells F. LCA and tomato production in Mediterranean greenhouses, Int. J. Agric. Resour. Gov. Ecol. 2005, 4 (2), 102–112.
9. Audsley E., Alber S., Clift R., Cowell S., Crettaz P., Gaillard G., Hausheer J., Jolliet O., Kleijn R., Mortensen B., Pearce D., Roger E., Teulon H., Weidema B., van Zeijts H. 1997. Harmonisation of

environmental life cycle assessment for agriculture. Final report concerted action AIR3- CT94-2028. European Commission DG VI Agriculture, Reino Unido.

10. Guinée J.B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M.A.J. 2002. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Part III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 692 p.
11. PRe Consultants, 2018 [www.pre-sustainability.com]
12. Ecoinvent, 2018. Ecoinvent Data. Swiss Centre for Life Cycle Inventories [http://www.ecoinvent.org]
13. Audsley E. Systematic procedures for calculating agricultural performance data for comparing systems. 2000. En: Weidema, B., Meeusen, M. (eds.). Agricultural data for life cycle assessments, 1, 35–46. Agricultural Economics Research Institute, La Haya, Países Bajos.
14. Brentrup F., Küsters J., Lammel J., Kuhlmann H. Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector. Int. J. Life Cycle Assess. 2000, 5(6), 349–357.
15. Castoldi N., Bechini L., Ferrante A. Fossil energy usage for the production of baby leaves. Energy, 2011, 36, 86–93.
16. Martinez-Mate M.A., Martin-Gorriz B., Martínez-Alvarez V., Soto-García M., Maestre-Valero J.F. Hydroponic system and desalinated seawater as an alternative farm-productive proposal in water scarcity areas: energy and greenhouse gas emissions analysis of lettuce production in southeast Spain. J. Clean. Prod. 2018, 172, 1298–1310.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Uso de energía solar fotovoltaica aplicada a la refrigeración de un invernadero

I. Molina López[1], M.A. Muñoz-García[1], R. Moratiel-Yugueros[2], G. P. Moreda Cantero[1]

[1] Dpto. Ingeniería Agroforestal. LPF-TAGRALIA. ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid. Av. Puerta de Hierro, 2-4, 28040 Madrid, Spain; irene.molinalo@alumnos.upm.es, miguelangel.munoz@upm.es.

[2] Dpto. Producción Agraria. ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Puerta de Hierro, 2-4, 28040 Madrid, Spain.

Resumen: Las energías renovables son imprescindibles para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En el ámbito agrario, los invernaderos suponen un gasto de energía elevado debido, principalmente, a un uso poco eficiente de la misma. Su tecnificación debe incluir estrategias de ahorro energético incluyendo sistemas pasivos para reducir el coste que supone la refrigeración y calefacción, así como estrategias de reducción de la huella de carbono. El invernadero objeto del estudio se sitúa en Madrid y, aunque cuenta con sistemas pasivos, son insuficientes para el fin para el que se utiliza -la producción de gerbera para flor cortada-. Este trabajo ha analizado los consumos para llevar a cabo el diseño de una instalación de suministro de energía fotovoltaica. De forma que se ha calculado el sistema completo para abastecimiento parcial de energía eléctrica, así como la propuesta de solución conjunta al elevado consumo energético actual en climatización, mediante la incorporación de una bomba de calor reversible. Con el objetivo del ahorro, tanto energético como de costes, por ello se estudiaron diferentes alternativas tras analizar los datos de consumo del *cooling system* y del calefactor. Se determinó que la mejor opción era una instalación conectada a la red eléctrica, dado el reciente cambio de normativa. La instalación de los paneles, se planteó en primera opción sobre la cubierta del invernadero, ya que está orientada al sur. Pero también se barajarán otras opciones que no afecten al desarrollo del cultivo. El sistema planteado resulta amortizable en pocos años, dependiendo del desarrollo final de la nueva normativa, reduciendo en cualquier caso la huella de carbono del invernadero.

Palabras clave: Energías renovables, Consumo eléctrico, Huella de carbono, *Cooling system*.

1. Introducción

La parte experimental de este trabajo se ha desarrollado en un invernadero situado en los Campos de Experimentación de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB), de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

El invernadero es de cristal tipo "venlo" [1] con material de cubierta tipo *carglass new* de 4 mm de grosor. Tiene unas dimensiones de 6,25 x 23 m, y una altura de 4 metros. Se encuentra adosado a otro invernadero de igual dimensión. El eje longitudinal de ambos invernaderos está orientado en dirección Este-Oeste, siendo el que se encuentra más al sur dónde se ha desarrollado este proyecto.

A la hora de tecnificar la climatización de un invernadero, lo primero que se hará será establecer mecanismos pasivos para ahorrar energía, como pueden ser las ventanas y las pantallas térmicas. Debido a la situación en la que se ubica el invernadero, estos sistemas

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3393

pasivos no son suficientes para el desarrollo óptimo de la gerbera, especie que actualmente se cultiva en su interior. Por ello, el invernadero cuenta con dos calefactores eléctricos y dos *cooling system* o equipos de enfriamiento. Los calefactores eléctricos se emplean para evitar un salto brusco de temperatura entre el día y la noche. Tienen una potencia nominal de 30,30 kW en total. Los *cooling system* disminuyen la temperatura del invernadero y aumentan la humedad, puesto que se basan en la refrigeración por evaporación. La potencia nominal de ambos es de 4,04 kW. El sistema de refrigeración funciona de mayo a octubre aproximadamente, y el de calefacción de octubre a mayo. Estas fechas son orientativas, puesto que dependerá de la temperatura exterior.

El objetivo de este trabajo es medir el consumo de los sistemas de climatización actuales y establecer una alternativa para suministrarles electricidad a partir de energía solar fotovoltaica.

2. Materiales y métodos.

Pese a que en un primer momento se pensó que el sistema que mayor consumo presentaría sería el de refrigeración tras un año de análisis de datos del consumo diario de los sistemas de climatización del invernadero, a través de un medidor de energía conectado a la instalación, se observó que son los meses de invierno los que mayor consumo presentan. Esto se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Consumo eléctrico por meses de calefacción y refrigeración. Los meses duplicados se debe a que en ellos se registraron consumos tanto de refrigeración como de calefacción. Fuente: Elaboración propia.

Mes	Consumo (kWh)
Enero	3296,05
Febrero	3123,86
Marzo	1829,89
Abril	1870,04
Mayo*	1297,96
Mayo	605,53
Junio	1979,74
Julio	1881,06
Agosto	1886,18
Septiembre	1816,18
Octubre	1384,14
Octubre*	943,47
Noviembre	1371,20
Diciembre	2366,82

* Consumos de calefacción

Los consumos de octubre a mayo representan los datos de calefacción, y los consumos de mayo a octubre los de refrigeración. En mayo, el consumo de calefacción abarca desde el día 1 al 19, y desde el 20 en adelante la refrigeración. De manera similar, en octubre, el sistema de refrigeración estuvo funcionando del 1 al 20, y del 21 al 31 el dato sería de calefacción. A la vista de los elevados consumos en ambos periodos, se replanteó el estudio orientándolo a una instalación fotovoltaica para el abastecimiento de la climatización en ambos periodos.

A la hora de diseñar una instalación de alimentación mediante energía fotovoltaica, uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta es la disponibilidad del recurso solar, determinado por medio de las Horas Solares Pico (HSP). Estas representan el número medio de horas al día con una hipotética irradiancia de 1000 W/m^2. Las HSP serán menores en la época

invernal que en verano. En invierno, la radiación incide con un ángulo mayor respecto a la vertical, por lo que, para aprovechar la energía incidente, se deberían instalar los paneles con una inclinación mayor, de hasta 60° en el caso de Madrid [2].

Por el contrario, durante los meses de verano, la radiación llega a la superficie terrestre con un ángulo cenital menor, más próximo a la perpendicular en las horas centrales del día. Es por ello que, en este periodo, los paneles deberían colocarse con un ángulo menor, de unos 20° en la zona analizada.

Según la latitud a la que se encuentra el invernadero, 40° 26′ 21″ Norte, para garantizar la máxima captación anual, la inclinación adecuada de los paneles es de 30°. Por lo que, con esta inclinación, en la siguiente Tabla 2 se muestran las HSP según el mes, referenciada en European Commission – JRC [3].

Tabla 2. Las HSP para cada mes para una inclinación del panel fotovoltaico de 30°. Fuente: PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System).

Mes	HSP (30*)
Enero	3,45
Febrero	4,60
Marzo	5,86
Abril	6,06
Mayo	6,58
Junio	7,30
Julio	7,76
Agosto	7,44
Septiembre	6,51
Octubre	5,14
Noviembre	3,76
Diciembre	3,29

Si el diseño de la instalación se realizase para el mes más desfavorable, este sería diciembre o enero. En este caso, además, el mes de enero es el más desfavorable en cuanto a radiación y consumo. No obstante, si se pretende obtener la mayor captación de energía solar a lo largo del año, compensando el déficit de radiación haciendo uso de la red eléctrica, la inclinación de los paneles será la mencionada anteriormente de 30° para la ubicación analizada.

3. Análisis de resultados.

A la hora del diseño de la instalación, se barajaron varias alternativas. En cuanto al tipo de instalación, esta podría ser aislada o conectada a la red. Puesto que el invernadero ya cuenta con conexión a la red eléctrica y la demanda en invierno sería mayor que la demanda de verano, unido al cambio de normativa reciente, que permite compensar los excesos de producción con los consumos, se optó por un sistema conectado a la red eléctrica.

Por otro lado, se consideró la utilización de sistemas de almacenamiento para acumular la energía producida en las horas centrales del día dónde, como se ve en la Figura 1, el consumo es inferior a la producción. De esta forma, la energía acumulada se podría usar en horas nocturnas. Sin embargo, al tener un consumo de calefacción muy elevado, serían necesarias bastantes baterías que aumentarían considerablemente el coste de la instalación. Estas, además, tienen una vida útil menor que los paneles solares, por lo que habría que sustituirlas de 2 a 3 veces a lo largo de la vida útil de los paneles. Asimismo, con el nuevo Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica [4], se podría inyectar a la red esta energía excedente, y en las horas nocturnas abastecerse de la red eléctrica. En cada periodo de facturación, la energía comprada a

la red se compensaría con la que se vierta, y aunque el balance no será 0, puesto que existirán unos cargos fijos por potencia, se ahorrarán costes.

Por tanto, se descartó esta opción y se decidió la no utilización de baterías. Por todo esto, el invernadero se acoplaría a la modalidad de suministro con autoconsumo con excedentes, y acogida a compensación.

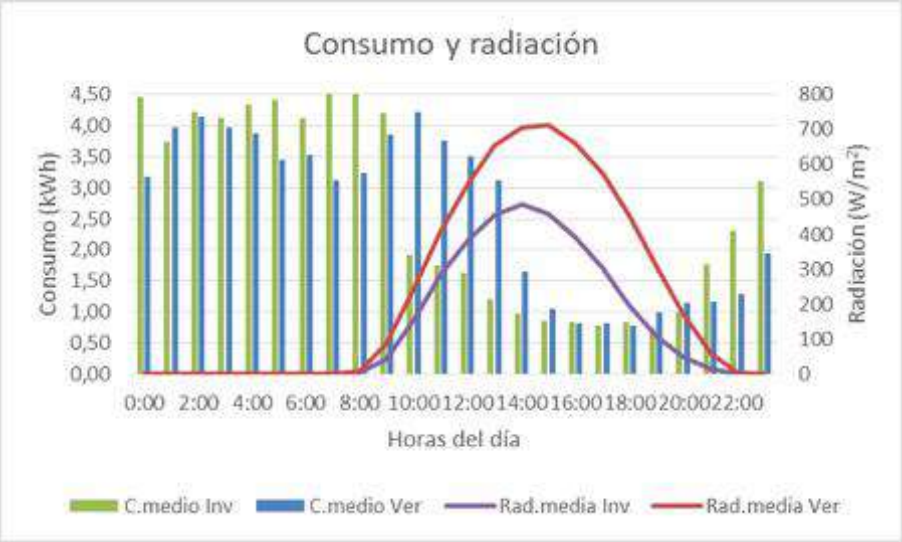


Figura 1. Consumo eléctrico y radiación en las horas del día y según la época del año.

Además, la estructura que soporta los paneles puede ser fija o móvil. Al realizar el estudio comparativo entre estructura con inclinación fija de 30°, y con una estructura móvil que permita inclinar los paneles según la época del año, se observó que no difería mucho el número de paneles necesarios de una estructura móvil a una fija. Además, hay que tener en cuenta que la estructura móvil supone un coste añadido, por lo que la estructura elegida finalmente será fija.

Para el cálculo de la instalación, se eligen las necesidades energéticas medias y disponibilidad de HSP de enero. En este caso, el panel elegido [5] presenta las características técnicas expuestas en Tabla 3.

Tabla 3. Características del panel solar fotovoltaico policristalino.

Potencia pico del panel solar	330 W
Tipo de célula	Policristalino
Dimensiones	1960 x 992 x 40 mm
Tensión Máxima Potencia (V_{mp})	37,95 V
Corriente en Cortocircuito (I_{sc})	9,30 A
Amperios Máximos de Salida (I_{mp})	8,70 A
Tensión en Circuito Abierto (V_{oc})	45,75 V
Voltaje de trabajo del panel solar	24 V

Por lo que,

$$Nº\ Paneles = \frac{Consumo}{P_p \times HSP \times 0{,}8}$$

Siendo,

- Consumo, correspondiente al mes de enero, en Wh/día,
- P_p, la potencia pico del panel, en Wp,
- HSP, las Horas Solares Pico del mes de enero a una inclinación de 30°, y

- 0,8 es el rendimiento del panel.

$$Nº\ Paneles = \frac{106324}{330 \times 3{,}45 \times 0{,}8} = 116{,}74 \cong 117\ paneles$$

Y si realizamos el análisis en términos de potencia, tenemos:

$$P_p = \frac{106324}{3{,}45 \times 0{,}8} = 38{,}53 \cong 40\ kW$$

Por tanto, a la hora de elegir el inversor, este debe tener una potencia de 40 kWn. El inversor elegido tiene un rango de tensión de entre 330 y 700 V, una tensión máxima de entrada de 105 A [6].

Para calcular el número de paneles que se conectarán a dicho inversor en serie (N_s) y paralelo (N_P), se tendrá en cuenta que:

$$N_S > \frac{V_{min}}{V_{mp} \times pérdidas\ por\ Tª} = \frac{330}{37{,}95 \times 0{,}8} = 10{,}87$$

$$N_S < \frac{V_{máx}}{V_{oc}} = \frac{700}{45{,}75} = 15{,}30$$

$$N_p = \frac{Nº\ paneles}{N_s} = \frac{117}{12} \cong 10$$

Por lo tanto, el número de paneles en serie será de 12, y en paralelo 10, esto dará un total de 120 paneles.

En cuanto al emplazamiento de los paneles fotovoltaicos, las alternativas eran la cubierta del invernadero o el suelo. Debido al elevado número de paneles necesarios, no resulta posible colocarlos en la cubierta del invernadero, por lo que se opta por la colocación en suelo, entre el edificio de Producción Vegetal de la ETSIAAB y el invernadero, ocupando una superficie de 201 m^2.

La energía generada con un sistema de esta potencia, teniendo en cuenta que las HSP anuales en Madrid está en torno a 1600, podremos obtener.

$$E = P_n * HSP = 40\ kW * 1600\ HSP \cong 64\ MWh$$

Considerando un ahorro en precio de energía tras impuestos de 0.2 €/kWh, la instalación proporciona 12800 € de ahorro anuales. Este dato debe compararse con el coste de instalación, que actualmente está en torno a 1 €/Wp instalado, lo que hace que el coste de la instalación sea de unos 40000 €.

Por tanto, la amortización de la instalación sería de entre 3 y 4 años aproximadamente. Si toda la energía pudiese aprovecharse, bien por su uso directo, o bien por la compensación mediante balance neto entre la energía inyectada en la red y la consumida de la misma. Esto deja un margen amplio para un escenario en el que la energía inyectada en la red se descontase a un precio muy inferior.

Se omite por tanto un estudio basado en la limitación de la energía vertida a la red, puesto que se considera que la nueva ley aún está en desarrollo. No obstante, el análisis aquí plasmado da una referencia de cómo la electricidad de origen fotovoltaico supone una fuente de energía no solo de bajas emisiones, sino también más barata que la de la red eléctrica.

4. Conclusiones

Para la latitud de Madrid, los sistemas de climatización de un invernadero, en concreto el sistema de calefacción, consumen mucha energía (superior a 100 kWh/día para 140 m^2). Esto es debido a que los sistemas de calefacción actuales resultan muy ineficientes. Por ello, como solución conjunta al elevado consumo eléctrico de ambos sistemas de climatización (calefacción y refrigeración), se propone sustituirlos por una bomba de calor reversible. Esta disminuiría los consumos del invernadero prácticamente a la mitad, puesto que tiene mayor eficiencia energética. Concretamente, por cada kWh eléctrico consumido, la bomba de calor reversible aporta de 2 a 4 kWh térmicos. Por consiguiente, esta solución también reduciría el número de paneles solares fotovoltaicos necesarios en la instalación.

Con este proyecto se demuestra que es viable la utilización de un sistema de alimentación fotovoltaico y que la inversión se amortiza ampliamente dentro de la vida útil de la instalación. Además, es una solución que contribuye a la reducción del uso de energías no renovables, disminuye la contaminación y los costes.

Referencias

1. Díaz Álvarez, J. R., Pérez Parra, J. Tecnología de invernaderos. 1994, volumen I, 15 – 352 págs.
2. CENSOLAR. La energía solar. Aplicaciones prácticas. Progensa. Sevilla. 2009. 3- 152 págs.
3. European Commission – JRC. PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Disponible en: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php. Fecha de consulta: 09/05/2019.
4. RD 244/2019. Disponible en : https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-5089. BOE (Boletín Oficial del Estado). Fecha de consulta: 09/05/2019.
5. Bauer. Ficha técnica del panel. Disponible en: http://www.bauer-energy.com/wp-content/uploads/2019/05/ficha-tecnica-panel-330-1.pdf. Fecha de consulta: 09/05/2019.
6. Aros Solar Technology. Ficha técnica del inversor. Disponible en: http://www.aros-solar.com/en/inverter/solar-inverters-threephase-sirio-k33. Fecha de consulta: 09/05/2019.

Área temática:

Innovación educativa en Agroingeniería



X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Apps como vehículo de aprendizaje en naturación urbana y campos deportivos

Perdigones, A. [1]; **Ruiz-Mazarrón, F.** [1]; **Cañas, I.** [1]; **García, J.L.**[1]

[1] Dpto. Ingeniería Agroforestal, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid; Alicia.perdigones@upm.es, f.ruiz@upm.es, Ignacio.canas@upm.es, joseluis.garciaf@upm.es

Resumen: Los dispositivos electrónicos suponen una oportunidad para el proceso de enseñanza-aprendizaje en las aulas. El uso de *apps* (*applications*) o lo que es lo mismo, aplicaciones para dispositivos móviles tales como tabletas o teléfonos inteligentes, es cada vez mayor en el ámbito privado, existiendo aplicaciones tan diversas como para el cálculo de distancias y velocidades recorridas, seguimiento de dietas nutricionales o contaje de la puntuación en numerosos deportes. Existen así mismo aplicaciones interesantes para poder ser usadas en la Universidad a través de las prácticas de las asignaturas orientadas hacia la ingeniería y el entorno profesional. Algunos ejemplos podrían ser aplicaciones que permiten trabajar con los dispositivos como si fueran acelerómetros, calculadores de superficies, o apps que permiten detectar enfermedades en plantas o necesidades de riego. Determinar el soporte electrónico más utilizado por los estudiantes en el aula permitirá conocer las posibilidades de incorporar estas aplicaciones en el ámbito universitario. Por otro lado, las redes sociales permiten generar un entorno para la difusión de conocimientos y debates interesantes en la Universidad. Sin embargo, no todas tienen las mismas posibilidades ni todas favorecen el entorno colaborativo que se busca en la docencia.

Palabras clave: TICs, áreas verdes

1. Introducción

Las metodologías empleadas en el proceso de enseñanza aprendizaje de titulaciones presenciales se han ido modificando según ha ido evolucionando la tecnología. El material o tecnología de apoyo se ha visto gradualmente modificado; lo que eran inicialmente clases magistrales apoyadas en pizarra ha evolucionado progresivamente, pasando a clases magistrales apoyadas en transparencias y posteriormente apoyadas en presentaciones Power Point, siendo presentaciones que permiten incluir videos, links a páginas web, etc., haciendo las clases más dinámicas. Esto claramente ha favorecido el trabajo del profesor, aunque se ha tenido que ir adaptando a los distintos cambios.

Con la implantación de los planes según Bolonia, en 2010 (la gran mayoría), el sistema de clases magistrales se ha visto desplazado parcial o totalmente por sistemas colaborativos, en el que la participación del alumno es fundamental. De esta forma el aprendizaje basado en clases magistrales se ve sustituido por un aprendizaje basado en proyectos, aprendizaje basado en juegos (gamificación) [1], en retos, en realidad aumentada [2], o aprendizaje-servicio (aprendizaje a través de la colaboración con actividades que proporcionen servicio a la sociedad) [3], entre otros. Las clases prácticas de laboratorio o de campo, también toman importancia en este nuevo marco.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3342

Estos cambios que se han experimentado en los últimos 9 años ha llevado a los docentes a diseñar las clases de una forma más dinámica y colaborativa buscando formas de adaptarse a las nuevas tendencias.

En la docencia propia de la ingeniería ya es habitual el uso de aplicaciones informáticas, asistidas por ordenador, destinadas al cálculo de estructuras (Metal 3D), diseño de instalaciones eléctricas (Dialux, Prysmitool), aplicaciones para cálculos estadísticos (Statgraphics), aplicaciones de simulación (Matlab, SketchUp), cálculo de dosis de aplicación fitosanitaria (DOSACITRIC), entre otros muchos.

Hay que ir más allá y emplear las nuevas tecnologías para mejorar la formación práctica y, actualmente, las posibilidades son muchas. Los móviles actuales son capaces de sostener aplicaciones que son utilizadas de forma natural por millones de personas en el ámbito privado; Whatsapp, Google Maps o Nike + running son algunas de estas aplicaciones que se utilizan como medio de comunicación, localización de rutas o plan de entrenamiento, respectivamente. Es posible utilizar apps destinadas al uso privado como herramientas para la docencia universitaria.

Es posible, por ejemplo, utilizar apps (aplicaciones para dispositivos móviles) gratuitas para las clases prácticas; son muchas las apps destinadas de forma directa o indirecta al área de la ingeniería agroforestal: identificación de especies vegetales, cálculo de riego, mantenimiento de jardines y campos deportivos, cálculo de áreas, cálculo de velocidades, aplicaciones para la geolocalización, entre otras muchas. Sin embargo, no se pueden utilizar sin conocer previamente los dispositivos móviles con que los alumnos asisten a clase, para ver su capacidad de aplicación real.

A partir de un proyecto de innovación educativa financiado por la Universidad Politécnica de Madrid, con título "*Redes sociales y uso de TICs como vehículo de aprendizaje en áreas verdes y naturación urbana*", con fecha de finalización en diciembre de 2019, se está llevando a cabo un estudio de apps orientadas a las asignaturas del área de la Ingeniería Agroforestal, con un estudio adicional para conocer, a través de encuestas elaboradas a alumnos, con qué tipo de dispositivos móviles cuentan en las clases. Esta segunda fase está todavía en proceso.

Esta fase del proyecto se centra en las áreas de la naturación urbana y campos deportivos; sin embargo, las encuestas se están realizando a todas las titulaciones de Grado que se imparten en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB): Grado en Ingeniería Agrícola, Grado en Ingeniería Agroambiental, Grado en Ingeniería Alimentaria, Grado en Ciencias Agarias y Bioeconomía y Grado en Biotecnología.

La naturación urbana es un tema de actualidad, ligado al medio ambiente, con el que se pretende reverdecer las ciudades mejorando el microclima, el paisajismo urbano y favoreciendo, en algunos casos, aspectos sociales de los vecinos. Es un tema relativamente nuevo que se ha incorporado a la programación docente de muchas de las asignaturas implicadas (relacionadas con las infraestructuras, especies vegetales, aspectos sanitarios, etc.) en los nuevos planes de estudio. Por su transversalidad y actualidad, es un área donde el uso de *apps* bien para el diseño o para el mantenimiento es factible.

2. Materiales y métodos

Lo expuesto en esta comunicación corresponde a una fase del proyecto de innovación educativa "*Redes sociales y uso de TICs como vehículo de aprendizaje en áreas verdes y naturación urbana*", financiado por la Universidad Politécnica de Madrid.

Por un lado, se han buscado *apps* de uso general que permite determinar algún parámetro interesante en el mantenimiento de áreas verdes (geolocalización, por ejemplo). En relación a las *apps* que se utilizan de forma profesional en el área de la naturación urbana, se ha realizado una búsqueda a través de *Play Store* [4] y *App Store* [5] para localizar aquellas de posible uso en el aula. Los temas buscados están relacionados con el diseño y mantenimiento de áreas verdes, y la naturación urbana.

Sobre los dispositivos empleados en el aula, se está diseñando una encuesta que se realizará a todos los cursos de todas las cinco titulaciones de Grado que se imparten en la ETSIAAB. Los resultados se obtendrán en los próximos meses. En ellas se pregunta por el tipo de dispositivo electrónico de que disponen los alumnos y el sistema operativo de los mismos.

Los sistemas operativos móviles (orientados a la conectividad inalámbrica) para los que están desarrolladas las apps son los siguientes:

- *Android:* sistema operativo móvil desarrollado por Android Inc., empresa de Google desde 2005, y diseñado para dispositivos móviles con pantalla táctil (teléfonos, tablets).
- *iOS:* sistema operativo móvil desarrollado por Apple Inc. Utilizado en dispositivos como *iPod touch* y el *iPad*. No es posible su instalación en dispositivos de otras empresas.
- *Windows 10 mobile – Windows Phone*: sistema operativo móvil desarrollado por Microsoft, disponible desde 2015 para todo tipo de plataformas (teléfonos inteligentes, tabletas, computadoras).
- *BlackBerry OS:* sistema operativo móvil desarrollado por BlackBerry para sus dispositivos.
- *Symbian:* sistema operativo móvil que nace como alianza entre empresas como Nokia, Sony Ericsson, Samsung, LG, o Motorola, entre otros.
- *Firefox OS:* sistema operativo móvil desarrollado por Mozilla Corporation, para *smartphones* y tabletas.
- *Ubuntu Touch*: Sistema operativo móvil basado en Linux, comercializado desde 2013.

Los dispositivos móviles en los que pueden instalarse las aplicaciones para móviles son:

- Teléfonos inteligentes o *Smartphone:* ordenador portátil, de pequeño tamaño con las propiedades de un teléfono móvil, pero con mayor capacidad para almacenar datos, realizar actividades, incluir correo electrónico y con mayor conectividad (acceso a internet vía *WIFI*), función multimedia (cámara fotográfica y de vídeo, reproductor de vídeos/mp3), agenda, administrador de contactos, acelerómetros, GPS (sistema de posicionamiento global), y programas de navegación. Existen diferentes gamas, según la empresa que lo desarrolla; *iPhone*, por ejemplo, es un *Smartphone* desarrollado por Apple Inc., con sistema operativo *iOS*.
- *iPad*: dispositivo electrónico tipo Tablet desarrollado por Apple Inc., en 2012, con sistema operativo iOS. Por su diseño se encuentra entre lo que corresponde a un teléfono inteligente y una computadora portátil. Por su tamaño favorece la lectura de documentos.
- *Tableta* (*Tablet*): tipo de computadora portátil integrado en una pantalla táctil, con la que se interactúa sin necesidad de teclado físico. Suelen integrar un microprocesador, pantalla táctil, altavoz y micrófono, cámara de video, cámara fotográfica, Radio, GPS (Sistema de posicionamiento global), conexiones inalámbricas (*WIFI, bluetooth*, etc.).

3. Resultados y discusión

En internet es posible encontrar apps gratuitas, diseñadas para uso personal, que pueden emplearse para conocer determinados parámetros técnicos en muchas asignaturas en las que sea necesario calcular áreas, velocidades, recorridos, etc., entre otros muchos parámetros. Son interesantes en el área agroforestal para determinar por ejemplo rendimientos de maquinaria, desniveles o pendientes en terrenos o recorridos de las máquinas. Se muestran unos ejemplos en la tabla 1.

Tabla 1. Apps generales para determinación de parámetros técnicos.

Aplicación	Uso general	Propietario	Sistema operativo	Tamaño (Mb)	Parámetros
Runtastic	Entrenamiento personal	Adidas	iOS, Android, Windows Phone y Blackberry	50,76	Velocidad máxima, velocidad mínima, velocidad media, distancias, recorrido realizado, desnivel
Nike Run Club	Entrenamiento personal	Nike Inc.	iOS 11.0, Android	235,5 68,8	Velocidad máxima, velocidad mínima, velocidad media, distancias, recorrido realizado, desnivel
Medición de áreas y distancias	Medida de áreas y distancias sobre terreno	Farmis	Android 4.2	23	Áreas, perímetro, distancias
GPS Digital Speed Tracker	Medida de velocidades	Joao Silveira	iOS 9.0		Velocidad actual, velocidad máxima, velocidad media, distancia, altitud

A nivel profesional y a través de apps con contenido técnico, es posible utilizarlas para calibrar equipos de aplicación fitosanitaria, determinar especies vegetales, identificar enfermedades y plagas o diseñar jardines, entre otros muchos. En la tabla 2 se muestran agunas de estas apps.

En la tabla 1 y tabla 2 se incluyen sólo unas pocas apps a modo de ejemplo entre las muchas localizadas; en internet hay muchas otras aplicaciones soportados por distintos sistemas operativos, que permiten trabajar tanto en el área educativa como en la profesional, siendo muy interesante su uso en las prácticas docentes.

A modo de ejemplo, las últimas tres aplicaciones que aparecen en la tabla 2, pueden emplearse en el área de la naturación urbana para analizar la cantidad (Light Meter) y tipo de luz (IColor) que recibe una superficie vegetal, o diseñar la iluminación a instalar (Cálculos eléctricos clave PRO).

En relación al estudio sobre dispositivos electrónicos con que cuentan los alumnos en clase, los primeros resultados obtenidos del primer curso del Grado Ingeniería Agrícola, indican que el dispositivo móvil que más utilizan los alumnos en clase es el teléfono móvil (52,2%) seguido de los ordenadores portátiles (43,5%) y las tabletas (21,7%); sólo el 21,7% afirman utilizar aplicaciones informáticas en su actividad diaria.

Tabla 2. Apps específicas para uso en áreas verdes.

Aplicación	Uso	Propietario/ Desarrollador	Sistema operativo*	Tamaño (Mb)	Parámetros calculados
Sprayer calibrator	Calibración para productos fitosanitarios	Farmis	Android 4.1	5,4	Velocidad del tractor y presión requerida
Agrio – Agricultura inteligente	Identificación y tratamiento de plagas y enfermedades a través de fotografías tomadas	Saillog Ltd	iOS 11.0, Android 4.1	33,4 18,88	Identificación y tratamiento de la enfermedad o plaga
Fitosanitarios	Descarga de fichas de product fitosanitarios	Ager Technology SL	iOS 8.0, Android 2.2	2 184 kb	Características de productos fitosanitarios registrados por el Ministerio Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
Tee2Green Pro	Evaluación de las condiciones de mantenimiento de campos de golf	Tee2Green Benchmarking	Android 5.0	11	Calidad de tees, greenes, bunkers, etc.
ArbolApp	Identificación árboles	Real Jardín Botánico - CSIC	Android 4.0, iOS 9.0	63 76,9	Identifica árboles de la Península Ibérica
Light Meter	Mide la cantidad de luz sobre un plano (lx)	Google Commerce Ltd	Android 4.0.3.	4,1	Iluminancia (lux)
IColor	Identificación de la longitude de onda de una luz	Google Commerce Ltd	Android 1.0	90 kb	Longitud de onda, frecuencia
Cálculos eléctricos clave PRO	Calcula parámetros de iluminación	Egal Net di Ettore Gallina	Android 4.0	1,1	Flujo luminoso, Iluminancia,

*Mínima versión de Sistema Operativo válida para soportar la aplicación.

4. Conclusiones

Las aplicaciones para móviles o apps, son herramientas que se pueden utilizar con fines educativos a nivel universitario, para la parte práctica de las asignaturas o en trabajos colaborativos. Sistemas de geolocalización, por ejemplo, nos permite conocer velocidades, distancias, puntos críticos, etc., en el área de la jardinería.

Conocer con qué tipo de dispositivos móviles cuentan los alumnos en clase es necesario para poder incorporar a la docencia esta tecnología.

El dispositivo móvil con mayor aceptación entre los alumnos es el teléfono, haciendo un uso muy reducido de las aplicaciones informáticas.

5. Agradecimientos

Este estudio se incluye en el proyecto "*Redes sociales y uso de TICs como vehículo de aprendizaje en áreas verdes y naturación urbana*", financiado por la Universidad Politécnica de Madrid.

Referencias

1. Corchuelo-Rodríguez, C. A. Gamificación en educación superior: Experiencia innovadora para motivar estudiantes y dinamizar contenidos en el aula. EDUTEC- Revista electrónica de tecnología educativa. 2018, 63, 29-41.
2. Badilla Quesada, M., Sandoval Poveda, A. M. Realidad aumentada como tecnología aplicada a la educación superior: Una experiencia en desarrollo. Innovaciones educativas. 2015, 23, 41-49.
3. Gutiérrez-Sánchez, M., Moreno Abellán, P. El aprendizaje servicio como metodología para la formación integral de los estudiantes universitarios. EDETANIA. 2018, 53, 185-202.
4. https://play.google.com/store/apps
5. https://www.apple.com/

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Diseño de mecanismos de línea recta mediante software de Geometría dinámica

J. Álvarez[1], E. Martínez[1], V. Carbonell[1], M. Flórez[1]

[1] Unidad de Física Aplicada a la Ingeniería. Dpto. de Ingeniería Agroforestal. E.T.S.I. Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB). Universidad Politécnica de Madrid. Av. Puerta de Hierro 2, 28040 Madrid (España); jose.alvarez.sanchez@upm.es

Resumen: Durante siglos, las máquinas se han utilizado para reemplazar el trabajo humano y la sociedad moderna las ha sustituido asimismo por robots, ampliamente utilizados en ámbitos como la medicina, la agricultura y la industria. Algunas máquinas requieren dispositivos que deben realizar ciertos movimientos, como los citados robots que necesitan describir una ruta precisa para realizar tareas específicas. En los siglos XVIII y XIX, el mayor problema práctico fue obtener curvas de acoplador de línea recta, como fue el caso del ingeniero James Watt, que necesitó un mecanismo con una salida de línea recta aproximada para mejorar su motor de vapor. Muchos mecanismos jugaron un papel clave en la revolución industrial y desde entonces, la generación de trayectorias de línea recta, exacta o aproximada ha sido largamente estudiada y clasificada. En este trabajo se presentan simulaciones de los principales mecanismos de línea recta o aproximadamente recta, creados por los autores con el software de geometría dinámica GeoGebra, accesible gratuitamente en internet. Estas simulaciones están disponibles para cualquier usuario que acceda a la web de GeoGebra, pudiéndose verificar en todas que un punto del mecanismo describe una línea recta o aproximadamente recta. Este software es asimismo utilizable en el aula por los profesores para la enseñanza de diversas materias, ya que en los últimos años han percibido que existe una dificultad por parte del alumnado para entender el movimiento de diversos cuerpos y máquinas, entre otros.

Palabras clave: GeoGebra, simulaciones, Mecánica

1. Introducción

Aunque el diseño de mecanismos de línea recta se lleva estudiando desde hace más de dos siglos y su uso está muy extendido actualmente en campos como la robótica, en las últimas décadas no hay muchas referencias acerca de nuevos mecanismos de este tipo.

La cinemática, término acuñado por Ampère, es la parte de la Física que estudia las leyes del movimiento de los cuerpos, sin tener en cuenta las causas que lo producen. Reuleaux [1] es considerado el padre de la cinemática moderna, la cual está orientada hacia el análisis y síntesis de mecanismos compuestos de elementos rígidos conectados y el desplazamiento relativo entre barras y puntos.

Desde los tiempos de Arquímedes, muchos físicos se han interesado por la trayectoria que describe un punto cualquiera, esto no es más que una forma primitiva de Geometría aplicada al análisis y síntesis de las máquinas [2-4].

Las aplicaciones robóticas más avanzadas, como pinzas o mecanismos de nano-manipulación, están basados en mecanismos de línea recta, los cuales son también ampliamente utilizados en la construcción de dispositivos como es el caso de los robots más punteros.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3282

El análisis topológico de los mecanismos, que involucra aspectos geométricos, impone las condiciones geométricas que han de cumplir las longitudes de los eslabones, por ejemplo, en el mecanismo de cuatro barras, y establece el papel desempeñado por cada eslabón.

Algunos mecanismos especiales son una fuente de problemas geométricos, como la identificación de los parámetros de diseño en la curva de acoplador dada.

En los siglos XVIII y XIX el mayor problema práctico fue obtener curvas de acoplador con trayectorias que fueran rectas o aproximadamente rectas, o lo que es lo mismo, los denominados mecanismos de línea recta. Muchos de ellos tuvieron un papel fundamental en la revolución industrial. Watt requirió de un mecanismo de este tipo para su máquina de vapor [5-7]. Este ingenio fue el punto de partida para un amplio abanico de mecanismos de línea recta o casi recta que fueron desarrollados en los años posteriores.

En este artículo se va a resaltar la importancia de la geometría en el diseño de estos mecanismos y su uso en ingeniería. Para ello se han desarrollado con el software GeoGebra [8] algunos de los mecanismos de línea recta más conocidos.

2. Mecanismos de línea recta

La invención de la máquina de vapor dio comienzo a una nueva era de avances tecnológicos que no estuvieron exentos de dificultades sobre todo en relación a la fiabilidad y precisión de las máquinas. Las pérdidas de vapor en la zona de la cabeza de los pistones junto con una fricción excesiva fueron los mayores problemas.

A lo largo de la historia se han requerido en numerosas ocasiones mecanismos en los que alguno de sus puntos genere una trayectoria con al menos una porción perfectamente rectilínea y otros que generen una trayectoria tal que una porción de la misma se aproxima a una línea recta. Los primeros se denominan de línea recta exacta y los segundos de línea recta aproximada.

El mecanismo que desarrolló James Watt, en el cual los pistones de las máquinas de vapor son guiados a través de una trayectoria recta, es considerado con diferencia la alternativa más sencilla, además de la más cercana a un mecanismo de línea recta [6]. Desde los tiempos de Watt un gran número de ingenieros han desarrollado otros mecanismos de línea recta [7,9,10].

3. Simulaciones

En los últimos años existe un creciente interés por el uso de software con simulaciones para el diseño de mecanismos. Las simulaciones constituyen una ayuda a la hora tanto de implementar modelos que sean muy abstractos como para adaptarlos en la medida de lo posible al mundo real.

Lo primero que hay que tener en cuenta para crear un mecanismo es examinar la topología del sistema de palanca y posteriormente detallar la geometría con vistas a implementarlo.

Se han desarrollado numerosos entornos virtuales con carácter pedagógico como Cabri Geometre II [11-13], Cinderella [14], o GeoGebra [8,15]. Con el propósito de diseñar mecanismos de línea recta o aproximadamente recta, los autores se han decantado por el software de geometría dinámica GeoGebra. GeoGebra es un software libre que permite a cada usuario del espacio subir a la plataforma y compartir sus propias simulaciones.

La geometría dinámica apareció en los años 80 y aunque es una disciplina, es considerada también por muchos una nueva herramienta en Geometría. El germen de las herramientas de geometría dinámica es la interacción, o lo que es lo mismo, que el usuario pueda seleccionar un objeto geométrico en la pantalla y moverlo y de forma inmediata pueda ver como la construcción geométrica cambia.

En la mayoría de los entornos virtuales, también en GeoGebra, el espacio de trabajo está dividido en la interfaz gráfica y la algebraica. Los objetos de la interfaz gráfica están también representados en la algebraica como una lista de objetos o ecuaciones dependientes e independientes.

En GeoGebra se pueden introducir diferentes comandos seleccionando los iconos correspondientes en la barra de herramientas, las opciones en el menú o introduciéndolos manualmente en el cuadro de texto debajo de la zona de trabajo.

Cuando se ha dibujado una simulación todos los pasos que se han seguido en su construcción son guardados en una tabla interactiva que permite a cualquier otro usuario reproducirla en su dispositivo. Otras ventajas del uso de GeoGebra residen en que, al acabar una simulación, esta puede ser guardada tanto dentro como fuera del entorno GeoGebra como un archivo HTML para que cualquier otro usuario de internet se la pueda descargar.

4. Resultados y discusión

Como se ha dicho anteriormente en este texto, después de Watt, numerosos investigadores en cinemática desarrollaron mecanismos de línea recta o aproximadamente recta con vistas a mejorar su hito. El nivel de complejidad de los dispositivos aumentaba según se aproximaban a la línea recta. Los nombres de todas estas máquinas creadas siempre hacen referencia a sus inventores. Los autores han diseñado seis de los mecanismos más conocidos, tres de línea recta exacta y tres de línea recta aproximada y han subido los archivos a la página web de GeoGebra para que otros usuarios los puedan descargar y usar.

4.1 Mecanismo de Watt

El mecanismo de Watt consiste en tres barras articuladas, siendo las barras de los extremos más largas que la barra central. El punto medio de la barra central describe aproximadamente una línea recta en las proximidades del centro del mecanismo [16]. Este sistema se sigue usando en la actualidad en los sistemas de suspensión en automóviles para guiar el eje trasero hacia arriba y abajo a lo largo de una línea recta, además de en otras muchas aplicaciones.

La Figura 1 muestra la interfaz gráfica y algebraica del mecanismo. Cuando se mueve el punto B, el punto G central describe una línea trayectoria casi recta.

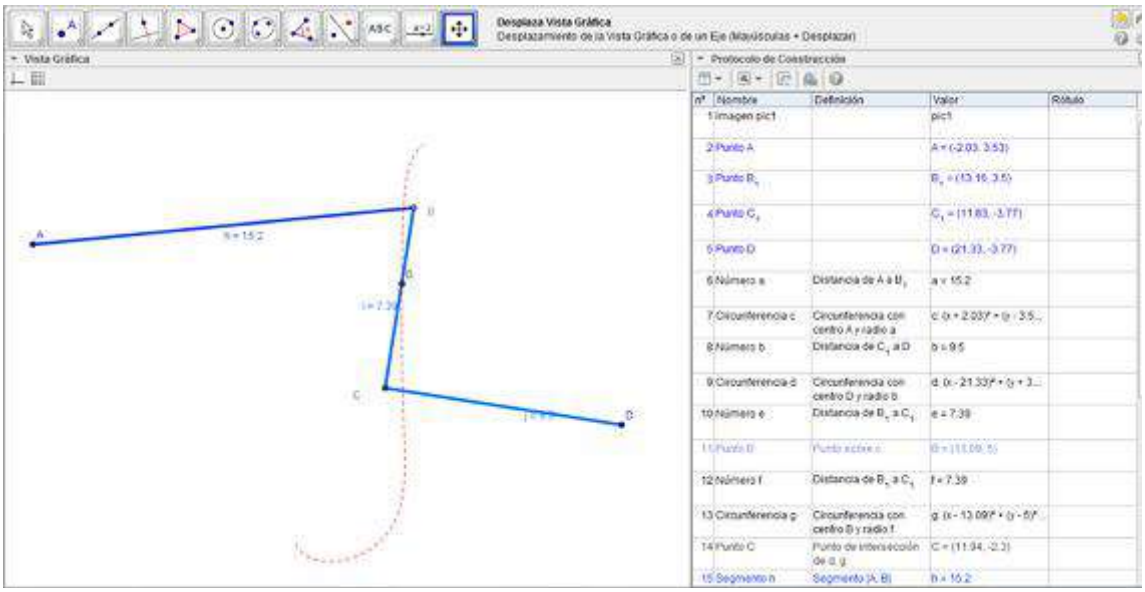


Figura 1. Mecanismo de Watt. El archivo está disponible para el lector en el siguiente enlace: https://www.geogebra.org/m/cYbhuwdp#material/nmTN2DXM

4.2 Mecanismo de Chebyshev

Pafnuty Chebyshev (1821-1894) estudio de forma teórica los problemas que se presentaban en los mecanismos cinemáticos e inventó en el siglo XIX uno con un movimiento aproximado de línea recta [17]. Este mecanismo consiste en cuatro barras con las siguientes proporciones: AD=2BC y AB=CD=2.5BC siendo P el punto medio del segmento BC [18]. La Figura 2 muestra un ejemplo realizado por los autores del mecanismo de Chebyshev con las siguientes longitudes de barras de acuerdo con las proporciones mencionada: BC= 2cm, AD=4cm y AB=CD=5cm. Cuando se mueve el punto C con el ratón, el punto P central describe una línea aproximadamente recta.

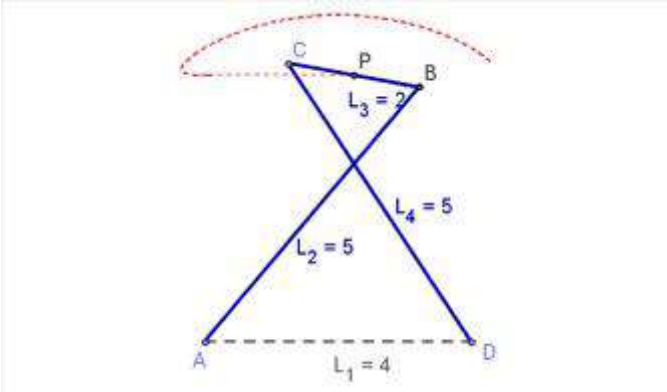


Figura 2. Mecanismo de Chebyshev. El archivo está disponible para el lector en el siguiente enlace: https://www.geogebra.org/m/cYbhuwdp#material/xMqh8NpB

4.3 Mecanismo de Roberts

Richard Roberts (1789-1864) da nombre a un mecanismo de línea recta aproximada entre las articulaciones unidas a la barra fija. En este caso, la estructura consta de tres barras, dos laterales de igual longitud fijadas a dos pivotes cuya distancia entre extremos es dos veces la longitud de la barra central que las une por el otro lado. Tal y como se observa en la Figura 3, los vértices B y C de la barra central delimitan junto con el punto P un triángulo isósceles. Las medidas de las caras de este triángulo coinciden con las de las barras laterales. El vértice, P, opuesto al lado desigual del triángulo describe aproximadamente una línea recta cuando se mueve el punto B.

Se han de cumplir las siguientes relaciones AB = BP = PC = CD y AD = 2 BC para que cuando se mueva el punto B, el punto P describa una línea aproximadamente recta.

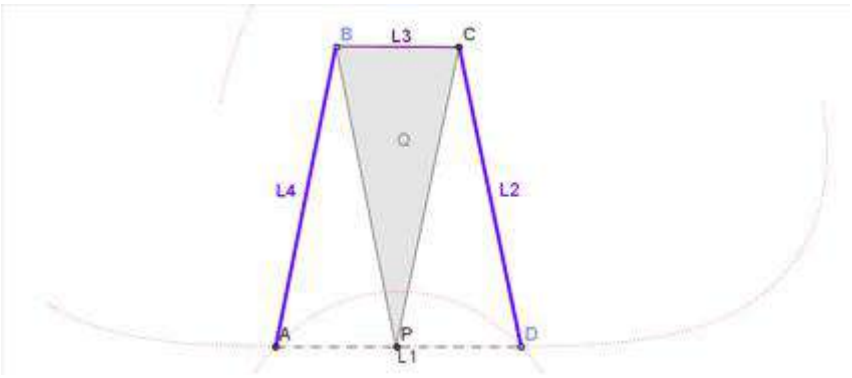


Figura 3. Mecanismo de Robert**.** El archivo está disponible para el lector en el siguiente enlace: https://www.geogebra.org/m/cYbhuwdp#material/WKSHDjer

4.4 Mecanismo de Peaucellier- Lipkin

El primer sistema articulado capaz de dibujar una línea recta en el plano fue el desarrollado por Charles-Nicolas Peaucellier (1832-1913) y Yom Tov Lipman Lipkin (1846–1876). El de Peaucellier-Lipkin es uno de los mecanismos de línea recta más exactos. Se basa en pares inferiores en un sistema romboidal de siete barras realizado con vistas a producir una trayectoria de salida de línea recta.

El mecanismo de Peaucellier-Lipkin se diseñó para convertir un movimiento circular de entrada en un movimiento de salida de línea recta exacta. Este sistema es capaz de transformar un sistema vibratorio rotatorio en un con trayectoria rectilínea y viceversa [19]. En la Figura 4 se puede observar el citado mecanismo en el que se utiliza la simetría de dos mecanismos de cuatro barras con las mismas longitudes, pero montados en distinta configuración. Moviendo el punto C, el punto E describe una trayectoria recta exacta.

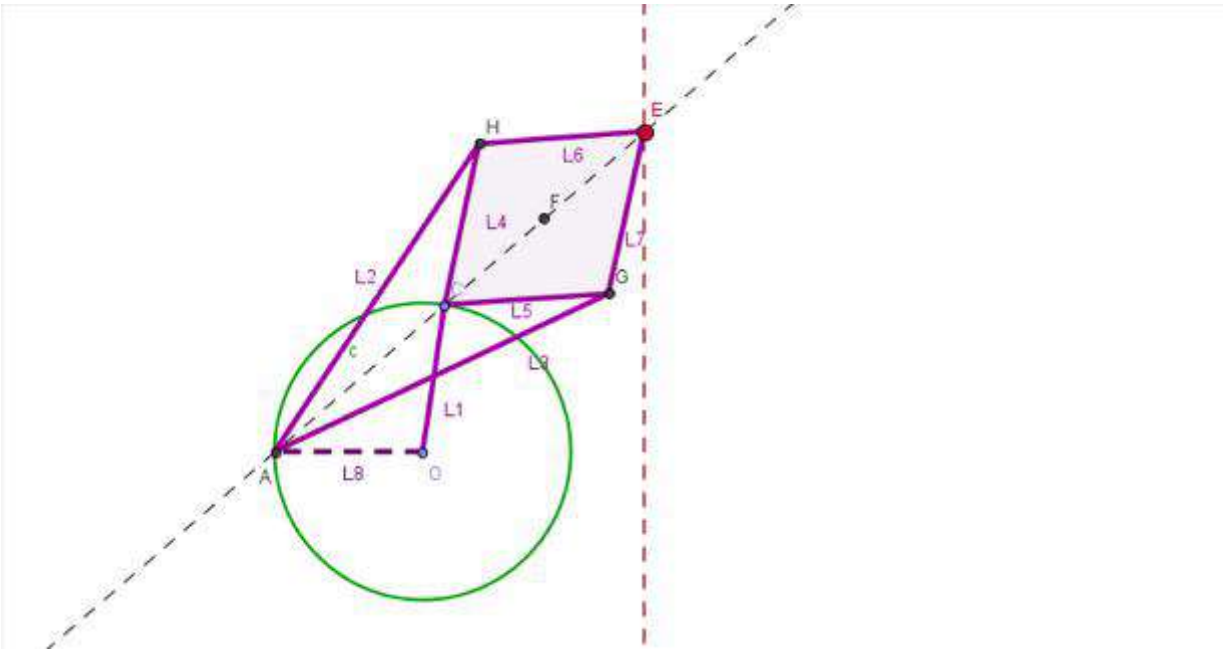


Figura 4. Mecanismo de Peaucellier-Lipkin. El archivo está disponible para el lector en el siguiente enlace: https://www.geogebra.org/m/cYbhuwdp#material/cH3fn3tW

4.5 Mecanismo de Hart

El mecanismo de Hart es otro mecanismo de línea recta exacta inventado por Harry Hart que vio la luz en 1874. En esta ocasión es una estructura con seis barras, por lo tanto, un número inferior a las usadas en el mecanismo descrito en el apartado anterior [20]. Está representado en la Figura 5. Moviendo el punto P, el punto E describe una línea recta.

El mecanismo de Hart, como el de Peaucellier-Lipkin, recibe también el nombre de mecanismo inversor, ya que ambos tienen la propiedad de invertirse, es decir, que de un movimiento circular pueden pasar a uno de línea recta y viceversa.

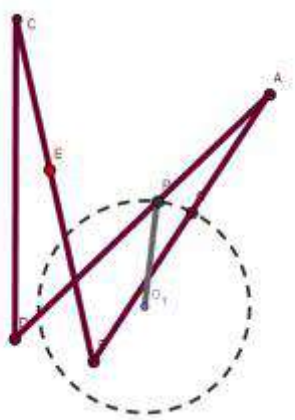


Figura 5. Mecanismo de Hart. El archivo está disponible para el lector en el siguiente enlace: https://www.geogebra.org/m/cYbhuwdp#material/TBnFexCh

4.6 Mecanismo de Scott-Russell

Como se ha visto a lo largo de estas líneas, los mecanismos para producir líneas rectas exactas son muy complejos. En el mecanismo de Scott-Russell, que fue patentado por el relojero William Freemantle en 1803, y mejorado posteriormente por Scott, el movimiento de salida es o bien de tipo armónico o bien una simple función seno del eslabón motriz.

Si se observa este mecanismo en movimiento, se aprecia que la estructura está formada por triángulos isósceles cuyas caras iguales están formadas por barras y la otra por lados imaginarios. En la Figura 6 se puede observar este mecanismo, donde las barras AB, AC y AO tienen la misma longitud. Cuando se mueve el punto A, el punto C describe una línea recta.

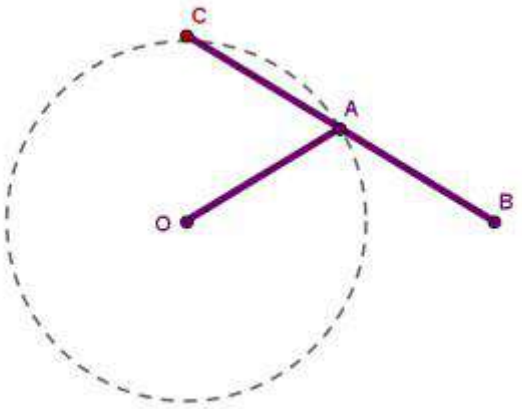


Figura 6. Mecanismo de Scott-Russell El archivo está disponible para el lector en el siguiente enlace: https://www.geogebra.org/m/cYbhuwdp#material/VEPEAvAf

Las herramientas de geometría dinámica se llevan usando desde hace un tiempo para explicar en diferentes etapas educativas aspectos relacionados con la mecánica y han demostrado ser una alternativa muy potente a la hora de sintetizar la explicación y comparar todos los tipos de mecanismos de línea recta. Nelson investigó el movimiento compuesto de los mecanismos de Peaucellier [19] y usó el software MATLAB para generar curvas de salida considerando diferentes configuraciones y tamaños del mecanismo y sus elementos. Síntesis y análisis de mecanismos (SAM también en inglés) es otro software interactivo disponible para el diseño, análisis y

optimización de mecanismos planos [21]. Los efectos de las nuevas tecnologías [22] y las simulaciones en la enseñanza de Física han sido muy positivos para el resultado académico del alumnado [23-30] y han sido reportados en numerosos estudios [28,31].

5. Conclusiones

Los autores han diseñado por medio del software de geometría dinámica GeoGebra, los mecanismos de línea recta o aproximadamente recta más usados durante el siglo XIX partiendo del motor de Watt y han intentado solventar los problemas que plantean. Las simulaciones realizadas constituyen una herramienta de gran utilidad para visualizar el movimiento de un punto, un eslabón o cualquier cuerpo en general.

Estos mecanismos se siguen usando en la actualidad en la automatización de numerosos procesos industriales que requieran realizar movimientos muy precisos con rutas específicas para tareas concretas, en la mayoría de los casos son tareas robotizadas.

Las simulaciones pueden ser descargadas de la web GeoGebra y ser utilizadas por profesores que impartan esta materia para que sus alumnos puedan visualizar la trayectoria recta de estos mecanismos que, aunque son antiguos, tienen plena vigencia para su uso en la industria por su perfecta descripción de la ruta rectilínea requerida.

Referencias

1. Moon F. C. Franz Reuleaux: Contributions to 19th Century Kinematics and Theory of Machines. Applied Mechanics Reviews. 2003, 56(2), (261-285).
2. Liu J. Kinematic Differential Geometry of a Rigid Body in Spatial motion. A New Adjoint Approach and Instantaneous Properties of a Point Trajectory in Spatial Kinematics. Mechanism and Machine Theor. 1997, 32 (4), (419-432).
3. Koetsier T.A. Contribution to the History of Kinematics. Mechanisms and Machine Theory. 1983, 18(1), (37-42).
4. Koetsier T.A. From Kinematically Generated Curves to Instantaneous Invariants. Episodes in the History of Instantaneous Planar Kinematics. Mechanism and Machine Theory. 1986, 21(6), (489-498).
5. Ferguson E.S. Kinematics of Mechanisms from the Time of Watt. Smithsonian Institution (United States National Museum). 1962, Bulletin 27.
6. Stuart R. A. Descriptive History of the Steam Engine. 1824, London: J. Knight and H. Lacey.
7. Wunderlich W. Mechanism and Machine Theory. 1978, 13(2), (155-160).
8. GeoGebra. https:// www.Geogebra.org.
9. Kempe A.B. How to Draw a Straight Line. A lecture on linkages. In: National Council of Teachers of Mathematics. 1877, London: Mc Millan and Co.
10. Dijksman E. A. Approximate Straight-Line Mechanisms through Four-Bar Linkages. Romanian Journal of Technical Science: Applied Mechanics. 1972, 17(2), (319-372).
11. Cabri Geometre II. www.cabri.com/.
12. Laborde, J.M. & Bellemain, F. Cabri-Geometry II. Texas Instruments. Copyright Texas. Instruments and Université Joseph Fourier, CNRS. 1998.
13. Gabaldón J. A. Nuevos Planteamientos Metodológicos en la Enseñanza de la Geometría. Geometría Dinámica Con Cabri, Escuela Politécnica Superior. Departamento de Expresión Gráfica. 2004, Universidad de Alicante, España.
14. Cinderella. http://www.cinderella.de/tiki-index.php
15. Iriarte X., Aguinaga J. & Ros J. Teaching Mechanism and Machine Theory with GeoGebra. Capítulo en New Trends in Educational Activity in the Field of Mechanism and Machine Theory. 2014, (211-219), Springer: Cham.
16. Primrose E., Freudenstein F. & Roth B. The Watt mechanism. Archive for Rational Mechanics and Analysis. 1967, 24(1), (22-41).
17. Luquin F. Máquinas De Vapor, Mecanismos y P.L. Chebyshev. Un paseo por la geometría , Universidad del País Vasco, España, 2005.

18. Todorov T. S. Synthesis of Four-Bar Mechanisms by Freudenstein-Chebyshev. Mechanism and Machine Theory. 2002, 37 (12), 1505–1512.
19. Nelson C.A. & Padilla C. Motion Generation using Combinations of Peaucellier Straight Line Mechanisms. ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering, 2012, Toronto, Canadá.
20. Dijksman E. A. Kempe's (Focal) Linkage Generalized, Particularly in Connection with Hart's Second Straight-Line Mechanism. Mechanism and Machine Theory. 1975, 10(6), (445–460).
21. SAM https://www.artas.nl/es/.
22. Krusberg Z. A. Emerging technologies in physics education. Journal of Science Education and Technology. 2007, 16(5), (401-411).
23. Hursen C., & Asiksoy G. World Journal on Educational Technology. World. 2015 7(1), 87-98.
24. Ingerman Å., Linder C., & Marshall D. The learners' experience of variation: following students' threads of learning physics in computer simulation sessions. Instructional science. 2009, 37(3), (273-292).
25. Jonassen D. H. Computers in the classroom: Mindtools for critical thinking. 1996, New Jersey, EE. UU: Prentice-Hall, Inc.
26. Jimoyiannis A., & Komis V. Computer simulations in physics teaching and learning: a case study on students' understanding of trajectory motion. Computers & education. 2001, 36(2), (183-204).
27. Kara I. The effect on retention of computer assisted instruction in science education. Journal of instructional Psychology. 2008, 35(4), (357-365).
28. Kozielska M. & Kedzierski R. Computer simulation in learning physics as a useful teaching method—a report of research. Technology in Education. 2009, 83
29. Ceberio, M., Almudí J. M., & Franco Á. Design and application of interactive simulations in problem-solving in university-level physics education. Journal of Science Education and Technology. 2016, 25(4), (590-609).
30. Carbonell V., Romero C., Martínez E., & Flórez M. Interactive simulations as teaching tools for engineering mechanics courses. European Journal of Physics. 2013, 34(4), (991).
31. Khan S. New pedagogies on teaching science with computer simulations. Journal of Science Education and Technology. 2011, 20(3), (215-232).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Gamificación como instrumento para mejorar los indicadores docentes en asignaturas de ingeniería agroforestal

R. R. Sola-Guirado[1], P. E. Romero[1], E. J. González-Sanchez[2], F. Aragon-Rodriguez[2], S. Castro-Garcia[2]

[1] Departamento de Mecánica. E.P.S. Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, Ctra. Nacional IV, km. 396, 14014 Córdoba; ir2sogur@uco.es
[2] Departamento de Ingeniería Rural. E.T.S.I. A.M. Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, Ctra. Nacional IV, km. 396, 14014 Córdoba; scastro@uco.es

Resumen: En cursos iniciales de asignaturas de ingeniería aplicada se produce una reducida asistencia y participación del alumnado en clase, minorando el rendimiento de este y promoviendo el absentismo en el examen final. El fomento de la motivación del alumno puede ser un factor determinante en dicho problema, pudiendo presentarse la gamificación como herramienta útil para tal fin. En este trabajo, como respuesta ante esta cuestión, se muestra el uso de una herramienta on-line que ofrece la posibilidad de realizar una prueba tras cada unidad didáctica. Con ello, el alumno puede autoevaluar su proceso de aprendizaje y, al mismo tiempo, el profesorado tiene la posibilidad de conocer la evolución individual de cada estudiante. Para incentivar su uso, se ofrece la opción de superar contenidos de la asignatura para mantener la calificación de parte de la nota, previa a su evaluación en la prueba final de la asignatura. La práctica docente se ha llevado a cabo en una asignatura troncal con 126 alumnos, de los que han participado 87. Los resultados indican que se ha incrementado la asistencia a clase y la retroalimentación y proactividad de los alumnos a través de tutorías, foros y preguntas con relación a los tres cursos académicos anteriores. La práctica propuesta no aumenta sustancialmente la carga de trabajo del profesorado y mejora la compresión y el aprendizaje del alumno, así como la superación de las pruebas escritas de la asignatura.

Palabras clave: herramienta didáctica, participación, evolución académica, autoevaluación.

1. Introducción

En algunas asignaturas del ámbito de la ingeniería, especialmente en los cursos iniciales, existe una baja asistencia del alumnado a clase. Este hecho da lugar a un seguimiento reducido de la materia, repercutiendo esto en una disminución del rendimiento académico. Los estudiantes no se encuentran motivados en determinadas materias teóricas [1] por lo que los docentes en este ámbito tratan de fomentar un clima propicio para que la participación aumente y favorecer el aprendizaje. En la actualidad, el docente universitario se encuentra con el reto de transmitir el conocimiento tradicional y contemporáneo de la técnica e integrarlo con las nuevas tecnologías de la información y la comunicación. El uso de técnicas de aprendizaje basadas en la mecánica de los juegos (gamificación) ha resultado de gran utilidad para conseguir este objetivo [2]. Este recurso permite al estudiante aprender mediante dinámicas de juegos utilizando tecnología de uso habitual y ágil como el smartphone, entre otras. Existen numerosas aplicaciones gratuitas que han abierto un gran abanico de posibilidades para los retos que se plantean en la educación

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3416

superior y, fundamentalmente, en el ámbito ingenieril, donde se observan bajos niveles de motivación.

Se parte de la hipótesis de base en la cual una asistencia y participación en clase, seguida de un seguimiento adecuado del transcurso de la asignatura, repercute positivamente en los resultados académicos de los estudiantes. Para evaluar dicha hipótesis, se plantea un sencillo método docente basado en la evaluación intermedia mediante el uso de la gamificación. Se ha demostrado, a través de diversos autores, la utilidad de herramientas de gamificación en el aula de cara a mejorar la motivación y atención en clase [3]. Además, el proceso de evaluación continua redunda en la calidad del aprendizaje [4], y, si esta se plantea con la posibilidad de utilizar los resultados intermedios para reducir materia o como complemento a la calificación final, puede incrementar la asistencia del alumno a clase y a las tutorías. Finalmente, el profesorado puede disponer de los resultados de cada una de dichas evaluaciones intermedias para incidir en aquellos contenidos que parezcan tener menor comprensión entre el alumnado, antes de terminar el curso.

Sin embargo, fomentar la asistencia y motivación del estudiante únicamente con test gamificados puede no ser suficiente y es necesario incentivar al alumnado con alguna recompensa. El uso de exámenes parciales puede ser una herramienta de valía para fomentar el estudio continuado [4], principalmente reduciendo la cantidad de materia a evaluar, ya que se percibe una mayor probabilidad de aprobar la asignatura. En este sentido, puede ser interesante mezclar el uso de exámenes parciales con el uso d técnicas de gamificación, realizando entonces pequeñas evaluaciones que puedan reducir materia.

El objetivo del presente trabajo es incrementar la motivación, la participación del alumno en clase e incentivar el estudio continuado para mejorar la tasa de rendimiento de la asignatura.

2. Materiales y métodos

La práctica docente se ha llevado a cabo en la asignatura "Motores y máquinas" del Grado Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural de la ETSIAM, en la Universidad de Córdoba. La asignatura se imparte en el primer cuatrimestre, segundo curso, es obligatoria y cuenta con 4,5 créditos ECTS. Posee en su historial valores reducidos de tasas de rendimiento y de asistencia a clase. En el curso 2018/19 la asignatura contó con un total de 126 alumnos matriculados, el 65,1% eran de primera matrícula, 20,6% de segunda matrícula y, el resto, 14,3%, de tercera o superior matrícula. Sin embargo, el 71,4% nunca se había presentado a examen, el 7,9% se había presentado una vez y 10,3% había consumido dos convocatorias.

La metodología a desarrollar fue la siguiente:

1. Al inicio de la asignatura se explicó en clase el método de obtención de la calificación de la materia, bien a través de un examen final, o bien, promediando este con la calificación intermedia obtenida de cada unidad didáctica cursada a través de tests gamificados.
2. Se impartieron las clases magistrales sobre los contenidos con carácter más teórico.
3. Las pruebas se hicieron en los últimos 5 minutos de clase al finalizar una unidad didáctica, sin previo aviso.
4. Se repitieron los pasos 2 y 3 hasta finalizar los contenidos expresados en la guía docente.

La herramienta utilizada para la gamificación ha sido la aplicación "Kahoot" (kahoot.com), de uso gratuito y que permite obtener en tiempo real los resultados de pruebas de respuesta corta al profesor y, a la vez, a los estudiantes, que compiten por alcanzar un pódium. Se realizaron 6 pruebas con un total de 64 preguntas, con 4 opciones, una sola correcta y 20-25 segundos por pregunta (Figura 1). El alumno tuvo que introducir el código de la prueba proporcionado por el profesor, en su tableta, PC, o móvil y acceder al mismo con su DNI como usuario. De las 15 semanas de duración del cuatrimestre, las semanas que se realizaron las pruebas fueron la

semana 3, 5, 7, 10, 13 y 14, cuando se había impartido la materia en clase teoría o práctica. Solamente los alumnos que asistieron a clase pudieron realizar la actividad de gamificación.



Figura 1. Ejemplo de una pregunta con cuatro opciones y respuesta única en Kahoot.

Al final de cada prueba se registró la calificación obtenida para generar una calificación mínima ponderada en el examen de teoría al final de la asignatura. De esta manera, el alumno tuvo constancia de la nota tras cada prueba y pudo detectar cuáles fueron sus fallos para repasar aquellos contenidos que no haya comprendido con estudio o el uso de tutorías. El profesor tuvo digitalizados las notas de cada uno de los alumnos para organizar su tiempo en aquellas partes que generalmente tuvieran peores resultados. El examen final se realizó al finalizar el curso y su evaluación consistió en un tipo test verdadero/falso de 40 preguntas (45% nota), 3 problemas (45% nota) y 2 informes de prácticas y asistencia (10% nota).

3. Resultados y discusión

En el curso 2018/19, durante las dos primeras semanas la asistencia fue de un 65,5% de los alumnos (83 de los 126 alumnos matricularon en la asignatura) valor superior a la asistencia inicial en los dos cursos académicos anteriores, con una asistencia del 46,2 y 59,1%, respectivamente. En la actividad de gamificación en el curso 2018/19 participaron un total de 87 alumnos, con una partición media en las pruebas del 52,4%. Solamente 22 alumnos realizaron la actividad con más de un 75% de participación. Resultó interesante que el uso de los tests gamificados no conllevara implícitos matices negativos de entretenimiento o diversión, sino que fuese una herramienta más de apoyo a la docencia y que el estudiante así lo entendieses [5]. Como se muestra en la Figura 2, los alumnos que cursaban la asignatura por primera vez tuvieron una participación mayoritaria (70 alumnos) en la actividad de gamificación, seguidos de los alumnos de segunda matricula (12 alumnos). Destacó que 3 de los 7 alumnos de cuarta matricula participaron en las actividades.

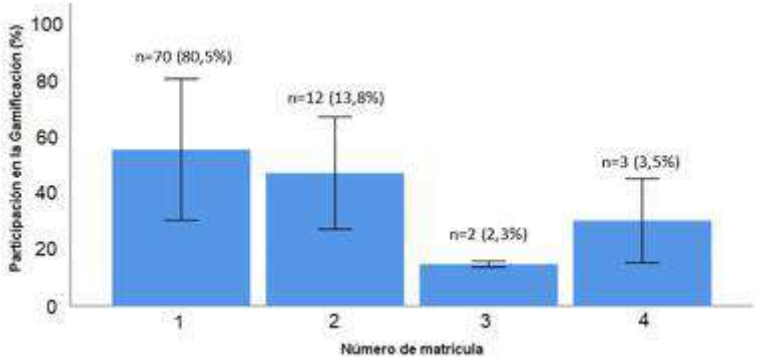


Figura 2. Porcentaje de participación de los alumnos en las pruebas de gamificación y su distribución según el número de matrículas realizadas en la asignatura.

La participación en la actividad de gamificación fue irregular a lo largo del cuatrimestre, de tal forma que en las últimas semanas solamente un número cercano a 20 alumnos seguían las pruebas y asistían a clase (Figura 3). Con 4 opciones por pregunta, el porcentaje de acierto se situó por encima del 50% en las últimas 3 pruebas (semanas 10, 13 y 14). Debido a que la participación en las pruebas de gamificación no implicó ninguna calificación negativa para el alumnado, más del 90% de aquellos que asistían a clase realizaron los tests. Esto ha permitido que el alumno pueda autoevaluarse durante el desarrollo de la asignatura sin que esto le conlleve una acción negativa sobre su puntuación final. Es posible que aquellos alumnos con una calificación baja en las pruebas pudieran haber desistido en su asistencia a clase, siendo un aviso de que su seguimiento no era el esperado, aunque este hecho no se ha podido confirmar. En este sentido, hay que tener en cuenta que la autoevaluación puede tener una connotación negativa [6] debido a la frustración que causa una nota baja, aunque el objetivo perseguido fuese una corrección prematura vía estudio, en caso de necesitarlo.

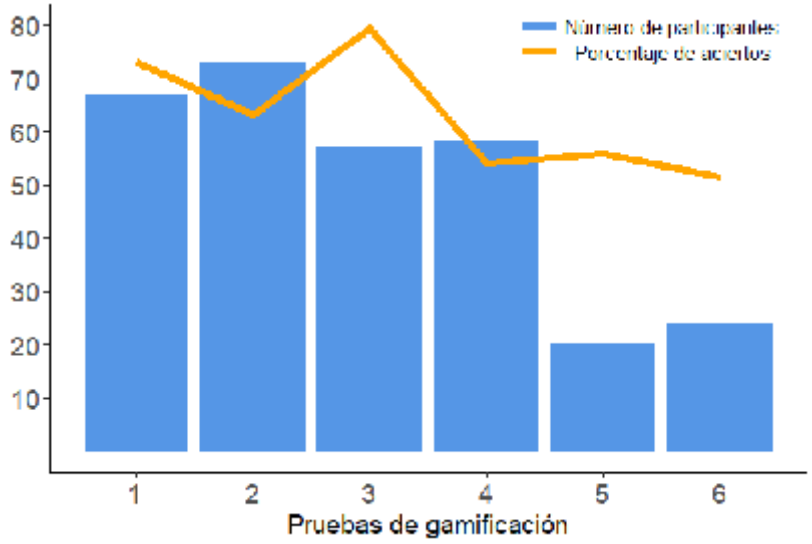


Figura 3. Número de alumnos que participó en cada prueba y porcentaje de aciertos de las preguntas.

En el año de realización de las pruebas de gamificación se mejoró la asistencia a clase de los alumnos, como se observa en la Figura 4. El dato de mejora de la participación coincide con otros estudios en la mejora de participación y asistencia [7]. Sin embargo, la gamificación no consiguió

reducir el abandono en la asistencia a lo largo del cuatrimestre, con valores finales similares a los años anteriores. Especialmente dramática es la baja tasa de asistencia en las últimas semanas, con valores menores al 25% de asistencia, siendo estas semanas de especial importancia en los contenidos del temario, con ejercicios prácticos para reforzar la adquisición de las competencias de la asignatura. Existen numerosos factores que justifican el grado de asistencia a clase de carácter personal [8], aunque la tendencia a la baja constante en todos los años parece indicar que el grado de asistencia tenga un carácter estratégico, en el que los estudiantes empleen el tiempo de las clases en otras tareas como estudio o finalización de prácticas.

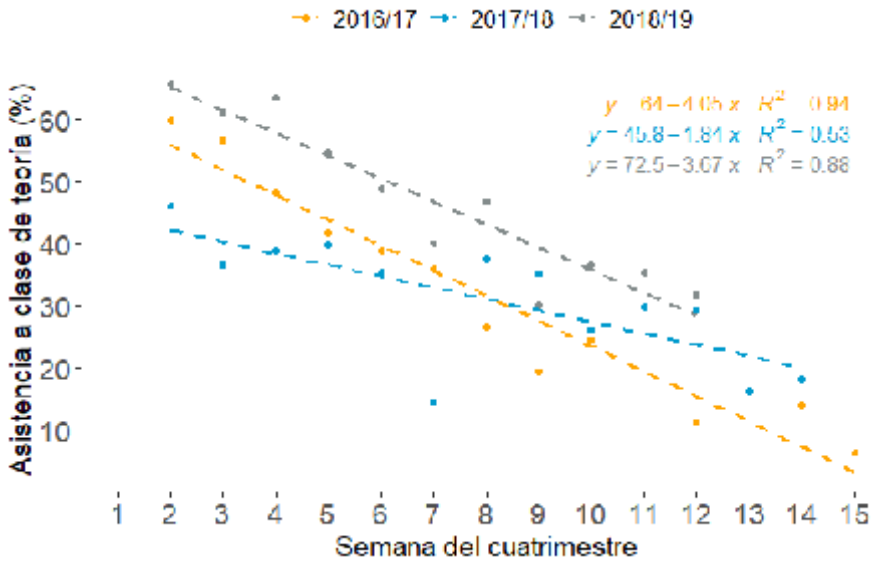


Figura 4. Asistencia de los alumnos a clase durante las 15 semanas del cuatrimestre. En el curso 2018/19 se realizó la prueba de gamificación.

Las tasas de rendimiento, entendida como el número de alumnos que superan la asignatura respecto a los alumnos que están matriculados, fue superior en el año de la experiencia de gamificación, con un valor del 63,5%. Este valor, aunque fue reducido, ha mejorado el resultado de los tres últimos años, siendo del 24,0, 57,6 y 43,5% para los cursos 2015-16, 2016-17 y 2017-18, respectivamente. Sin embargo, el 86% de los alumnos que participaron en las actividades con al menos 3 pruebas (43 alumnos) superaron la asignatura.

De los resultados obtenidos destaca que el grado de participación en las actividades de gamificación estuvo correlacionada positivamente de forma significativa con la calificación final alcanzada por los alumnos en la asignatura (Coef. Person = 0,523, sig = 0,001, n = 109) y con su asistencia a las prácticas de la asignatura (Coef. Person = 0,571, sig = 0,001, n = 125). Esto indica que estos alumnos realizaron un seguimiento adecuado de la asignatura. Esto indica que una asistencia productiva repercute positivamente en los resultados finales [9].

Sin embargo, la asistencia a las prácticas de la asignatura no estuvo correlacionada con la calificación alcanzada por los alumnos en la asignatura (Coef. Person = 0,80, sig = 0,062, n = 108) a pesar de que debían entregar informes de prácticas y que estos se valoraban en la calificación final. Aunque los resultados son de un único año, parece indicar que la mera asistencia a las prácticas de la asignatura, sin un elemento que les haga participe del seguimiento de la misma, no ha resultado un instrumento eficaz para superar la asignatura.

Las encuestas realizadas durante las pruebas de gamificación mostraron que prácticamente a la totalidad de los alumnos les resultó útil la experiencia, que el 90% de ellos la recomendaría

para incluirla en otras asignaturas y que ésta tuvo una aceptación positiva para el 81,25% de los participantes.

4. Conclusiones

Las actividades de gamificación en aula son seguidas con gran interés por los alumnos de primera matrícula, siendo estos los que suelen acudir de forma más asidua a clase. Aunque los resultados de este estudio están limitados a un único año de experiencia, se destaca el interés mostrado por los alumnos de cuarta matrícula en la participación a la actividad y la mejora en de su asistencia a clase. Se ha podido observar que estas técnicas didácticas basadas en juegos pueden ser una herramienta interesante en el proceso de autoevaluación del alumnado, no obstante, no han sido un factor decisivo para incrementar la asistencia a clase a lo largo de la asignatura. Sin embargo, se han constatado resultados positivos en la tasa de rendimiento de la asignatura, aumentando conforme a cursos académicos anteriores, y en la participación e implicación de los alumnos en clase, con percepción de efectos inmediatos y en mayor medida que la entrega de informes y memorias de prácticas, contribuyendo en la mejora de la tasa de rendimiento anteriormente mencionada.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida por la Universidad de Córdoba, dentro del Plan de Innovación y buenas Prácticas docentes 2018/2019, al proyecto 2018-2-5001 "Uso de autoevaluación intermedia gamificada en asignaturas de ingeniería".

Referencias

1. López Fernández, D., Alarcón Cavero, P.P., Rodríguez Sánchez, M. Casado Fuente, M.L. Motivación en estudiantes de ingeniería: Un caso de estudio con teorías e instrumentos para su medida y desarrollo. Revista de Docencia Universitaria. 2014, 12(4), 343-376.
2. Lee, J. J. Hammer, J. Gamification in Education: What, How, Why Bother? Academic Exchange Quarterly. 2001, 15(2).
3. Christoforou, A. P., Yigit, A. S. Improving teaching and learning in engineering education through a continuous assessment process. European Journal of Engineering Education. 2008, 33(1), 105-116.
4. Dochy, F.., Segers M., Sluijsmans D. The use of self-, peer and co-assessment in higher education: A review. Studies in Higher education. 1999, 24(3), 331-350.
5. Erenli, K. The impact of gamification: Recommending education scenarios. International Journal of Emerging Technologies in Learning. 2013, 8(1), 15-21.
6. Valdivia I. "La coevaluación como alternativa para mejorar la calidad del aprendizaje de los estudiantes universitarios: valoración de una experiencia. Revista interuniversitaria de formación del profesorado. 2008, 63, 127-140.
7. Barata G., Gama S., Jorge J., Gonçalves D. Improving Participation and Learning with Gamification. In International Conference on Gameful Design, Research, and Applications, Toronto, Canada, October 2012, 10– 17
8. Kelly G. Lecture attendance rates at university and related factors. Journal of Further and Higher Education. 2012, 36.1, 17-40.
   Obeidat, S., Bashir, A., Jadayil, W. A. The importance of class attendance and cumulative gpa for academic success in industrial engineering classes. International Journal of Humanities and Social Sciences. 2012, 6, 139-142.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Huertos académicos como herramientas de innovación docente en el Campo de prácticas de la ETSIAM de Albacete de la Universidad de Castilla-La Mancha

M. Suárez[1], R. Bernabéu[2]

[1] ETSIAM (UCLM), Paseo de los Estudiantes, s/n, 02071, Albacete, España; mariano.suarez@uclm.es
[2] ETSIAM (UCLM), Paseo de los Estudiantes, s/n, 02071, Albacete, España; rodolfo.bernabeu@uclm.es

Resumen: Los huertos académicos son espacios destinados al cultivo de flores, plantas aromáticas, hortalizas, hierbas medicinales, y frutales a escala doméstica, en un entorno de infraestructuras universitarias. Este tipo de infraestructuras permiten, por parte del alumnado, la adquisición de conocimientos prácticos, que mejoran la comprensión de conceptos teóricos, competencia y concienciación del medio ecológico, incluyendo aspectos sobre seguridad y marketing agroalimentario. Estas instalaciones de huertos académicos dan viabilidad académica a los campos de prácticas de las infraestructuras universitarias para la realización de prácticas continuas, siguiendo un itinerario de cultivo y la convivencia con el entorno medioambiental y socioeconómico de la vida académica. Por ello se describen las competencias que las instalaciones de los huertos académicos permiten proporcionar al alumnado según los planes de estudio del Grado en Ingeniero Agrícola y Agroalimentario y la Orden CIN/323/2009, de 9 de febrero. Analizadas las competencias que se cubre con este tipo de proyectos, se evalúa la implantación del mismo en la ETSIAM de Albacete, después de la constitución del grupo docente, el desarrollo de una reglamentación de funcionamiento, los trabajos de replanteo, la creación y dotación de infraestructuras para el desarrollo de la producción de cultivos en los huertos académicos, así como la secuenciación de las fases de producción de cultivos, y el análisis de la calidad agroalimentaria de los mismos y las perspectivas de comercialización.

Palabras clave: Cultivos, competencias profesionales, grado, ingeniería

1. Introducción

El huerto es una forma natural y económica de producir alimentos sanos, con la que se busca mantener la fertilidad natural del suelo manteniendo el equilibrio entre los elementos.

Los huertos son:

- sistemas integrados de elementos que están interrelacionados y se influyen mutuamente,
- sistemas abiertos en el que se producen intercambios de materia y energía con su ambiente,
- organizaciones que permiten analizar relaciones entre los seres a distintos niveles,
- medios de estudiar las múltiples relaciones socioculturales.

Los huertos académicos son herramientas útiles para llegar a trabajar contenidos básicos de la formación técnica del alumno, la educación ambiental y la comprensión del funcionamiento de unos sistemas que tienen fundamentos pedagógicos, psicológicos y sociológicos.

El objeto de innovación docente es desarrollar huertos académicos que permitan adquirir al alumnado conocimientos prácticos, con la finalidad de que mejoren su comprensión de conceptos

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3460

teóricos, competencia y concienciación del medio ecológico, incluyendo aspectos sobre seguridad y marketing agroalimentario.

La ejecución de dicha actividad permite coordinar las prácticas docentes de las asignaturas en un itinerario único, fomentar formas de trabajo y producción de alimentos, familiarizar con métodos de producción sostenibles de alimentos y que sean importantes para la seguridad alimentaria, y aumentar y promover el sentido de la responsabilidad e implicación del estudiante en la vida académica.

Este proyecto se puede complementar con el estudio de seguimiento de los cultivos con las tecnologías de la información y la telecomunicación, y las relaciones de los huertos académicos para implementarse en granjas académicas.

2. Materiales y métodos

La infraestructura inicial y los métodos para comenzar la actividad se exponen en este apartado.

2.1. Materiales

El Campo de Prácticas de la ETSIAM, se compone de un conjunto de edificios e infraestructuras que cumplen funciones docentes e investigadoras ligadas al sector agrario. Se trata de una parcela con acceso directo desde la carretera comarcal CM3203 con una extensión total de 15 ha de las que 9 ha están dedicadas a campo de prácticas y de experimentación en materias agrícolas, ganaderas y forestales.

Este espacio cuenta con la infraestructura suficiente para desarrollar esta actividad, entre las que se encuentran: vivero 1 de 200 m^2, vivero 2 con 120 m^2, vivero 3 con 200 m^2, vivero 4 con 100 m^2, umbráculo con 90 m^2, invernadero 1 con 260 m^2, invernadero 2 con 170 m^2, invernadero 3 con 160 m^2, invernadero 4 con 130 m^2, nave de recursos y especies cinegéticas de 750 m^2, parcela de ensayo de mejora vegetal con 3.028 m^2, parcela de ensayo de pascicultura con 4.681 m^2, parcela de ensayo de reforestación e impacto ambiental con 1.024 m^2, parcela de ensayo de modelos de masas forestales con 3.226 m^2, parcela de superficie forestal para ensayos con 9.685 m^2, parcelas para ensayos de cultivos con 12.421 m^2, granja experimental de recursos y especies cinegéticas con 27.495 m^2, además de otras parcelas que contienen colecciones de frutales, viña y olivo.

Para la actividad docente de huertos académicos se seleccionó la parcela de 12.421 m^2 destinada a ensayos de cultivos. Esta parcela cuenta con dos tomas de agua de riego y un seto perimetral formado por almeces (*Celtis australis*), saucos (*Sambucus nigra*) y enebros (*Juniperus communis*). Los invernaderos y viveros anexos dotan al proyecto de espacio para semilleros.

2.2. Métodos

Los métodos para poner en marcha una iniciativa de esta naturaleza para que sea una herramienta de innovación educativa requieren:

- Coordinación de asignaturas que se pueden encuadrar en el proyecto.
- Revisión de competencias generales y específicas de la titulación de Grado que se adecuan a la actividad docente.
- Replanteo de parcelas por medio de técnicas topográficas.
- Creación de infraestructuras usando técnicas constructivas e hidráulicas.
- Itinerarios de prácticas conjuntas seleccionando métodos propios de la elección de especies, laboreo, siembra, fertilización, tratamientos y recolección.
- Valoración de la calidad alimentaria.
- Complementariamente se realizará la creación de documentos gráficos con vuelo de dron. Los vuelos han sido realizados con un microdrone de tipo cuadracóptero, md-400 (Microdrones,

Inc., Kreuztal/Alemania), de aterrizaje y despegue vertical (Figura 1). La obtención de imágenes de espectro visible se realizó mediante una cámara digital automática Canon Ixus 115.



Figura 1. VANT utilizado

- Desarrollo de cuestionarios con evaluación de resultados. Dentro de esta actividad, e independientemente de la obligación por parte de la docencia de las asignaturas, se preguntó a los alumnos el cuestionario de la tabla 1.

Tabla 1. Encuesta a los usuarios

1.- Explica brevemente cuál es tu motivación y cuáles son tus expectativas en esta actividad
2.- En qué meses vas a realizar tus cultivos, en que horario aproximado (mañana, tarde, entre semana, fin de semana).
3.- Preferencias: a. Huerto/Viveros/ambos b. Individual/Equipo: indicar miembros UCLM y en su caso personas de tu entorno cercano de apoyo puntual. c. Dedicación solo durante el periodo lectivo o también durante el verano.
EXTRA VOLUNTARIO: Indica alguno de los objetivos didácticos mencionados antes en el que te gustaría incorporarte*

3. Resultados y discusión

3.1. Competencias implicadas

Los huertos académicos integran un gran número de competencias del título, tanto generales como específicas, que llegan a cubrir hasta un 20 % de las mismas y entre las que se encuentran:

Competencias generales

Capacidad de organización y planificación, toma de decisiones, habilidades en las relaciones interpersonales, reconocimiento de la diversidad y multiculturalidad, aprendizaje autónomo, creatividad, iniciativa y espíritu emprendedor, motivación por la calidad, sensibilidad por temas medioambientales, capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica, conocimientos básicos de la profesión.

Comprende, así mismo, conocimiento adecuado de los problemas físicos, las tecnologías, maquinaria y sistemas de suministro hídrico y energético, los límites impuestos por factores presupuestarios y normativa constructiva, y las relaciones entre las instalaciones o edificaciones y explotaciones agrarias, las industrias agroalimentarias y los espacios relacionados con la jardinería y el paisajismo con su entorno social y ambiental, así como la necesidad de relacionar aquellos y ese entorno con las necesidades humanas y de preservación del medio ambiente.

Capacidad para desarrollar sus actividades, asumiendo un compromiso social, ético y ambiental en sintonía con la realidad del entorno humano y natural, y para el trabajo en equipos multidisciplinares y multiculturales.

Competencias específicas

Conocimientos básicos de geología y morfología del terreno y su aplicación en problemas relacionados con la ingeniería y la climatología.

Conocimiento de las bases y fundamentos biológicos del ámbito vegetal y animal en la ingeniería.

Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de identificación y caracterización de especies vegetales.

Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de las bases de la producción vegetal, los sistemas de producción, de protección y de explotación.

Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de ecología.

Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de Cartografía, Fotogrametría, y teledetección en agronomía.

Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de tecnologías de la producción vegetal.

Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de sistemas de producción y explotación.

Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de protección de cultivos contra plagas y enfermedades.

Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de tecnología y sistemas de cultivo de especies herbáceas.

Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de sistemas y tecnología del riego.

3.2 Resultado final de la infraestructura desarrollada entre las soluciones alternativas

La parcela utilizada para huertos académicos está limitada en su cara sur por un seto alto de cipreses que provoca una larga sombra prácticamente permanente. Por este motivo la zona se ha desestimado para el cultivo, dejando una franja de unos 600 m2 de suelo desnudo. Esta franja se dedicó inicialmente para acopio de diversos materiales, como gomas portagoteros, sacos de humus, pacas de paja, y otros. Allí se colocaron también los composteros, qué al tener poca capacidad, se llenaron rápidamente. Esto indujo a que se acumularan todos los restos vegetales de cultivos, así como otros residuos no deseados (bolsas de plástico, trozos de goma no utilizables, cintas de rafia para el atado, cañas de entutorado usadas, etc). El aspecto de esa zona llegó a ser desordenado y poco estético e inducía a su mal uso como vertedero. Por este motivo, y con la finalidad de fomentar el uso civilizado y responsable de las zonas y materiales comunes en los usuarios, la franja sombreada por los cipreses se ha engravillado, para colocar en ella unas mesas de trabajo, convirtiéndose en un aula al aire libre.

Antes del establecimiento de las primeras parcelas se realizó una labor mecanizada a toda la superficie. Esta preparación primaria y profunda, con el objeto de romper posibles horizontes que dificulten el desarrollo radicular, se realizó en previsión de que, una vez instalados los huertos, las labores manuales o con motocultor no conseguirían alcanzar la profundidad suficiente. Con el terreno alisado se realizó el planteamiento de las parcelas y los pasillos correspondientes, quedando señalizadas.

Se decidió, por consultas previas que las parcelas fueran de 25 m^2. Se realizó el replanteo y marcado de 30 parcelas elementales con superficies de 25 m^2 (5*5), de las cuáles por petición expresa, 6 son dobles, resultando 6 parcelas de 55 m^2 y 18 de 25 m^2.

Se tendió una tubería secundaria entre los dos hidrantes, a lo largo del pasillo central, y se colocaron las derivaciones correspondientes para la toma de agua individualizada en cada parcela. La instalación del sistema de riego por goteo fue realizada por cada usuario en su parcela con materiales (tubería portagoteros, de diversos caudales y separaciones, llaves de paso y otros accesorios como codos y tes), incluidos contadores.

Instalación del sistema de distribución de agua de riego. Las obras de acondicionamiento y puesta en marcha del riego de las parcelas ha requerido del descubrimiento y reparación del hidrante, que se suministra de un pozo con caudal suficiente para atender el regadío en el periodo de mayores necesidades hídricas. A partir de dichos hidrantes se han tendido las secundarias con tuberías de 40 mm, de las que parten una toma a cada parcela para que cada usuario realice su propia instalación de tuberías portagoteros.

Se ha habilitado una caseta de herramientas de uso común, con un material mínimo necesario expuesto en la tabla 2, que ha proporcionado la experiencia del uso conjunto del material. Es de destacar que todo el material, transcurrido un año de campaña se encuentra en buen estado.

Tabla 2. Material inventariado en la caseta de herramientas

Para el laboreo del suelo	Para la instalación de riego	Para el cultivo
1 motocultor de 3 CV	5 sacabocados	2 carretillas
10 azadas de hoja mediana	1 soplete pequeño de gas	5 capachos
10 azadillas	Llaves y destornilladores	100 cañas de entutorado
4 rastrillos	Teflón	Rollos de cuerda
2 palas de aluminio	Alambre	1 Mochila de tratamiento
2 picos	Accesorios de repuesto	Azufre (Autorizado ecológico)
2 horcas		Sacos de humus de lombriz
3 palas finas		

Se han colocado composteros para recoger el material vegetal sobrante de los cultivos. Inicialmente dos de 300 l, pero actualmente hay seis de 600 l.

3.3. Especies que resultaron implantadas por iniciativa de los usuarios por considerarlas de mayor interés y provecho

En la campaña inicial se pidió a los usuarios que proporcionaran datos sobre las especies y variedades cultivadas. En la tabla 3 se recoge el resumen de los datos aportados.

Tabla 3.- Número de variedades en cada una de las 36 especies cultivadas.

Especie	Número de variedades	Especie	Número de variedades	Especie	Número de variedades
Acelga	1	Coliflor	1	Melón	3
Achicoria	1	Combrios	1	Patata	2
Ajo	2	Escarola	1	Pepino	2
Albahaca	2	Espinaca	1	Perejil	1
Alcachofa	1	Fresa	1	Pimiento	5
Apio	1	Girasol	2	Puerro	1
Berenjena	2	Guisante	1	Rábano	1
Calabacín	2	Haba	1	Rúcula	1
Calabaza	3	Judía	4	Sandia	2
Cebolla	3	Lechuga	3	Tabaco	1
Cilantro	1	Lichis	1	Tomate	6
Col repollo	1	Maíz	1	Zanahoria	1

En el conjunto de las parcelas se han cultivado al menos 36 especies distintas. Las más frecuentes han sido tomate y pimiento, presentes en todas las parcelas, seguidos por berenjena, melón, pepino y sandía, presentes en casi todas. Además, en muchos de los huertos se cultivaron

algunas plantas acompañantes: aromáticas, como manzanilla y tomillo, y otras de flor, como caléndulas, tagetes, etc. En cuanto a la diversidad dentro de cada huerto individual ha sido muy variable, encontrando parcelas con solo 6 especies hasta la más diversa con 25 especies.

En este curso todos los usuarios de los huertos deben recoger, además de las especies cultivadas, las tareas realizadas en los huertos en una Memoria de actividades. Para ello, se les ha proporcionado un modelo fácil de completar que recoge aspectos botánicos, agronómicos y tecnológicos de cada una de las especies o variedades cultivadas. La evaluación de estas memorias permitirá al Equipo docente valorar el nivel de compromiso y conocimientos adquiridos.

3.4. Toma de documentación gráfica

El objetivo de esta tarea es la práctica de aplicación y tratamiento de imágenes de alta resolución, obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para el seguimiento de los huertos. Esta tarea permite transferir a los alumnos la utilidad de esta tecnología en la agricultura de precisión.

Una vez ejecutados los vuelos, se puede obtener una ortoimagen georreferenciada con un GSD, en este caso, de 1,5 cm. En la figura 2, recoge una imagen obtenida el 9 de mayo, donde se puede observar que la mayoría de los huertos tienen poco desarrollo vegetativo, propio de la fecha de vuelo.



Figura 2. Imagen de los huertos correspondiente a una de las huellas calculadas con MFLIP

Con este procedimiento, se pude obtener el modelo 3D de la zona volada (Figura 3), permitiendo la estimación de biomasa aérea.

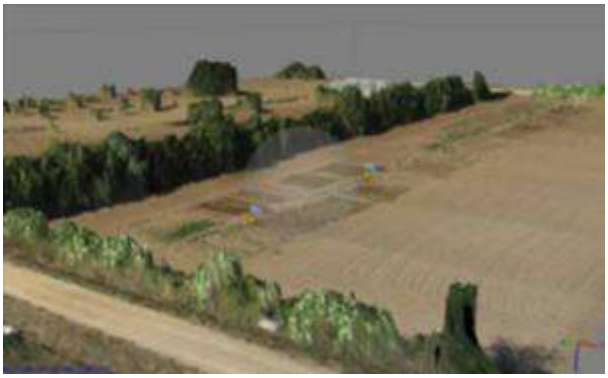


Figura 3. Modelo 3D de la zona de vuelo

3..5 Resultado de las encuestas planteadas

El cuestionario planteado fue respondido por el 94% de los que inicialmente habían manifestado su interés. Las respuestas al cuestionario permitieron extraer mucha información sobre los intereses de los usuarios y cuales debían ser los siguientes pasos a dar. En la tabla 4 se muestra una valoración general de dichas respuestas expuesta al equipo docente.

Tabla 4. Valoración de las respuestas al cuestionario planteado a los usuarios HuViCa

Pregunta 1. Motivación, expectativas	Diversidad de intereses. Destacadas: Interés por "Tocar tierra", Consumir lo que yo produzco, Aprender de forma práctica.
Pregunta 2. Calendario, horario	Unos pocos todo el año, la mayoría en el verano, 1/3 solo durante el curso. Horario de tardes y fin de semana.
Pregunta 3. Preferencias	Se hacen equipos por iniciativa propia. Se confirma que un tercio abandonaran al acabar el curso.
Pregunta 4. Implicación en objetivos docentes	Mayoritariamente en Semillero y Seguimiento de plagas y enfermedades

Los objetivos didácticos propuestos, algunos de ellos ya contemplados, fueron: Caracterización agronómica de variedades locales, producción viverística forestal, semilleros hortícolas, seguimiento fenológico y de plagas y enfermedades, obtención de híbridos y evaluación de características de calidad.

4. Conclusiones

Esta iniciativa, ha permitido considerar que ha habido una amplia respuesta positiva por parte de los sectores universitarios implicados, profesores y alumnos, la puesta en ejecución de una infraestructura a terrenos infrautilizados, aprendizaje académico, la creación de herramienta docente de carácter innovador.

Por ello se establece el propósito de ampliar los objetivos didácticos, proponiendo diversos estudios con una posibilidad de ampliación de capacidades académicas del título.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Las exposiciones interactivas para escolares como herramienta de motivación de los estudiantes de Ingeniería Forestal y del Medio Natural

E. García[1], J.R. Villar[1] y M. Moya[1]

[1] Universidad de Extremadura. Centro Universitario de Plasencia. Avda. Virgen del Puerto nº 2, 10600 Plasencia (Cáceres); egciadel@unex.es; jrvillar@unex.es; manuelmi@unex.es

Resumen: La innovación docente se concibe como la vía idónea para mejorar la formación del alumnado en competencias técnicas y transversales en el Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural de la Universidad de Extremadura, pues los estudiantes presentan importantes carencias, especialmente de tipo técnico, al haber accedido al Grado, mayoritariamente, desde algún ciclo formativo de grado superior. Estas carencias reducen sensiblemente su motivación para el estudio y para la adquisición de dichas competencias. Para contrarrestar este problema se ha diseñado una estrategia innovadora bajo el lema "FOREXPO: enseñando se aprende más", consistente en una exposición interactiva sobre espacios naturales protegidos, física y medio ambiente, que es ofrecida por los estudiantes del Grado a los escolares de la ciudad de Plasencia cada primavera, desde 2013, para aprender de manera directa y amena a través de maquetas y exposiciones de tipo interactivo en las que estos últimos pueden experimentar, tocar, observar, etc. FOREXPO es novedoso porque combina diversas metodologías innovadoras, como el Aprendizaje Basado en Problemas (ABP), el Aprendizaje por Servicio (ApS), el "enseñando se aprende más" (learning by teaching) y porque, además, facilita la colaboración entre dos materias del Grado, algo muy enriquecedor desde muchos puntos de vista. Finalmente, con esta actividad se contribuye a difundir la labor del Ingeniero Forestal en la sociedad combinando tanto la parte científica como la parte medioambiental de manera educativa.

Palabras clave: FOREXPO, innovación docente, Aprendizaje Basado en Problemas, Aprendizaje por Servicio, enseñando se aprende más

1. Introducción

El Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural (IFMN) de la Universidad de Extremadura (UEX), ofertado en el Centro Universitario de Plasencia, se caracteriza porque en los últimos años un porcentaje elevado de los alumnos de nuevo ingreso proceden de ciclos formativos de grado superior gracias a la aprobación del Real Decreto 1618/2011, de 14 de noviembre, sobre reconocimiento de estudios en el ámbito de la educación superior (BOE núm. 302, de 16 de diciembre de 2011). En la formación que recibe este tipo de alumnado se detecta una carencia importante en materias de base técnica, que son esenciales en los Grados de Ingeniería, lo que conlleva el que la mayoría de estos estudiantes pierdan la motivación para el estudio y, por ende, también para la adquisición de competencias transversales que son cada vez más demandadas en el ámbito profesional.

Como se definía en el proyecto "Tunning Educational Structures in Europe", "las competencias representan una combinación dinámica de atributos en relación con conocimientos, habilidades, actitudes y responsabilidades, que describen los resultados de aprendizaje de un

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3444

programa educativo o lo que los alumnos son capaces de demostrar al final de un proceso educativo" [1]. Con esta definición la competencia implica la movilización de distintos atributos del alumno, tanto visibles (conocimientos y habilidades), como invisibles (actitudes y responsabilidades).

Por este motivo, desde la implantación del proceso de Bolonia en la universidad española, el profesorado del Grado en IFMN de la UEX se ha preocupado por la innovación docente, como lo atestigua la concesión y posterior desarrollo de diversos proyectos competitivos de este tipo para lograr fortalecer las carencias detectadas en el alumnado, tanto técnicas como transversales [2-5], mejorando a la vez tanto las tasas de éxito alcanzadas como el rendimiento en las materias implicadas.

Entre las competencias transversales cabe destacar la importancia creciente que posee la inteligencia emocional. Este concepto, que es relativamente nuevo, fue utilizado por primera vez por Peter Salovey y John Mayer en 1990 [6], y se ha hecho tremendamente popular porque explica y evidencia cómo personas con un buen cociente intelectual fracasan en ocasiones y, sin embargo, otras que poseen un cociente intelectual más bajo fracasan escolarmente pero posteriormente triunfan en diversos ámbitos [7]. Este mismo autor [8] propuso un modelo de inteligencia emocional sustentado en cuatro brazos (autoconciencia, autogestión, conciencia social y gestión de relaciones), de cada uno de los cuales posteriormente obtenía diversas competencias emocionales, tales como la autoconciencia emocional, la autoconfianza, el autocontrol, la integridad, la adaptabilidad, la iniciativa, la empatía, la comunicación, la gestión de conflictos o el liderazgo, entre otros, considerando un total de 20 competencias. Estas competencias se han ido trasladando posteriormente al mundo profesional y a los negocios, de modo que lo utilizan muchas empresas actualmente para tratar de encontrar los mejores candidatos para determinados puestos de trabajo que puedan requerir en un momento dado.

Para lograr que los estudiantes de la titulación sean capaces de desarrollar las competencias técnicas y transversales deseadas en su formación, las metodologías docentes elegidas deben ser las más adecuadas para ello, centrándose fundamentalmente en el papel activo del alumno en lugar de su papel pasivo, como se viene haciendo en la enseñanza tradicional [9]. De entre las existentes, las del "Aprendizaje Basado en Problemas" (ABP), impulsada, entre otros, por Olsen y Pedersen [10], el Aprendizaje por Servicio (ApS), que se desea arraigar en el ámbito universitario [11] y la de "Enseñando se aprende más" (learning by teaching), de la que también se han realizado experiencias piloto y se intenta implantar su uso con fines pedagógicos [12-15], son las elegidas por los profesores implicados en la actividad "FOREXPO: enseñando se aprende más" porque se han considerado idóneas para el alumnado del Grado en IFMN. Con ella se espera poder lograr en los estudiantes resultados parecidos a los alcanzados en otras experiencias en las que los alumnos enseñan a otros alumnos [16-18], además de facilitar la colaboración entre dos materias del Grado, algo muy enriquecedor desde muchos puntos de vista tanto para los profesores como para los alumnos que participan en su desarrollo.

Finalmente, con esta actividad se contribuye a difundir la labor del Ingeniero Forestal en la sociedad combinando tanto la parte científica como la parte medioambiental de manera educativa.

2. FOREXPO: Enseñando se aprende más

La actividad "FOREXPO: enseñando se aprende más" se viene proponiendo desde el curso 2012/2013 en el Grado en IFMN de la UEX en el Centro Universitario de Plasencia. Inicialmente se promovió desde la asignatura de "Física", asignatura obligatoria de primer curso del Grado, pero posteriormente, desde el curso 2014/15, se sumó a esta propuesta la asignatura "Gestión de Espacios Naturales Protegidos", optativa para alumnos de tercer y cuarto curso de la titulación. Desde entonces, y hasta la actualidad, ya han sido cinco las ediciones celebradas de esta actividad y los resultados obtenidos no pueden ser más satisfactorios, como se verá posteriormente al

analizar los resultados de las encuestas que se han realizado entre los participantes en la última edición celebrada correspondiente al curso 2018/19.

La asignatura de "Física" suele ser complicada para la mayoría de los estudiantes del Grado en IFMN porque, como se comentó en la sección anterior, muchos de ellos no tienen base técnica suficiente al provenir de ciclos formativos de grado superior. Este hecho provocó el que, tras la implantación del proceso de Bolonia en la UEX, al comenzar a recabarse datos sobre las tasas de éxito de las distintas materias impartidas, en esta asignatura concretamente dicha tasa fuera una de las más bajas de la titulación, y todo ello a pesar del enorme esfuerzo realizado por la profesora responsable de la asignatura para suplir las carencias de base que ya por aquel entonces se habían detectado. Por este motivo, para tratar de reconducir la situación, se percibió que los alumnos debían adoptar un papel más activo en la asignatura, dejando de ser meros receptores de información. Para ello, se plantearon diversos talleres de física que los propios alumnos debían ser capaces de poder desarrollar y explicar posteriormente y con los que se pretendía que aprendieran de manera más interactiva e intuitiva algunos de los fundamentos de la física cuya explicación teórica ya se les había facilitado previamente en clase, comprobando de primera manera mano cómo se cumplen en la realidad en la vida cotidiana.

Sin embargo, no sólo se plantea esta actividad únicamente desde el punto de vista de comprender mediante su puesta en práctica algunos de los fundamentos de la física, sino que también se desea ayudarles en el desarrollo de las competencias transversales, tan demandadas en el ámbito profesional actualmente. Al constatar que muchos de los estudiantes de los últimos cursos tenían muchas dificultades en ese sentido, por ejemplo, al defender públicamente sus trabajos fin de grado, pues les cuesta bastante hablar en público expresándose correctamente, o a organizarse para sacar delante de manera exitosa trabajos en grupo que se requieren en algunas asignaturas, entre otros aspectos, se creyó conveniente que los estudiantes comenzaran cuanto antes a desarrollar este otro tipo de habilidades. Por eso, se concibió que una buena manera de desarrollar conjuntamente estas competencias era conformar pequeños grupos para preparar y desarrollar cada uno de los talleres previstos, así como obligarles a exponer éstos en público, poniendo así en juego las metodologías de Aprendizaje Basado en Problemas y "enseñando se aprende más".

Como receptores de estos talleres se escogió a escolares que cursan tercero, cuarto, quinto o sexto de educación primaria. A esa edad los escolares están en condiciones idóneas para despertar en ellos el interés por la ciencia y el respeto por el medio ambiente. Por eso, aprovechando que esa labor de educación y sensibilización se viene haciendo por parte del profesorado de educación primaria, qué mejor manera de refrendarlo que permitir que ese mismo mensaje les llegue desde estudiantes universitarios que, con ejemplos prácticos muy sencillos de realizar, les permiten comprobar cómo aquello que se les explica en las aulas se lleva a cabo en la realidad. Pero es que, además, se les permite tocar lo que quieran, jugar con parte del material que se utiliza en estos talleres, observar, analizar, deducir y, en definitiva, participar activamente en una visita a la Universidad que seguro que no olvidarán fácilmente con el paso de los años. Se pone aquí en práctica, por lo tanto, la metodología del "Aprendizaje por servicio".

Dada la buena acogida que tuvo esta actividad en sus primeros años, se decidió que desde la asignatura "Gestión de Espacios Naturales Protegidos" también se propusiera algún taller, en este caso dándole un enfoque completamente medioambiental, sobre alguna de las temáticas que se tratan en la asignatura, aprovechando la excelente relación que existe entre los profesores responsables de ambas asignaturas. En este caso, al tratarse de una asignatura de carácter optativo, el número de alumnos que se matriculan en ella es menor, pues hay otras nueve asignaturas optativas a elegir y de ellas deben seleccionar cinco para finalizar la carrera, por lo que en este caso se propone un único taller pero con los mismos requisitos que se exigen en física, es decir, que se realice y se exponga en grupo ante los escolares que visitan el Centro Universitario de Plasencia.

Además, dado que en Plasencia mucha gente desconoce aún lo que se hace en el Centro Universitario, incluso muchos desconocen que hay un Centro Universitario, pues éste se asienta en un edificio que era un antiguo cuartel y que fue rehabilitado para convertirlo en un centro educativo (motivo por el que muchos placentinos aún denominan al edificio el "antiguo cuartel"), con el fin de difundir la titulación y acercar la ciencia a la sociedad, se dio difusión de esta actividad a los colegios de Plasencia y de otros municipios cercanos para que trajesen a sus alumnos a dicho Centro para que éstos disfrutaran y aprendieran con los talleres desarrollados por nuestros estudiantes. Por cuestiones de agenda, pues a los estudiantes se les computa las horas de trabajo totales que deben dedicarles a las distintas asignaturas, fijándose éstas en 150 horas en todo el cuatrimestre (6 créditos ECTS para cada asignatura), a esta actividad sólo se le puede dedicar entre tres y cuatro sesiones, celebrándose tradicionalmente los viernes por la mañana, pues es buen momento para los escolares, y preferiblemente en el mes de abril, porque para entonces los estudiantes han tenido tiempo desde febrero (mes en el que comienza el segundo cuatrimestre) para ir familiarizándose con ambas asignaturas, aprender algunos de los conceptos y fundamentos de las mismas, y poder organizarse para preparar los distintos talleres que expondrán posteriormente.

La duración de los talleres es de 15 minutos, de modo que a los colegios se les pide que compongan grupos de 50 escolares, aproximadamente, albergando a dos grupos cada una de las mañanas (unos 100 alumnos en total en cada una de las sesiones). Cada uno de estos grupos se divide en tres para los talleres de física, conformando subgrupos de 15-16 estudiantes para cada uno de los talleres que se les explica después, aproximadamente, mientras que para el taller de espacios naturales protegidos se permite que permanezcan los 50 juntos. Por este motivo, los estudiantes de física exponen 6 talleres a lo largo de cada una de las mañanas en las que se desarrolla FOREXPO, en los que se explican fenómenos como el funcionamiento de la capa freática, la sostenibilidad de las construcciones de paja, el comportamiento de los fluidos no newtonianos, el motor Stirling o el funcionamiento de un coche de hidrógeno, entre otros, mientras que los estudiantes de gestión de espacios naturales protegidos sólo desarrollan dos talleres cada vez (el mismo repetido), eligiendo temáticas diversas como la necesidad de creación de espacios naturales protegidos, los tipos de áreas protegidas que existen, las peculiaridades del Parque Nacional de Monfragüe, las especies más representativas de este espacio o pautas de buena conducta que se han de llevar a cabo en este tipo de espacios. Las figuras 1 y 2 ilustran el desarrollo de estos talleres.



Figura 1. Talleres de física expuestos por los alumnos de primer curso del Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural de la UEX.



Figura 2. Talleres de gestión de espacios naturales protegidos expuestos por los alumnos de tercer y cuarto curso del Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural de la UEX.

Conviene aclarar, no obstante, que los alumnos de física deben familiarizarse con todos los talleres que se proponen porque van rotando de unas semanas a otras, de modo que al final acaban comprendiendo todos los talleres planteados porque tienen que exponerlos ante los escolares, mientras que a los alumnos de gestión se les cita un único día (si hay alumnos suficientes matriculados en la asignatura), dos como mucho, pues la asignatura se imparte los miércoles y los jueves, de modo que los viernes están fuera del horario previsto para ella y se solapa en ocasiones con otras asignaturas que cursan algunos de los matriculados, por lo que se trata de facilitar su participación pero sin que ésta les impida compaginar esta actividad con las demás asignaturas.

3. Difusión de FOREXPO

Dado que en los últimos años se exige a los organismos públicos que rindan cuentas ante la sociedad para que ésta conozca qué se está haciendo, en el ámbito universitario la mejor manera de justificarse ante ella es dando a conocer por diversos medios las actividades desarrolladas y a las que el profesorado implicado dedica un gran esfuerzo y dedicación que muchas veces se desconoce fuera de este ámbito. Por esta razón, casi desde el principio, se han enviado notas de prensa para que los medios de comunicación se hicieran eco de esta actividad desarrollada en el Centro Universitario de Plasencia. Por este motivo, no es de extrañar que se hayan concedido algunas entrevistas en diversas cadenas de radio de ámbito local y/o regional y que, a su vez, la prensa escrita haya reflejado esta actividad en sus páginas ilustrándola debidamente. Se persigue así, por lo tanto, que la sociedad placentina esté al corriente de esta iniciativa, dando a conocer tanto la titulación como el Centro Universitario, para que cale en la sociedad la existencia de un centro educativo de estas características y un grado en el que se puede aprender enseñando a los demás. La figura 3 muestra algunas de las noticias aparecidas en los medios con motivo de la realización de FOREXPO en esta primavera de 2019.



Figura 3. Noticias de FOREXPO reflejadas en periódicos de difusión regional.

Pero no sólo se hacen eco del evento los medios de comunicación. Las figuras 4 y 5 muestran ejemplos de la difusión que dan los colegios que han tenido la oportunidad de llevar a sus alumnos al Centro Universitario de Plasencia para disfrutar de las jornadas de FOREXPO sobre lo acontecido en dicha actividad.

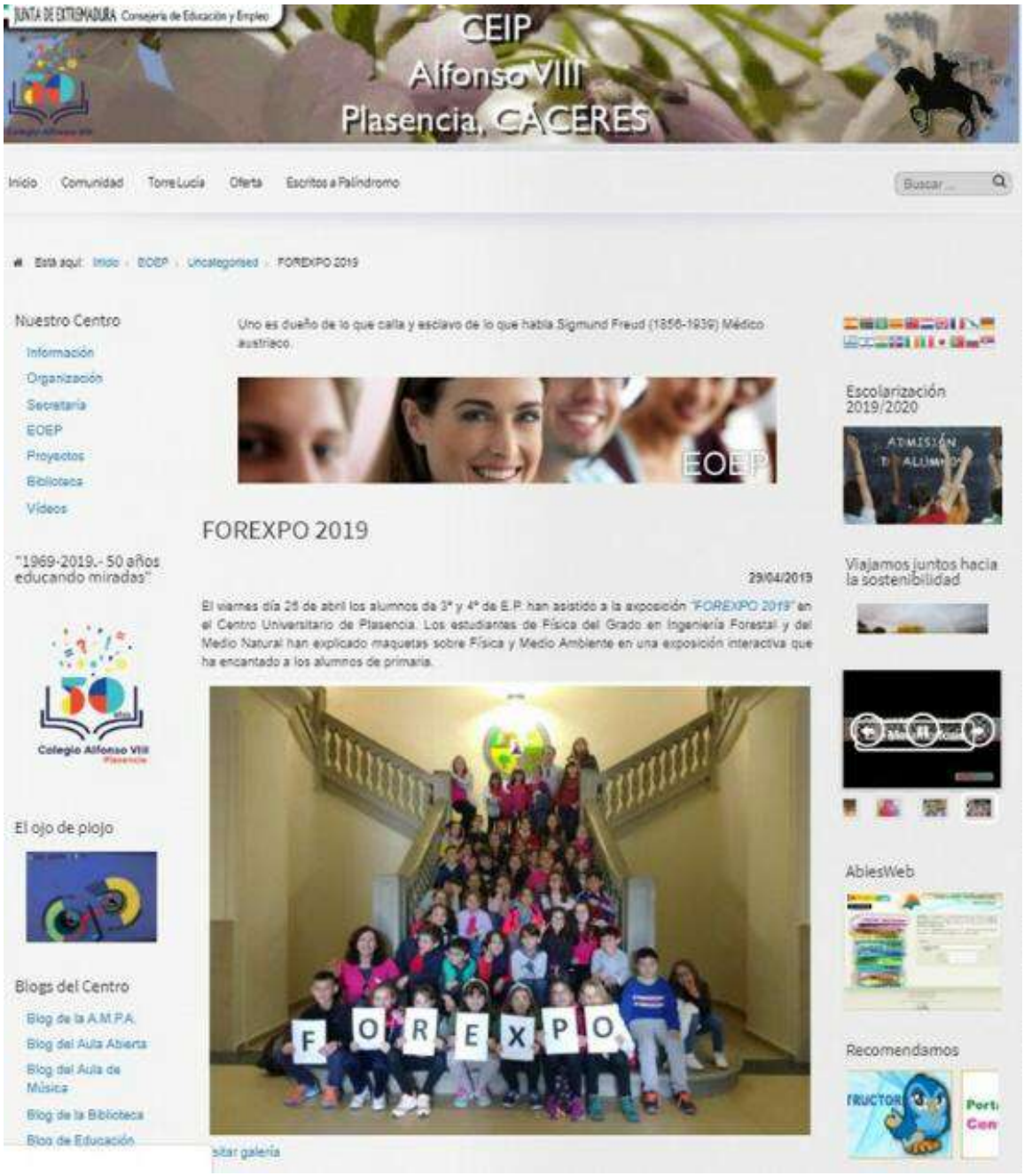


Figura 4. Difusión de FOREXPO en las páginas web de uno de los colegios de Plasencia que han visitado el Centro Universitario en el mes de abril de 2019.



Figura 5. Difusión de FOREXPO en las páginas web de uno de los colegios de Plasencia que han visitado el Centro Universitario en el mes de abril de 2019.

4. Resultados de las encuestas

En la edición celebrada el pasado mes de abril de 2019 se ha realizado por primera vez una encuesta para conocer la opinión de los protagonistas que hacen posible la realización de "FOREXPO: enseñando se aprende más", los estudiantes del Grado en IFMN de la UEX, por un lado, y los profesores de los Centros de Educación Primaria que se han acercado al Centro Universitario con sus alumnos para disfrutar y participar en los talleres de Física y Gestión de Espacios Naturales Protegidos especialmente diseñados para ellos. El número de encuestas recogidas ha sido de 15 entre los alumnos de física, de primer curso del Grado en IFMN, que corresponden al 100% de los alumnos matriculados por primera vez en la asignatura, mientras que en el caso de la asignatura de Gestión de Espacios Naturales Protegidos sólo se han podido

recoger 4 encuestas de un total de 8 alumnos matriculados en la misma, pues los cuatro restantes no respondieron a la petición realizada para recabar su opinión sobre esta actividad. Por su parte, en lo que a la participación del profesorado visitante se refiere, en total fueron 5 las respuestas recogidas procedentes de dos de los colegios que visitaron el Centro. A pesar de no ser una cifra especialmente elevada, sí se valora muy positivamente su opinión porque refleja bastante bien el sentir del resto de profesores visitantes que se acercaron a FOREXPO pero de los que, desgraciadamente, no ha sido posible obtener respuesta en el momento de presentar este trabajo. Seguidamente se van a mostrar y comentar los resultados más destacados que se han obtenido desglosando éstos por bloques temáticos, pues así fue como se estructuró la encuesta preparada expresamente para tal fin.

En las cuestiones en las que se pedía que dieran una puntuación, los valores asignados para éstas oscilaban entre 1 y 5. Así, 1 significaba que no están nada de acuerdo, 2 que están poco de acuerdo, 3 que les parece regular, 4 que están de acuerdo y 5 que están muy de acuerdo.

4.1. Encuestas de los estudiantes del Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural

Con el primer bloque de preguntas se pretende conocer la impresión general de los estudiantes sobre la experiencia de participar en FOREXPO. En este apartado se les ha preguntado sobre la novedad, el interés, la carga horaria (entendiendo ésta como la suma del tiempo dedicado a la preparación de los talleres y el de la exposición en sí), el interés despertado en los asistentes, la coordinación con los compañeros y la organización. Cada uno de estos aspectos debían valorarlos de 1 a 5. Los resultados más destacados que se han obtenido para este primer bloque de preguntas han sido los siguientes

La novedad es muy bien valorada, tanto por los alumnos de primero como por los de la optativa de GENP: aunque estos últimos ya experimentaron la iniciativa de FOREXPO durante su primer curso, les sigue pareciendo algo muy novedoso, pero en menor grado, pues el 70 % asigna una puntación de 4, mientras que entre los de primero se valoran con un 5 por parte de un porcentaje muy similar (un 67%).

Por otra parte, a todos los alumnos les parece muy interesante la experiencia de aprender enseñando: para los de primero el interés se reparte mayoritariamente por igual entre un valor de 4 (40 %) y un valor de 5 (40 %), mientras que para los de GENP el nivel de interés decae un poco pero sigue siendo muy notable para todos, puesto que el 80 % le asigna un valor de 4.

Sobre la carga horaria existe una mayor disparidad de opiniones, siendo considerada de tipo moderado por los de primero (que la valoran mayoritariamente con un 3), mientras que para los de GENP supone un esfuerzo mayor, al estar situada fuera del horario habitual de la asignatura, como ya se ha comentado.

Dos aspectos importantes que revela la encuesta son los relacionados a la organización y coordinación entre ellos, igualmente bien valoradas, de forma que la puntuación asignada es el 4 o el 5, conjuntamente, para más de un 70 % del alumnado, sin diferencias importantes para la Física y GENP.

Con el segundo bloque de preguntas se quiere determinar las sensaciones que han percibido los estudiantes al participar en FOREXPO. Este bloque tenía los siguientes items: exigencia por la dificultad del taller, nerviosismo por tener que hablar en público, sensación de liderazgo ante los asistentes, emoción, empatía hacia los asistentes y presencia de profesores. Cada item debía ser valorado igualmente de 1 a 5. Los resultados de las respuestas facilitadas a estas cuestiones se muestran a continuación:

La exigencia académica les parece en general de bajo nivel o asequible a todos los universitarios, lo cual podría indicar, para los de primero, que, pese a tener poca base técnica, se empoderan y adquieren autoestima.

Para el nerviosismo por hablar en público, emoción y empatía hacia los asistentes a FOREXPO la dispersión de valoraciones es amplia, lo cual denotaría que se trata de aspectos

notablemente subjetivos. Mientras que para el liderazgo, al tratarse de algo observable objetivamente (por cuanto el alumno que explica se transforma en protagonista al ejercer learning by teaching), encontramos predominio claro del valor 4, elegido por casi un 50 % del alumnado de ambas asignaturas.

En cuanto a la presencia de los profesores, también es bien valorada, con 4 y 5 mayoritariamente, lo cual muestra una ausencia de antagonismo entre alumno-profesor y es prueba de confianza, pese a que el hecho de hablar en público pudiera parecer, a priori, una prueba dura que hiciera desear la ausencia de profesores.

Con el tercer bloque de preguntas se desea conocer en qué medida consideran los estudiantes del Grado que FOREXPO les aporta algo positivo de cara a su formación. Las cuestiones concretas que se les plantea valorar son las siguientes: la soltura a la hora de hablar en público, la mejora de la autoestima, la comprensión de partes de la asignatura expuesta, la mejora del interés por la asignatura, el acercamiento al profesor/a responsable, el conocimiento de los compañeros, la empatía hacia los demás y el grado de autonomía a la hora de trabajar. Al igual que en los dos bloques anteriores, las respuestas proporcionadas debían otorgar valores entre 1 y 5. Los resultados más destacados sobre estos aspectos se comentan a continuación:

Este quizás sea el bloque más relevante, por la valoración que hacen los universitarios sobre lo que supone FOREXPO a su formación personal. En general destaca que la valoración es mayoritariamente de 4 y 5 en todos los casos salvo en el acercamiento al profesor responsable, tal vez porque ya la relación es muy cercana y no se necesita una vivencia como FOREXPO para mejorar dicha relación, lo cual sería muy positivo. En general la relación es cercana y cordial y este resultado es esperable.

Also similar ocurre para la relación entre compañeros, puesto que al ser grupos pequeños suelen conocerse bastante bien y comprenden, por ende, lo que un compañero puede estar viviendo en FOREXPO.

En el cuarto bloque se les pide a los estudiantes que valoren las siguientes afirmaciones entre 1 y 5: "Enseñando se aprende más", "Con FOREXPO aprendo de mis compañeros" y "Con FOREXPO aprendo de los niños que nos visitan". Los resultados para estas afirmaciones han sido las siguientes:

El lema de Forexpo parece ser que es perfectamente asimilado y muy bien valorado por los universitarios, puesto que más del 90 % le asigna un 4 o un 5.

Además una gran mayoría reconoce que realiza aprendizaje a partir de sus compañeros y, en menor medida, de los niños.

Para finalizar la encuesta, se les preguntaba si la experiencia vivida en FOREXPO les anima a participar en otras actividades que se celebran habitualmente en los últimos años en el Centro Universitario de Plasencia como "La noche de los investigadores" o el "Desayuna con la ciencia". El resultado de sus respuestas ha sido el siguiente:

Entre los alumnos de la optativa de GENP el 100 % desearía participar en iniciativas similares, mientras que solo el 40 % de los de primero se animaría a estas. Puede deberse al carácter de educación medioambiental que pose GENP, lo cual hace que quienes la cursen ya contemplen como una actividad muy interesante la sensibilización y educación mediante actividades semejantes a FOREXPO.

4.2. Encuestas de los profesores visitantes de los Centros de Educación Primaria

Al igual que en el caso anterior, la encuesta a los profesores visitantes se estructuró en bloques temáticos, de modo que a las cuestiones planteadas en ellos en algunos casos debían hacerse valoraciones entre 1 y 5 con el mismo significado que se explicó anteriormente. Vamos a ir desgranando a continuación las reflexiones efectuadas por el profesorado de educación primaria a las cuestiones que se les planteó.

En primer lugar se les preguntaba a los docentes si conocían la existencia de este tipo de actividades en el Centro Universitario de Plasencia. Ante esta cuestión, la respuesta facilitada fue que 4 de los 5 profesores que rellenaron la encuesta desconocían que en este Centro se desarrollaran este tipo de actividades, mientras que sólo uno de ellos afirmó conocerlas. Este resultado debe servir de reflexión al profesorado del Centro Universitario para el futuro, de modo que cuando se vayan a celebrar eventos de estas características se dé la oportuna difusión en los restantes Centros educativos de Plasencia y del norte de la provincia de Cáceres como forma de atraer a mayor número de visitantes a los mismos.

El segundo bloque de preguntas se elaboró para conocer la vía por la que se habían enterado de la actividad de FOREXPO, de modo que un encuestado respondió que se enteró porque contactaron directamente con él desde el Centro Universitario de Plasencia, mientras que los cuatro restantes contestaron que se enteraron a través del personal de su Centro de trabajo. El hecho de que algunos profesores del Centro Universitario tengan en su círculo familiar o de amistades a docentes de otros centros facilita el contacto directo con ellos, vía que debe seguir explotándose en la medida de lo posible. En cualquier caso, también es destacable que la información ofrecida a los Centros fue debidamente canalizada por el personal que trabaja en ellos para informar debidamente de este tipo de actividades a los docentes que potencialmente pudieran estar más directamente interesados en que sus estudiantes acudan a los mismos.

En el tercer bloque se deseaba recoger las impresiones de los docentes a raíz de su experiencia al asistir a FOREXPO. El 80% de los encuestados (4 en total) afirmaron que les resultó totalmente novedosa la experiencia mientras que al 20% restante (1 persona) no les pareció muy novedosa, otorgándole una puntuación de 3. Con respecto al interés personal en esta experiencia el 80% tenían muchísimo interés (valoración de 5), mientras que el 20% tenía un elevado interés (4 puntos). En cuanto al interés que en su opinión esta actividad debía revestir para sus estudiantes, la valoración realizada fue unánime (5 puntos), considerando por lo tanto que FOREXPO posee el máximo interés para sus estudiantes, algo que reconforta a los docentes responsables de las asignaturas implicadas pues ése era un objetivo primordial para seguir ofertando esta actividad en el futuro. Al preguntarles por la duración de la actividad, nuevamente el 80% de los encuestados contestaron que les pareció muy adecuada la duración de la actividad (5 puntos), mientras que el 20% opinó que ni bien ni mal (3 puntos). A la última cuestión planteada en este bloque, sobre la organización de la actividad, el 80% estaba totalmente de acuerdo en cómo se había organizado ésta, mientras que el 20% opinó que estaba de acuerdo.

En el cuarto bloque de preguntas se desea conocer las sensaciones que los profesores visitantes han percibido en sus estudiantes al asistir a FOREXPO, teniendo que valorar de 1 a 5 las diferentes cuestiones planteadas. De las respuestas facilitadas se constató que de manera unánime los docentes percibieron que tanto la ilusión despertada en los escolares como el interés despertado por los talleres fueron máximos, del mismo modo que hubo unanimidad, pero ésta en sentido contrario (valoración de 1) en que los escolares en ningún momento se sintieron cohibidos por la presencia de los profesores, algo esperado por otro lado, mientras que el 80% de los encuestados respondieron que no notaron excesivo nerviosismo en ellos (2 puntos) frente al 20% que percibió un nerviosismo normal (3 puntos) en los días u horas previos al desarrollo de esta actividad. Además, también coincidieron (80% con valoración de 5 frente al 20% con valoración de 4) en que esta actividad puede contribuir a despertar el interés de los estudiantes por la ciencia, valoración muy positiva en este caso, y los mismos porcentajes y valores se alcanzaron para estimar la empatía mostrada por los escolares hacia los estudiantes del Grado en IFMN que se encargaban de explicarles los diferentes talleres.

En el quinto bloque se desea saber en qué medida los docentes visitantes consideran que FOREXPO puede contribuir a mejorar la formación de sus estudiantes. El 80% asignó una valoración de 5 a esta cuestión, mientras que el 20% restantes le otorgó una puntuación de 4, deduciéndose por lo tanto que los docentes ven en FOREXPO una buena oportunidad para que sus estudiantes se motiven más por los estudios y mejoren así su formación. Esta misma

valoración y estos mismos porcentajes fueron los que se registraron cuando se les preguntó a los docentes en qué medida FOREXPO puede contribuir a mejorar el interés por la ciencia en sus alumnos, deduciéndose en este caso también que tienen depositadas grandes esperanzas en que esta y otras actividades de este tipo puedan contribuir a dicha mejora.

En el sexto bloque se les preguntó en qué medida conocían otras actividades que se desarrollan habitualmente en el Centro Universitario de Plasencia en los últimos años y a los que asisten asiduamente escolares llegados desde distintos lugares de la provincia de Cáceres, respondiendo el 80% que conocían tanto "La noche de los investigadores" como las "jornadas de puertas abiertas", frente al 20% que no estaba al corriente de tales iniciativas. A diferencia de los anteriores, todos los encuestados afirmaron conocer el "Desayuna con la ciencia".

Para finalizar, todos los encuestados respondieron que estarían encantados de repetir su visita a FOREXPO en años venideros, lo que anima fervientemente a los organizadores a continuar con esta propuesta que ha resultado ser tan bien valorada tanto por los docentes como por los escolares.

5. Conclusiones

La iniciativa de FOREXPO resulta ser muy bien valorada, tanto a nivel cualitativo (a través de felicitaciones y comentarios verbales que habitualmente se reciben), como a nivel cuantitativo, según muestran los resultados de las encuestas del presente estudio.

Por una parte los alumnos consideran que es una iniciativa altamente novedosa y muy interesante, aun para los que ya la conocieron en primer curso y ahora no tiene el mismo factor sorpresa.

El factor emocional es muy importante, aun cuando los alumnos más veteranos ya conocen la experiencia desde primero. Esto garantiza el éxito de esta iniciativa de learning by teaching, puesto que el aprendizaje significativo lo es tanto más cuanta mayor sea la emoción con la que el alumno desarrolla una actividad de aprendizaje, siendo un método de anclaje de conocimientos muy efectivo la implicación emocional.

En la parte más objetiva, los alumnos consideran que se trata de una buena herramienta para motivarles puesto que aumenta el interés por la asignatura, así como la comprensión de algunas partes de la misma. Del mismo modo la consideran muy útil para mejorar la autoestima y la capacidad de hablar ante un público no especializado.

En cuanto a las relaciones puestas en juego, éstas forman parte muy importante también de la actividad y aprendizaje emocional de esta experiencia, no solo entre compañeros estudiantes, sino también con los niños y con los profesores (tutores y visitantes).

Podemos añadir que, globalmente, FOREXPO resulta una experiencia muy enriquecedora desde el punto de vista de los aprendizajes adquiridos y de las competencias transversales y la vivencia emocional experimentada, que contribuye a anclar dichos aprendizajes.

Referencias

1. González J., Wagenaar R. Tuning educational structures in Europe. Universidad de Deusto. Bilbao, España. 2003.
2. García E., Benítez R., Villar J.R., López M.L., González R., Moya M. The use of whatsapp for improving the student attention from the tutorial action plan. Proceedings of the 9th Annual Conference of Education, Research and Innovation (ICERI 2016). IATED. Sevilla, España, 14-16 noviembre 2016, pp. 2660-2665.
3. Moya M., García M.E., Hernández J., Montero M.J., Martínez R., López M.L., Benítez R., Villar J.R. Education from affection, also at the University? Proceedings of the 8th Annual Conference of Education, Research and Innovation (ICERI 2015). IATED. Sevilla, España, 16-18 noviembre 2015, pp. 1539-1545.

4. Benítez R., García E., Montero M.J., Martínez R., Moya M., Solla A., Hernández J. Learning by teaching within a University-Society interaction framework. Proceedings of the 6th Annual Conference of Education, Research and Innovation (ICERI 2014). IATED. Sevilla, España, 17-19 noviembre 2014, pp. 1124-1130.
5. Moya M., García E., Villar J.R., López L., Benítez R. Skills required by companies from Forest Engineers. Experiences from the University-Alumni-Company relation at the University of Extremadura. Proceedings of the 6th Annual Conference of Education, Research and Innovation (ICERI 2014). IATED. Sevilla, España, 17-19 noviembre 2014, pp. 1207-1214.
6. Cherniss C. Emotional intelligence: what it is and why it matters. Annual Meeting of the Society for Industrial and Organizational Psychology, New Orleans, Los Ángeles, Estados Unidos de América, 15 de abril de 2000.
7. Goleman D. Emotional intelligence: why it can matter more than IQ. Bloomsbury Publishing Ltd. Reino Unido de Gran Bretaña. 1996, 367 pp.
8. Goleman D. An EI-based theory of performance. En Cherniss C., Goleman D. (eds.). The emotionally intelligence workplace. Jossey-Bass, San Francisco, Estados Unidos de América. 2001, pp. 27-45.
9. Fook C.Y. Best practices of teaching in higher education in United States: a case study. Procedia-Social and Behavioral Sciences. 2012, 46, 4817-4821.
10. Olsen P.B., Pedersen K. Working with your Supervisor. En Olsen P.B., Pedersen K. (eds.). Problem-Oriented Project Work- A Workbook. Roskilde University Press. Denmark. 2005, 123-134.
11. Campo L. El aprendizaje servicio en la universidad como propuesta pedagógica. En Martínez M. (ed.). Aprendizaje, servicio y responsabilidad social de las universidades. Octaedro-ICE-UB. Barcelona, España. 2010, 81-91.
12. Gartner A., Kohler M.C., Riessman F. Children teach children: learning by teaching. Harper & Row. Nueva York, Estados Unidos de América. 1971.
13. Blazar D., Kraft M.A. Teacher and teaching effects on students' attitudes and behaviors. Educational Evaluation and Policy Analysis. 2017, 39(1), 146-170.
14. Fiorella L., Mayer R.E. The relative benefits of learning by teaching and teaching expectancy. Contemporary Educatonal Psychology. 2013, 38, 281-288.
15. Fiorella L., Mayer R.E. Role of expectations and explanations in learning by teaching. Contemporary Educatonal Psychology. 2014, 39, 75-85.
16. Park S., Kim C. Boosting learning-by teaching in virtual tutoring. Computers and Education. 2015, 82, 129-140.
17. Brevik L., Gunnulfsen A.E., Renzulli J.S. Student teachers' practice and experience with differentiated instructions for students with higher learning potential. Teaching and Teacher Education. 2018, 71, 34-45.
18. Denancé V., Somat A. Learning by explaining: impacts of explanations on the development of a competence. Revue européene de psychologie appliquée. 2015, 65, 307-315.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Mejorando la formación en nuevas tecnologías para una agricultura digital: Proyecto Sparkle

C. Valero [1], A. Krus [1], P. Barreiro [1], B. Diezma [1], N. Hernández [1], M. Garrido [1], A. Moya [1], J. J. Ramírez [1], G. Moreda [1], B. Muñoz [1], M. Vieri [2]

[1] Universidad Politécnica de Madrid; constantino.valero@upm.es Orcid 0000-0003-4473-3209
[2] Università degli Studi di Firenze; marco.vieri@unifi.it

Resumen: En el proceso de transformación que está sufriendo la agricultura moderna, el papel del ingeniero agrónomo sigue siendo fundamental como enlace principal entre la producción agropecuaria y las herramientas de la ingeniería. Sin embargo, es un hecho constatado que las empresas del sector demandan profesionales con destrezas digitales que las actuales titulaciones no están proporcionando. Es necesario reformular las competencias del "ingeniero agrónomo digital", no primando únicamente la tecnología, sino facilitando que se ponga al servicio del agricultor y la sociedad en un entorno sostenible. El proyecto de innovación educativa SPARKLE ha sido seleccionado en la Unión Europea para que un grupo de 5 universidades, 3 empresas especializadas y 3 productores avanzados estudien y definan cuales son las necesidades formativas para que nuestros estudiantes lleguen a ser verdaderos ingenieros agrónomos digitales. SPARKLE es un proyecto Erasmus+. Las primeras acciones llevadas a cabo por los socios del proyecto han sido la realización de un gran número de encuestas entre alumnos de escuelas de agricultura en todos los países del consorcio, entrevistas con expertos internacionales, estudios del estado del arte sobre la Agricultura de Precisión y la Robótica Agrícola, prospectiva sobre la evolución de las patentes relativas a las nuevas tecnologías en el ámbito agrario, y el estudio detallado de los modelos de negocio de empresas agrícolas que han aplicado con éxito la agricultura digital. Los resultados de las encuestas, especialmente los obtenidos entre estudiantes de ingeniería en universidades españolas, muestran la inquietud e interés hacia las nuevas tecnologías, pero a la vez una demanda creciente de destrezas y habilidades transversales que complementen su formación.

Palabras clave: agricultura de precisión sostenible**,** agro-emprendimiento**,** e-learning

1. Introducción

La agricultura actual está en proceso de transformación gracias a la introducción de nuevas tecnologías para conseguir un mejor uso de los recursos. Todo ello se engloba en una rama de la ingeniería que llamamos "Agricultura de Precisión" (AP) que hace uso del GPS, el guiado automático de tractores, las redes de sensores en campo, la mecatrónica y la sensórica a bordo de la maquinaria, la telemetría de flotas o riegos, el envío a la nube de los datos de campo, los cuadernos digitales de explotación, el análisis avanzado de los datos … y muchas otras que están variando el tópico de un sector productivo primario atrasado y reacio al cambio. Sin embargo, existen barreras sociales y tecnológicas [1.2] en la adopción de estas nuevas tecnologías. Aunque hay pocas encuestas oficiales sobre la adopción de la AP, los últimos estudios apuntan a grandes diferencias en la rapidez de aceptación de determinadas herramientas [3] y a diferencias notables

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3347

entre regiones en el mundo [4]. EN algunos países (ej. Reino Unido, Francia) se están organizando instituciones para el fomento y la vigilancia tecnológica de la AP [5].

1.2. El proyecto Sparkle

En este contexto de cambio, en el que existe un vacío entre el profesional agrario que necesita aplicar nuevas tecnologías, y las instituciones formativas que no han adaptado sus titulaciones para adaptarse a tal necesidad, surge el proyecto Sparkle [6].

Se trata de una acción financiada por el programa europeo Erasmus+ dentro de la línea de Knowledge Alliances, para el fomento de la cooperación educativa. Su título completo es "Sustainable Precision Agriculture: Research and Knowledge for Learning how to be an agri-entrepreneur".

Las entidades participantes son:

- Instituciones educativas y de I+D:
  - Universitá degli Studi di Firenze (coordinador, IT)
  - Aristotle University of Thessaloniki (GR)
  - Universidad Politécnica de Madrid (ES)
  - Universidad de Évora (PT)
  - Centro de Automática y Robótica (CAR-CSIC) (ES)
- Empresas tecnológicas:
  - Soluciones Agrícolas de Precisión (AgroSap) (ES)
  - ErreQuadro (IT)
  - ValueDo (IT)
- Empresas agrícolas:
  - Marchesi Mazzei (IT)
  - Rezos Brands (GR)
  - Quinta da Cholda (JC)

El consorcio, de marcado carácter mediterráneo, trata de integrar a instituciones expertas en nuevas tecnologías agrarias de diferente ámbito (educativo, investigación, innovación empresarial) con empresas agrícolas punteras en su sector (bodega, superalimentos, producción intensiva de maíz) con experiencia en la aplicación práctica de las nuevas tecnologías en la agricultura.

El marco conceptual del proyecto se expresa en la Figura 1. Los participantes tratarán de definir el corpus de la agricultura de precisión sostenible, el de la 'agricultura de precisión sostenible' (SPA, *sustainable precision agriculture*), para lo cual, entre otras actuaciones se detallarán los conocimientos que un técnico agrícola empresario en la era digital ('*agri-preneur 4.0*') debe dominar, no sólo en lo relativo a tecnologías de la ingeniería agraria, sino también a destrezas empresariales que fomenten un espíritu emprendedor. Dichos conocimientos se plasmarán en el diseño de una metodología educativa innovadora, apoyada en herramientas de e-learning y en experiencias directas en empresas agrarias punteras en el uso de la Agricultura de Precisión. El proyecto va dirigido tanto a estudiantes de escuelas de ingeniería agrícola, como a técnicos agrarios y a empresas del sector en general, para tratar de cubrir la necesidad de una formación específica en la aplicación de nuevas tecnologías de forma sostenible.

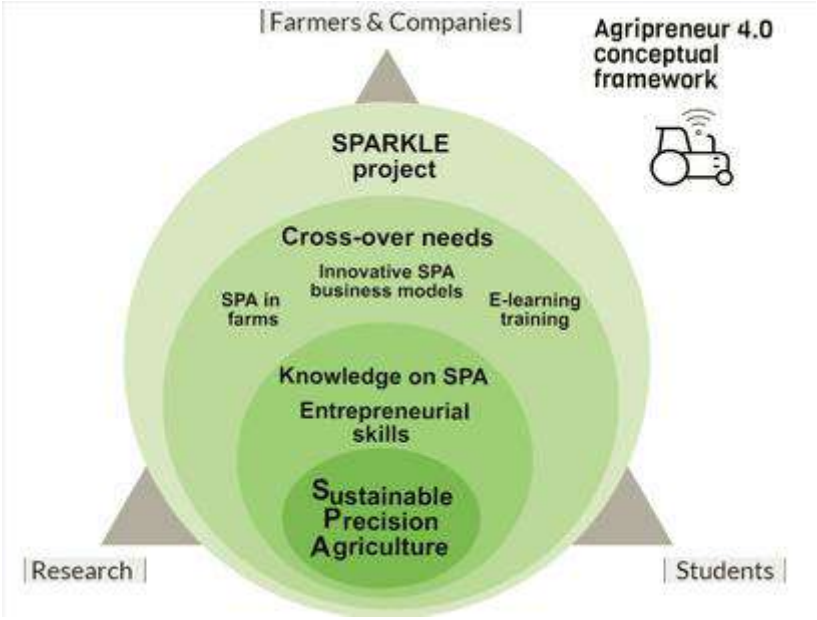


Figura 1. Marco conceptual del proyecto Sparkle, que pone en común las necesidades formativas de estudiantes y agricultores en el uso de tecnologías sostenibles.

Los **objetivos** del proyecto son (Figura 2):

- Definir las tendencias futuras (tecnológicas y de mercado) de tres sectores relevantes en la agricultura (vino, maíz y superalimentos)
- Identificar las necesidades de formación (competencias) en nuevas tecnologías de los estudiantes en escuelas de ingeniería agrícola y de los agricultores, así como las de transferencia tecnológica
- Estudiar modelos de negocio de empresas agrarias que han tenido éxito aplicando agricultura de precisión, y con ellos crear casos de estudio para futuros estudiantes
- Crear un curso sobre SPA, orientado al emprendimiento agrícola, accesible en Europa, combinando materiales de e-learning con metodologías tradicionales presenciales
- Crear una competición sobre creación de empresas agrarias entre estudiantes, con prácticas en empresas reales

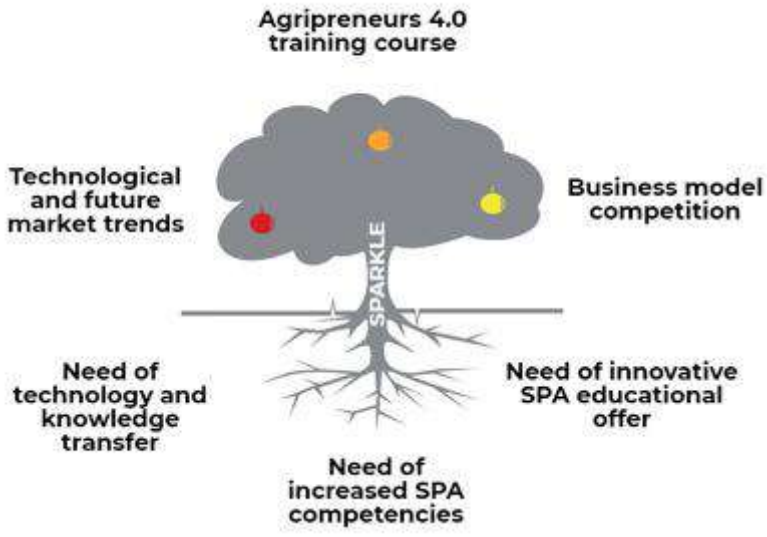


Figura 2. Objetivos del proyecto Sparkle.

Para llevar a cabo los objetivos antes mencionados, el proyecto se ha estructurado en diversas fases que se vertebran en torno a ejes de actividad principales:

- Realización de encuestas a estudiantes en escuelas de ingeniería de los países participantes (Italia, Portugal y España) pero también a agricultores avanzados y a investigadores/ingenieros expertos en agricultura de precisión.
- Realización de estudios de prospectiva tecnológica sobre la evolución de la agricultura de precisión y la robótica agrícola, basados en la aplicación de algoritmos a patentes y artículos científicos
- Diseño del curso formativo y preparación de materiales para tres ámbitos coexistentes: mooc, moodle y clases presenciales
- Diseño de la competición para la creación de empresas entre estudiantes, con el premio final para los participantes de una estancia en empresas agrícolas para poner en marcha su plan de negocio.

Varias de estas actividades se encuentran en curso actualmente, y sus resultados se publicarán en la página web del proyecto: http://sparkle-project.eu . En esta comunicación se van a presentar los resultados de las encuestas realizadas a estudiantes de ingeniería agronómica en varias universidades españolas.

2. Necesidades formativas de los estudiantes de ingeniería agronómica en España

Durante el primer año del proyecto se realizó un estudio cuantitativo mediante un formulario entregado a estudiantes de agrónomos en todos los países participantes, con el objetivo de identificar las carencias formativas según la percepción de dichos estudiantes, y de captar su interés por la Agricultura de Precisión. El formulario se diseñó con la intención de obtener respuesta a las siguientes cuestiones:

a) Necesidades formativas en AP, según los estudiantes
b) Preferencias en los métodos de enseñanza
c) Nivel de conocimientos de los estudiantes sobre AP
d) Nivel de competencias y experiencia de los estudiantes en AP
e) Nivel de interés de los estudiantes en AP

2.1. Metodologia de las encuestas

El cuestionario contenía un total de 116 preguntas, en su mayoría preguntas de selección única (entre varias respuestas propuestas) o preguntar con respuesta por escala (“mucho”, ”regular”, “poco”…). Las preguntas se agruparon en tres apartados principales, el primero sobre los conocimientos previos sobre AP, el segundo sobre las necesidades formativas, y el tercero sobre datos personales y sociales del encuestado. Las encuestas se realizaron durante o después de sesiones normales de clase (en aulas) y en formato papel, y el tiempo medio necesario para que un estudiante la completase rondó los 25 min. Las encuestas, en el caso de España, se realizaron entre los meses de mayo y junio de 2018, a estudiantes de:

- Universidad Politécnica de Madrid, ETSIAAB
- Universidad de Zaragoza, EPS Huesca
- Universidad de Sevilla, ETSIA
- Universitat Politècnica de València, ETSIAMN

En total, 192 estudiantes rellenaron el cuestionario. Más de la mitad de ellos pertenecían a últimos cursos de estudios de grado (52%), pero también hubo un número significativo de estudiantes de máster (48%).

2.2. Resultados

2.2.1 Necesidades formativas sobre AP

En las preguntas relacionadas con la percepción de los estudiantes sobre la necesidad en mayor formación sobre las tecnologías englobadas en la AP, el nivel general de consenso fue alto y positivo (es necesaria más formación). Declararon igualmente importante la formación en tecnologías, y la formación en conocimientos y destrezas relacionadas con la gestión medioambiental, mientras que los conocimientos sobre gestión empresarial quedaron relegados al tercer lugar. Igualmente hubo consenso en identificar la falta de conocimientos en nuevas tecnologías como un lastre para su futuro profesional.

2.2.2 Preferencias en los métodos de enseñanza

Preguntados acerca del momento ideal para recibir formación sobre AP, la mayoría de los estudiantes respondió que "durante los estudios universitarios", frente a otras alternativas como "en cursos posteriores de especialización" (Fig. 1). Sin embargo, un tercio de los estudiantes marcaron que prefieren esperar a recibir formación sobre AP "durante el desempeño profesional". Separando a los estudiantes de grado de los de master, estos últimos valoran en mayor grado un tipo de enseñanza que combine formación teórica con formación práctica. Resumiendo, otras respuestas obtenidas de los estudiantes, el curso ideal sobre AP sería aquel que combinase formación reglada (durante los estudios universitarios) de carácter práctico en gran medida, con formación profesional (posterior a la universidad) para una correcta aplicación de las tecnologías a la vida profesional, que ayude a técnicos que ya trabajan en empresas del sector.

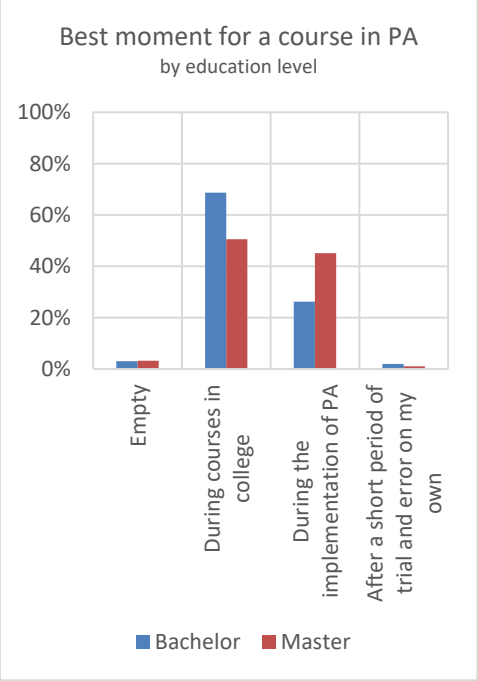


Figura 1. Momento ideal para recibir formación

Preguntados sobre las metodologías de enseñanza, los estudiantes descartaron métodos "antiguos" (radio, folletos…) frente a métodos más interactivos (Fig. 2), aunque coincidían en señalar la enseñanza presencial como la más efectiva. Sin embargo, modularon tal aserción indicando que debería ser enseñanza presencial en sesiones prácticas, preferiblemente en las propias explotaciones agrícolas, en viajes de estudios y demostraciones en campo.

Preguntados sobre si estarían dispuestos a pagar por un curso especializado en AP, tres veces más estudiantes indicaron que pagarían, frente a los que no.

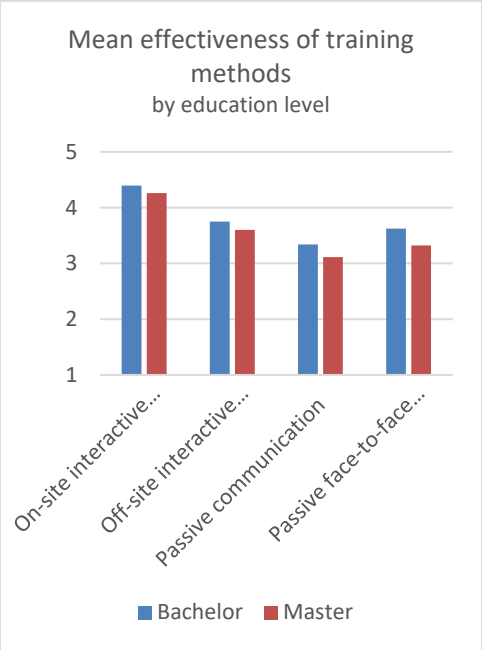


Figura 2. Preferencias sobre el método de enseñanza

2.2.3 Conocimientos previos sobre AP

En general, los estudiantes opinan que están poco o medianamente formados en cada una de las categorías presentadas, en el ámbito de la AP (Figura 3). La carencia mayor es relativa a sus conocimientos en legislación implicada, la gestión empresarial o la gestión de la innovación, frente a la formación en tecnologías. Por el contrario, se sienten bien formados en sostenibilidad y ecosistemas aplicados a la AP.

Sorprendentemente, la categoría referente a formación en tecnologías se percibe como menos necesaria entre los estudiantes frente a otras como la sostenibilidad, o la gestión de la innovación. (Figura 3).

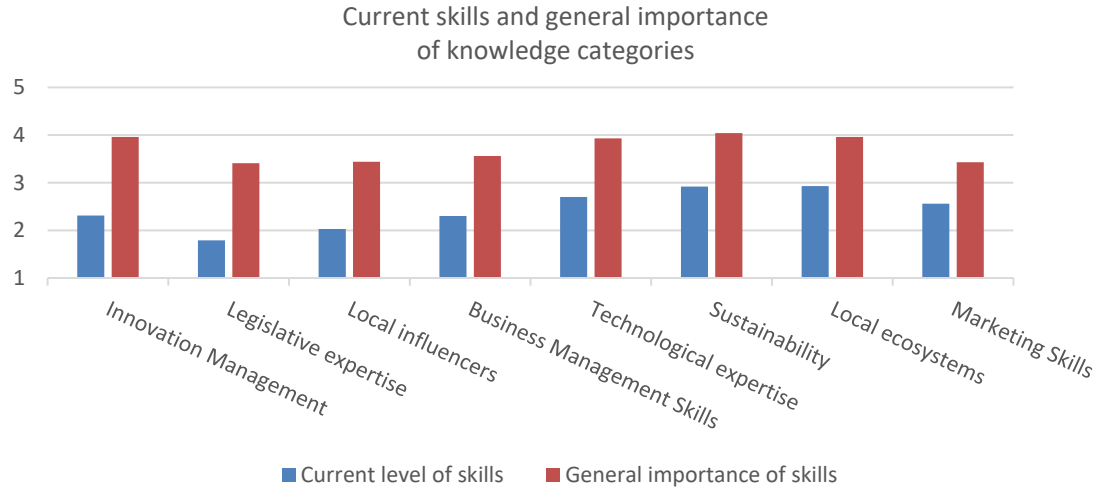


Figura 3. Conocimientos previos de los estudiantes: nivel e importancia percibida

Comparando el nivel de conocimientos percibido con el nivel de importancia otorgado a cada categoría (figura 4) vuelve a hacerse patente que las necesidades formativas, según los estudiantes, son mayores en otras áreas de conocimiento para una formación más transversal (legislación, gestión…) no sólo en la pura tecnología.

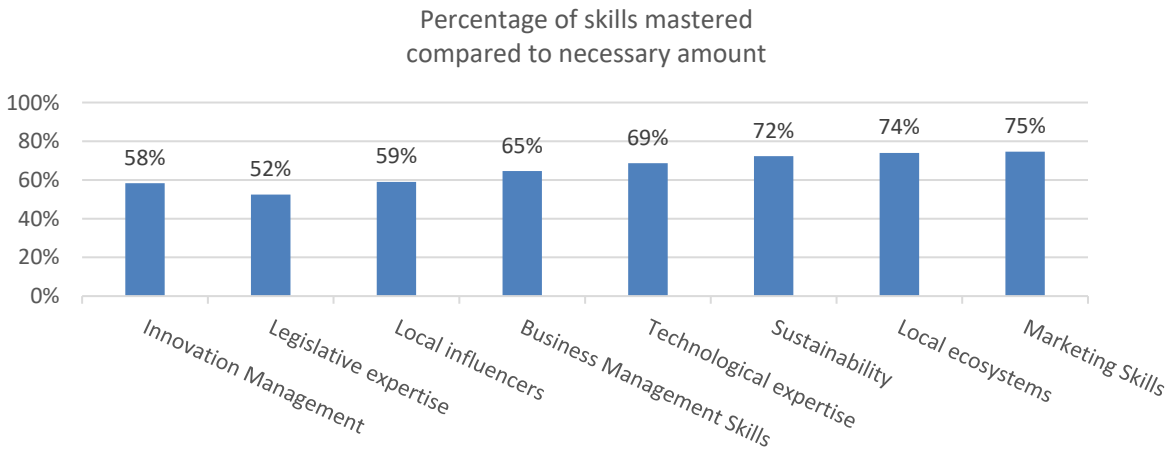


Figura 4. Comparación del nivel de conocimientos previo con la importancia de cada área

En cuestiones más específicas, los estudiantes fueron consultados acerca de sus conocimientos previos en tecnologías relacionadas con la AP (Figura 5). En general declararon que las que más dominaban eran las referidas a máquinas inteligentes, sensores y sistemas de posicionamiento. En casi todos los casos, el nivel de los alumnos de máster fue algo superior al de los de grado.



Figura 5. Nivel de conocimientos actuales percibidos por los estudiantes

3. Conclusiones

Las encuestas realizadas a unos 200 estudiantes de ingeniería agrícola de toda España muestran que existe interés e inquietud por la formación en nuevas tecnologías aplicadas a la agricultura, pero también hacia la formación en otras destrezas transversales, como la administración medioambiental o las competencias empresariales, legislativas y de gestión de la innovación.

El proyecto de innovación educativa "Sparkle" tiene como objetivo principal reunir a expertos docentes en estas materias y crear un curso online que fomente las capacidades de los alumnos en nuevas tecnologías aplicadas a la agricultura y el emprendimiento agrario.

4. Agradecimientos

A los colegas de las Escuelas de Agrónomos de la Universidad de Zaragoza (Fco. Javier García Ramos y compañeros), Universidad de Valencia (Coral Ortiz Sánchez y compañeros) y Universidad de Sevilla (Manuel Pérez Ruiz y compañeros), y a todos los compañeros de la UPM por la realización desinteresada de las encuestas a sus alumnos.

El presente proyecto SPARKLE (Knowledge Alliance 588241-EPP-1-2017-1-IT-EPPKA2-KA) ha sido financiado con el apoyo de la Comisión Europea. Esta publicación es responsabilidad exclusiva de su autor. La Comisión no es responsable del uso que pueda hacerse de la información aquí difundida.

Referencias

1. Pierpaoli, E., Carli, G., Pignatti, E., and Canavari, M. (2013). Drivers of precision agriculture technologies adoption: a literature review. Procedia Technology 8, 61-69.
2. Daberkow, S. G., and McBride, W. D. (2003). Farm and operator characteristics affecting the awareness and adoption of precision agriculture technologies in the US. Precision agriculture 4, 163-177.
3. Griffin, T. W., and Yeager, E. A. How quickly do farmers adopt technology? A duration analysis. In "Precision agriculture '19", pp. 843-849. Ed. Wageningeng Academics. Proceedings of ECPA2019 8-11 July, Montpellier, France.
4. Lowenberg-DeBoer, J., and Erickson, B. How does European adoption of precision agriculture compare to worldwide trends? In "Precision agriculture '19", pp. 859-866. Ed. Wageningeng Academics. Proceedings of ECPA2019 8-11 July, Montpellier, France.
5. Lachia, N., Pichon, L., and Tisseyre, B. A collective framework to assess the adoption of precision agriculture in France: description and preliminary results after two years. In "Precision agriculture '19", pp. 851-857. Ed. Wageningeng Academics. Proceedings of ECPA2019 8-11 July, Montpellier, France.
6. Proyecto Sparkle http://sparkle-project.eu (visitado 10/05/2019).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Proyecto H2020 - INNOSETA - Cómo acercar la investigación al campo a través de la formación

E. Gil[1], M. Gallart[1], P. Ortega[1], A. Angel[1]

[1] Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología, Universidad Politécnica de Cataluña, Esteve Terradas, 8 - 08860 - Castelldefels, Barcelona (España); emilio.gil@upc.edu.

Resumen: INNOSETA (CSA- 773864), Innovative self-sustainable Thematic Network on Spraying Equipment, Training and Advising is a Thematic Network compiling knowledge ready for practice. Se trata de un Proyecto multidisciplinar puesto en marcha por un consorcio que incluye representantes de la universidad y centros de investigación, asociaciones de agricultores, empresas privadas y asesores locales. El proyecto se organiza en torno a siete centros estratégicos de la agricultura europea. El principal objetivo del proyecto INNOSETA es el desarrollo de una plataforma o red temática que contribuya a acercar la ciencia al sector profesional, poniendo a su alcance de forma fácil todos los desarrollos derivados de la investigación, el desarrollo industrial o los últimos avances en materia de formación relacionados todos ellos con el uso de los productos fitosanitarios. Los beneficios esperados del desarrollo del proyecto están relacionados con un mejor y más seguro uso de los productos fitosanitarios, la reducción de los inputs (agua, tiempo, combustible, …) lo que redundará en un mejor aprovechamiento de los mismos, una reducción del riesgo de contaminación y una aproximación a lo establecido en la Directiva de Uso Sostenible de Plaguicidas.

Palabras clave: Formación, INNOSETA, agricultura de precisión, Uso Sostenible de Fitosanitarios

1. Introducción

"*La próxima Política Agrícola Comunitaria será más ambiciosa en relación a los objetivos medioambientales, garantizando que los agricultores practiquen una agricultura verde mediante una amplia difusión e implementación de la Agricultura de Precisión*". Con estas palabras, Phil Hogan, Comisario de Agricultura de la Unión Europea, incidía hace pocas fechas en la importancia de la formación en el sector agrario, como herramienta para extraer la máxima rentabilidad. La formación, la transferencia del conocimiento y la puesta en marcha de incentivos que atraigan a una población joven al sector son elementos fundamentales. Un reciente estudio publicado por la Comisión Europea constata que "los agricultores son cada vez más viejos y es necesario un cambio generacional. El sector agrario necesita atraer a una nueva generación de agricultores con el conocimiento y la formación necesaria para vivir y trabajar en un contexto novedoso y global". En este sentido, el Parlamento Europeo ha remarcado la importancia de la educación y la formación de los agricultores, como medida para garantizar su capacidad para trabajar en un mundo globalizado y tecnificado. Un mundo, el agrario, que presenta notables diferencias a lo largo del territorio europeo.

La figura 1 muestra grandes diferencias en el nivel formativo de los agricultores entre los diferentes países, lo que dificulta la completa aceptación e implementación de las nuevas tecnologías y nuevos desarrollos. Por ello INNOSETA, el proyecto europeo que acaba de

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3365

iniciarse, liderado por la Unidad de Mecanización Agraria de la Universidad Politécnica de Cataluña (https://uma.deab.upc.edu) es una buena oportunidad para acercar la ciencia y la investigación al sector agrario en un mundo tan particular y controvertido como el de la protección de cultivos.

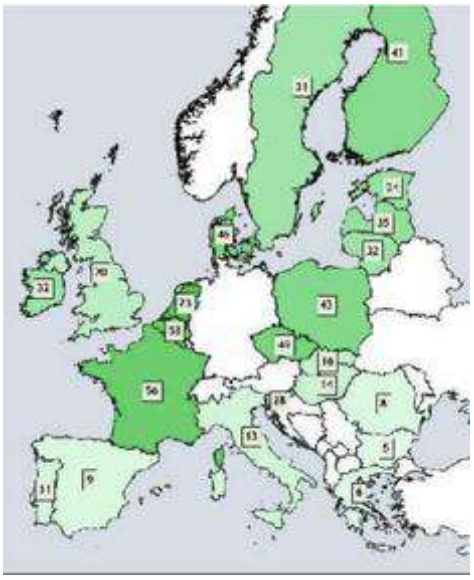


Figura 1. Mapa de Europa con indicación del nivel de formación de los profesionales de la agricultura. El verde intenso indica mayor grado de formación y el verde claro menor nivel formativo. Precision Agriculture and the future of farming in Europe. 2016. STOA IP/G/STOA/FWC-2013-1/Lot 7/SC5. Disponible en: http://www.ep.europa.eu/stoa/

2. Plataforma INNOSETA

El nombre del proyecto deriva de los objetivos del mismo: Accelerating INNOvative practices for Spray Equipment, Training and Advising in European agriculture through the mobilization of agricultural knowledge and innovation systems. El principal objetivo de INNOSETA es la puesta en marcha de una red temática innovadora y active dedicada a las tecnologías de aplicación de fitosanitarios, incluida la formación y el asesoramiento, para contribuir de este modo a llenar el hueco existente entre los nuevos desarrollos y la investigación aplicada que se está llevando a cabo, incluidos los esfuerzos tanto públicos como privados, y la realidad del sector en relación al empleo de nuevas tecnologías y aplicación de buenas prácticas en el ámbito de la protección de cultivos. La plataforma será una herramienta ideal para el fomento del intercambio de ideas, puesta en común de conocimiento y detección de necesidades específicas del sector. Un nexo de unión entre la comunidad científica, los asesores, la industria y el agricultor; una herramienta activa que permitirá detectar las necesidades reales de los agricultores en sus condiciones específicas, y que aportará las soluciones puntuales disponibles adecuadas a sus condicionantes.

Spraying, Equipment, Training and Advising (SETA) se refiere al conjunto de herramientas necesarias para cubrir el uso de PPP para la protección de cultivos, incluida la maquinaria de pulverización y sus componentes, tecnologías electrónicas (software y hardware) aplicadas en pulverizadores y técnicas de aplicación de fitosanitarios. Prácticas de gestión adaptadas a requisitos particulares. Los beneficios de la nueva plataforma SETA están relacionados con una aplicación de los productos fitosanitarios más eficiente (reducción del uso de agroquímicos, contaminación del agua, consumo de combustible y mano de obra), lo que resulta en beneficios económicos, agronómicos y ambientales. Las partes interesadas y los usuarios finales en la cadena de valor tienen diferentes necesidades con respecto a SETA para la producción agrícola. La producción de

cereales, hortícolas, viña, frutales, cítricos, cultivos en invernadero y olivar son los subsectores agrícolas en los que los pulverizadores se usan ampliamente para mantener niveles aceptables de producción. INNOSETA atenderá estas necesidades, permitiendo a los agricultores optimizar la producción de cultivos (Figura 2).



Figura 2. Partners del proyecto INNOSETA

El proyecto de creación de la plataforma digital a través de una red temática internacional llega en un momento adecuado teniendo en cuenta la situación que en Europa tiene el uso de fitosanitarios:

- Las buenas prácticas agrícolas que estarán a disposición en la plataforma SETA son una prioridad de la UE reflejada en la Directiva 2009/128/CE sobre uso sostenible de fitosanitarios, donde acciones específica relacionadas con la formación obligatoria de todos los profesionales, la obligatoriedad de la Gestión Integrada de Plagas, la inspección de los equipos en uso, y algunos otros aspectos, son recogidos en la Directiva.
- La nueva plataforma SETA pondrá al alcance de los usuarios el rápido desarrollo de modernización y digitalización que evoluciona más que cualquier otra disciplina en agricultura debido a la evolución de las tecnologías de la información y la comunicación. Hay una oferta continua de nuevos equipos y nuevos desarrollos adaptados a estructuras de cultivo específicas, aplicaciones de teléfonos inteligentes para buenas prácticas de pulverización, dispositivos electrónicos adaptados en pulverizadores existentes y nuevos pulverizadores inteligentes, muchos de los cuales no llegarán a la mayoría de los usuarios finales a tiempo. Sin embargo, los agricultores europeos necesitan adoptar estas nuevas tecnologías para mantener su posición en el entorno competitivo global en combinación con una mayor protección ambiental.
- La nueva plataforma tiene el potencial de contribuir al objetivo más amplio de satisfacer la creciente demanda de alimentos, piensos y materias primas al tiempo que garantiza la sostenibilidad de la producción primaria, basada en un enfoque más preciso y eficiente de los recursos para la protección de cultivos, especialmente en un escenario de la escasez de mano de obra agrícola y el cambio climático.

3. Objetivos del proyecto INNOSETA

El Proyecto se ha estructurado de forma que se pretenden alcanzar cinco objetivos particulares.

Objetivo 1: Crear un inventario de equipos y tecnologías de pulverización directamente aplicables, materiales de capacitación y herramientas de asesoramiento disponibles a partir de la gran oferta de desarrollos y herramientas generada en los numerosos proyectos de investigación llegados a cabo

INNOSETA ha desarrollado un inventario que incluye resultados de investigación y aplicaciones comerciales en las tres subcategorías que abarca SETA, a saber (i) maquinaria de pulverización y sus componentes, (ii) tecnologías electrónicas (software y hardware) aplicadas a equipos de aplicación de fitosanitarios y (iii) buenas prácticas de gestión y desarrollos de capacitación adaptados a cultivos particulares y condiciones específicas. El trabajo se basará en la revisión sistemática de artículos científicos, proyectos de investigación y proyectos europeos y nacionales y soluciones de mercado existentes en las áreas mencionadas. Más específicamente, la maquinaria de pulverización y las tecnologías electrónicas se revisarán por separado abarcando desde soluciones que aún se encuentran en fase experimental / de prueba y que podrían beneficiarse de la retroalimentación de los usuarios, hasta soluciones que se han adoptado en la práctica pero que no están generalizadas. Con respecto a las técnicas de aplicación, la revisión cubrirá todos los aspectos de las mejores prácticas de capacitación / asesoramiento durante la aplicación de PPP por los usuarios finales que se han proporcionado en varios proyectos de investigación y comunidad industrial que actualmente se difunden en diferentes medios de difusión (libros, folletos, sitios web, aplicaciones de teléfonos inteligentes, etc.) Las soluciones SETA se evaluarán sobre la base de criterios tales como el potencial para reducir el uso de PPP, mitigar la deriva de la pulverización, aumentar el rendimiento y / o la calidad, disminuir los costos de producción y reducir Impacto en la salud.

Objetivo 2: evaluar las necesidades e intereses del usuario final e identificar los factores que influyen en la adopción de los nuevos desarrollos, teniendo en cuenta las especificidades regionales o locales

INNOSETA evaluará las necesidades e intereses de los usuarios finales e identificará y caracterizará los factores que influyen en el cambio de generación, la adopción y la difusión de SETA por parte de los agricultores. El proyecto también identificará las buenas prácticas en el uso de SETA y explorará y evaluará los procesos en juego y las barreras para su adopción e integración en los diferentes contextos regionales / nacionales. Se hará hincapié en los factores sociales, como las necesidades, creencias y actitudes de los agricultores y otros actores. Los resultados y las metodologías empleadas en proyectos anteriores se utilizarán para respaldar la evaluación de los procesos de innovación específicos de SETA y el papel de los servicios de extensión y asesoría en la adopción y generación de innovaciones.

Objetivo 3: Generar colaboraciones interactivas de múltiples actores de diferentes procedencias o sectores

INNOSETA facilitará el desarrollo de procesos de innovación interactivos en las cadenas de valor agrícolas nacionales / regionales, al reunir a agricultores, asesores, investigadores, socios industriales y otros actores en talleres de innovación interactivos. Se implementará un marco conceptual mediante el cual el SETA inventariado se adaptará a los contextos regionales / nacionales para una diseminación efectiva y específica. Las ideas de nivel local se captarán y canalizarán utilizando el mismo enfoque, dando como resultado proyectos concretos basados en la innovación desarrollados en respuesta a las necesidades prácticas de los usuarios finales, que se pondrán en práctica más rápidamente gracias al empoderamiento de los actores y la comunidad. -propiedad generada durante las colaboraciones. Este proceso se ampliará al nivel de la UE para generar colaboraciones transfronterizas en el área de SETA.

Objetivo 4: Establecimiento de una herramienta TIC para la evaluación en línea de los equipos de pulverización, capacitación y asesoramiento y el fomento del intercambio de ideas y necesidades de nivel básico

INNOSETA implementará una herramienta on-line para la comunicación interactiva, la interacción y el intercambio de conocimientos mediante el uso de la plataforma diseñada, la "Plataforma SETA", que desplegará la información y el conocimiento recopilados en SETA en forma de extremo de fácil acceso -un material de usuario según el formato EIP-Service Point. La plataforma SETA será la herramienta para la evaluación en línea del SETA inventariado por las partes interesadas en toda Europa y permitirá el crowdsourcing de ideas de base y las necesidades de investigación. Tras la finalización del proyecto, la plataforma SETA podrá integrarse en el punto de servicio EIP asegurando la accesibilidad a largo plazo del material producido.

Objetivo 5: establecer un enlace con EIP-AGRI y sus estructuras

INNOSETA establecerá comunicación directa con la Asociación Europea de Innovación para la Productividad y Sostenibilidad Agrícola (EIP-AGRI) y sus Grupos Operativos (OG) ampliamente desarrollados en toda Europa para maximizar la movilización de los interesados y mejorar el impacto de las actividades y resultados del proyecto para cerrar la división de investigación e innovación en el área de interés de SETA. INNOSETA servirá a muchos OG actuales y futuros, ya que se extiende a todo el sector agrícola y abarca todos los sistemas de producción de cultivos (arables, huertos, viñedos, hortalizas).

4. Impactos esperados del proyecto

El impacto estratégico esperado tras la puesta en marcha y ejecución del proyecto se basa en los siguientes aspectos clave:

- Su relevancia para las necesidades actuales de mejorar el proceso de protección de cultivos y la gestión de protección de plantas.
- Su oportunidad, ya que SETA representa una parte crucial de la producción de cultivos para mejorar la eficiencia del proceso de aplicación de plaguicidas, generando beneficios técnicos, económicos y ambientales.
- El consorcio creado con representatividad de múltiples actores, que combina expertos en investigación en temas de protección de cultivos, investigadores de sociología rural, servicios de extensión, organizaciones de agricultores en ocho países de la UE, tres asociaciones europeas de agricultores, fabricantes de pulverizadores y compañías de productos fitosanitarios, que permitirán una intensa difusión de los resultados del proyecto
- Su enfoque sistémico e interactivo de la innovación, incluida la dimensión social, que permitirá abordar todos los aspectos relacionados con la generación, introducción y difusión de innovaciones agrícolas para lograr el cambio necesario hacia la investigación impulsada por la innovación en el área de SETA y una mayor aceptación por parte de los usuarios.

Se plantean seis grandes tipos de impactos:

- Impacto 1: Desarrollo y difusión de una amplia base de datos de materiales, software, aplicaciones, videos, y cualquier tipo de material relacionado con la protección de cultivos y con las tecnologías de aplicación, mediante un sistema simple de clasificación que permita al usuario localizar sus necesidades de forma fácil y ágil.
- Impacto 2: Mejorar el conocimiento y el intercambio entre investigadores y agentes del sector profesional mucho más relacionados con el mundo rural de forma directa.
- Impacto 3: La recopilación y provisión, a través de los principales canales de difusión existentes más utilizados por los profesionales, de un conocimiento orientado a la

práctica de fácil acceso en las áreas temáticas, para que el material (incluido el material con fines educativos y de formación) permanezca disponible a largo plazo, más allá de período del proyecto.

- Impacto 4: Mayor aceptación de los usuarios de las soluciones recopiladas y difusión más intensa a los usuarios finales.
- Impacto 5: Mayor flujo de información práctica entre áreas geográficas de Europa afectadas por los temas (teniendo también en cuenta las diferencias entre los territorios).
- Impacto 6: Apoyo a la implementación de la Asociación Europea para la Innovación (EIP) 'Productividad y Sostenibilidad Agrícola'.

5. Plataforma INNOSETA

Tras la puesta en marcha del proyecto, en mayo de 2018, se inicia una labor de búsqueda, clasificación, selección y evaluación de las denominadas SETAs. De acuerdo con lo establecido, se ha realizado una búsqueda exhaustiva de material identificado como elemento a incorporar en la plataforma. La plataforma INNOSETA (disponible en la página web del proyecto – www.innoseta.eu) contiene más de 667 entradas (Figura 3) con información detallada sobre:

- Artículos científicos y técnicos
- Proyectos de investigación y de transferencia, nacionales e internacionales
- Desarrollos industriales
- Material de formación y asesoramiento

Como ejemplo de tipo de información disponible en la plataforma INNOSETA, la figura 4 muestra el número de entradas relacionadas con la formación y el asesoramiento, clasificadas por la tipología de las mismas. Se ha desarrollado un motor de búsqueda por palabras clave, idioma o tipo de material que se desea localizar, con la idea de facilitar el acceso a todos los profesionales. La plataforma está disponible en diversos idiomas oficiales de la UE, entre ellos el español.

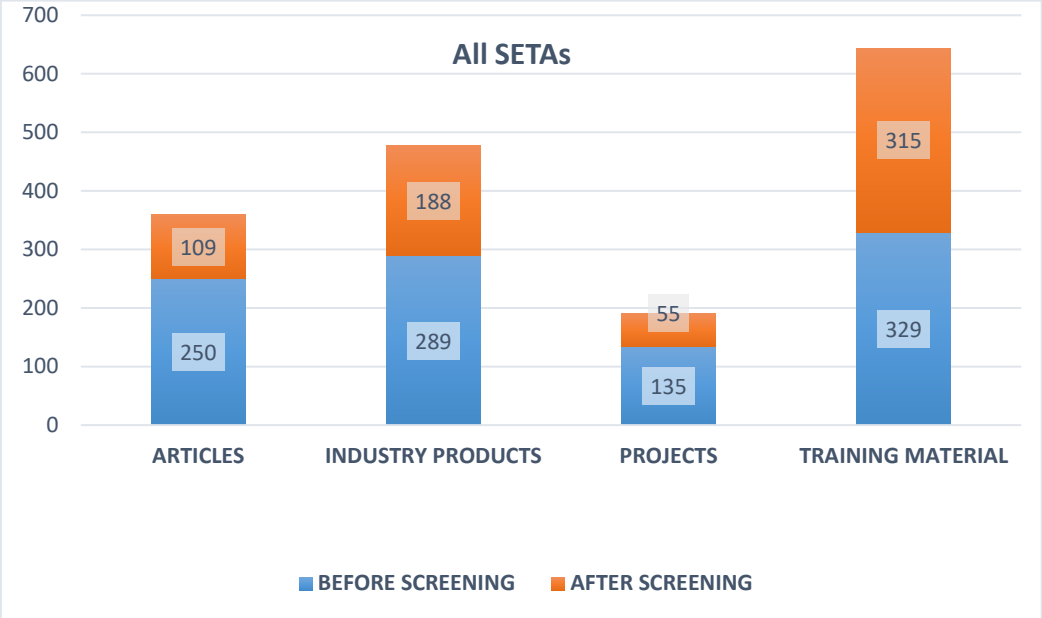


Figura 3. Material incluido en la primera versión de la plataforma INNOSETA

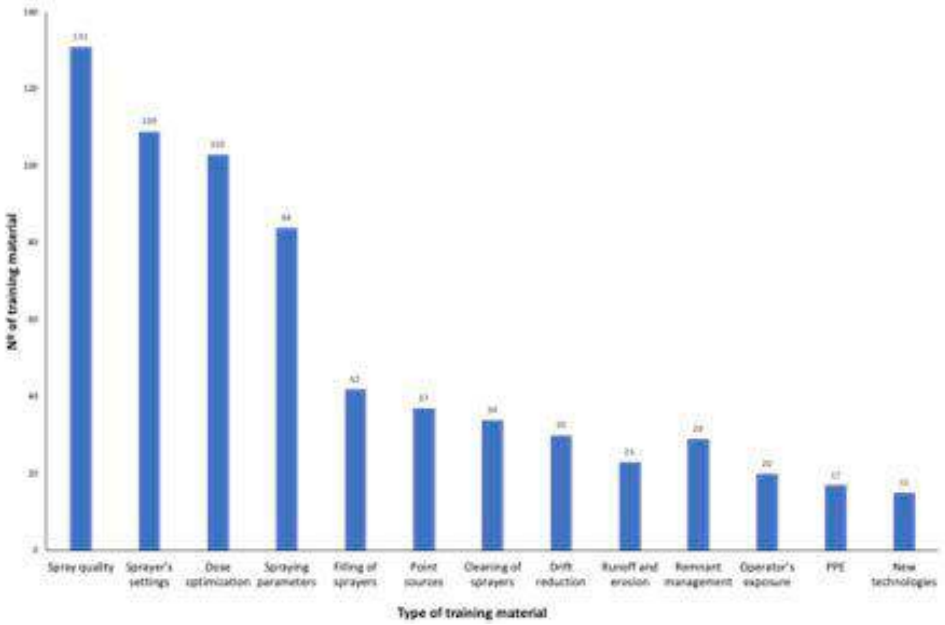


Figura 4. Material de formación incluído en la plataforma INNOSETA, clasificado en función de su tipología

6. Consideraciones finales

INNOSETA es un proyecto multidisciplinar en el que están implicados todos los agentes involucrados en la protección de cultivos. Los grupos principales a los que se dirige el proyecto son:

- Agricultores: asociaciones y federaciones de agricultores, sindicatos de agricultores, cooperativas de agricultores a nivel regional, nacional y de la UE (COPA-COGECA es un socio del proyecto), cámaras agrarias, etc.
- Servicios de asesoramiento y extensión agrícola: asesores públicos y privados, representantes nacionales, regionales y locales de autoridades agrícolas (ministerios, departamentos) relacionados con los Programas de Desarrollo Regional;
- Redes de investigación e innovación: EIP-AGRI y otras redes temáticas; redes de investigación e iniciativas sobre aplicación de fitosanitarios, agricultura orgánica, agricultura sostenible, desarrollo de equipos de aplicación, tecnología de la información en la agricultura, iniciativas de Internet de las Cosas; Plataformas tecnológicas europeas pertinentes (aquellas centradas en Bioeconomía, Medio Ambiente y TIC), Agricultura, Seguridad Alimentaria y Cambio Climático y Agua y otras redes e iniciativas a nivel de la UE.
- Industria de fabricación de equipos de aplicación de fitosanitarios e industria de productos fitosanitarios: a través de ECPA (European Crop Protection Association), maquinaria agrícola a través de CEMA (Comité Européen des groupements de constructeurs du Machinisme Agricole, fabricantes de componentes (boquillas, bombas, barras, depósitos, etc.), sensores y soluciones de software para la aplicación eficiente de pulverizadores en el campo;
- Autoridades y responsables de las políticas locales y regionales: expertos en cuestiones reglamentarias relacionadas con el uso de equipos de aplicación de fitosanitarios, uso de productos, contaminación ambiental (en el suelo, aguas superficiales y subterráneas, organismos no objetivo, biodiversidad); organismos de normalización y certificación; responsables políticos a nivel europeo y nacional, la DG INVESTIGACIÓN de la UE, la DG AGRI, la DG INDUSTRIA, la DG SANTE, la DG ENV, el SCAR, las autoridades

públicas de supervisión del medio ambiente y las organizaciones nacionales e internacionales en agricultura sostenible.

7. Agradecimientos

Este proyecto está financiado por el Programa de Investigación e Innovación Horizon2020 de la Unión Europea, bajo el acuerdo Nº 773864 – INNOSETA - Accelerating Innovative practices for Spraying Equipment, Training and Advising in European agriculture through the mobilization of Agricultural Knowledge and Innovation Systems.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Sustainable farming best practices for MSc programmes

Fátima Baptista [1,*], Patrícia Lourenço [1,2,3], Vasco Fitas da Cruz [1], Luís Leopoldo Silva [1], José Rafael Silva [1], Manuela Correia [1], Georgios Papadakis [4], Evangelos Dimitriou [4], Pietro Picuno [5]

[1] Departamento de Engenharia Rural, ICAAM - Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, Universidade de Évora, Pólo da Mitra, Ap. 94, 7006-554 Évora, Portugal; fb@uevora.pt
[2] CICGE - Centro de Investigação em Ciências Geo-Espaciais, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Observatório Astronómico Prof. Manuel de Barros, Alameda do Monte da Virgem, 4430-146 Vila Nova de Gaia, Portugal
[3] CAESCG - Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global, Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano, 04120 Almería, España
[4] Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, Athina 118 55, Greece
[5] University of Basilicata, Via Nazario Sauro, 85, 85100 Potenza PZ, Italy
* Correspondence: fb@uevora.pt

Abstract: The sustainable agriculture concept emerges from the necessity to ensure food production to feed the human growing population, while the natural resources, water and soil quality, ecosystems and others are preserved. One way to implement the know-how and techniques in sustainable agriculture is through educational courses in the universities, such as MSc programme, by promoting communication between academics, researchers, agricultural workers and other experts. This paper examines the best practices to serve as a guide to develop a MSc programme in sustainable farming. A questionnaire was prepared and distributed to academics' expert in agrarian sciences in Greece, Italy and Portugal. The questionnaires were developed in order to define the fundamental competences/expertise, to identify the sustainable agricultural practices and the methods of training/learning that should be taken in consideration in a MSc programme in sustainable farming. The results allowed to identify the relevant best practices, the fundamental competences/expertise, the most important sustainable farming practices adequate forms of training/learning and the more efficient training methods that should be taken into account when developing the MSc programme.

Keywords: Questionnaires; High education; Sustainable agricultural practices.

1. Introduction

Nowadays, world faces huge challenges such as reducing poverty and ensuring food security. Therefore, the approximately one million people living in hunger today, by 2050 there will be 2 million more people who need to be fed. In addition, it is necessary to consider the climate changes that are negatively affecting the availability of fertile soil and water for agriculture production [1]. The sustainable agriculture concept emerges on growth in sustainable productivity to ensure the continued existence of our production base to feed a growing population, also thanks to innovation, while enhancing rural livelihoods [1]. The important role played by sustainable agriculture is to increase the productivity without affecting the quality of soil and water, preserve the ecosystems, safeguard animal welfare, generate income for farms

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.4191

and improve quality of life in rural areas, support territorial development and contribute to economy [2].

Consequently, issues related with economic, social and environment aspects are key factors for a sustainable agriculture, as a practice of farming using principles which respect ecology and save natural resources. Currently, there is a conscious need to relate agriculture, food and environmental policies and issues from a perspective that takes account of the diversity of sustainable agriculture and the complexity of their interdependencies [3]. In a brochure untitled "Sustainable agriculture for the future we want" [1] some success stories are presented, such as organic farming, on-farm biogas production, extensive grazing practices, renewable energy, precision farming and agro-forestry systems.

In order to practice a sustainable agriculture, farmers responsible for the management of farmland must adopt correct and environmental friendly practices, using appropriate technology and complying with EU regulations for a sustainable agriculture. Hence, farmers will need know-how and techniques to implement the changes, as well as, a smart governance system, fully set up, linking research, support services, farmers and their organizations and markets. The communication gap between academics, researchers and agricultural workers should be promoted. Also, the introduction of the know-how in sustainable agriculture it will be better implemented through MSc programme, since the public is more aware of environmental problems and the offer of educational courses in the universities is increasing in this area [4].

Thus, this study aims to identify the best practices to serve as a guide to develop a MSc programme in Sustainable Farming through a questionnaire prepared and distributed to academics' expert in agrarian sciences in Greece, Italy and Portugal. The questionnaires were developed in order to define the fundamental competences/expertise, to identify the sustainable agricultural practices and the methods of training/learning that should be taken in consideration in a MSc programme in sustainable farming. A long-term impact in securing the sufficient, safe, as well as environmentally, socially and economically sustainable production of agricultural products is expected to be developed.

2. Materials and Methods

In order to identify the best practices to serve as a guide to develop a MSc programme in Sustainable Farming, a questionnaire was prepared by the University of Evora (UEVORA) with the contribution of Agricultural University of Athens (AUA) and University of Basilicata (UNIBAS). This questionnaire was distributed to academics' expert in agrarian sciences in Greece, Italy and Portugal (Deliverable 1.2 – Similar Curricula in Europe of SFARM project). The main objective of the questionnaire was to identify the best practices based on other similar questionnaires and ideas expressed in EISA [5], such as:

- Which are the fundamental expertise in an MSc programme on sustainable farming?
- Which are the most important sustainable agriculture practices?
- Which forms of training/learning are adequate? Theoretical, practical classes? Presential, e-learning, b-learning?

The questionnaire is divided in three parts: 1) Present and future of sustainable farming; 2) Training needs on sustainable farming and 3) Personal data.

The questionnaire results were analyzed by country and were presented in percentages to allow the comparison of the results between the countries. Table 1 shows the methodology defined for the analysis of the currently existent practices, current level of farmers' expertise, future trends for practices, training needs, skills with future training needs, forms of learning/training, and training methods more efficient for the respondents of each country.

Table 1. Methodology defined for the analysis of the best practices of sustainable farming in Greece, Italy and Portugal, based on the percentage of the respondents.

Best practices	Percentage of the respondents	Results
Currently existing practices	> 60 %	Present in farms
	< 30 %	With low expression in farms
Current level of farmers' expertise	Sum of medium, high and very high > 80 %	High level
	Sum of medium, high and very high > 40 % and < 80 %	Medium level
	Sum of none and small > 50 %	Very low level
Future trends for practices	> 60 %	Main futures
	< 30 %	No future
Training needs	Value 5 > 60 %	Extremely important expertise
	Sum of values 4 and 5 > 80 %	Very important expertise
	Sum of values 1 and 2 > 10 %	Not important expertise
Future training needs	Sum of strongly agree and agree > 80 %	Strongly agree
	Sum of neither agree nor disagree, disagree and strongly disagree > 20 %	Not required
Forms of learning/training	Sum of values 4 and 5 > 75 %	Very applicable/important
	Sum of values 1, 2 and don't know > 10 %	Not very applicable/not important
Training methods efficiency	Sum of values 4 and 5 > 75 %	Extremely efficient
	Sum of values 1, 2, 3 and don't know > 60 %	Not efficient

3. Results and discussion

3.1. Personal data

A total of 72 questionnaires were answered by academics' expert in agrarian sciences: 22 in Greece, 30 in Italy and 36 in Portugal. In the three countries, most of the respondents were male (70.8 %) and the average age vary between 35.5 and 56.7 years old.

3.2. Best practices

There is a strong need to relate agriculture and environment into the term sustainable farming, because agriculture is one of the major user and polluter of water, a driver of deforestation and of loss of biodiversity. Farming systems, from intensive conventional farming to organic farming, have the potential to be locally sustainable. Whether they are in practice depends on farmers adopting the appropriate technology in the specific agro-ecological environment.

3.2.1. Current situation

More than half of the Greek, Italian and Portuguese academics said that there is a widespread concern in their region regarding the practice in sustainable agriculture (Figure 1).

Despite, they affirm that some farmers don't have the "know-how" of these practices and that farmers are interested in the economic profit.

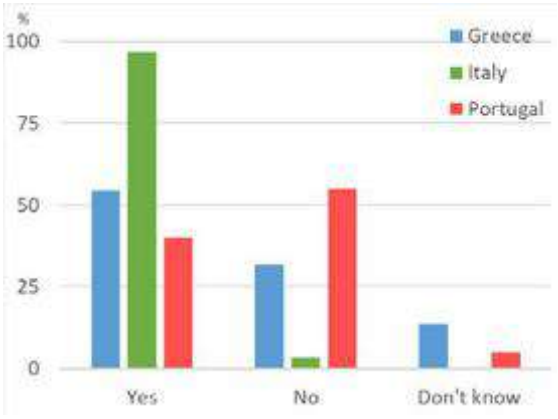


Figure 1. Present widespread concern of European expert academics regarding sustainable agriculture.

The sustainable agriculture practice concern was mainly related to subjects: i) climate change; ii) soil quality and resources; iii) water resources and management; iv) sustainable production; v) conservation agriculture; vi) farmers' income. The identified subjects are those that are causing a degree of concern and optimism in farmers that significantly varies according to the stakeholder's political views, production region, and agricultural occupation group [6].

Less than half of the respondents of each country agreed that exist some concern regarding the practice of sustainable agriculture. In Greece, the majority of respondents said that farmers do not have enough knowledge in sustainable agriculture issues and most of the stakeholders' focus on short-term profit, without taking into account the environmental impact and the sustainability of the farming systems. In Italy, the only questionnaire with negative answer said that there is not a widespread concern regarding the practice of sustainable agriculture, because their productions - organic agriculture and integrated agriculture - are regulated by the law. In Portugal, the majority of respondents said that many farmers are more interested in the economic sustainability. In sum, the differences in the elaboration of the "Yes" and "No" answers can be accounted based on the demographic characteristics of farmers in different countries.

From the analysis of the existent sustainable farming practices, we found that sustainable crop rotation plan, crop protection management and soil management were considered as practices already present in farms in the three European countries (Table 2). However, crop nutrient management and organic based fertilizers, integrated pest management and reuse of agricultural residues could almost be considered as practices present in European farms. Reduction of methane emissions from livestock and reduction of CO_2 emissions from machinery and fuel use were considered to be practices with low expression in Europe. Precision agriculture (PA) is a sustainable farming practice existent in Portugal and with low presence in Greece and in Italy. The low expression practices, identified among the respondents, have been considered to be the main drivers of climate change. According to Climate Change Position Statement Working Group (2011) and IPCC (2007), agriculture contribute with an estimation of 10 % - 15 %, to global anthropogenic greenhouse gases (GHG) emissions including nitrous oxide (N_2O), methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2). Climate change and environmental degradation increase farmers' responsibilities on conservation and environmental management.

Table 2. Existent sustainable farming practices in Greece, Italy and Portugal.

Existing practices	Greece (%)	Italy (%)	Portugal (%)
Whole farm management plan	45	50	45
Farming cooperation	82	53	55
Sustainable crop rotation plan	73	87	75
Soil management	68	60	85
Crop nutrient management and organic based fertilisers	59	67	65
Crop protection management	91	77	85
Management plan for efficient energy use	32	37	25
Farm waste management	18	40	35
Use of renewable energy	36	43	45
Energy production from biomass and liquid manure	41	43	30
Water conservation and management	41	43	85
Irrigation evaluation and monitoring	36	50	75
Reduction of CO_2 emissions from machinery and fuel use	14	10	30
Reduction of methane emissions from livestock	18	23	10
Maintenance and calibration of spraying equipment	68	30	85
Use of catch crops	41	60	30
Integrated pest management	59	90	75
Reuse of agricultural residues	55	77	60
Precision agriculture	41	23	70

3.2.2. Current level of farmer's expertise

In Greece, Italy and Portugal, most of the respondents consider the farmers to have medium level of experience in the topics presented in Table 3. The highest level of knowledge of farmers' expertise was in crop nutrition, health and protection. However, the farmers have a considerable level of knowledge in animal husbandry, health and welfare, soil management and organization and planning. The lowest level of knowledge of farmers' expertise was in climate change and air quality, and waste management and pollution control. These results revealed that the farmers are experts in every phases of crop and animal production but not in farming waste and pollutants.

Table 3. Level grade of farmer's expertise in Greece, Italy and Portugal.

Subject	Greece						Italy						Portugal					
	None	Small	Medium	High	Very high	Don't know	None	Small	Medium	High	Very high	Don't know	None	Small	Medium	High	Very high	Don't know
Energy efficiency	5	55	36	0	5	0	3	50	47	0	0	0	10	45	45	0	0	0
Water use and conservation	0	50	32	14	0	5	3	47	43	7	0	0	0	25	55	20	0	0
Climate change and air quality	27	45	18	9	0	0	20	50	30	0	0	0	10	70	10	5	0	5
Landscape and nature conservation	0	41	50	5	0	5	3	23	50	23	0	0	5	50	25	20	0	0
Animal husbandry, health and welfare	0	32	27	27	9	5	0	7	50	33	10	0	0	15	45	25	5	15
Waste management and pollution control	23	36	23	5	9	5	7	47	37	10	0	0	20	40	25	10	5	0
Soil management	5	27	55	9	5	0	0	30	43	27	0	0	0	35	40	20	5	0
Organization and planning	0	23	50	14	9	5	0	30	47	23	0	0	0	35	45	20	0	0
Human and social capital	0	18	64	9	0	9	0	37	37	20	3	3	10	25	30	20	0	10
Crop nutrition	0	5	32	50	14	0	3	7	43	40	7	0	0	0	45	45	0	10
Crop health and protection	0	0	32	55	14	0	3	13	37	40	7	0	0	0	60	30	5	10

3.2.3. Future trends

The main future trends of sustainable farming practices in Greece, Italy and Portugal were management plan for efficient energy use, farm waste management, and energy production from biomass and liquid manure (Table 4). Although, the use of renewable energy, reduction of methane emissions from livestock, and precision agriculture may be also considered important future trend practices in European farms. Whilst, water conservation and management were considered the sustainable/farming practice with lowest future trend. This can be due to the fact that water is already a concern for farmers, especially in the opinion of Italian and Portuguese academics.

Table 4. Future trends in sustainable farming practices in Greece, Italy and Portugal.

Future trends practices	Greece (%)	Italy (%)	Portugal (%)
Whole farm management plan	55	50	45
Farming cooperation	23	47	40
Sustainable crop rotation plan	23	13	35
Soil management	32	40	20
Crop nutrient management and organic based fertilizers	41	33	40
Crop protection management	55	57	20
Management plan for efficient energy use	73	63	60
Farm waste management	86	60	65
Use of renewable energy	73	57	50
Energy production from biomass and liquid manure	91	90	60
Water conservation and management	14	23	15
Irrigation evaluation and monitoring	50	10	30
Reduction of CO_2 emissions from machinery and fuel use	59	57	60
Reduction of methane emissions from livestock	86	77	55
Maintenance and calibration of spraying equipment	32	70	25
Use of catch crops	55	40	35
Integrated pest management	68	50	30
Reuse of agricultural residues	45	23	45
Precision agriculture	77	77	40

3.2.4. Training needs on sustainable farming

The Greek, Italian and Portuguese academics considered very important expertise the majority of the technological, legislative, management and business, local community leadership and marketing (Figure 2). The technological was the most important expertise, while the legislative was the least important expertise. To train properly the farmers in sustainable agriculture, it is important to provide critical knowledge and skills to enhance the agricultural productivity and become economically self-reliant through gainful-employment [7].

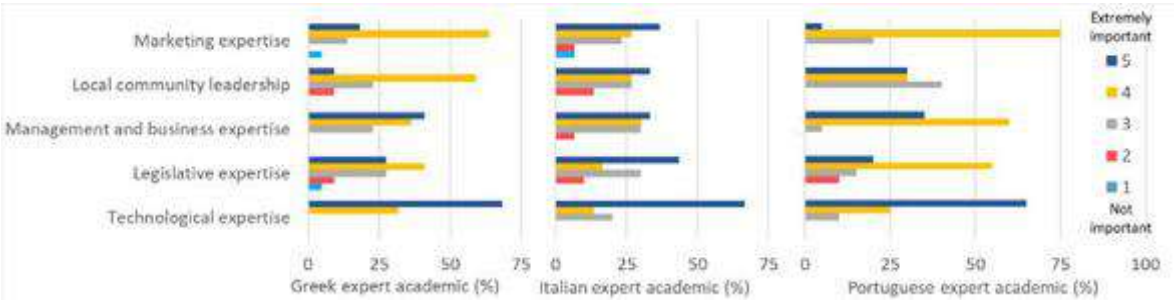


Figure 2. Expertise important rate for the future of sustainable agriculture in Greece, Italy and Portugal.

When the academics of the three countries were asked, about subjects in sustainable agriculture/farming, which do they think to be important to be taught in a Master Level, they agree in 9 important subjects: 1) agricultural waste management; 2) animal husbandry; 3) pest management; 4) precision agriculture; 5) remote sensing and GIS; 6) resources use efficiency (water, energy, nutrients, etc.); 7) soil management and conservation; 8) technological, economic, social and environment applied to sustainable agriculture; and 9) water management and conservation. These subjects are being used as the basis for the new curricula integrating the latest advancements of the "agri-tech" sector, and training courses for agricultural workers. Six of these

areas, where significant technological developments occurred to help farmers for a more sustainable agriculture, were identified in the ongoing project SAGRI – Sustainable Agriculture (http://www.sagriproject.eu/), and are being applied in the ongoing project SFARM – Sustainable Farming.

3.2.5. Training methods

The analysis of future training methods allows us to identify that Greek, Italian and Portuguese academics strongly agree with the require learning of new agronomical and environment (Figure 3). However, Greeks and Portuguese respondents strongly agree that management, and information and communication technology (ICT) skills are future training needs, while Italians respondents consider that these skills do not require future training. Skilled farmers will need to be able to understand and apply new technologies related to primary production for both food and non-food uses, soil science, crop and livestock genetics, agri-chemicals and general-purpose technologies such as remote sensors, satellites and robotics.

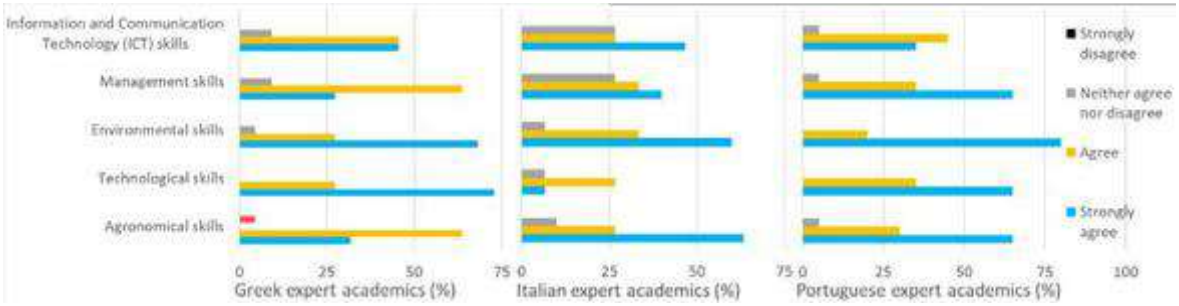


Figure 3. Overall future training needs in Sustainable farming.

Furthermore, we found that traditional face-to-face learning, experienced farmers as mentors and knowledge sharing mechanisms were rated as very applicable/important by the academics of Greece, Italy and Portugal (Table 5). On the other hand, massive open online courses and apps for learning via a smartphone was considered not very applicable/not important forms for learning/training in sustainable farming.

Table 5. Rate forms of learning/training in Sustainable farming by Greek, Italian and Portuguese expert academics (1 - not very applicable/ not important; 5 – very applicable/important).

Forms of learning/training	Greece (%)						Italy (%)						Portugal (%)					
	1	2	3	4	5	Don't know	1	2	3	4	5	Don't know	1	2	3	4	5	Don't know
Traditional face-to-face learning	0	0	14	41	41	0	0	7	10	30	53	0	5	0	10	45	40	0
Virtual and blended learning	0	0	36	27	32	0	3	10	37	37	10	3	0	5	25	40	30	0
Massive Open Online Courses	9	14	27	27	14	5	3	30	13	37	10	7	0	30	60	10	0	5
Peer-to peer learning	0	0	41	45	9	0	7	23	10	43	13	3	0	5	25	40	30	0
Experienced farmers as mentors	0	5	9	27	55	0	0	0	17	30	53	0	0	0	15	45	40	0
Knowledge sharing mechanisms	0	0	9	50	32	5	0	0	20	40	37	3	0	0	10	45	30	15
Apps for learning via a smartphone	5	9	32	32	18	0	0	13	50	23	13	0	5	5	40	20	10	20

The training methods educational excursions/visits, field demonstrations, short-term seminars, practical courses/exercises and agriculturalist's visits in farms were extremely efficient by the academics of the three European countries (Table 6). On the other hand, these academics considered not efficient the training methods broadcasts on radio, information in the form of forms-brochures, television broadcasts and articles in newspaper. Some agricultural universities and colleges still teach unsustainable conventional agricultural practices and technologies linked to crop and livestock production, such as crop monoculture and heavy use of chemical inputs.

Table 6. Training methods believed to be more efficient for the respondents (1 – not at all efficient; 5 – extremely efficient).

Training methods	Greece						Italy						Portugal					
	1	2	3	4	5	Don't know	1	2	3	4	5	Don't know	1	2	3	4	5	Don't know
Classroom sessions	0	0	36	50	14	0	0	7	17	40	37	0	0	5	35	25	35	0
Educational excursions/visits	0	0	14	36	50	0	0	0	13	30	57	0	0	0	20	45	35	0
Field demonstrations	0	0	0	36	64	0	0	0	3	27	70	0	0	5	10	25	60	0
Short-term seminars	0	0	18	73	9	0	0	3	10	57	30	0	0	0	25	40	35	0
Practical courses/exercises	0	0	5	36	59	0	0	0	7	23	70	0	0	0	10	35	55	0
On-line courses (e-learning)	0	14	50	27	9	0	0	10	57	23	7	3	0	10	45	40	5	0
Education at the individual level/ individual contact	0	5	18	50	27	0	3	10	40	30	10	7	0	0	15	50	30	10
Agriculturalist's visit in farms	0	0	0	41	59	0	0	0	20	13	67	0	0	0	15	40	45	0
On-line communication with agriculturalist (real time)	0	9	36	45	9	0	0	17	57	7	13	7	5	0	45	25	20	5
Lectures at physical meetings	0	0	27	64	9	0	0	13	50	20	13	3	0	15	45	30	10	0
Farmers visits to agriculturalist's office	5	5	45	32	9	0	0	0	37	43	20	0	0	20	20	35	15	5
Creating newsgroups	0	27	41	27	5	0	0	17	50	20	7	7	0	15	35	45	0	0
Broadcasts on radio	14	32	45	5	0	5	0	40	40	10	7	3	10	15	60	15	0	0
Information in the form of forms-brochures	5	18	64	9	0	5	0	17	53	20	7	3	10	20	30	30	5	0
Television broadcasts	0	32	41	18	5	5	0	23	43	20	10	3	0	20	35	35	5	5
Articles in newspapers	0	36	36	27	0	0	0	17	57	20	7	0	0	15	50	30	5	0
Agricultural journals	0	9	50	32	5	5	0	13	57	23	7	0	0	10	45	45	5	0
Helpline instructions	9	5	32	32	14	9	0	27	37	23	7	7	0	5	40	15	15	15

4. Conclusions

Relevant best practices in sustainable farming and agro-environmental technologies in Europe can be taken into account when developing a MSc programme were identified based on questionnaires. The questionnaires were developed in order to define the fundamental competences/expertise, to identify the sustainable agriculture practices and the methods of training/ learning that should be taken in consideration in a MSc programme in sustainable farming. The questionnaires were answered by Greek, Italian and Portuguese academics experts in agrarian sciences. The results allowed to identify the relevant best practices that should be taken into account when developing a MSc programme in sustainable farming.

In summary, the fundamental competences/expertise to be present in a MSc programme on sustainable farming should be:

1) Agricultural waste management
2) Animal husbandry
3) Pest management
4) Precision agriculture
5) Remote sensing and GIS
6) Resources use efficiency (water, energy, nutrients, etc.)
7) Soil management and conservation
8) Technological, economic, social and environment applied to sustainable agriculture
9) Water management and conservation

The most important sustainable agriculture/farming practices identified were:

a) Sustainable crop rotation plan
b) Crop protection management
c) Soil management

The more adequate forms of training/learning considered were:

1) Traditional face-to-face learning
2) Experience farmers as mentors
3) Knowledge sharing mechanisms

The more efficient training methods considered were:

a) Educational study visits
b) Field demonstration
c) Short-term seminars
d) Practical courses/exercises
e) Agriculturalist's visits in farms.

Author Contributions: Fátima Baptista and Patrícia Lourenço contributed for the questionnaire elaboration, analysed the data and wrote the manuscript; Vasco Fitas da Cruz, Luís Leopoldo Silva and José Rafael Silva contributed for the questionnaire development and data; Manuela Correia helped to develop the questionnaire; Georgios Papadakis, Evangelos Dimitriou and Pietro Picuno contributed to the questionnaire data.

Funding: This research was funded by SFARM - Sustainable Farming project (www.sfarm-project.eu) of the programme ERASMUS + (Skills alliance for sustainable agriculture) (SFARM - 585814-EPP-1-2017-1-EL-EPPKA2-CBHE-JP).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments

Authors are grateful to all academic expertise that answered the questionnaires.

References

1. EU, "Sustainable agriculture for the future we want. European Union, DG AGRI/ DG Development and Cooperation (EuropeAid).," p. 8, 2012.
2. D. Cioloş, "Agriculture the way towards sustainability and inclusiveness G20/Rio de Janeiro 21 June 2012. DG AGRI/DG DEVCO side event / SPEECH/12/480, 21/6/2012.," 2012.
3. C. Lamine, "Sustainability and Resilience in Agrifood Systems: Reconnecting Agriculture, Food and the Environment," *Sociol. Rural.*, vol. 55, no. 1, pp. 41–61, 2015.

4. U. M. Azeiteiro, P. Bacelar-Nicolau, F. J. Caetano, and S. Caeiro, "Education for sustainable development through e-learning in higher education: experiences from Portugal," *J. Clean. Prod.*, vol. 106, pp. 308–319, 2015.
5. EISA, "European Initiative for Sustainable Development in Agriculture (EISA). 'European Integrated Farming Framework A European Definition and Characterisation of Integrated Farming (IF) as Guideline for Sustainable Development of Agriculture.,'" 2012.
6. B. I. Grimberg, S. Ahmed, C. Ellis, Z. Miller, and F. Menalled, "Climate Change Perceptions and Observations of Agricultural Stakeholders in the Northern Great Plains," *Sustainability*, vol. 10, no. 5, p. 1687, May 2018.
7. S. S. Patil and K. D. Kokate, "Training need assessment of subject matter specialists of Krishi Vigyan Kendras," *Indian Res. J. Ext. Educ.*, vol. 11, no. 21, pp. 18–22, 2011.

Área temática:

Mecanización



X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Accidentes mortales en el sector agrario en los últimos 15 años

J. Mangado[1], P. Arnal[1], A. López-Maestresalas[1], S. Arazuri[1], C. Jarén[1]

[1] Dpto. Ingeniería, ETS Ingenieros Agrónomos, Universidad Pública de Navarra. Campus Arrosadia. 31006 Pamplona. España; 1 txuma.mangado@unavarra.es; pedro.arnal@unavarra.es; ainara.lopez@unavarra.es; silvia.arazuri@unavarra.es; cjaren@unavarra.es

Resumen: El presente trabajo se basa en la recogida y análisis de 1387 accidentes mortales acontecidos en el sector agrario en España desde 2004 al 2018 (ambos incluidos), la mayoría de ellos relacionados con la maquinaria agrícola. Los datos de siniestralidad laboral oficiales del sector tienen poco que ver y enmascaran la realidad, arrojando unos resultados de siniestralidad muy por debajo de la realidad del sector, dando una falsa imagen de seguridad laboral en el sector. Los accidentes mortales son los que tienen una mayor repercusión en los medios apareciendo solo en menor medida los accidentes con resultado de heridos, con la recopilación de estos accidentes mortales y el análisis y estudio de las noticias que los describen se realiza un estudio estadístico que busca sectorizar los accidentes creando grupos en función de distintos factores como el lugar donde se produce el accidente, en qué circunstancias, que máquina o elementos intervienen en el accidente, etc. El objetivo final es el de visibilizar los factores de riesgo presentes con mayor frecuencia en los accidentes mortales. Se busca dar una visión global y mostrar un problema que no se percibe en el conjunto de la sociedad, ya que las noticias constituyen un goteo constante que la mayoría de veces únicamente aparece en los medios de comunicación regionales.

Palabras clave: seguridad, maquinaria, tractor, noticias.

1. Introducción

Tomando la tesis doctoral "Análisis de la información sobre accidentes en el sector agrario recogida en los medios de comunicación en el decenio 2004 a 2013" [1] como punto de partida del presente trabajo, y partiendo de la premisa de que el tractor se encuentra presente en la mayoría de los accidentes mortales que se dan en el sector agrícola [2], se ha actualizado la revisión de las noticias que aparecen en los medios de comunicación sobre accidentes acontecidos en el campo en España, poniendo especial énfasis en la búsqueda de todos los accidentes relacionados con la maquinaria agrícola.

El sector agrario es considerado un sector con baja siniestralidad en España, esta imagen se desprende de las estadísticas oficiales de accidentes laborales.

Un accidente laboral solo es considerado como tal cuando lo sufre un trabajador por cuenta ajena, quedando fuera de las estadísticas oficiales todos los accidentes sufridos por los trabajadores agrarios por cuenta propia.

También quedan fuera de la estadística los accidentes que sufren los familiares de los agricultores que muchas veces ayudan a los agricultores en situaciones puntuales de trabajo, los accidentes que sufren los jubilados y las personas que sin tener la actividad agraria como

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3401

actividad principal, disponen de un huerto o una pequeña explotación agraria que atienden compaginando esta actividad con su ocupación principal.

Todos estos trabajadores cuyos accidentes no son incluidos en la estadística hacen que la estadística de siniestralidad no sea representativa del sector.

Por último existe otro factor que enmascara aún más la siniestralidad en el sector, y es que los accidentes de tractores en carreteras y caminos suelen ser incluidos como accidentes de circulación, no entrando tampoco en la categoría de accidentes laborales del sector agrario.

El sector agrario tiene una serie de características intrínsecas que incrementan el riesgo de accidente de sus trabajadores, las más destacables son:

- La enorme variedad de tareas a realizar.
- El empleo de distintas tecnologías y maquinaria.
- Trabajo al aire libre con los consiguientes factores ambientales variables.
- Trabajo habitualmente solo, aislado y muchas veces alejado de la atención sanitaria.
- Aplicación menos eficaz de medidas de prevención que en otros sectores como la industria.
- Distribución variable de los tiempos de trabajo, alternando valles y picos de trabajo que provocan una presión temporal en los trabajadores que deben realizar tareas en un tiempo limitado dependiendo de factores ajenos como el clima, plagas etc.

Todas las características anteriores que incrementan los riesgos afectan en mayor medida a los trabajadores agrarios por cuenta ajena cuyos accidentes no se consideran accidentes laborales.

El objetivo del trabajo es obtener una visión más real de los accidentes mortales que se dan en el sector agrario, obteniendo además de la cuantificación de estos accidentes, los factores de riesgo más repetidos en estos accidentes mortales.

2. Materiales y métodos

Desde antes del 2004 el Grupo de Investigación "Mecatrónica Agraria", de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la UPNA ha ido recogiendo los accidentes que aparecen en los medios de comunicación referentes a accidentes en el sector agrario, principalmente los relacionados con tractores agrícolas. De los miles de accidentes registrados para el análisis de los accidentes mortales se van a analizar un total de 1387 accidentes mortales.

2.1. Información obtenida de las noticias de accidentes

El estudio de accidentes se realiza a partir de datos no oficiales, únicamente tenemos los datos que aparecen en los medios de comunicación sobre los accidentes mortales.

Partimos de la seguridad de que no hemos conseguido recoger todos los accidentes, actualmente existen muchos más medios digitales que cuando se comenzó a recopilar los accidentes, además no todos los accidentes aparecen en los medios de comunicación, en algunas comunidades autónomas sus medios de comunicación valoran en mayor medida estas noticias que otras comunidades autónomas.

Otra fuga de información de los accidentes mortales son los accidentes cuyas consecuencias son heridos graves, los cuales tienen menor relevancia en prensa que los mortales, y además los heridos graves que fallecen como consecuencia del accidente pero pasado un tiempo de éste no suelen generar noticia, salvo excepciones.

También decir que sobre todo los primeros años se buscaron los accidentes relacionados con el tractor.

Los datos que se pueden extraer de las noticias de los accidentes muchas veces no aclaran nada lo sucedido, se limitan a informar que *"una persona a fallecido en un accidente con su tractor*

mientras realizaba labores agrícolas", informando más de la hora a la que se ha dado aviso al 112 del accidente y de los medios que se han movilizado, bomberos etc.

Otras noticias dan descripciones del accidente muy escasas no pudiendo obtener información de que ha propiciado al accidente y otras noticias que cubren el mismo accidente incluso dan versiones muy distintas de como ha ocurrido el accidente.

La lectura e interpretación de las reseñas que informan de los accidentes plantea además del problema de la falta de información en muchas de las noticias, otro problema que es reflejo de las muchas tareas diferentes que desarrollan los trabajadores agrarios, y es la gran variabilidad de accidentes y de factores que intervienen.

Todos los accidentes son diferentes, siendo los accidentes mortales con maquinaria agrícola además de los más numerosos, los que más factores en común suelen tener y en los que resulta más fácil encontrar factores de riesgo repetidos en distintos accidentes.

Aun considerando todos los puntos anteriores que dificultan el análisis de los accidentes, el número de noticias que cubren accidentes mortales es de tal magnitud que se pueden sacar conclusiones estadísticas relevantes que informan de los factores de riesgo que intervienen más veces en los accidentes mortales.

2.2. Análisis de las noticias de accidentes

Se realiza un análisis general de los accidentes mortales, primero una cuantificación total de los accidentes mortales encontrados, comparando esos datos con los accidentes laborales mortales. A continuación se obtiene y representa para todos los accidentados fallecidos la edad y el sexo de los fallecidos y por último también empleando todos los datos, la distribución por meses de los accidentes en función de la fecha del accidente.

Para realizar un análisis más específico de los accidentes en función de que factores de riesgo están implicados en al accidente, se van a emplear únicamente los accidentes acontecidos desde 2015 a 2018, un total de 342 accidentes mortales de los cuales se ha buscado la máxima información, intentando descubrir cómo y por qué se ha dado el accidente.

Hay que apuntar que en muchos de estos accidentes por mucho que se indague en internet buscando distintos medios digitales que aclaren un accidente, las reseñas en distintos medios muchas veces es la repetición de la nota de prensa de las agencias de noticias EFE o Europa Press, quedando muchos accidentes sin explicar a no ser que el medio de prensa local informe con más detalle sobre el accidente.

3. Resultados y discusión

3.1. Comparación del número de fallecidos en accidentes recogidos en prensa con el número de muertos en accidente laboral recogido en las estadísticas del Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social [3]

La media de fallecidos en accidentes laborales en el subsector correspondiente a Agricultura, ganadería, caza y silvicultura alcanza los 46,5 fallecidos al año.

La media de fallecidos en accidentes del sector recogidos en prensa alcanza los 92,5 fallecidos por año. El doble, y con la certeza de que el número es aún mayor.

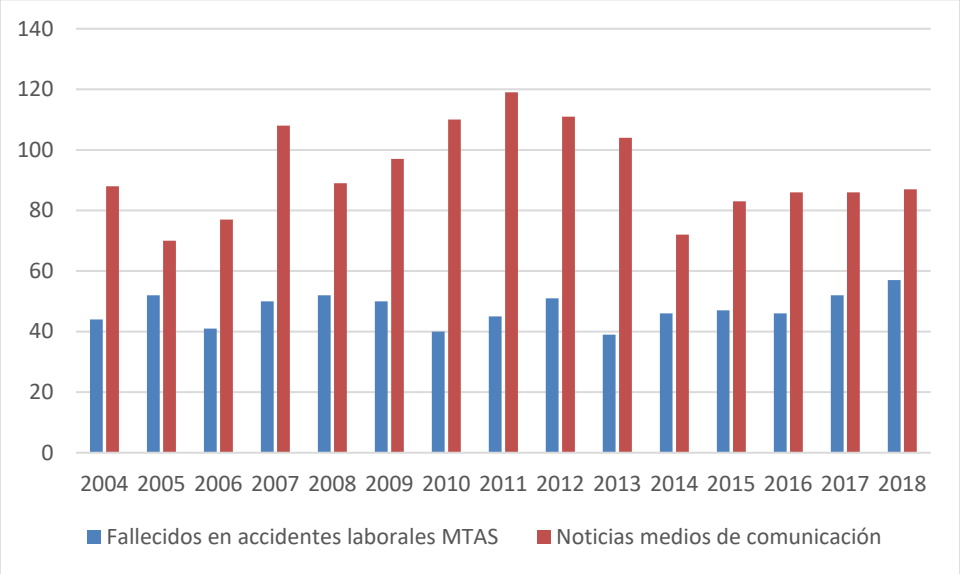


Figura 1. Nº de fallecidos en el sector agrario.

3.2. Edad y sexo de los fallecidos

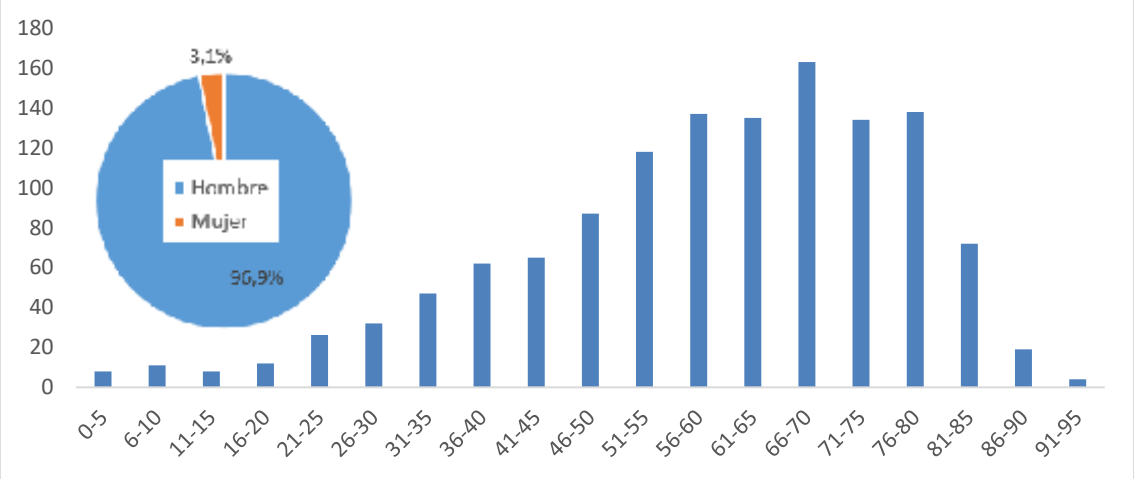


Figura 2. Nº fallecidos en accidente por grupos de edad.

De los 1387 fallecidos únicamente obtenemos el dato de la edad de 1286 fallecidos. En la figura 2 se aprecia claramente que la mayoría de accidentados son personas mayores, la media de edad de todos los accidentes recogidos es de 58,8 años.

También se aprecia que existen concretamente 27 niños menores de 16 años fallecidos en accidentes agrarios. Todos ellos familiares acompañantes del padre o del abuelo.

3.3. Distribución a lo largo del año de los accidentes

En la figura 3 se muestra el número de fallecidos en accidente distribuidos en los distintos meses del año. Los meses de otoño e invierno en los que la duración del día y las condiciones meteorológicas limitan el tiempo de trabajo en el campo son los meses en los que se recogen un menor número de accidentes, hasta un 20% menos que la media, por contrapartida los meses de verano y primavera en los cuales se realizan más labores en el campo, son los que más accidentes agrupan, hasta un 30% más de accidentes que la media.

La parte final del verano y comienzo del otoño no responde a lo anterior. En agosto y septiembre, aunque el día es largo, las labores en el campo son menos frecuentes que los meses anteriores, el campo reposa en espera de las lluvias, en octubre se da un repunte de accidentes mortales, coincidiendo con el mes de preparación y siembra de los cereales de invierno.

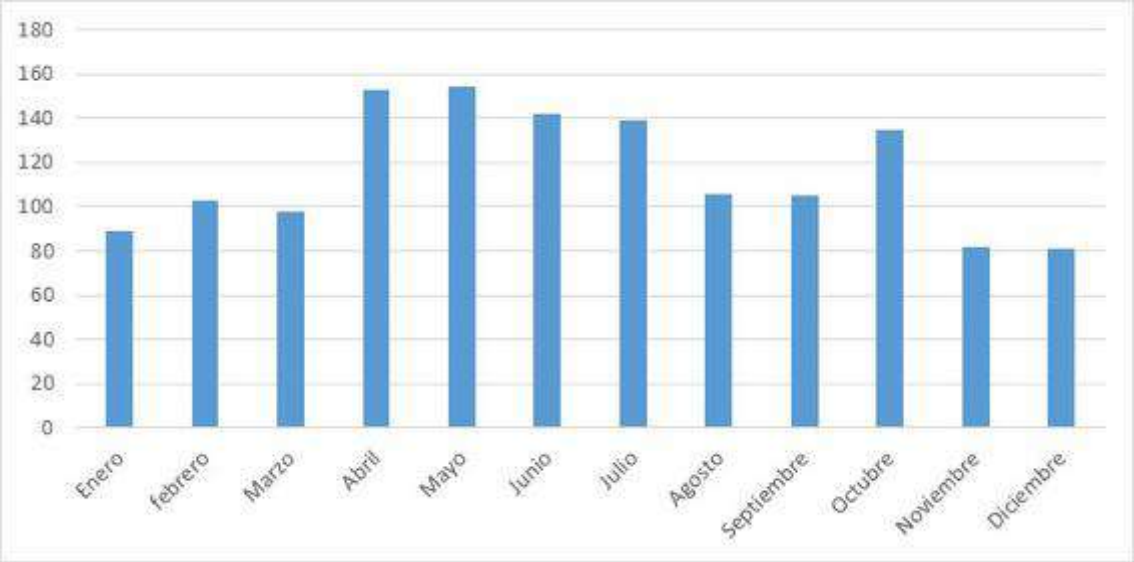


Figura 3. Nº fallecidos en accidente por meses del año.

3.4. Factores de riesgo presentes en los accidentes

3.4.1 Distribución de los accidentes mortales en función del vehículo implicado en el accidente y en función del tipo de accidente

La figura 4 muestra la distribución de los accidentes con los que se realiza el estudio y no la distribución de los accidentes totales del sector agrario, ya que, aunque se han incluido todos los accidentes mortales asociados al sector, la búsqueda de dichas reseñas ha empleado en su mayoría términos relacionados con la maquinaria.

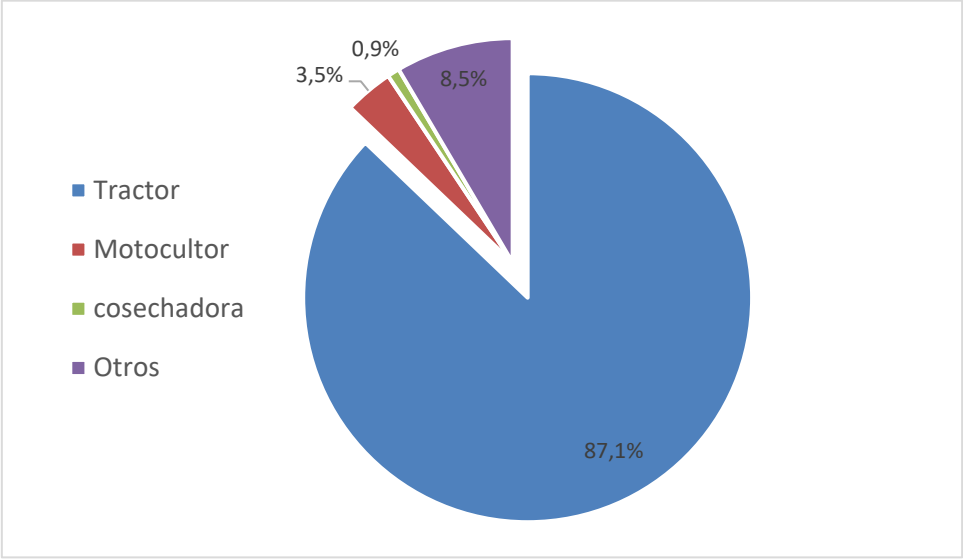


Figura 4. Distribución de los accidentes en función del vehículo implicado en el accidente.

Aclarar que el grupo de accidentes en el que está implicado el tractor incluye los accidentes provocados por el tractor y los provocados por los aperos enganchados al mismo.

Respecto al grupo "otros" incluye los accidentes mortales en los que no se ve implicado ningún vehículo y aquellos en los que interviene algún vehículo no incluido en los grupos anteriores.

Cogiendo únicamente los accidentes en los que está implicado el tractor se realiza otra sectorización según el tipo de accidente. Se muestra en la figura 5

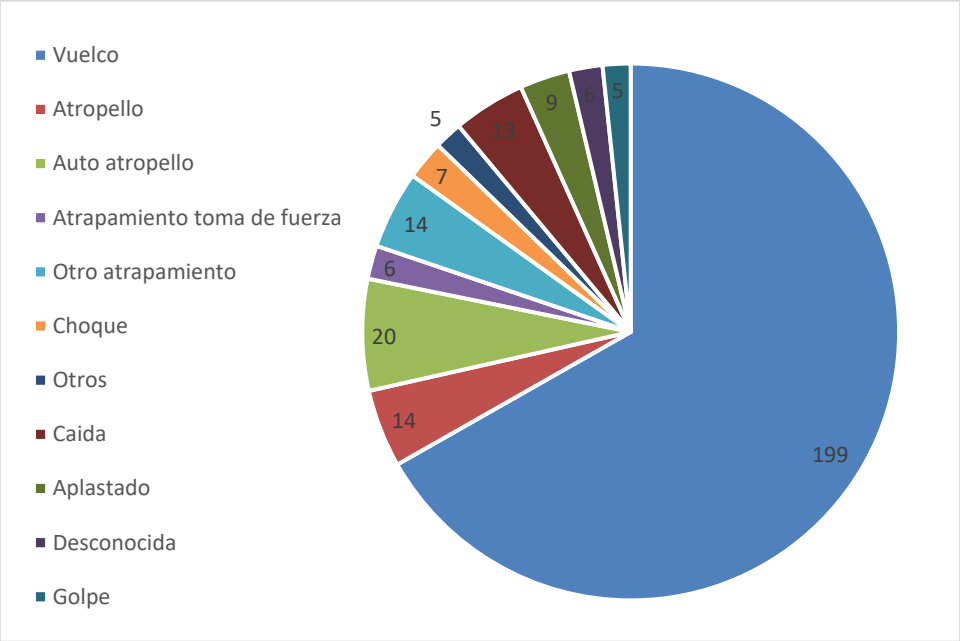


Figura 5. Distribución de los accidentes con tractor en función del tipo de accidente.

Destaca claramente el vuelco de tractor como el tipo de accidente mortal más frecuente (67%) con el tractor, a destacar los auto atropellos (20%) y también los atropellos (14%), atrapamientos (14%) enganchando aperos, por los propios aperos o la pala frontal y las caídas desde el tractor o desde el remolque acoplado (13%).

El motocultor es el vehículo agrícola que está presente en 2º lugar en los accidentes mortales. Los tipos de accidente que se dan con los motocultores son básicamente dos, el más frecuente es el atrapamiento del usuario (66% de los casos) este atrapamiento tiene dos versiones, el atrapamiento del usuario con el eje de azadas y el atrapamiento del usuario entre el motocultor y un obstáculo fijo como un árbol al maniobrar marcha atrás. La segunda causa es el vuelco en el caso de que el motocultor esa tipo tracto carro.

3.4.2 Análisis de los accidentes mortales por vuelco de tractor

De los 199 vuelcos de tractor en 68 accidentes no se menciona causa alguna que haya podido provocar el vuelco, el resto, (131) se representa en la figura 6 en función de la causa principal que ha influido en el vuelco. La gran mayoría de veces el vuelco del tractor no es consecuencia de un solo factor de riesgo, sino que es el resultado de la combinación de varios factores. El factor más predominante es la salida de vía.

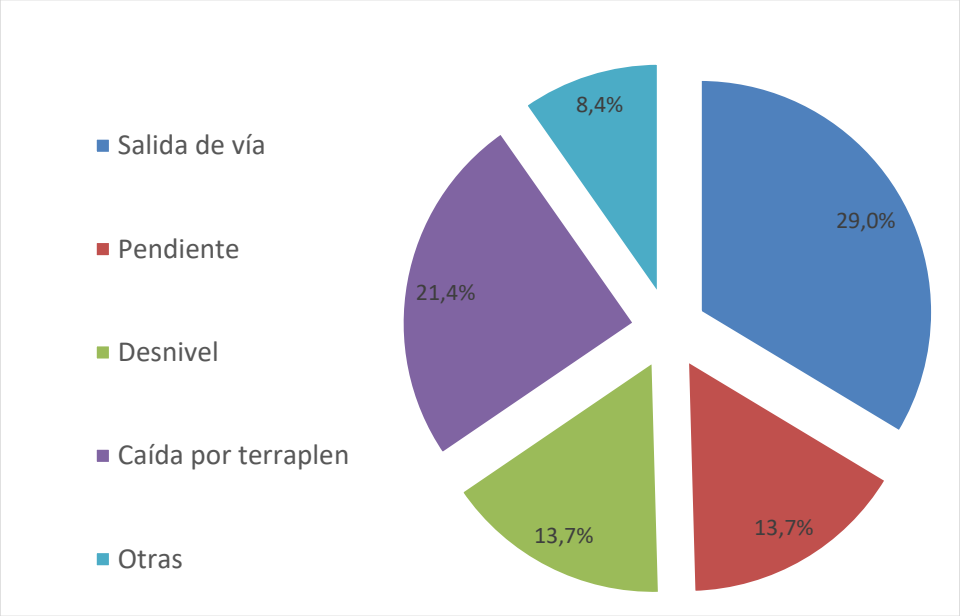


Figura 6. Factores de riesgo principales presentes en los vuelcos de tractor.

Respecto al lugar en el que se encontraba el tractor en el momento del vuelco, con los 173 vuelcos en los que las noticias especifican donde se encontraba el tractor en el momento de volcar se genera la figura 7.

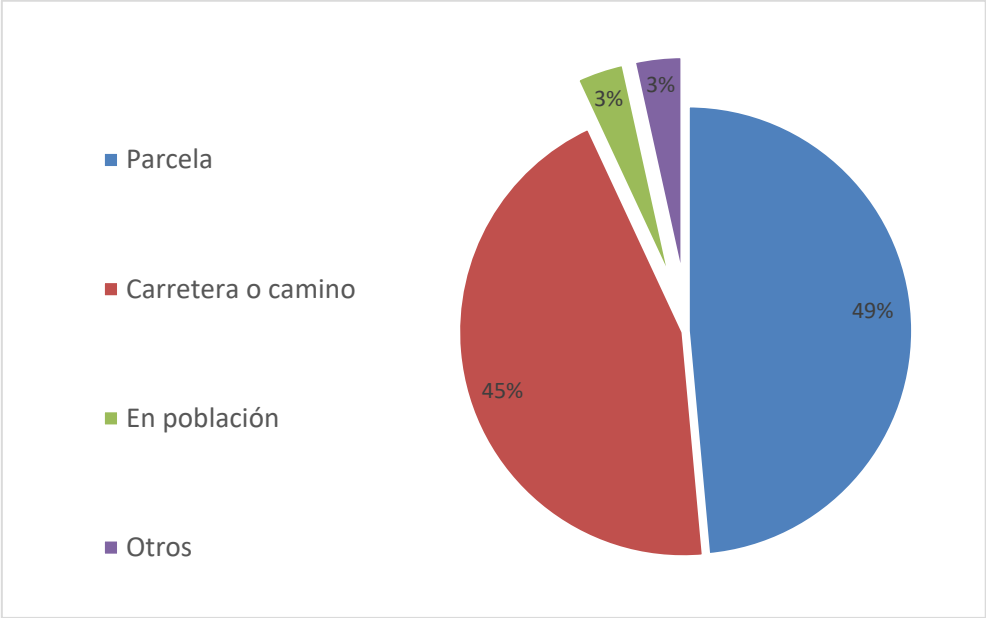


Figura 7. Lugar donde se da el vuelco de tractor.

Esta gráfica muestra que los vuelcos por vuelco de tractor en caminos y en carreteras son casi los mismos que los muertos por vuelco de tractor en las parcelas.

Analizando las noticias de los vuelcos de tractor en función del trabajo que se estaba realizando en el momento del vuelco se obtiene la figura 8.

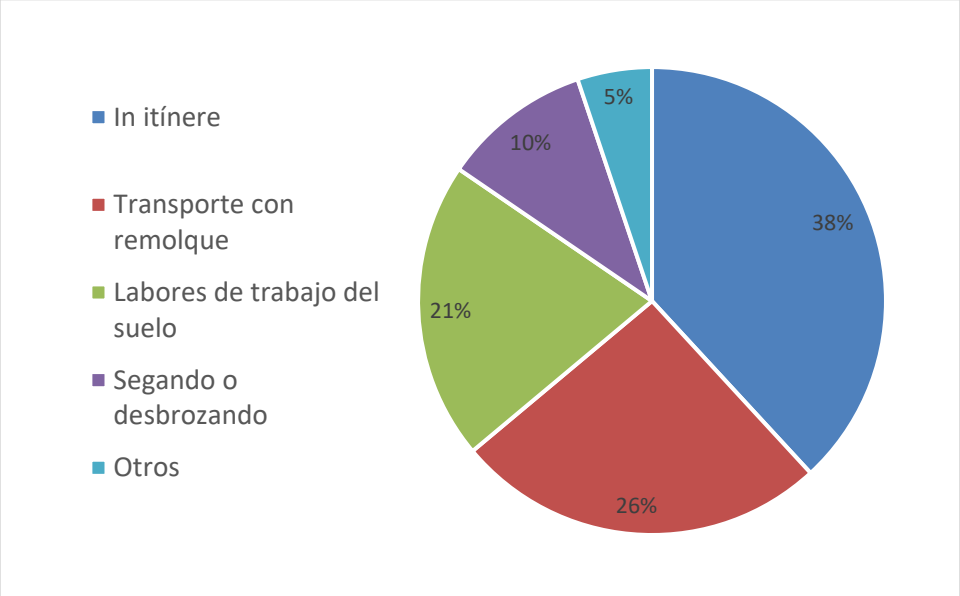


Figura 8. Trabajo que se estaba realizando cuando se da el vuelco de tractor.

Esta gráfica vuelve a confirmar lo que se desprende de la lectura de las crónicas de los accidentes, en contra de lo que se pueda pensar no provocan más vuelcos los trabajos en parcelas en pendiente. Donde más vuelcos de tractor se producen son en los desplazamientos, y hay que destacar el alto porcentaje de vuelcos de tractor en los que el tractor iba arrastrando un remolque. En más de una cuarta parte de los vuelcos de tractor existe también el factor remolque.

El 21% de los vuelcos se dan realizando laboreo del suelo, que aparezca este alto porcentaje de vuelcos realizando estas labores es razonable ya que es el tipo de labores en las que normalmente más tiempo emplea el tractor, y en las que más se acerca a las lindes de la parcelas con sus desniveles.

A destacar también la labor de siega y desbroce. En esta labor sí que suele estar presente el factor pendiente, principalmente en la siega de pastos de montaña en parcelas con mucha pendiente. En los desbroces de esos pastos o de lindes de parcelas tenemos el factor pendiente y el factor desnivel ya que el tractorista en la labor se acerca a la linde de la parcela.

Por último (figura 9) para terminar de estudiar los vuelcos de tractor únicamente en 73 vuelcos se especifica si el tractor disponía es estructura de protección al vuelco (ROPS).

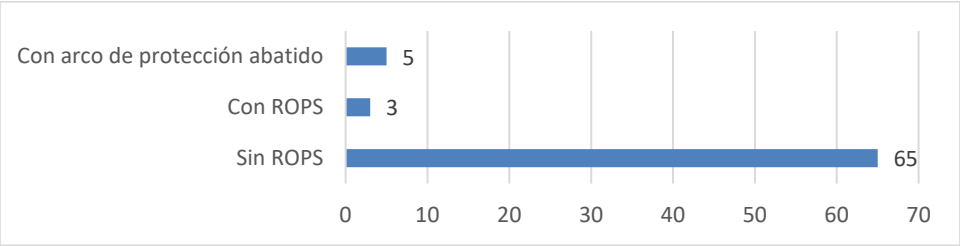


Figura 9. Presencia de ROPS en los vuelcos mortales.

El 96% de los fallecidos iba en un tractor sin ROPS o con el arco abatido, únicamente en uno de los tres vuelcos de tractor con ROPS la estructura ha colapsado atrapando al tractorista.

4. Conclusiones

1. Los accidentes en el sector agrario son mucho más numerosos que lo reflejado en las estadísticas de accidentes laborales.
2. Los accidentes mortales afectan en su gran mayoría a hombres con una edad bastante elevada, alcanzando casi los 60 años de media (58,8).
3. Las épocas con mayor incidencia de accidentes son la primavera, el principio del verano y octubre.
4. Los accidentes son tan variados como el número de tareas diferentes que se desempeñan, sin embargo el tractor es el vehículo implicado en la gran mayoría de accidentes mortales.
5. El vuelco de tractor resulta el accidente mortal más repetido y la causa más frecuente del vuelco son las salidas de vía en carreteras y caminos.
6. La casi totalidad de vuelcos mortales son con tractores sin ROPS o con el arco de protección abatido.
7. Es necesario que los trabajadores del sector estén o no dados de alta como tales incrementen la prevención y para ello deben tomar conciencia de los riesgos que corren en el desarrollo de su actividad, prestando atención extra en los desplazamientos con el tractor por caminos y carreteras, más aún si son con remolque.
8. Como eliminar totalmente los vuelcos de tractor incrementando la precaución es imposible se deberían limitar sus consecuencias, para ello se recomienda la instalación de ROPS en los tractores que no llevan, y evidentemente si el tractor dispone de arco de protección éste debe ir siempre en posición elevada.

Referencias

1. Arnal Atarés, Pedro Análisis de la información sobre accidentes en el sector agrario recogida en los medios de comunicación en el decenio 2004 a 2013. (Tesis doctoral).2017 Universidad Pública de Navarra. Pamplona. España.
2. Mayrhofer et al., (2013). Occupational incidents with self-propelled machinery in Austrian agriculture. Journal of Agromedicine. 18(4): 359-367.
3. Estadísticas de accidentes de trabajo. Subdirección general de estadística y análisis sociolaboral. Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social. http://www.mitramiss.gob.es/estadisticas/eat/welcome.htm

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Análisis de la influencia de la poda mecanizada sobre la incidencia de plagas en mandarinos de la variedad `Clemenules´

G. Mateu[1], A. Fonte[1], C. Garcerá[1], I. Carrillo[1], A. Torregrosa[2], P. Chueca[1]

[1] Centro de Agroingeniería, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA); chueca_pat@gva.es
[2] Universitat Politècnica de Valencia-DIRA (UPV); torregro@dmta.upv.es

Resumen: Actualmente, la poda de cítricos en España se realiza de manera manual y puede suponer hasta un 21,6 % de los costes de producción, sin considerar la recolección. A pesar de que la poda mecanizada podría reducir estos costes hasta en un 75%, es una práctica cuestionada por su posible efecto sobre otras labores, como el control de plagas y enfermedades. El objetivo de este estudio fue conocer la influencia de la poda mecanizada sobre la eficacia de las aplicaciones de fitosanitarios en el control de las principales plagas en cítricos, pulgón (*Aphis spiraecola* y *A. gossypii*), araña roja (*Tetranychus urticae*) y piojo rojo de California (*Aonidiella aurantii*). Para ello, se realizó un ensayo en una parcela comercial de mandarinos `Clemenules´ ubicada en Chiva (Valencia) durante la campaña 2018. Se evaluaron tres estrategias de poda: C (control, no poda); M (poda manual) y TEW (poda mecanizada de toda la copa: Topping + Hedging de las caras este y oeste) y se realizó el seguimiento de las tres plagas. Los resultados mostraron que no hubo diferencias significativas entre las estrategias de poda en cuanto a la incidencia de ninguna de las plagas evaluadas, ni entre los dos tipos de poda, ni con el control, indicando que la eficacia de la aplicación de los tratamientos fitosanitarios no se vio afectada por el tipo de poda realizado.

Palabras clave: pulgón, araña roja, piojo rojo de California, podadora de discos

1. Introducción

En las explotaciones citrícolas de la Comunidad Valenciana, de forma tradicional la poda se realiza manualmente, con tijeras y serrucho, siendo muy pocos productores los que apuestan actualmente por la mecanización de esta tarea.

La poda manual consiste en eliminar de forma selectiva las ramas menos productivas o dañadas y se considera una tarea fundamental para el correcto desarrollo fisiológico de los cítricos, ya que da lugar a una mejor distribución de los nutrientes en la planta. Esto reduce la cantidad de frutos producidos pero aumenta su tamaño y por tanto, su calidad. Además, se incrementa la incidencia lumínica y la aireación en el interior del árbol, y se facilita la penetración de los productos fitosanitarios durante su aplicación. El coste de la poda manual, si no se considera la recolección, puede llegar a suponer un 21.6% de los costes de producción [1], y requiere gran cantidad de mano especializada en un periodo de tiempo concreto. La poda mecanizada, a diferencia de la manual, no es selectiva en el corte, elimina todos los brotes y ramas exteriores que sobresalen más allá de los discos de corte, con el objetivo de controlar el tamaño y forma de los árboles. Sin embargo, en el interior quedan ramas sin podar que acaban formando un entramado de ramas secas que podrían dificultar la aireación y la penetración de los productos fitosanitarios. Como ventajas, requiriere menos tiempo y mano de obra que la

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3415

poda manual. Además, se ha demostrado que la poda mecanizada permite controlar la vecería de algunas variedades [2, 3].

Las primeras experimentaciones con poda mecánica se realizaron en USA en los años 50. Según Moore [4], la poda mecánica en limón complementada con poda manual reducía los costes en un 30-50% sin afectar a la producción ni a la calidad. En España durante los años 70-80 se realizaron las primeras experimentaciones [5, 6] y se han retomado en la última década [7, 8]. En general se observó que las producciones de los árboles disminuían el año en el que se realizaba la poda, tanto manual como mecánica, pero si se podaba con menos intensidad, o incluso no se podaba, algún año, tras los de poda, las producciones medias eran similares a las obtenidas con poda manual continuada. Ello demuestra que la poda mecánica puede ser una alternativa factible si se realiza adecuadamente y puede suponer una significativa reducción de costes. En experiencias realizadas en otros países se obtuvieron resultados similares [9, 10, 11, 12 y 13]. En cuanto al estudio del efecto de la poda mecanizada en el control y desarrollo de las plagas, no se han realizado investigaciones, basándose las afirmaciones de su efecto negativo en hipótesis no contrastadas [14].

Por todo ello, el objetivo de este estudio es conocer la influencia de diferentes estrategias de poda (manual, mecánica, y no poda) sobre el control y desarrollo de las principales plagas de los cítricos en la Comunidad Valenciana, pulgón (*Aphis spiraecola* y *Aphis gossypii*), araña roja (*Tetranychus urticae*) y piojo rojo de California (*Aonidiella aurantii*).

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño experimental

El ensayo se realizó durante la campaña de 2018 en una parcela comercial de mandarino de la variedad `Clemenules´ con una superficie de 3.4 ha situada en el municipio de Chiva (39°26'29.8"N, 0°33'00.5"W). El marco de plantación es de 6 m × 3 m y los árboles están plantados sobre meseta. Previo al ensayo, en toda la parcela se había podado las faldas de los árboles (skirting).

El ensayo consistió en un diseño experimental de bloques al azar con cinco repeticiones. Se evaluaron tres estrategias de poda: C (Control, sin poda), M (Manual, con tijeras de poda y serrucho), y TEW (Poda en altura, Topping, y poda lateral, hedging, en ambas caras del árbol, este y oeste). El seguimiento de las plagas se hizo sobre los árboles que habían sido podados con la misma estrategia durante dos campañas: 17-18 y 18-19. La poda se realizó con una podadora con cinco discos de corte (Modelo Jumar FH666, Jumar agrícola S.L, La Rioja, España) accionada por un tractor (Landini 90 REX 90 CV, Fabbrico, Italia). Previamente a la poda se caracterizó el tamaño de los árboles (Tabla 1). La poda en altura se realizó con dos pases horizontales, uno por cada lado de la copa, para cubrir su totalidad, y la poda lateral consistió en un pase por cada cara de los árboles.

Tabla 1. Caracterización de los árboles

Tratamiento	Volumen copa (m^3)
C	26,04
M	21,41
TEW	20,11

La unidad experimental por tratamiento y repetición fue como mínimo de 10 árboles de una misma fila, excepto el control que fue de 5 árboles. El seguimiento y evaluación de las plagas se realizó en tres árboles de cada unidad experimental, descartando los árboles del inicio y del final de la unidad experimental, y eligiendo tres árboles al azar repartidos a lo largo de la fila. En el caso de las unidades experimentales del control se muestrearon los tres árboles centrales. En total se muestrearon 15 árboles por tratamiento.

Tras realizar la poda y durante la campaña se realizaron los seguimientos de las plagas más importantes en el cultivo de los cítricos en la Comunidad Valenciana de la siguiente manera:

- Pulgón (*Aphis spiraecola* y *Aphis gossypii*):

En cada árbol muestreado se colocaron tres aros de 56 cm de diámetro sobre la copa, dos se colocaron en la parte externa y a una altura media de la copa (uno a cada lado de la calle –cara este y cara oeste) y un aro en el interior de la copa (para muestrear los brotes que surgen de la "cruz" del tronco). En cada aro se contó el número total de brotes que había dentro del aro y el número de brotes ocupados por pulgones. Con estos datos se calculó el porcentaje de brotes ocupados por pulgón.

- Araña roja (*Tetranychus urticae*):

En cada árbol se muestrearon 4 hojas sintomáticas (2 hojas en cada orientación –este y oeste– y en dos profundidades de la copa –exterior e interior–). En cada hoja sintomática se contabilizó el número de arañas rojas adultas presentes. En total, se muestrearon 60 hojas sintomáticas por tratamiento. En cada árbol muestreado se determinó el número de arañas por hoja sintomática ocupada.

Previamente a la recolección, de cada árbol muestreado se seleccionaron al azar un total de 40 frutos (10 frutos de cada orientación –norte, sur, este y oeste–, 5 del interior y 5 del exterior de la copa), diferenciando entre daño leve y severo. Con estos datos se determinó el porcentaje de frutos con daños leves y severos producidos por araña roja. Se consideró leve cuando el daño estaba localizado en un punto del fruto (normalmente en la zona del ápice o del pedúnculo, o en la zona de contacto entre dos frutos) y no implicaba destrío, y severo cuando el daño era más extenso en la superficie del fruto e implicaba destrío.

- Piojo rojo de California (*Aonidiella aurantii*):

Previamente a la recolección, de cada árbol muestreado se seleccionaron al azar un total de 40 frutos (10 frutos de cada orientación –norte, sur, este y oeste–, 5 del interior y 5 del exterior) y se contó el número de escudos de piojo rojo de California por fruto. Con estos datos se determinó el número medio de escudos por fruto en cada árbol.
En la Tabla 2 se muestran las fechas de los muestreos y los tratamientos fitosanitarios realizados a lo largo de la campaña.

Tabla 2. Resumen de los muestreos y tratamientos fitosanitarios realizados en la campaña 2018

	Muestreos				**Tratamientos**				
	1	**2**	**3**	**4**	**06/04**	**19/05**	**16/06**	**15/07**	**21/08**
Pulgón	03/05	11/05	21/05	X	✓	✓	X	X	X
Araña roja	10/07	17/07	24/07	08/11	X	✓	X	✓	✓
Piojo rojo de C.	08/11	X	X	X	X	X	✓	X	X
Volumen (l/ha)					3642	2210	4947	4447	4447
Producto aplicado					Flonicamida	Dimetoato + Abamectina	Piriproxifen + Clorpirifos	Aceite + Abamectina	Spirodiclofen + Abamectina

2.2.Análisis de datos

Para estudiar el efecto de las diferentes estrategias de poda sobre la incidencia de las plagas se realizó un análisis de la varianza simple (ANOVA) con el factor estrategia de poda a tres niveles (C, M, y TEW) para las variables 1) Porcentaje de brotes ocupados por pulgón en cada muestreo, 2) Número de arañas medio por hoja sintomática, 3) Porcentaje de fruto con daños por araña, 4) Porcentaje de frutos con daño severo o leve por araña, y 5) Número medio de escudos de piojo rojo de California por fruto en cada árbol. En todos los análisis se comprobó que los datos cumplían la hipótesis de homocedasticidad mediante el Test de Levene. La normalidad de los datos se comprobó mediante el análisis de los residuos en papel probabilístico normal. Para comparar las medias de los tratamientos se utilizó la prueba HSD de Tukey. En todos los análisis se consideró un nivel de confianza del 95%.

3. Resultados y discusión

3.1. Pulgón

En general, en los tres muestreos de pulgón se observa que la estrategia de poda mecanizada presenta menor porcentaje de brotes ocupados que la poda manual independientemente de la localización de los brotes (Figura 1). En el muestreo 1, el porcentaje de brotes ocupados en la estrategia de poda mecanizada fue significativamente inferior que en el tratamiento sin poda, mientras que en los muestreos 2 y 3 no fue significativamente diferente del resto de tratamientos.

En el segundo muestreo, ambas estrategias de poda presentaron mayor porcentaje de brotes ocupados que el control en la cara oeste.

Se observa que el primer tratamiento no controló la población de pulgón, ya que en el segundo muestreo se observó que el porcentaje de brotes ocupados había incrementado respecto al muestreo previo, hasta valores que oscilaban entre el 30 y el 60%. El segundo tratamiento controló la población de pulgón, disminuyendo los porcentajes medios de brotes ocupados a niveles alrededor del 1% independientemente de la estrategia de poda.

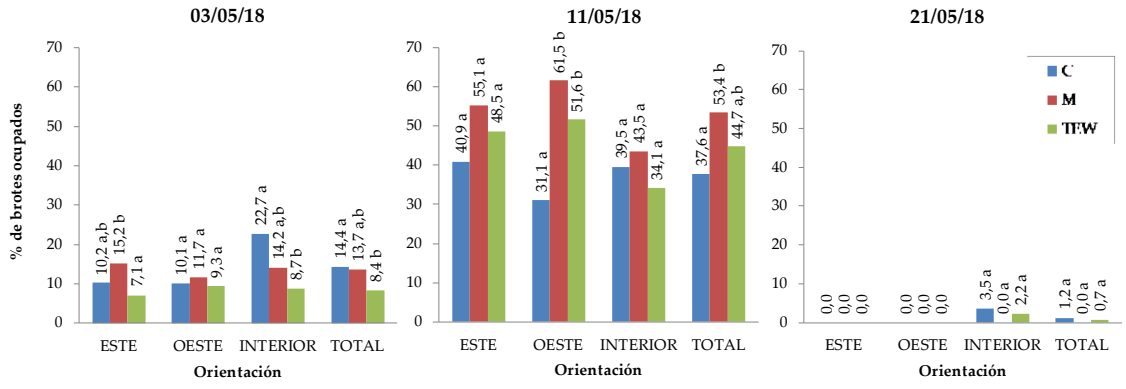


Figura 1. Porcentaje de brotes ocupados por pulgón en los tres muestreos. Letras entre columnas muestran diferencias significativas (Tukey HSD, $p<0.05$); TEW (Poda en altura y poda lateral en ambos lados); M (Manual); C (Control)

3.2. Araña roja

No se observaron diferencias significativas en el número de arañas medio por hoja sintomática entre las diferentes estrategias de poda, ni en el momento previo a la aplicación realizada el 15/07/2018, ni a posteriori (Figura 2).

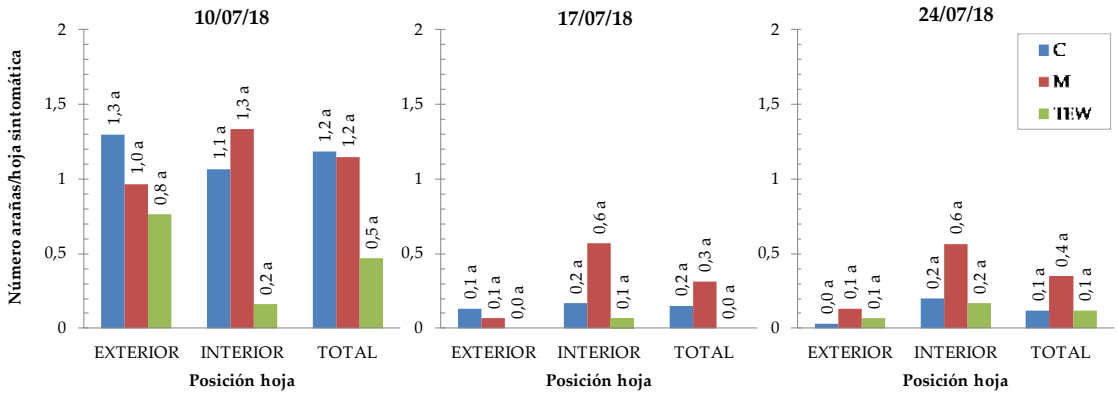


Figura 2. Número de arañas medio por hoja sintomática. Letras entre columnas muestran diferencias significativas (Tukey HSD, p<0.05); TEW (Poda en altura y poda lateral en ambos lados); M (Manual); C (Control)

Tampoco se observaron diferencias significativas en el porcentaje de frutos dañados por araña y el porcentaje de frutos con daño severo o leve el día de la recolección entre las diferentes estrategias de poda. Se observó que en todos los casos, el porcentaje de frutos dañados fue mayor en el interior de la copa, y que más del 50% de los frutos dañados presentaban daños leves.

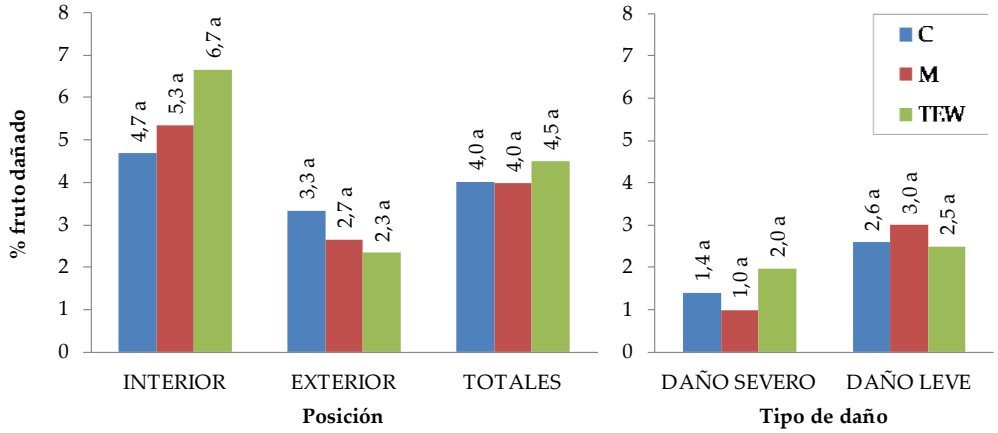


Figura 3. Porcentaje de fruto dañado y porcentaje de frutos con daño severo o leve. Letras entre columnas muestran diferencias significativas (Tukey HSD, p<0.05); TEW (Poda en altura y poda lateral en ambos lados); M (Manual); C (Control)

3.3. Piojo rojo de California

No se encontraron escudos de piojo rojo de California en la fruta muestreada, en ninguna de las estrategias de poda estudiadas.

4. Conclusiones

Tras una campaña de seguimiento de las principales plagas de los cítricos en una parcela en la que se realizaron diferentes estrategias de poda se observó que no existieron diferencias significativas de nivel de plaga. Independientemente de la estrategia de poda seguida, el pulgón, el piojo rojo de California y la araña roja en hoja fueron controlados con los tratamientos fitosanitarios realizados en la parcela. Por lo tanto, en base a estos resultados diríamos que la poda mecanizada no ha dado lugar a un aumento de los niveles de plaga. No obstante, para conocer el efecto a largo plazo de las diferentes estrategias de poda se debería continuar el presente estudio durante más campañas.

5. Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado dentro del proyecto "Aplicación de nuevas tecnologías para una estrategia integral de la recolección mecanizada de cítricos (CITRUSREC)" financiado por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA) y el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España (proyecto RTA2014-00025-C05-00) y cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Agradecer al grupo Revacitrus la cesión de la parcela experimental y su colaboración. Guillermo Mateu es beneficiario de una beca de formación y especialización del fondo social europeo (FSE).

Referencias

1. Mateu, G., Caballero, P., Torregrosa, A., Segura, B., Juste, F., Chueca, P. Análisis de la influencia de las operaciones de cultivo sobre los costes de producción en la citricultura de la Comunidad Valenciana. Levante Agrícola: Revista internacional de cítricos. 2018, 440, 60-64
2. Agusti, M., Martinez-Fuentes, A., Reig, C., Iglesias, D.J., Primo-Millo, E., Mesejo, C. Alleviation of alternate bearing in Citrus by means of mechanical pruning. In I International Symposium on Flowering, Fruit Set and Alternate Bearing, Palermo, Italy. 2017.
3. Sauls, J.W. Citrus pruning. Texas citrus and subtropical fruits. 2008. Available in https://aggie-horticulture.tamu.edu/citrus/pruning/L2308.htm [26 Abril 2019].
4. Moore, P.W. Mechanical pruning for citrus. California Agriculture. 1958, 11, 7-13.
5. Zaragoza, S., Alonso, E. La poda mecanizada de los agrios en España. Anales del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Serie: Producción Vegetal. 1980, 12, 157-180.
6. Zaragoza, S., Alonso, E. Citrus pruning in Spain. Proc. Int. Soc. Citric. 1981, 1, 172-175.
7. Martin-Gorriz, B., Castillo, I. P., Torregrosa, A. Effect of mechanical pruning on the yield and quality of 'Fortune'mandarins. Spanish Journal of Agricultural Research. 2014, 12(4), 952-959.
8. Martin-Gorriz B., Torregrosa A., Martínez C. 2018. Mechanical Pruning of Lemon Trees. AgEng, July 8-12. Wageningen the Netherlands. 9 pp.
9. Fallahi, E., Kilby, M. Rootstock and pruning influence on yield and fruit quality of 'Lisbon' lemon. Fruit Varieties Journal. 1997, 51, 242-246.
10. Kallsen, C.E. Topping and manual pruning effects on the production of commercially valuable fruit in a midseason Navel Orange variety. HorTecnology. 2005, 15, 335-341.
11. Rouse, B., Parsons, L., Wheaton, T.A. Hedging, topping and skirting trees in the citrus canker era. Citrus Industry. 2006, 12, 2 pp.
12. Mendoça, V., Ramos, J. D., Neto, S. E. A., Rufini, J. C. M. Production of 'Poncan' tangerine tree after pruning recovery. Ciencia e Agrotecnologia. 2008, 32, 103-109.
13. Yildirim, B., Yesiloglu, T., Incesu, M., Kamiloglu, M., Ozguven, F., Tuzcu, O., Aka, Y. The effects of mechanical pruning on fruit yield and quality in 'Star Ruby' grapefruit. Journal of Food, Agriculture & Environment. 2010, 8, 834-838.

    Klerk de, J. Citrus pruning. Learner guide. Pruning principles. Citrus Academy. 2017. http://www.citrusresourcewarehouse.org.za/home/document-home/learning-aids-and-resources/ca-citrus-av-series-learning-material/citrus-pruning/5033-ca-av-series-lm-citrus-pruning-m01-pruning-principles/file [26 Abril 2019].

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Análisis de la técnica de laboreo en bandas (*Strip Till*) en ensayos de campo reales

B. Gil Domínguez [1]

[1] Kuhn Ibérica S.A. - Carretera A-131, Km 100 - 22005 Huesca; Beatriz.gil@kuhn.com

Resumen: Estudio de la técnica agrícola que es novedosa en España, mediante la realización de dos ensayos en los que se pueda constatar el comportamiento de la técnica en condiciones reales, en una finca representativa en condiciones de regadío en el término municipal de Sariñena. En el primero se compara el trabajo de un apero *Strip-Till* con una pasada y dos pasadas antes de la siembra. En el segundo ensayo, en maíz de doble cosecha después de cebada y de siembra en julio, se estudia el comportamiento de este apero en este tipo de condiciones, así como realizar una comparación distribuyendo abono localizado y abono en superficie.

Palabras clave: línea, mínimo laboreo, apero.

1. Introducción

1.1. Antecedentes.

El laboreo en bandas nació como una técnica alternativa para solventar o mejorar la problemática asociada a los métodos de Laboreo Convencional o a la Siembra Directa [1].

El laboreo en bandas también llamado *Strip-Till* de forma anglosajona, es un modo de agricultura de conservación que se basa en trabajar el suelo en líneas. Estas líneas quedan limpias de residuo vegetal para el establecimiento del cultivo mientras las áreas de suelo entre las líneas permanecen inalteradas, con el residuo vegetal en superficie. El laboreo en bandas combina algunas de las ventajas del laboreo convencional (a toda la anchura de la parcela) así como del No Laboreo o la Siembra Directa (Tabla 1). A diferencia de la Siembra Directa donde la semilla se deposita en una estrecha rendija en el suelo, el *Strip-Till* trabaja una banda de entre 6 y 12 pulgadas (15-35 cm) de anchura y de 8 a 18 pulgadas (20-45 cm) de profundidad. El laboreo en bandas supone la sustitución de los aperos del laboreo convencional por el *Strip-Till*, y también implica el cambio de varias prácticas culturales para obtener resultados óptimos [2]. Si lo comparamos con el Laboreo Convencional, el laboreo en bandas disminuye tanto el volumen de suelo desestructurado como la cantidad de polvo que se genera normalmente; además reduce el consumo de carburante y los costes de maquinaria [3].

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.4247

Tabla 1. Aspectos de las dos técnicas convencionales que se utilizan en la actualidad que se potencian con el apero de laboreo en bandas de Kuhn: Striger.

	STRIGER	Siembra Directa	Convencional
Velocidad de calentamiento del suelo	☺		☺
Preparación de la línea de siembra	☺		☺
Preservar la vida y la estructura del suelo	☺	☺	
Conservar la humedad del suelo	☺	☺	
Rendimiento del campo	☺		☺
Drenaje de la línea de siembra	☺		☺
Rendimiento tiempo/ha	☺	☺	
Consumo de combustible	☺	☺	

El *Strip-Till* se desarrolló hace algunas décadas, y en la actualidad es comúnmente utilizado en toda la región de las Llanuras Costeras al sureste de los Estados Unidos (de ahora en adelante EE.UU.), en cultivos como el algodón, el maíz, y los cacahuetes, con el objetivo de romper las capas de suelo compactado que se forman con frecuencia en esa zona [3]. Esta técnica también se usa en sistemas de regadío en otras regiones de EE.UU. [4] para cultivos como el maíz dulce, frijoles, maíz y soja en secano, melón, tomate (tanto fresco como para industria), calabacín, brócoli trasplantado y coliflor [2]. Así pues, esta técnica va ligada a cultivos de siembra en línea ya que consiste en trabajar el suelo únicamente en la línea que luego va a ser sembrada, y que en España podrían ser tales como maíz, girasol, colza, remolacha, etc. o incluso cultivos hortícolas tales como el repollo, la coliflor o la alcachofa, lo que supone aproximadamente un 10% de la superficie cultivada en España.

1.2 Técnica de cultivo.

La técnica de cultivo experimentada en Europa ofrece varias alternativas de manejo, en función del suelo, del cultivo y del clima que se dé en la explotación.

El momento para realizar el laboreo en bandas es crítico para alcanzar los objetivos de esta técnica. Tradicionalmente, el *Strip-till* se lleva a cabo en otoño para maximizar los beneficios de crear una zona trabajada antes de la siembra en primavera. Los suelos están generalmente más secos tras la cosecha que en primavera. Las condiciones del suelo son más favorables para el *Strip-till* cuando la humedad del suelo está a capacidad de campo o menos, para minimizar la compactación del suelo. El laboreo en bandas en otoño seca y calienta el suelo antes de la siembra en primavera, preparando un lecho de siembra más uniforme y mejorando el contacto suelo-semilla [5].

El objetivo de la pasada de otoño es formar un caballón (Figuras 1 y 2) para que los fenómenos que tienen lugar durante el invierno como las heladas o el viento aireen y desmenucen los agregados creando una granulometría adecuada para la siembra. La pasada de primavera, en cualquier tipo de suelo, consigue calentar la línea que se va a sembrar y crear un adecuado lecho de siembra.





Figura 1. (Izqda.) Caballón formado en otoño, que favorecerá la acción del invierno (Foto: Kuhn).

Figura 2. (Dcha.) Visualización de dos líneas a la salida del invierno. A la izquierda se observa tímidamente la banda realizada únicamente con la pasada de otoño, mientras que a la derecha vemos la línea trabajada dos veces, en la pasada de otoño y en la de primavera (Foto: Kuhn).

Para cultivos de verano como el maíz o el girasol, con siembra en primavera, se deben realizar una o dos pasadas en función del tipo de suelo predominante: ligero o pesado. En el primer caso, con suelos arenosos, se realiza una única pasada entre una semana y un mes antes de la siembra; mientras que, si los suelos son pesados, es decir, con un contenido en arcillas superior al 20 %, se dará una pasada en otoño y otra en primavera, aunque esta segunda siempre es opcional.

Algunos aperos *Strip-till* permiten adaptarles un kit para realizar la fertilización con abono mineral (figura 3) mediante una tolva frontal, así como permite también adaptarlo a una cuba esparcidora de purines (figura 4). El abono localizado nos permite ahorrar en costes de tiempo y combustible ya que lo aportamos en la misma pasada que trabajamos la tierra.





Figura 3. (Izquierda) Imagen de apero Strip-till con el kit de abonado mineral (imagen cedida por Kuhn).

Figura 4. (Derecha) Imagen de apero Strip-till acoplado tras una cisterna de purín para inyectar el abono orgánico en la banda de trabajo del apero (imagen cedida por Kuhn).

2. Materiales y métodos

2.1 Apero de laboreo en bandas

Se llevaron a cabo dos ensayos comparativos en el término municipal de Sariñena (Huesca) con un apero Strip-till con las siguientes características:

- Fabricante: KUHN S.A.

- Marca: KUHN
- Denominación comercial: STRIGER
- Número de cuerpos: 8
- Anchura de trabajo: 6 m
- Separación entre los cuerpos: 0,75 m
- Profundidad de trabajo: 0 – 0,25 m
- Potencia recomendada para del tractor: hasta 16,4- 22,37 kW / 22-30 CV por cuerpo, en función del tipo de suelo y de la profundidad a la que se desea trabajar. Es decir, para el Striger de 8 cuerpos utilizado en los ensayos, necesitaríamos un tractor con una potencia entre 175 y 240 CV.
- Velocidad de trabajo recomendada: 10-12 km/h

En este caso, el Striger es un apero de reja, con cuatro herramientas bien diferenciadas, como se observa en la Figura 5. Este tipo de aperos son polivalentes, es decir, parte de sus herramientas se pueden cambiar por otras similares, pero de distintas características para adaptarse a las condiciones de trabajo.

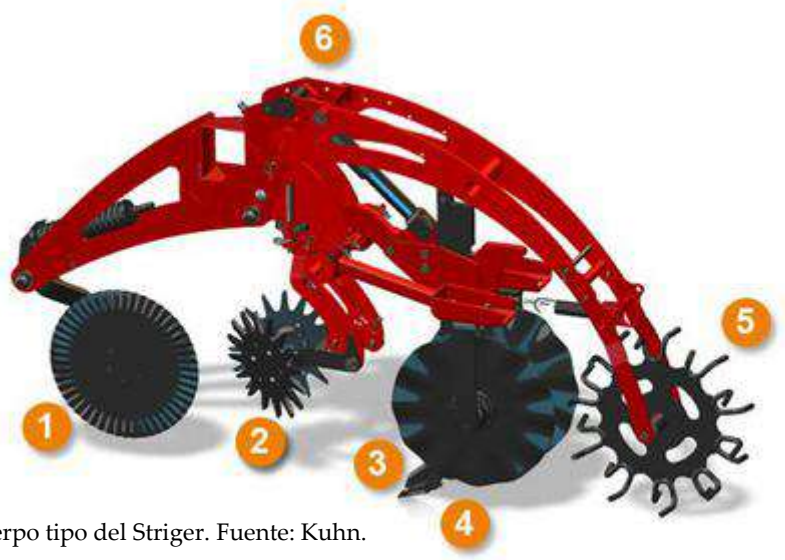


Figura 5. Cuerpo tipo del Striger. Fuente: Kuhn.

2.2 Metodología y descripción de los ensayos

En el primer ensayo llevado a cabo y denominado "Ensayo de única cosecha", se pretendió estudiar si influenciaba o no, el hecho de dar una o dos pasadas con un apero de laboreo en bandas. Para ello la finca "La Colada" se dividió en dos tipos de parcelas de ensayo, y éstas se repartieron por la superficie de la finca para intentar que tanto el tipo de suelo como la situación geográfica dentro de la finca y sus características, no afectaran de forma desigual a los resultados (Figura 6).

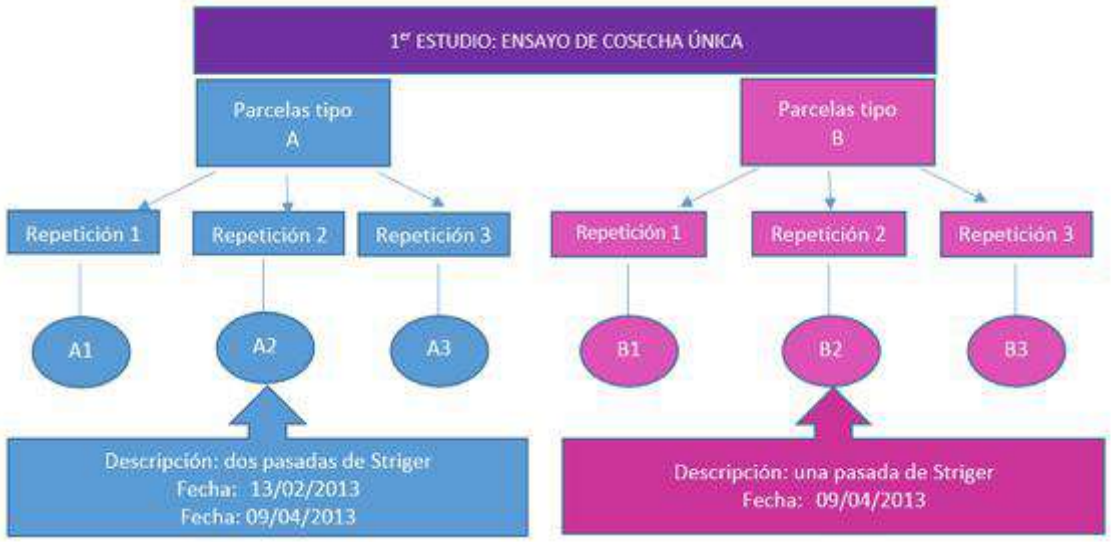


Figura 6. Representación esquemática de la organización del primer ensayo de cosecha única.

Para el segundo ensayo denominado "Ensayo de doble cosecha" se pretendió estudiar el comportamiento del Striger en doble cosecha con y sin abono localizado (Figura 7).

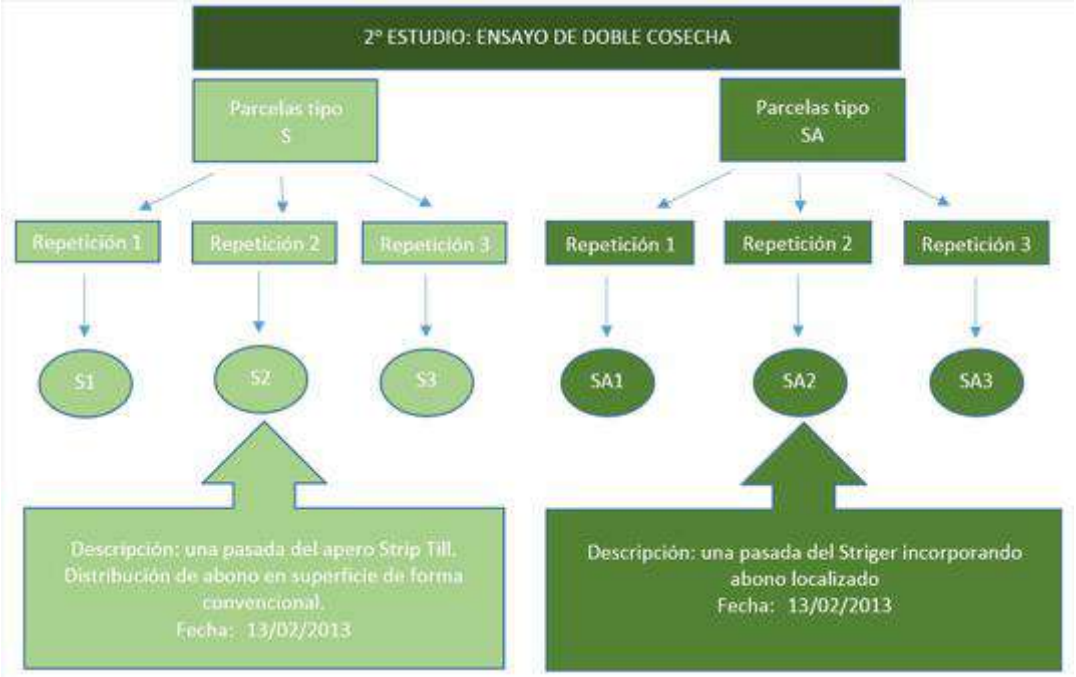


Figura 7. Representación esquemática de la organización del segundo ensayo de doble cosecha.

En el caso de la doble cosecha, no es una práctica extendida por Europa ni tampoco se han hallado demasiados estudios en EE.UU.

Lo que apremia en estos casos, es que en el momento que se cosecha el cereal de invierno, el maíz se tiene que sembrar lo más pronto posible. El terreno al ser pleno verano, no resulta difícil de trabajar. Los agregados que levanta la reja son de menor tamaño que para la siembra en primavera.

3. Resultados y discusión

3.1 Resultados del ensayo de cosecha única

En el ensayo de cosecha única se analizaron los siguientes parámetros: capacidad de trabajo, consumo de combustible, rendimiento seco, contenido de humedad en grano, peso medio de la mazorca, evolución de la nascencia, temperatura del suelo durante la nascencia, compactación del suelo, aparición de plantas adventicias y la viabilidad económica del laboreo en bandas.

Como datos significativos acerca de la técnica podemos observar los datos de consumo de combustible en función de las características de las pasadas. Se realizaron las siguientes secuencias de trabajo en parcela utilizando el tractor JD 8230.

- Tratamiento A (2 pasadas de Striger):
  - Pasada 1: 13/02/2013. Profundidad de trabajo: 20 cm.
  - Pasada 2: 09/04/2013. Profundidad de trabajo: 10 cm. Sobre la pasada 1 realizada el 13 de febrero.
- Tratamiento B (1 pasada de Striger):
  - Pasada 1: 09/04/2013. Profundidad de trabajo: 12 cm. Sobre suelo inalterado.

Las figuras 7 y 8 muestran los datos reales de consumo en parcela en función de las velocidades de avance registradas en los diferentes tratamientos para cada tipo de labor realizada. Los valores de consumo de combustible horario (l/h) y consumo por hectárea (l/ha) variaron en función de la profundidad de trabajo y de la velocidad de avance del tractor. El consumo horario en l/h fue muy variable, desde los 18 l/h para el suelo ya labrado y baja profundidad de trabajo, hasta los 42 l/h para suelo sin labrar y profundidad de 20 cm.

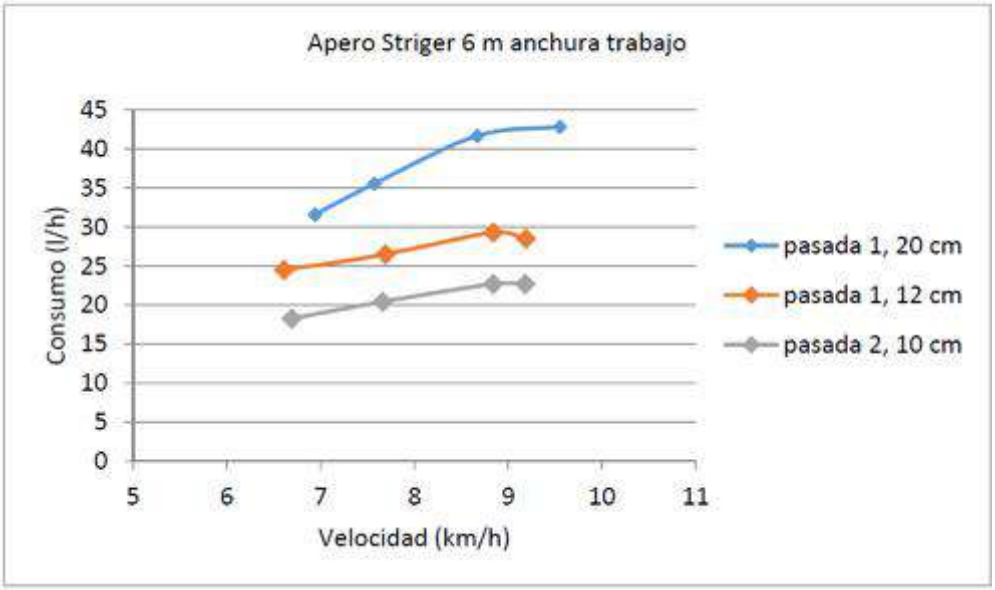


Figura 7. Consumo instantáneo de combustible (l/h) en función de la velocidad de avance.

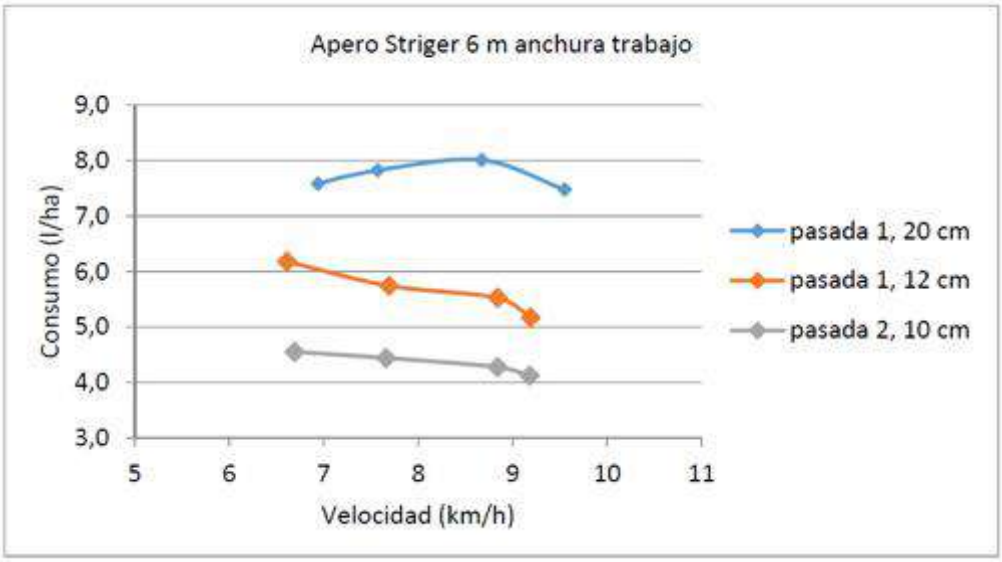


Figura 8. Consumo de combustible (l/ha) en función de la velocidad de avance.

En cuanto al cálculo de costes, en total el coste de la implantación del cultivo con el laboreo convencional calculado de forma teórica sería de 270,23 €/ha mientras que el coste de dos pasadas de laboreo en bandas sería de 87,3 €/ha y el coste una pasada de laboreo en bandas sería de 71,82 €/ha. Es decir, el coste de dos pasadas de laboreo en bandas cuesta un 32,3% del coste del laboreo convencional y una pasada de laboreo en bandas cuestan un 26,57%.

3.2 Resultados del ensayo de doble cosecha

Por su parte, en el ensayo de doble cosecha se analizaron los siguientes parámetros: datos de consumo y capacidades de trabajo, rendimiento seco de las subparcelas, contenido de humedad en grano, peso medio de la mazorca, evolución de la nascencia, temperatura del suelo durante la nascencia, compactación del suelo, plantas adventicias, viabilidad económica del laboreo en bandas para doble cosecha.

El cálculo de costes teórico del laboreo en bandas con y sin abono localizado y de la Siembra Directa se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Coste de la maquinaria en la preparación del suelo como labor previa a la siembra de maíz.

	Siembra Directa	Laboreo en bandas	Laboreo en bandas con abono localizado
Laboreo en bandas	-	13,88	-
Laboreo en bandas con aboo localizado	-	-	21,77
Siembra	50,18	50,18	50,18
Abonado	20,73	20,73	-
Coste superficial (€/ha)	70,91	84,79	71,95

En total, el coste por unidad de superficie para la Siembra Directa sería 77,31 €/ha, para el caso del laboreo en bandas con abonado convencional en superficie de 92,79 €/ha y el coste para el laboreo en bandas con el kit de abono localizado sería de 78,64 €/ha. Es decir, el coste del itinerario técnico preparando el suelo con el apero de laboreo en bandas y con distribución de

abono convencional costaría un 20% más que la Siembra Directa mientras que para el caso de incorporar el abono de forma localizada a la vez que se realiza el laboreo en bandas tiene un coste un 1,7% más que el No laboreo.

4. Conclusiones

4.1. Conclusiones para el ensayo de cosecha única maíz-maíz

- El consumo de combustible cuando se realiza la labor de 2 pasadas de apero de laboreo en bandas se obtienen consumos totales de 11,8 l/ha, de los cuales 7,8 l/ha se deben a la primera pasada (20cm) y la segunda pasada (de 10 cm de profundidad) conlleva un consumo de combustible de 4 l/ha. Para el caso de la siembra tras una sola pasada de Striger, el consumo superficial fue de 5 l/ha, para una profundidad de trabajo de 12 l/ha.
- Los valores de consumo de combustible horario (l/h) del apero Striger variaron en función de la profundidad de trabajo y de la velocidad de avance del tractor. El consumo en l/h fue muy variable, desde los 18 l/h para suelo ya labrado y profundidad de trabajo baja, hasta los 42 l/h para suelo sin labrar y profundidad de 20 cm.
- No se apreciaron diferencias significativas en cuanto al rendimiento obtenido con la realización de 1 ó 2 pasadas con el Striger.
- No se apreciaron diferencias significativas respecto al peso medio de las mazorcas correspondientes a 1 pasada de Striger (tratamiento B) y al peso medio de la mazorca obtenida con el laboreo en franjas con dos pasadas de apero (tratamiento A).
- La temperatura media del suelo no fue superior en las parcelas donde se realizaron dos pasadas de Striger que en las parcelas en las que se dio una sola pasada, como se podría pensar. Uno de los motivos podría ser la no coincidencia espacial de las dos pasadas del apero de laboreo en bandas debido a la ausencia de sistema de guiado GPS, tipo RTK.
- No se apreciaron diferencias significativas en el número total de malas hierbas en función de la fecha de muestreo, ni del tipo de laboreo realizado.
- En cuanto al análisis económico, el laboreo convencional muestra un incremento de costes debido a las labores de cultivo anteriores a la siembra, que el sistema de laboreo en bandas realizando tanto dos pasadas como una. El coste de dos pasadas de laboreo en bandas cuesta un 32,3% del coste del laboreo convencional y una pasada de laboreo en bandas cuestan un 26,57%.

4.2. Conclusiones para el ensayo de doble cosecha cebada-maíz

- No se observaron diferencias significativas entre el rendimiento obtenido con el tratamiento SA (Striger y abonado localizado), y el rendimiento de las subparcelas de Striger con abono convencional (S).
- Sí aparecen diferencias en el el peso de MS producida por cada mazorca si se comparan las parcelas dentro de un mismo ensayo y también comparando parcelas entre los dos ensayos, lo que refleja que sí hubo un efecto de la parcela sobre el peso final de la mazorca, pero no un efecto del tipo de tratamiento sobre el peso de la mazorca (abono localizado o convencional). Es decir, las diferencias podían estar ligadas a las características del suelo.
- En el análisis de la temperatura del suelo se aprecian claramente las oscilaciones de la variación de la temperatura diurna/nocturna, así como se reflejan las dos granizadas que afectaron a la parcela de ensayo.
- No hubo presencia de malas hierbas debido al rastrojo de cebada de la cosecha previa.
- En cuanto a la evaluación de los costes de producción en cada uno de los escenarios, el coste por unidad de superficie para la Siembra Directa sería 77,31 €/ha, para el caso del laboreo en bandas con abonado convencional en superficie de 92,79 €/ha y el coste para el laboreo en bandas con el kit de abono localizado sería de 78,64 €/ha, lo que se traduce en que el laboreo en

bandas con abono convencional cuesta un 20% más que la siembra directa, y el laboreo en bandas con abono localizado tan solo cuesta un 1,7% más que el No Laboreo.

Referencias

1. Lamm, F. R. and R. M. Aiken. 2007. Conventional, strip and no tillage corn production under different irrigation capacities. In: Proc. Central Plains Irrigation Conference, Kearney, NE., Feb. 27-28, 2007. Available from CPIA, 760 N. Thompson, Colby, KS. Pág. 32-47.
2. Luna, J. and Staben, M. 2003. "Using strip tillage in vegetable production systems in Western Oregon". Oregon State University. Extension service. EM 8824
3. Mitchel, J., Shrestha, A., Campbell-Mathews, M., Giacomazzi, D., Goyal, S., Bryant, D., Herrera, I. 2009. "Strip-Tillage in California's Central Valley". University of California. Division of Agriculture and Natural Resources. Publication 8361. ISBN-13: 978-1-60107-621-2.
4. Smith, J. A., and Pearson, C. H. 2004. Tillage practices. "Dry bean production and integrated pest management". 2nd ed. Fort Collins: Colorado State University Cooperative Extension Regional Bulletin 562A.
5. Al-Kaisi, M.M., and Hanna, M. 2008. "Consider the Strip-Tillage Alternative". Iowa State University. PM 1901c. File: Agronomy 8-1.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Análisis del aclareo mecánico de mandarinas durante el desarrollo del fruto a través de los videos de desprendimiento en laboratorio

Angelo Romano[1], Antonio Torregrosa[2], Coral Ortiz[2]

[1] Universidad de Firenza, Italia
[2] Universitat Politècnica de València, Dpto. Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Cno. Vera s/n, 46022 Valencia; cortiz@dmta.upv.es

Resumen: La operación de aclareo consiste en la eliminación de parte de los frutos de un árbol antes del desarrollo con la finalidad de incrementar los calibres de los frutos en recolección. El aclareo mecánico se ha abordado en otros frutales, pero en cítricos se realiza de forma manual en ciertas variedades. Basándonos en resultados de estudios previos, el objetivo del presente trabajo fue estudiar el aclareo mecánico de cítricos a lo largo del desarrollo del fruto. Para ello se usó un equipo de vibrado de ramas en laboratorio y una cámara de alta velocidad para evaluar el desprendimiento de los frutos a lo largo del tiempo. El análisis de las imágenes de la vibración muestra el porcentaje de derribo evoluciona de forma acdente frente al tiempo ajustándose a una curva inversa de X o de tipo sigmoidal. Para poder conseguir un porcentaje de derribo aceptable se podría vibrar 5 segundos cuando los frutos tienen un calibre mayor de 20 mm, un tiempo mayor de 8 s para calibres de 14 mm y más de 10 s para calibres de 8 mm (bajo las considiciones de laboratorio del estudio).

Palabras clave: aclareo, mandarina, desprendimiento, video

1. Introducción

La operación de aclareo es la eliminación de flores o frutos de los árboles antes de la fecha de recolección para mejorar la producción y la calidad de los frutos (Ouma, 2012).

Existen diferentes métodos para aclarar: químicos, manuales y mecánicos. El aclareo manual representa un coste muy elevado [1].

Son muchos los trabajos realizados sobre aclareo químico ([2], [3]). Sin embargo, estos trabajos se ven reducidos por la limitación del uso de algunos productos [4].

El aclareo mecánico ha sido ensayado en melocotones con vibradores de troncos y vibradores electromagnéticos ([5], [6]). Además en algunos frutales de hueso y pomáceas se han estudiado equipos de vibrado para el aclareo mecánico de flores y frutos ([7], [8], [9]). Estos estudios demuestran que el aclareo mecánico reduce tiempo y costes de cultivo.

En cítricos el aclareo de frutos no ha sido muy estudiado. [10] estudiaron el aclareo mecánico en dos variedades de mandarinas ('Clemenrubí' y 'Clemenules') con un peine eléctrico y un vibrador de ramas de gasolina. Se consiguieron porcentajes de derribo entre 31 % y 57 %. [11] realizando ensayos de campo con vibradores de ramas determinaron que el aclareo mecánico necesita más de 30 días para que los frutos de los árboles aclareados puedan tener un tamaño significativamente mayor que los frutos de los árboles no aclareados.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3301

Actualmente en la Comunidad Valenciana, el aclareo manual de mandarinos es una operación habitual en ciertas variedades. Estas operaciones manuales se realizan en repetidas tandas y encarecen los costes de cultivos. Por ello, se ha considerado la necesidad de estudiar el aclareo de mandarinos.

Para conseguir la máxima eficiencia en las prácticas agrícolas, estas deben realizarse en el momento de desarrollo vegetativo adecuado [12]. En el caso del aclareo de mandarinos elegir el momento de desarrollo del fruto adecuado es crucial.

En el presente trabajo se abordó el estudio en laboratorio de vibrado mecánico de ramas de mandarino para aclareo durante el desarrollo fenológico de los frutos de mandarino.

2. Materiales y métodos

2.1. Equipo de vibrado

Se utilizó un equipo de vibrado unidireccional de ramas (Figura 1). El movimiento rotatorio de accionamiento eléctrico es transformado en un movimiento lineal. Un convertidor de frecuencia se utiliza para variar la frecuencia de vibrado. La amplitud se puede fijar en un rango de 0,01 m a 0,180 m, fijando el vástago en los distintos orificios (A). La rama se coloca en una posición vertical hacia abajo sujeta por una abrazadera (B).

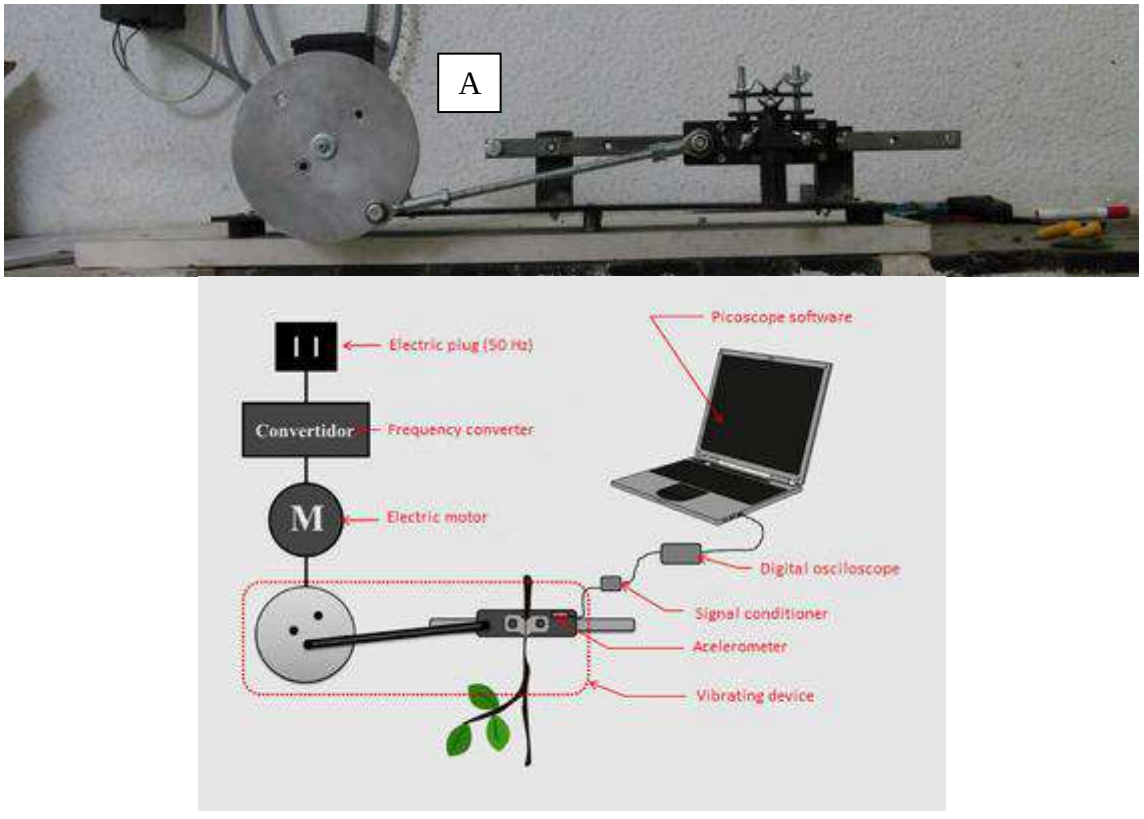


Figura 1. Dispositivo de vibrado de laboratorio.

Una cámara de alta velocidad (300 fotogramas/s) (Casio EXF1, www.exilim.com) se utilizó para grabar el movimiento de la rama y registrar la caída de los frutos.

Las frecuencias reales se midieron con un acelerómetro (Kistler 8763A500) y con las grabaciones de alta velocidad.

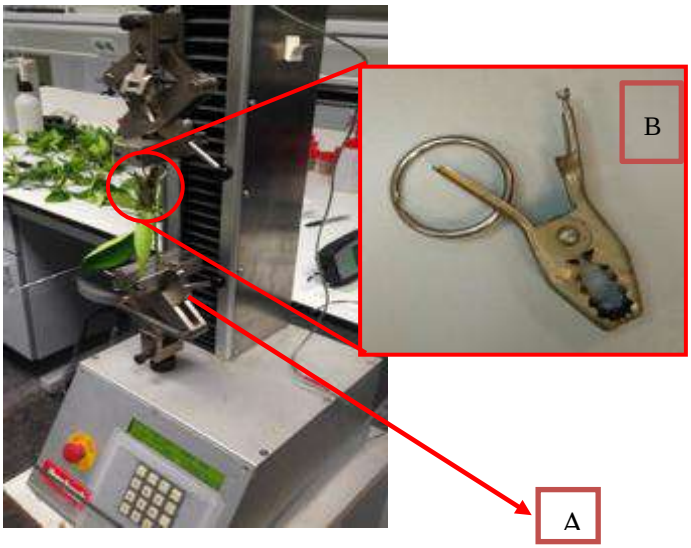


Figura 2. Máquina Universal de Ensayos utilizada en el test de tracción para obtener fuerza de retención.



Figura 3. Dispositivo para el agarre de los rutos verdes en el ensayo de tracción .

Además, se realizó la medida de la fuerza de retención mediante un ensayo de tracción con una máquina universal de ensayos (Ibertest, www.ibertestint.com), figura 2. La rama se colocaba hacia abajo sujeta mediante una agarradera (figura 2A). Como vástago de tracción se utilizó una pinza para los frutos más pequeños (figura 2B) y un cilindro con ranura para los frutos mayores (figura 3). Una muestra de 20 frutos por semana era utilizada para el ensayo de fuerza de retención. El peso y calibre de esta muestra de frutos se medía también y se ampliaba la medida de calibre con 100 frutos más.

2.2. Material vegetal

Para el ensayo definitivo se utilizaron ramas de mandarinos de la variedad 'Clemenrubí' de una plantación situada en el Racó de Gaussa (Sagunto), sobre la que también se realizó un ensayo de aclareo en campo. Durante 7 semanas se seleccionaron cad semana 20 ramas de forma similar con un número de frutos entre 3 y 20.

2.3. Metodología

Basándonos en los resultados de los ensayos preliminares, para el ensayo definitivo se estableció una carrera de 0,03 m. Las frecuencias estudiadas 18,1 Hz y 38,6 Hz.

Siguiendo la metodología empleada previamente por [13], las películas de la caída de los frutos se utilizaron para calcular los tiempos y porcentajes de desprendimiento de los frutos, mediante la ecuación [1].

$$t_{ij} = \frac{(foto_d - foto_0)}{300} \qquad [1]$$

tij= tiempo (s) de la fruta i de la rama j.
photo 0 fotograma cuando empieza el movimiento.
photo d, fotograma cuando se desprende el fruto i.

Para poder determinar el porcentaje de desprendimiento en relación con el tiempo de vibrado, el número acumulado de frutos desprendido respecto del total fue calculado agrupando las ramas vibradas bajo la misma frecuencia (simulando un árbol con todas las ramas con las mismas condiciones), ecuación [2].

$$\%D(t) = \frac{\Sigma frutos\ desprendidos\ (t)}{Número\ total\ de\ frutos} \qquad [2]$$

2.4. Metodología estadística

Se ha evaluado el efecto de la frecuencia y la semana (estado de desarrollo del fruto) en el porcentaje de derribo mediante un análisis de varianza multifactorial. Además, se han estudiado las curvas de ajuste de la evolución del porcentaje de derribo acumulado a lo largo del tiempo, para cada frecuencia de vibrado y semana.

3. Resultados y discusión

3.1. Evolución de los parámetros calibre, masa y fuerza de retención

En un primer paso se estudió la evolución de los parámetros, peso, calibre, fuerza de tracción y porcentaje de desprendimiento (para cada frecuencia) a lo largo de las semans de ensayo, figura 4.

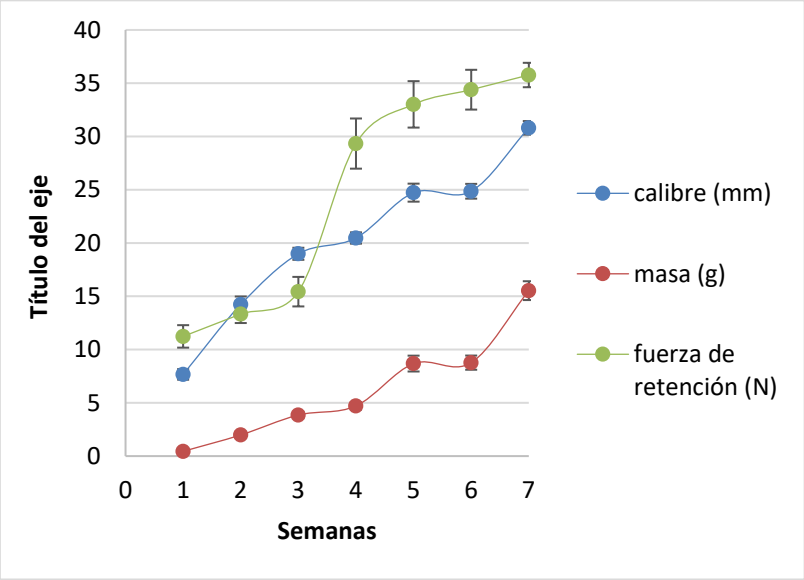


Figura 4. Evolución de la masa, calibre y fuerza de retención a lo largo de las semana (medias y errores típicos).

El análisis de varianza mostró que el factor Semana afecta de forma significativa a los parámetros de calibre, masa y fuerza de retención (tablas 1, 2 y 3).

Tabla 1. Análisis de varianza (suma de cuadrados tipo II) del efecto del factor semana en el calibre de los frutos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	4378,33	5	875,665	100,53	0,0000
Intra grupos	992,988	114	8,71042		
Total (Corr.)	5371,31	119			

Tabla 2. Análisis de varianza (suma de cuadrados tipo II) del efecto del factor semana en la masa de los frutos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1172,58	5	234,516	55,69	0,0000
Intra grupos	480,047	114	4,21094		
Total (Corr.)	1652,63	119			

Tabla 3. Análisis de varianza (suma de cuadrados tipo II) del efecto del factor semana en la fuerza de retención de los frutos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	7669,93	5	1533,99	26,26	0,0000
Intra grupos	6659,94	114	58,4205		
Total (Corr.)	14329,9	119			

Sin embargo, aunque se observa una evolución creciente de los parámetros a lo largo de las semanas, el test de rangos múltiples de Duncan mostró que no existían diferencias en calibre, peso y fuerza de retención entre algunas semanas contiguas (tablas 4, 5 y 6). Las semanas 3 y 4 y las semanas 5 y 6 presentaban valores de calibre y masa similares. En el caso de la fuerza de retención, parece haber un cambio entre las semanas 1, 2 y 3 y las semanas 4, 5, 6 y 7. Observando la evolución de la fuerza de retención (figura 4) se observa una tendencia creciente. Los datos de fuerza de retención registrados las semanas 3 y 6 presentan valores menores que la tendencia creciente de la curva. Esto puede ser un error causado por tomar la medida al finalizar el ensayo de desprendimiento con el vibrador de laboratorio.

Pruebas de Múltiple Rangos para calibre (mm) por 2018 semana

Tabla 4. Prueba de rangos múltiples de Duncan del efecto de la semana en el calibre de los frutos.

Semana	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1	20	7,669	X
2	20	14,2285	X
3	20	18,9905	X
4	20	20,472	X
5	20	24,7285	X
6	20	24,859	X
7	20	30,81	X

Tabla 5. Prueba de rangos múltiples de Duncan del efecto de la semana en la masa de los frutos.

Semana	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1	20	0,4464	X
2	20	1,98395	X
3	20	3,85565	X
4	20	4,71145	X
5	20	8,68445	X
6	20	8,77195	X
7	20	15,5299	X

Tabla 6. Prueba de rangos múltiples de Duncan del efecto de la semana en la fuerza de retención de los frutos.

Semana	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1	20	11,235	X
3	20	15,435	XX
2	20	16,01	X
6	20	25,71	X
4	20	29,335	XX
5	20	33,015	XX
7	20	35,77	X

Además, se evaluó la evolución del parámetro fuerza de retención entre masa, figura 5.

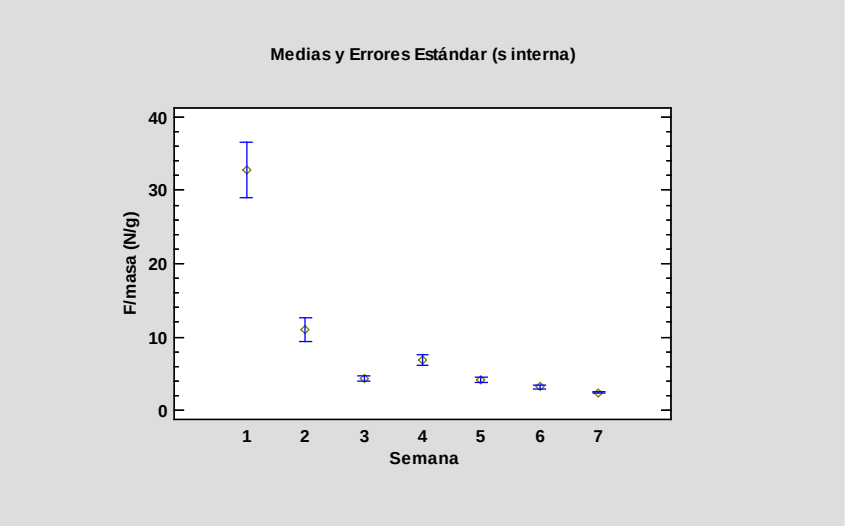


Figura 5. Evolución del ratio fuerza de retención entre masa (N/g) a lo largo de las semanas

Para evaluar el desarrollo de los frutos a lo largo de las semanas de ensayo se utilizaron las curvas de crecimiento de los frutos de las campañas 2017 y 2018 (ecuaciones [1] y [2]) que se han obtenido en los trabajos paralelos de campo sobre aclareo.

Para el año 2017: calibre = 30,0 + 0,336 x día [1]

Para el año 2018: calibre = 25,7 + 0,307 x día [2]

Estas curvas para los frutos en estado fenológico 72 (según la escala BBCH de [14]) y los resultados de los test de rangos múltiples de Duncan de calibre y masa confirmaron que las muestras analizadas cada semana no siempre correspondían con estados de desarrollo con la misma pauta de evolución.

Por ello se procedió a corregir las semanas por estadios relacionados con el nivel de desarrollo de los frutos. El estadio 1 corresponde con la semana 1, el estadio 2 con la 2, el estadio 3 con las semanas 3 y 4, el estadio 4 con las semanas 5 y 6, y el estadio 5 con la semana 7. En la tabla 7 y figura 6 se presenta el test de Duncan de diferencias significativas entre los calibres de los 5 estadios y los valores medios de calibre correspondientes a cada estadio.

Tabla 7. Prueba de rangos múltiples de Duncan del efecto del estadio en el calibre de los frutos.

Estadio	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1	20	7,669	X
2	20	14,2285	X
3	40	19,7313	X
4	40	24,7937	X
5	20	30,81	X

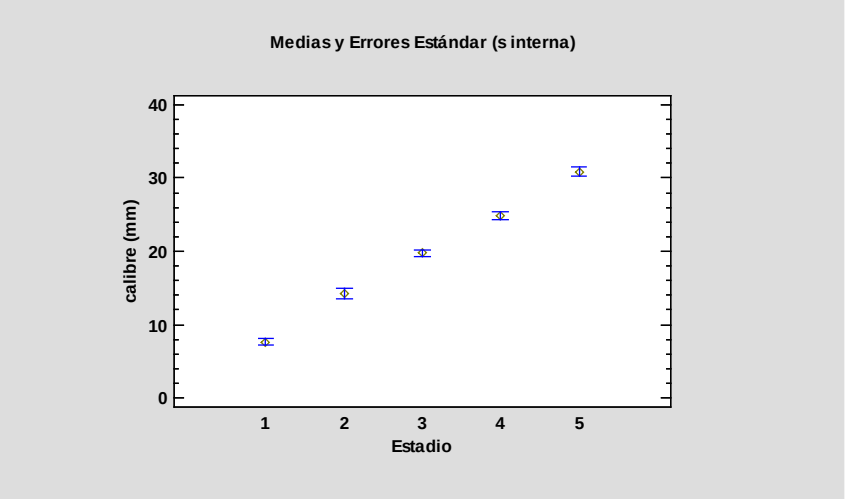


Figura 6. Evolución del calibre (mm) según los estadios.

Con esta corrección la evolución del ratio fuerza de retención entre masa presenta un rápido descenso en los estadios 1, 2 y 3 mientras que los estadios 3, 4 y 5 se mantienen similares, figura 6 y tabla 8.

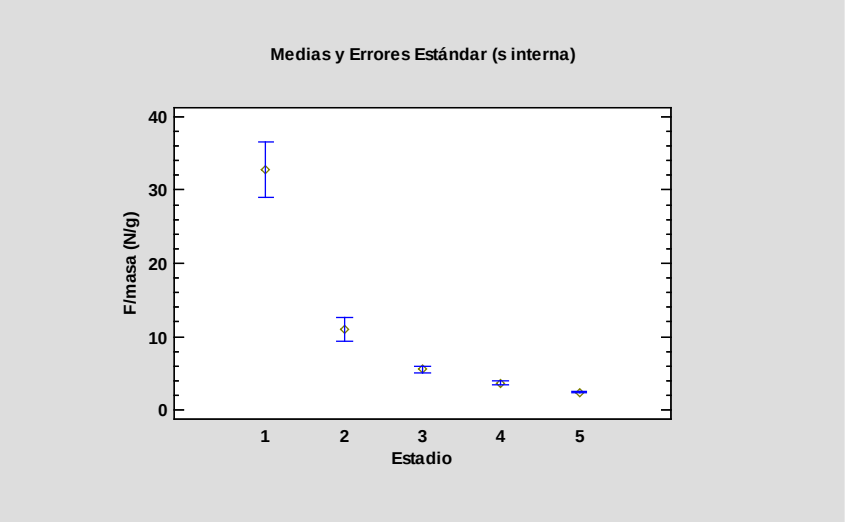


Figura 7. Evolución del ratio fuerza de retención entre masa (N/g) según los estadios.

Tabla 8. Prueba de rangos múltiples de Duncan del efecto del estadio en el ratio fuerza de retención entre masa (N/g).

Estadio	Casos	Media	Grupos Homogéneos
5	20	2,398	X
4	40	3,703	X
3	40	5,5495	X
2	20	10,9855	X
1	20	32,8215	X

3.2. Evolución del porcentaje de derribo

En un segundo paso se estudió el efecto de los factores frecuencia y semana en el porcentaje de derribo, tabla 9. Ambos factores afectan de forma significativa en el porcentaje de derribo. Las ramas vibradas con la frecuencia mayor (38 Hz) registraron un porcentaje de derribo significativamente mayor que las vibradas con la frecuencia menor (18 Hz), figura 8. En el caso de la frecuencia menor el porcentaje de derribo medio se encontró por debajo de los niveles aceptables para un correcto aclareo, en torno al 10 %, después de vibrar 10 segundos.

Tabla 9. Análisis de varianza (suma de cuadrados tipo II) del efecto de los factores frecuencia (38 Hz y 18 Hz) y semana (de 1 a 7) en el porcentaje de derribo final de cada rama.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Semana	9798,8	6	1633,13	4,48	0,0006
B:Frecuencia (ud)	47553,2	1	47553,2	130,37	0,0000
INTERACCIONES					
AB	7663,16	6	1277,19	3,50	0,0041
RESIDUOS	27721,2	76	364,752		
TOTAL (CORREGIDO)	93993,1	89			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

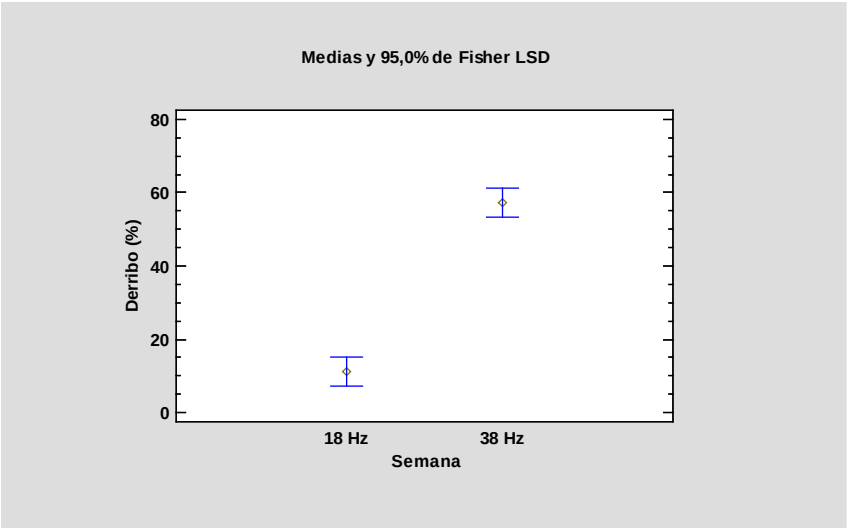


Figura 8. Porcentaje de derribo de los frutos según la frecuencia.

Si se compara la evolución del porcentaje de derribo para la frecuencia mayor (38 Hz) frente a la evolución del ratio fuerza de retención entre masa se observa que el descenso en el ratio

fuerza de retención entre masa se corresponde con una ascenso del porcentaje de derribo, figura 9. Esto sucede hasta el estadio 5 (calibre de 30,8 mm) correspondiente con un importante incremento de la masa, que pasa de 8,7 g de media a 15,5 g de media.

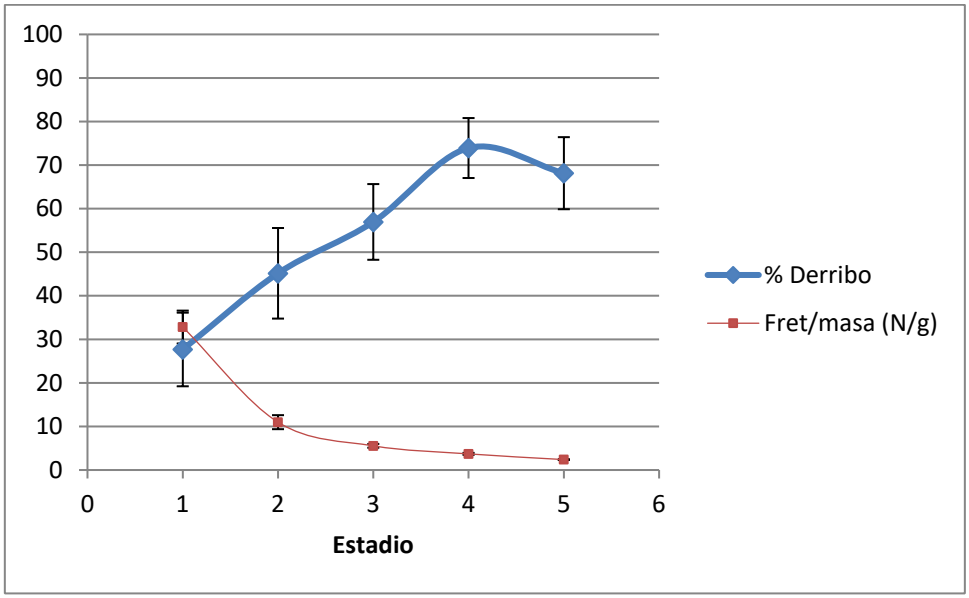


Figura 9. Porcentaje de derribo de los frutos y ratio fuerza de retención entre masa según el estadio (medias y errores típicos).

Posteriormente, se establecieron, a través de las películas de alta velocidad, los tiempos de derribo de los distintos frutos de cada rama y se calcularon los porcentajes de derribo acumulados por cada rama separada frente al tiempo en segundos, para la frecuencia de 38 Hz, figura 10.

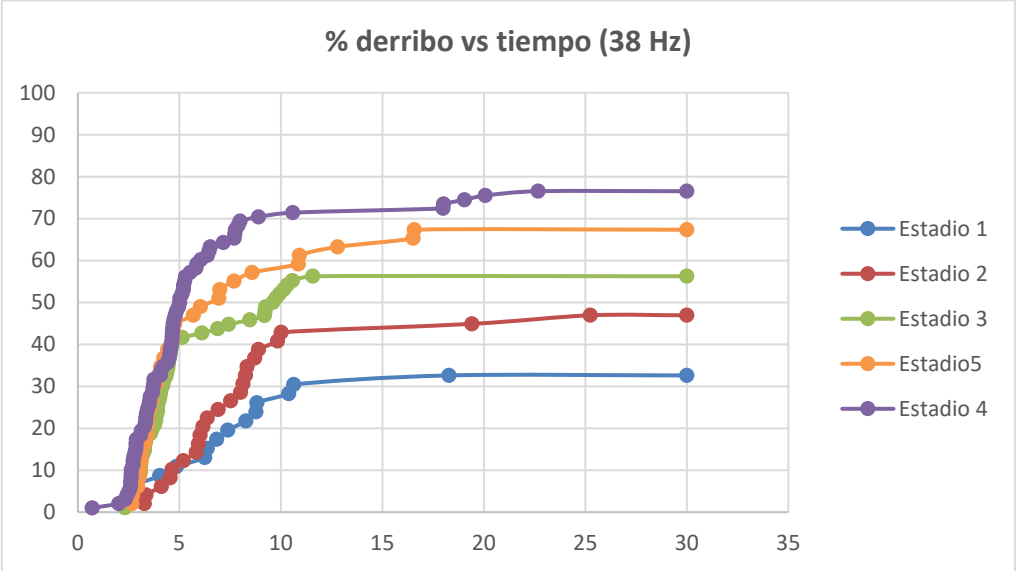


Figura 10. Curvas de evolución del porcentaje de derribo acumulado para los distintos estadios.

Se confirma un porcentaje de derribo creciente según el estadio, a excepción del estadio 5, como ya se había comprobado. Además, se observa un incremento de la pendiente de la curva de derribo según avanza el estadio.

Las curvas de derribo frente al tiempo se ajustan a una curva inversa de X o de tipo S, con un R2 medio de 84,2% en el caso de la curva en S y 92,3 % en el caso de la curva inversa.

Para poder conseguir un porcentaje de derribo aceptable (en torno a 30 %) se podría vibrar 5 segundos si los frutos tienen un calibre mayor de 20 mm. Sin embargo, si los frutos son menores, el tiempo de vibrado debería ser mayor de 8 s para diámetros de 14 mm y más de 10 s para calibres de 8 mm.

Si consideramos la pendiente en el primer tramo de las curvas vemos como se incrementa según avanza el estadio, tabla 10.

Tabla 10. Valores de la pendiente de la recta de ajuste y el R^2 para cada estadio.

Estadio	Pendiente primer tramo recto	R2 ajuste recta
1	2,98	96,54
2	5,93	96,85
3	12,59	88,34
4	14,72	94,19
5	20,40	97,12

4. Conclusiones

Se confirma una evolución ascendente de los valores de calibre, masa y fuerza de retención según evolucionan las semanas de desarrollo del fruto. Sin embargo, se ha comprobado como la selección de las muestras en semanas consecutivas no se correspondía siempre con estados fenológicos diferentes, pues el calibre y la masa no presentaban diferencias significativas.

Considerando los estadios de desarrollo del fruto, el ratio fuerza de retención del fruto entre masa disminuye en los estadios 1, 2 y 3, manteniéndose con valores similares en los estadios 3, 4 y 5.

Tanto el factor semana, como la frecuencia afectan significativamente al porcentaje de derribo total de los frutos. Las ramas vibradas con una frecuencia de 38 Hz presentan porcentajes de derribo significativamente mayores que con la frecuencia de 18 Hz. Con la frecuencia de 18 Hz el porcentaje de derribo de los frutos se considera insuficiente (un valor medio en torno a 10 % con 10 segundos de vibrado).

Al evolucionar el desarrollo del fruto (estadio) el porcentaje de derribo se incrementa. Este hecho cambia en el estadio 5, cuando el porcentaje de derribo, con la frecuencia de 38 Hz, parece cambiar su tendencia ascendente. Esto puede ser debido al incremento considerable de la masa del fruto (pasa de un valor medio de 8,7 g a 15,5 g).

Las curvas de porcentaje de derribo frente al tiempo confirman el porcentaje de derribo ascendente segúna avanza el estadio, a excepción del estadio 5.

Las curvas de derrribo frente al tiempo se ajustan a una curva inversa de X o de tipo S.

La pendiente de la recta del tramo inicial de las curvas de derribo frente a tiempo suben según el estadio.

Para poder derrribar los frutos mediante aclareo mecánico, con la carrera estudiada (30 mm), sería conveniente utilizar la frecuencia de 38 Hz y no la de 18 Hz.

Los resultados de las curvas de derribo frente al tiempo parecen indicar una relación entre el tiempo de vibrado y el derribo, para cada estadio.

Para poder conseguir un porcentaje de derribo aceptable (en torno a 30 %) se podría vibrar 5 segundos si los frutos tienen un calibre mayor de 20 mm (bajo las condiciones de laboratorio del estudio). Sin embargo, si los frutos están en un nivel de desarrollo menor, el tiempo de vibrado debería ser mayor de 8 s para calibres de 14 mm y más de 10 s para calibres de 8 mm (bajo las considiciones de laboratorio del estudio).

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) y fondos FEDER (Proyecto RTA2014-00025-C05-02).

Referencias

1. Stander, O.P.J and Cronjé P.J.R. Reviewing the Commercial Potential of Hand Thinning in Citrus with a Cost-benefit Analysis of Summer Hand Thinning of 'Nadorcott' Mandarin. HortTechnology. 2016, 26(2), 206-212.
2. Mesejo C., Rosito S., Reig C., Martinez-Fuentes A., Agustí, M. Journal of Plant Growth Regulation. 2012, 31: 186-194.
3. DOI: 10.1007/s00344-011-9230-z
4. Gonzatto M.P., Böettcher G.N., Schneider L.A., Silveira J.C., Petry H.B., Pedroso de Oliveira R., Schwarz S.F. 3,5,6-trichloro-2-pyridinyloxyacetic acid as effective thinning agent for fruit of 'Montenegrina' mandarin. Ciência Rural, Santa Maria. 2016, 46(12), 2078-2083.
5. DOI: 10.1590/0103-8478cr20140057
6. Ouma, G. Fruit thinning with specific reference to citrus species: A review. Agriculture and Biology Journal of North America. 2012, 3(4): 175-191
7. Powell, A.A., Hancock, B.G., Puls, E.E., Helmers Jr., S.G., Brown Jr., M.H. Utilizing
8. mechanical fruit thinning in commercial peach orchards. HortScience. 1975, 10 (2),
9. 142.
10. Rosa, U.A., Thompson, J.F., Slaughter, D., DeJong, T., Shackel, K., Tiamzon, J., Johnson,
11. S. Feasibility study of using electromagnetic shaker technology for peach
12. thinning. In: Proc. Int. Conf. AgEng2004, Leuven, Belgium. 2004, 12–16 September, pp.
13. 1116–1117
14. Schupp J.R., Baugher, T.A., Miller, S.S., Harsh, R.M., lesser, K.M. Mechanical Thinning of Peach and Apple Trees Reduces Labor Input and Increases Fruit Size. HortTechnology. 2008, 18 (4), 660-670.
15. Miller, S.S., Schupp, J.R., Baugher T.A., Wolford S.D. Performance of Mechanical Thinners for Bloom or Green Fruit Thinning in Peaches. HortScience. 2011, 46(1), 43-51.
16. Seehuber C., Damerow L. and Blanke M.M. Concepts of selective mechanical thinning in fruit tree crops. Acta Horticulturae. 2013, 998: 77-83
17. DOI: 10.17660/ActaHortic.2013.998.8
18. Ortiz, C., Martín-Gorriz, B., Ortí, E. And Torregrosa, A. An approach to mechanical thinning of mandarins.ASABE Annual International. 2016. Meeting162457303.
19. DOI:10.13031/aim.20162457303
20. Torregrosa, A., Orti, E., Soria, E., Balasch, S., Ortiz, C. Size Development of 'Clemenrubi' Mandarin Fruit After Manual And Mechanical Thinning. Eur AgEng Conference, Wageningen (Holanda). 2018, 8-11 de junio
21. Albrigo L.G., Valiente J.I., Beck H.W. Flowering expert system development for a phenology based citrus decision support system. SHS Acta Horticulturae. 2001, 584: VI International Symposium on Computer Modelling in Fruit Research and Orchard Management
22. Ortiz C., Torregrosa T. Determining adequate vibration frequency, amplitude, and time for mechanical harvesting of fresh mandarins. Transactions of the ASABE. 2013, 56(1), 15-22
23. DOI: 10.13031/2013.42581
24. Agustí M., Zaragoza S., Bleiholder H., Buhr l., Hack H., Klose R., Staus R. Adaptation of the BBCH scale for the description of Citrus fruits' phenological stages. Fruit. 1997, 52(5): 287-295

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Análisis del sistema implantado en España para el control de equipos de aplicación de productos fitosanitarios: entidades inspectoras, control de la calidad de la inspección y gestión de datos

A. Jiménez[1], M. Vidal[1], A. Boné[1], F.J. García Ramos[1]

[1] Escuela Politécnica Superior, Ctra. Cuarte s/n, 22071 Huesca; angelji@unizar.es; vidalcor@unizar.es; anbone@unizar.es; fjavier@unizar.es

Resumen: El Real Decreto 1702/2011, de 18 de noviembre, de inspecciones periódicas de los equipos de aplicación de productos fitosanitarios, establece que las CCAA son las encargadas del "control y aplicación del programa de inspecciones que se lleven a cabo en su ámbito territorial", para dar cumplimiento a la obligación que la Directiva 2009/128/CE de uso sostenible de plaguicidas impuso a todos los países miembros de la UE. Para poder llevar a cabo dicha encomienda la mayoría de las CCAA (trece) promulgaron decretos u órdenes autonómicos, donde se regula lo relativo al establecimiento y funcionamiento del sistema necesario para poder realizar la inspección periódica de los equipos de aplicación de fitosanitarios (EAF), desde el proceso de autorización de las entidades inspectoras (ITEAF) hasta los mecanismos de control de la calidad de la propia actividad inspectora y de los procesos relativos a la gestión de los resultados de las inspecciones realizadas en su ámbito territorial. El resto de las autonomías, cuyo número de equipos a inspeccionar es muy reducido, decidieron que fuesen los servicios del Departamento competente los que se encargaran de realizar la inspección de las máquinas y las instalaciones. En este artículo se analiza la configuración actual del sistema completo, en el que están implicadas las ITEAF autorizadas, los Órganos Competentes de las CCAA y la Dirección General de Medios de Producción del MAPA. Se describe el modelo establecido y las herramientas con las que se ha dotado a los agentes implicados. Asimismo, se determinan las fortalezas y debilidades del sistema de gestión, una vez que se encuentra en la fase final del proceso de implantación del Plan Nacional de inspección obligatoria de todos los equipos de aplicación de productos fitosanitarios, independientemente de que la aplicación se realice con equipos móviles o aeronaves a cultivos en campo abierto, con equipos fijos y semimóviles en el interior de instalaciones para cultivos bajo cubierta o mediante equipos fijos.

Palabras clave: pulverizador, ITEAF, plaguicida, manual de inspección, APPRITEAF.

1. Introducción

La Ley de sanidad vegetal, 43/2002, de 20 de noviembre, y la Directiva 2009/128/CE, de 21 de octubre, del Parlamento Europeo y del Consejo, por la que se establece un uso sostenible de los plaguicidas, determinan los requisitos aplicables al uso de los plaguicidas y de los medios técnicos que se emplean para su aplicación.

Uno de los aspectos que integran el Plan Nacional es la puesta en marcha de la inspección técnica obligatoria de los equipos de aplicación, con el objetivo de contribuir a la protección

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3330

medioambiental y a la seguridad de los aplicadores, y por ello, el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) publicó el Real Decreto 1702/2011, de 18 de noviembre, sobre las inspecciones obligatorias de los equipos de aplicación de productos fitosanitarios.

El artículo 5.1 obliga a que todos los EAF estén inscritos, en el ROMA o los Censos auxiliares habilitados, y en el artículo 5.2 indica que se deben establecer los programas de inspección para que todos los equipos en uso estén inspeccionados, al menos una vez, antes del 26 de noviembre de 2016 (los equipos nuevos no están obligados hasta que no cumplan cinco años), tal y como impone la Directiva 2009/128/CE.

En la tabla 1 se muestra la situación actual de los equipos inspeccionados, clasificados por tipologías, y los equipos que, estando censados, no han sido inspeccionados ninguna vez. No están recogidos los equipos no censados, ni los equipos que se han censado como nuevos y todavía están dentro de sus primeros cinco años, y por lo tanto no tienen obligación de ser inspeccionados. Tampoco se reflejan las máquinas censadas y que se corresponden con tipologías exentas de inspección (mochilas y carretillas manuales).

Tabla 1. Situación a 10/05/2019 del censo de equipos a inspeccionar. Fuente: REGITEAF (MAPA)

Comunidad Autónoma	Agrícola	No agrícola	Invernaderos	I. permanentes	Aeronaves	Total	No inspeccionados
Andalucia	73.501	222	8.650	1	38	82.412	35.858
Aragón	15.975	32	0	5	0	16.012	5.165
Canarias	915	80	3.611	0	0	4.606	2.969
Cantabria	144	5	0	0	0	149	79
Castilla-La Mancha	36.474	79	13	138	0	36.704	12.514
Castilla y León	30.897	80	1	3	0	30.981	13.756
Cataluña	21.716	224	2	1	5	21.948	5.618
Comunidad de Madrid	1.651	293	0	0	0	1.944	883
Comunidad Foral de Navarra	4.653	1	0	12	0	4.666	1.392
Comunidad Valenciana	21.518	224	5	850	0	22.597	8.305
Extremadura	13.268	5	8	0	0	13.281	5.513
Galicia	14.793	15	0	0	1	14.809	7.011
Islas Baleares	993	2	0	0	0	995	530
La Rioja	7.924	1	0	0	0	7.925	2.188
País Vasco	3.077	16	0	0	0	3.093	1.283
Principado de Asturias	622	19	0	0	0	641	296
Región de Murcia	9.890	102	32	1	2	10.027	3.689
TOTAL	258.011	1.400	12.322	1.011	46	272.790	107.049

OBSERVACIONES: "NO INSPECCIONADOS", con este concepto englobamos los equipos inscritos en el Registro Oficial de Maquinaria Agrícola (ROMA), que estando dados de alta en el mismo, no se han inspeccionado en los últimos cinco años.

El mencionado Real Decreto establece también que el sistema de inspección de los equipos de aplicación de productos fitosanitarios (EAF), estará estructurado en tres niveles, tal y como se muestra en la figura 1. Las Entidades Inspectoras (ITEAF), integradas por una o varias Unidades Inspectoras, son las encargadas de realizar las inspecciones, previa autorización del Órgano Competente correspondiente a la Comunidad Autónoma donde tenga su domicilio social. Los órganos competentes serán los encargados de recoger y auditar las inspecciones realizadas a las máquinas anotadas en su registro oficial de maquinaria agrícola y en sus censos auxiliares. Estos órganos serán los encargados de transmitir a la base estatal de inspecciones (REGITEAF), gestionada por el MAPA.

Este proceso se implementó con modelos diferentes y a ritmos desiguales en las diferentes Comunidades Autónomas, como consecuencia de las diferencias en cuanto a las tipologías de EAFs censadas y a las diferentes interpretaciones del RD 1702/2011.

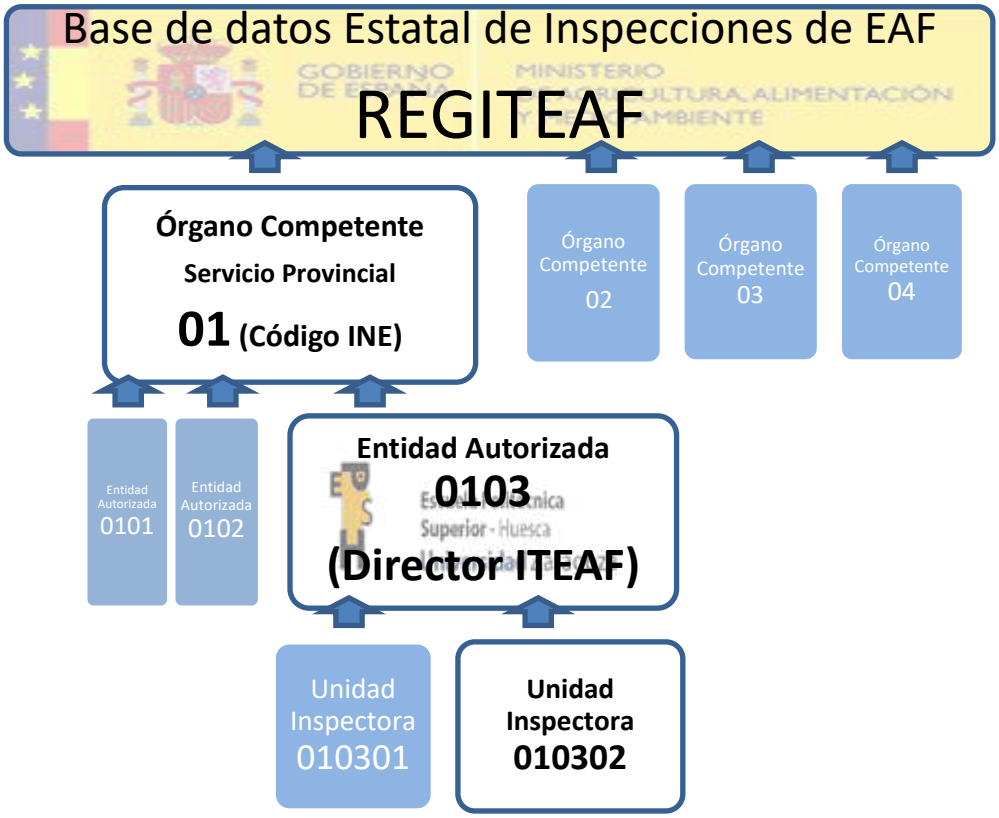


Figura 1. Estructura de la inspección de EAF en España. (Elaboración propia)

2. Gestión de la Inspección de equipos de aplicación de productos fitosanitarios en España

En el mencionado Real Decreto de inspecciones periódicas de los equipos de aplicación de productos fitosanitarios se detallan los requisitos exigibles a las entidades que tienen acceso a la autorización administrativa para poder realizar las inspecciones y adquirir la condición de ITEAF, así como el equipamiento y cualificación mínimos con que deberá desarrollar su actividad.

Un aspecto diferenciador, con los sistemas establecidos en otros países de la Unión Europea, es la restricción, establecida en el artículo 7, respecto a la titularidad de las ITEAF, puesto que las empresas dedicadas a la fabricación o reparación de EAF no podrán ser titulares ni tener participación en ellas, a no ser que el órgano competente lo considere imprescindible, para garantizar el servicio. Esto ha supuesto que, hasta el momento, los concesionarios y talleres

dedicados a la venta y reparación de equipos no han sido autorizados y las que están operando se han establecido a título personal o asociado, como secciones de empresas existentes dedicadas a prestar servicios al sector agrario o venta de materias primas, cooperativas y organizaciones de productores agrarios, centros tecnológicos públicos y privados. En Cantabria, Islas Baleares y Bizkaia, dado que el número de equipos censados es muy bajo, el servicio se presta desde la propia administración.

En cualquier caso, el RD dispone que serán los Órganos Competentes de cada comunidad autónoma los responsables de conceder la pertinente autorización, así como de realizar el control de la actividad que realicen las ITEAFs dentro de su demarcación territorial. Para poder realizar esa labor, doce de las diecisiete administraciones autonómicas y la administración Foral de Bizkaia, han recurrido a Órdenes autonómicas y Foral o Decretos autonómicos, donde se regulan las condiciones en las que se deben prestar las inspecciones periódicas de los EAF, en sus respectivos territorios. Tan solo Cantabria, Islas Baleares, Islas Canarias, Comunidad de Madrid y los Administraciones Forales de Álava y Guipúzcoa, no han considerado necesario el promulgar una regulación específica, por lo que se rigen por lo dispuesto en el RD 1702/2011.

Con todo ello, desde que, a finales de 2012, se registrara la primera autorización administrativa, se han ido concediendo autorizaciones y alguna baja. A 10 de mayo de 2019, permanecen autorizadas un total de 163 ITEAFs, y su distribución por comunidades autónomas se muestra en la figura 2.

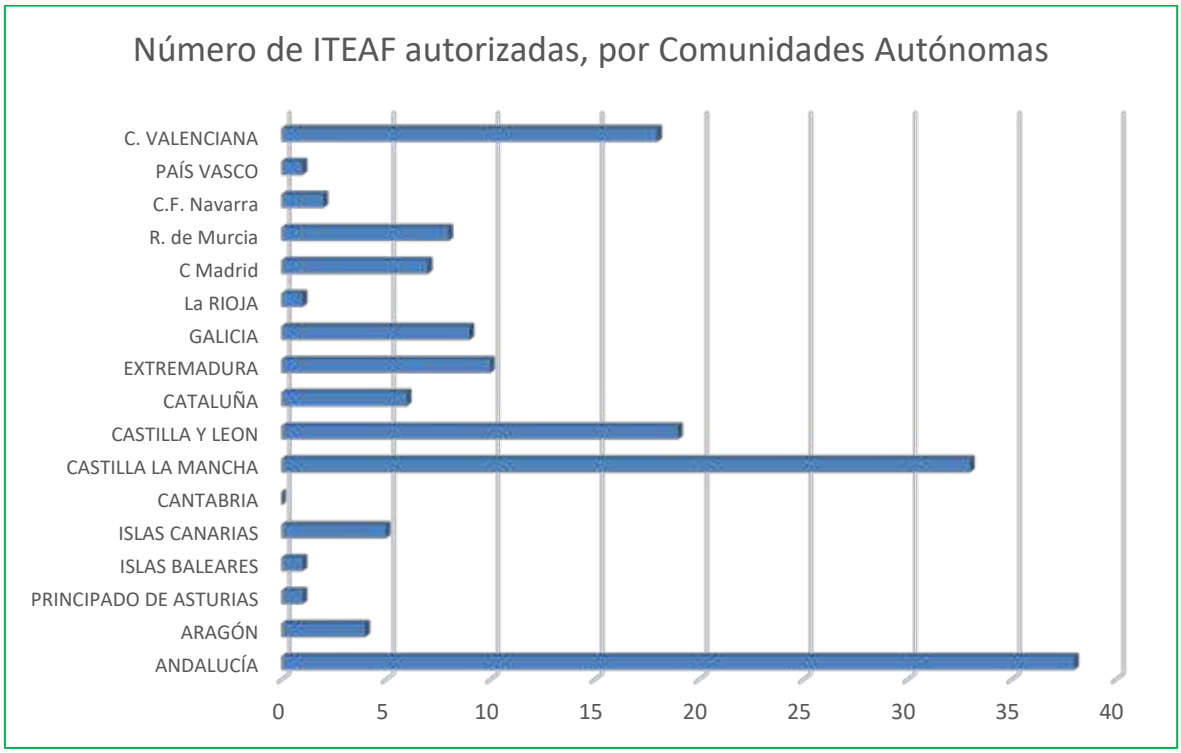


Figura 2. Número de ITEAF autorizadas por comunidad autónoma (Elaboración propia a partir de datos del MAPA a 10/05/2019).

Hay que aclarar que la autorización de una ITEAF, si bien la concede el órgano competente de una comunidad autónoma para trabajar dentro de su territorio, tiene validez en el resto del Estado español, si bien necesita comunicar la intención de trabajar en otra demarcación y deberá cumplir lo que la regulación e instrucciones locales exijan, en aquellas autonomías que tengan regulación propia. Por esta razón el número de ITEAFs a disposición de los titulares puede ser superior a los que aparecen en la figura 2.

3. Gestión de los resultados de las inspecciones

En el artículo 12 del RD 1702/2011, se especifica la documentación que las estaciones ITEAF deberán emitir y su contenido mínimo. También se indica que el Director de la ITEAF deberá remitir, al órgano competente de la comunidad autónoma donde esté inspeccionando, un documento informático con los resultados de las inspecciones. El formato y contenido de esos ficheros ha sido acorado entre el MAPA y las CCAA y está concretado en una instrucción, con el fin de que la información recibida en los órganos competentes esté normalizada y pueda ser revisada y cargada en el repositorio estatal REGITEAF, tal y como se ha representado en la figura 1, con el fin de que dicha base de datos sea el lugar donde todas las administraciones del estado puedan consultar la información referente a los equipos de aplicación de fitosanitarios registrados.

Desde el establecimiento del sistema de inscripción e inspección obligatorias de los EAF en España, fue implantado un modelo consistente en la publicación de manuales de inspección y una herramienta informática que desarrolló protocolos de inspección por tipologías de máquinas de aplicación. Esta importante labor, promovida en el seno del Grupo de Trabajo de Técnicas y Equipos de Aplicación de Fitosanitarios, dependiente de la Subdirección General de Medios de Producción Agrícolas y Oficina Española de Variedades Vegetales. Los manuales, que facilitan la interpretación de las normas de inspección y facilitan la ejecución de la misma, han sido elaborados por Departamentos de las Escuelas de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Cataluña, la Universidad de Córdoba, la Universidad Politécnica de Valencia, la Universidad de Castilla La Mancha y la Universidad de León. La aplicación informática empleada para la toma de datos, la expedición de la documentación de las inspecciones y la elaboración y transmisión de los ficheros normalizados desde las ITEAF a los órganos competentes fue desarrollada y mantenida por el Laboratorio de Maquinaria Agrícola de la Escuela Politécnica Superior de Huesca (Universidad de Zaragoza), quien, con el apoyo económico del MAPA, ha puesto a disposición de las entidades inspectoras y los órganos competentes las aplicaciones PRITEAF y APPRITEAF, facilitando el trabajo y contribuyendo a la uniformización de los procesos de toma de datos y gestión de los resultados de las inspecciones.

A pesar de que el sistema de gestión que hemos descrito es único en Europa y ha estado coordinado por el MAPA y su Laboratorio Nacional de Referencia, tiene una cadena de trasmisión de la información que podríamos denominar “manual”, de tal forma que el registro de una inspección en REGITEAF depende de que el Inspector de la unidad inspectora trasmita el resultado de cada inspección realizada al Director de su ITEAF, quien, después de revisarla, lo comunica al Órgano Competente, para que el funcionario al cargo de esa labor, cargue en la base de datos estatal los registros. Este proceso es notoriamente mejorable, con el fin de reducir el trabajo que supone y, sobre todo, evitar que la información pueda perderse en el camino. Para el aseguramiento de la calidad del proceso se hace necesaria una estructura de control en cada órgano competente.

4. Control de la actividad inspectora

Tal y como se expresa en el Artículo 6.1 del RD 1702/2011, son las comunidades autónomas las encargadas de definir y proponer el programa de inspecciones para su territorio. En las CCAA que no prestan directamente el servicio, dicho programa incluye las labores del control de las entidades inspectoras autorizadas para inspeccionar en su territorio.

Para llevar a cabo esta encomienda, en España, nos podemos encontrar con dos modelos:

a) Personal propio de la administración (funcionarios y/o contratados).
b) Externalización parcial, mediante la contratación de un Departamento universitario o un Centro tecnológico, que proporcione la asistencia técnica al personal funcionario del órgano competente.

El aseguramiento de la calidad, del sistema de inspección de EAF, lo podríamos sintetizar en tres labores:

1. Vigilancia de que las entidades inspectoras siguen cumpliendo los requisitos exigidos para su autorización. Fundamentalmente se concretan en la adecuada formación de su personal y el correcto estado del equipamiento técnico, tanto material como inmaterial.
2. Control documental de las inspecciones realizadas por cada ITEAF, con la comprobación del cumplimiento de los planes de inspección autonómicos y la correspondencia de cada inspección con los registros de inscripción de las máquinas.
3. La verificación en campo de que a las máquinas inspeccionadas se les está aplicando las exigencias reflejadas en los manuales o guías de inspección publicados en la web del MAPA.

En varias de las comunidades autónomas, el elevado número de entidades autorizadas (figura 2) está dificultando que se puedan realizar adecuadamente las labores descritas, en particular la tercera de ellas, puesto que supone tener, o contratar, personal técnico y equipamiento, que se tendrá que desplazar por todo el territorio y realizar una labor de muestreo aleatorio. Para que este control sea efectivo se debe realizar de forma sorpresiva y garantizando la calidad técnica del equipamiento y la cualificación del personal que la realiza.

Estas tareas no fueron tenidas en cuenta, ni en la dotación de personal ni presupuestariamente, cuando se designaron los órganos competentes en cada Autonomía y por esa razón la mayor parte de ellos se están encontrando con grandes dificultades para poder realizar sus funciones.

Especial dificultad están teniendo los órganos competentes para aplicar sanciones a las ITEAF, que tras la verificación del incumplimiento de sus funciones, deben ser expedientadas y suspendidas de sus funciones, de forma definitiva o temporalmente. Si repasamos las órdenes y decretos autonómicos que regulan la implantación y aplicación de los planes de inspección, no encontramos herramientas específicas que les permitan aplicar un proceso sancionador más específico y adecuado a esta modalidad de autorización administrativa. Los expedientes que se han practicado en algunas CCAA, y que han terminado en la desautorización de la ITEAF infractora, han sido escasos y han tenido que superar un proceso excesivamente complejo y laborioso, sobre todo si se compara con las facilidades que tuvieron para la concesión de la autorización

5. Conclusiones y recomendaciones

El cumplimiento de lo dispuesto en la Directiva 2009/128/CE de uso sostenible de plaguicidas en España se ha llevado a cabo mediante la publicación del RD 1702/2011 y las correspondientes Ordenes o Decretos Autonómicos que regulan y organizan un sistema obligatorio de inspecciones de los equipos de aplicación de fitosanitarios, para lo que se ha establecido un sistema de autorización administrativa a Entidades Inspectoras, de carácter privado en su mayoría, con ámbito de actuación estatal.

Para garantizar la calidad y uniformidad de las inspecciones técnicas, se ha promovido y coordinado desde el MAPA la elaboración y publicación en su web de una serie de manuales y guías que interpretan las normas técnicas aplicables y uniformizan la actuación de los inspectores. Complementariamente a esos manuales y guías, se ha desarrollado una aplicación informática que tiene implementados los protocolos de inspección específicos para cada tipo de equipo, facilitando la toma de datos, la cumplimentación de la documentación y la generación de los datos relativos a cada inspección.

La gestión del plan de inspecciones obligatorias y el control de la calidad de las propias inspecciones técnicas está en manos de los Órganos Competentes de las CCAA, quienes lo ejercen, en la mayor parte de los casos, con unos medios propios, materiales y humanos, muy

limitados y que es insuficiente en aquellas autonomías donde se ha dejado en manos de entidades privadas una actividad inspectora que no ha sido, por lo general, bien recibida por los titulares de los equipos y que por lo tanto es sensible a las presiones propias de la competencia empresarial.

La gestión de la información relativa a los equipos está contenida en dos bases de datos que recogen la inscripción de los EAF, denominadas REGMAQ y REGANIF, y una base de datos, REGITEAF, que registra los resultados de las inspecciones realizadas a aquellos equipos inscritos. Las primeras son nutridas por los registros provinciales de maquinaria agrícola y los servicios de gestión de las instalaciones, mientras que los resultados de las inspecciones son subidos por los órganos competentes. Las bases de datos nombradas pertenecen a los servicios informáticos del MAPA, y por lo tanto están conectadas, pero la información relativa a los resultados de las inspecciones, proceden de la transmisión manual desde las entidades inspectoras que, como hemos dicho, son mayoritariamente privadas. El establecimiento de un sistema que integrase, en los mismos servicios ministeriales que gestionan las bases de datos, las herramientas informáticas para la realización de las inspecciones, simplificaría el manejo y aseguraría el procesamiento y almacenamiento de los datos.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Análisis y optimización del diseño inicial de las barras de un pulverizador hidráulico suspendido de 26 metros mediante el Método de los Elementos Finitos

H. Malón[1], N. Angosto[1], M. Vidal[1], F.J. García-Ramos[1], J. Cuartero[1], A. Bone[1]

[1] Universidad de Zaragoza; hml@unizar.es; 681633@unizar.es; vidalcor@unizar.es; fjavier@unizar.es; jcs@unizar.es; anbone@unizar.es

Resumen: Los pulverizadores hidráulicos de barras son equipos muy extendidos que se emplean para la aplicación de productos fitosanitarios (herbicidas, insecticidas y fungicidas) en cultivos agrícolas. El diseño de las barras de los pulverizadores hidráulicos es uno de los aspectos más críticos en el análisis del comportamiento estructural de estos equipos, concretamente el análisis de la influencia de los efectos dinámicos generados por las irregularidades del terreno. En este artículo se analiza mediante técnicas numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos el comportamiento estructural de las barras de un pulverizador hidráulico suspendido equipado con barras de 26 metros de anchura de trabajo, sometidas a esfuerzos dinámicos generados por irregularidades del terreno. Para la realización del estudio han sido considerados tres casos de carga. El primero corresponde al peso propio y los dos restantes son casos de carga dinámicos que corresponden a dos irregularidades del terreno. Los resultados obtenidos de los cálculos numéricos han dado lugar a un proceso de optimización del diseño inicial, el cual se basa en criterios de rigidez y resistencia. Como conclusión del trabajo se ha obtenido el diseño de las barras de un pulverizador hidráulico suspendido con una anchura de cobertura de 26 metros, que son capaces de soportar efectos dinámicos de trabajo en campo, así como una metodología de diseño y optimización basada en el Método de los Elementos Finitos para barras de pulverizador hidroneumático de gran anchura de cobertura de pulverización.

Palabras clave: Análisis numérico**;** Plaguicida; Efectos dinámicos**;** MEF;

1. Introducción

Los pulverizadores hidráulicos de barras son equipos muy extendidos que se emplean para la aplicación de productos fitosanitarios (herbicidas, insecticidas y fungicidas) en cultivos agrícolas.

Según su disposición con respecto al tractor al que se van a acoplar existen tres tipos: a) los pulverizadores autopropulsados, los cuales son independientes y no requieren de ningún tractor para moverlo y realizar trabajo en campo; b) los pulverizadores arrastrados, en los cuales el depósito y las barras están colocados sobre un chasis con ruedas que está enganchado al tractor y c) los pulverizadores suspendidos, en los cuales el depósito y las barras están colgados del tractor.

En el diseño de pulverizadores de barras, uno de los aspectos más críticos es el análisis del comportamiento estructural de las barras, concretamente el análisis de la influencia de los

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3448

efectos dinámicos generados por las irregularidades del terreno. El problema en el diseño de las barras de estos equipos es que son estructuras en voladizo con longitudes de vuelo elevadas. Esta gran longitud de voladizo implica que los efectos inerciales en las barras debidos a movimientos verticales del tractor generados por las irregularidades en el terreno pueden dar lugar a zonas de concentración de tensiones que pueden ocasionar un fallo prematuro de la estructura resistente de la barra.

Por esta razón un correcto diseño de las barras de pulverizadores es imprescindible para evitar su fallo estructural, al mismo tiempo que permita realizar el correcto tratamiento en campo con las barras extendidas.

2. Objetivo

El objetivo principal del proyecto consiste en la definición de una metodología de análisis y optimización del diseño de barras de pulverizador hidráulico, basada en el Método de los Elementos Finitos (MEF). Esta metodología debe permitir analizar el comportamiento estructural de las barras sometidas a esfuerzos dinámicos generados por las irregularidades del terreno, con el fin de optimizar su diseño, evitando el fallo estructural, al mismo tiempo que se permite realizar el correcto tratamiento en campo con las barras extendidas.

Con el fin de alcanzar el objetivo principal del proyecto se ha aplicado la metodología desarrollada en el análisis y optimización del diseño inicial de las barras de 26 metros de un pulverizador hidráulico suspendido, en cuyo diseño no han sido considerados los efectos dinámicos de las solicitaciones existentes en el trabajo diario en campo.

3. Materiales y métodos

El trabajo realizado en el proceso de análisis y optimización del diseño inicial de las barras de un pulverizador hidráulico suspendido de 26 metros se ha basado en el análisis numérico mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF). Esta metodología es una técnica empleada frecuentemente en el análisis estructural de máquinas y vehículos [1-9], así como en maquinaria y aperos agrícolas [10-12] A continuación se describen las fases de la metodología aplicada durante el estudio realizado.

3.1. Modelo numérico

El modelo a analizar en el estudio corresponde a las barras de un pulverizador hidráulico de 26m. En el análisis numérico se ha desarrollado un modelo que corresponde a la mitad del equipo de pulverización, debido a la simetría con respecto al eje longitudinal del tractor que presenta el pulverizador con las barras extendidas. La aplicación de condiciones de contorno de simetría en el modelo numérico permite reducir el coste computacional del análisis numérico, obteniendo resultados equivalentes al análisis con el modelo completo. El modelo numérico discretizado consta de 27.016 nodos y 25.979 elementos.

El diseño de las barras del pulverizador, el cual se muestra en la figura 1, está formado por 6 secciones, las cuales corresponden al soporte de las barras y 5 tramos de barras articuladas. En la discretización de estas secciones han sido empleados elementos tipo SHELL de 3 y 4 nodos en los perfiles estructurales, mostrados en gris en la figura 1. También han sido empleados elementos tipo BEAM, en rojo en la figura 1, en el modelado de las barras de refuerzo en cada una de las secciones de las barras, así como en la discretización de los cilindros hidráulicos y bulones. Las uniones articuladas entre la diferentes secciones que componen el modelo han sido realizadas mediante Multi Point Constrain (MPC´s) con el fin evitar que las uniones sean completamente rígidas, y así poder reproducir su comportamiento real. En la figura 2 se muestra un detalle del modelo discretizado, en él se pueden observar los diferentes tipos de elementos empleados en el modelo numérico.



Figura 1. Modelo numérico de las barras del pulverizador hidráulico.

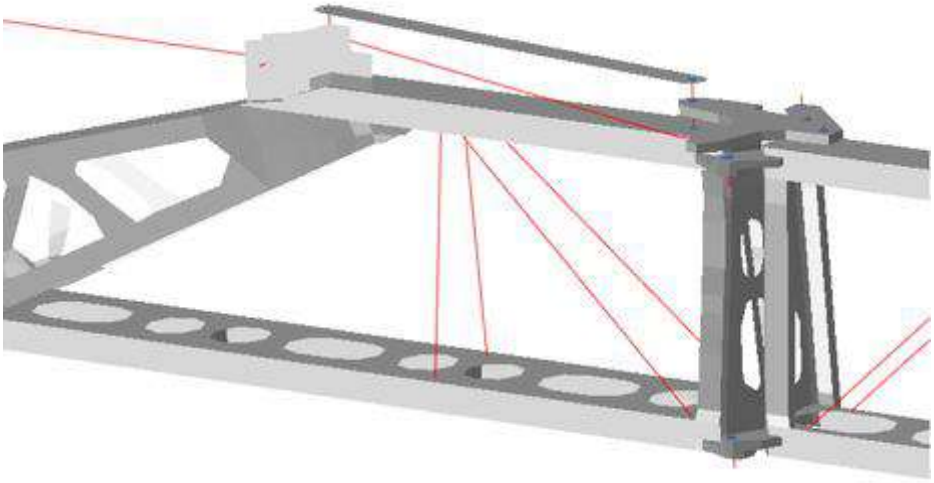


Figura 2. Detalle del modelo numérico de las barras del pulverizador hidráulico.

3.2. Materiales

En el análisis del diseño inicial se ha considerado que la totalidad de los componentes resistentes de la estructura son de acero S275. A los elementos no estructurales, como son los tornillos, bulones y cilindros hidráulicos, se les han asignado propiedades mecánicas de acero elástico lineal. Las propiedades mecánicas de los aceros empleados en el análisis del diseño inicial se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero empleado en el análisis del diseño inicial

Material	Modulo de Young (MPa)	Coeficiente de poison	Densidad (kg/m³)	Límite elástico (MPa)	Límite tracción (MPa)	Elongación (%)
S275	210.000	0,3	7.800	275	410	19
Acero	210.000	0,3	7.800			

3.3. Casos de carga

En el proceso de análisis y optimización realizado han sido definidos y analizados tres casos carga, los cuales corresponden a un caso de carga estático, denominado Gravedad, y dos casos de carga dinámicos, denominados Escalón 50mm y 20mm, los cuales reproducen los desplazamientos en el soporte de las barras del pulverizador generados por las irregularidades del terreno. A continuación, se describen en detalle los casos de carga definidos para el análisis de barras de pulverizador hidráulico de gran anchura de cobertura de pulverización.

3.3.1. Caso de carga 1 - Gravedad

El primer caso de carga analizado es un caso de carga estático en el cual se analiza el efecto de la gravedad en la totalidad de los componentes que constituyen la barra del pulverizador hidráulico. Por ello en este caso de carga únicamente se aplica la gravedad.

3.3.2. Caso de carga 2 - Escalón 50mm

El segundo caso de carga reproduce el desplazamiento generado en la barra del pulverizador por una irregularidad del terreno, concretamente se aplica un escalón de 50mm de altura en el soporte de la barra del pulverizador, el cual se asciende en 0,1 segundos. Para la reproducción de esta maniobra en los cálculos numéricos ha sido definido un caso de carga formado por tres steps dinámicos. En el primero de ellos se ha aplicado únicamente la gravedad durante 1 segundo. En el segundo step se ha introducido el escalón de 50mm, mediante un desplazamiento vertical ascendente de 50mm en 0,1 segundos en los nodos del plano de simetría, seguido de un desplazamiento de igual magnitud y sentido opuesto, con la misma duración. Para finalizar se define un tercer step de 2 segundos de duración, en el cual actúa únicamente la fuerza de la gravedad, con el fin de poder analizar el comportamiento dinámico de la estructura de barras ante el escalón generado en el segundo step.

3.3.3. Caso de carga 3 - Escalón 20mm

El tercer caso de carga definido corresponde a un escalón de 20mm aplicado en el soporte de la barra del pulverizador generado por una irregularidad del terreno. La definición del caso de carga es similar al caso de carga de Escalón de 50mm, con la diferencia que los desplazamientos introducidos en el segundo step son de ±20mm en lugar de los ±50mm del caso de carga 2.

3.4. Condiones de contorno

Las condiciones de contorno impuestas en el análisis numérico corresponden principalmente a condiciones de simetría con respecto al centro del pulverizador hidráulico, nodos mostrados en azul en la figura 3. Concretamente han sido restringidos en los nodos de simetría los desplazamientos respecto al eje longitudinal de la barra, así como los giros en torno del eje vertical y del eje transversal de la misma. Adicionalmente, para mejorar la convergencia de los cálculos numéricos, han sido restringidos los desplazamientos en la dirección del eje transversal de la barra en los nodos de simetría.

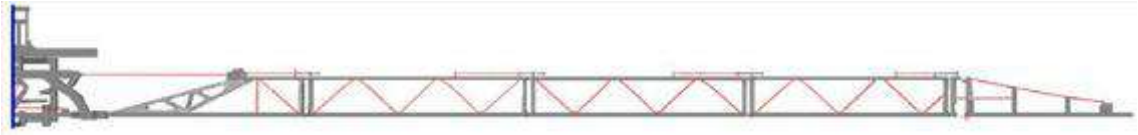


Figura 3. Nodos en los que aplican las condiciones de contorno y los casos de carga.

Para finalizar, en el caso de carga de gravedad han sido restringidos los desplazamientos verticales en los nodos de la superficie de simetría.

4. Resultados modelo inicial

Una vez han sido definidos la geometría, los materiales, los casos de carga y las condiciones de contorno, se han realizado los cálculos numéricos del modelo inicial mediante técnicas basadas en el MEF.

A continuación, se muestran los resultados de desplazamientos y tensiones de Von Mises obtenidos de los tres casos de carga analizados del diseño inicial de las barras de un pulverizador hidráulico.

4.1. Caso de carga 1 - Gravedad

En referencia a los desplazamientos verticales obtenidos en el caso de carga de Gravedad, los cuales se muestran en la figura 4, se observa que el desplazamiento máximo se localiza en el extremo de la barra del pulverizador, obteniendo se un desplazamiento máximo de 143mm.

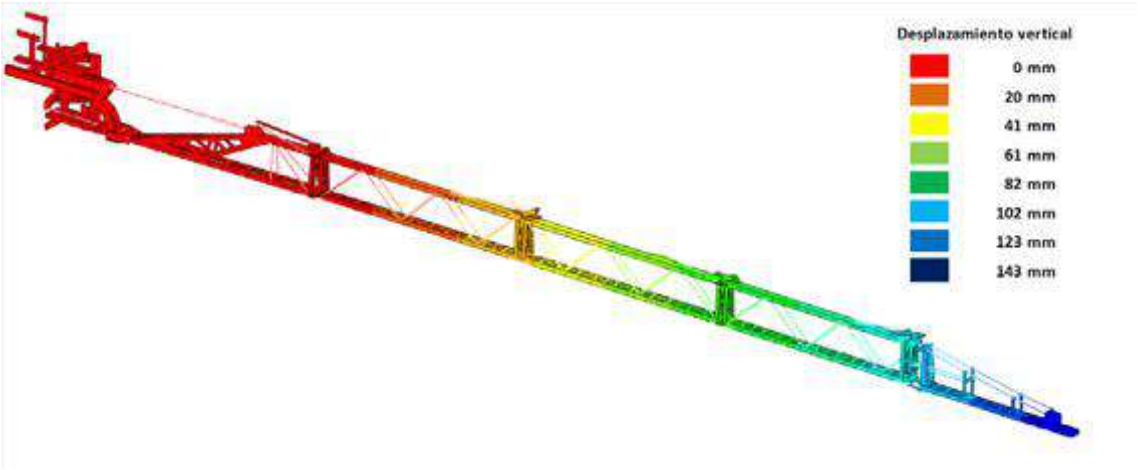


Figura 4. Desplazamiento vertical (mm) en el caso de carga Gravedad.

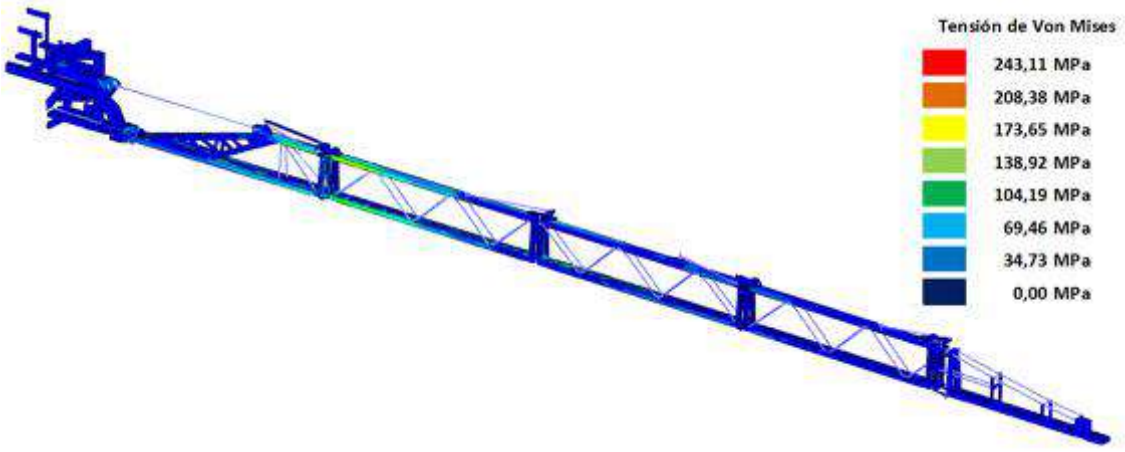


Figura 5. Tensiones de Von Mises. (MPa) en el caso de carga Gravedad.

Por otro lado, las tensiones de Von Mises más altas se localizan en las secciones 1 y 2, concretamente en las zonas cercanas a la unión entre ambos componentes, como se muestra en

la figura 5. La localización de las tensiones máximas es debida a que la sección 1 es un componente más rígido, debido a su geometría y la unión mediante el cilindro hidráulico al soporte, que la sección 2 (primera de las tres secciones centrales de la barra). Por esta razón la flexión en la barra del pulverizador comienza en esta unión, como se evidencia en la figura 4 de desplazamientos verticales. La tensión de Von Mises máxima obtenida alcanzan un valor de 243,11MPa en el perfil superior de la sección 2 de las barras, como se muestra en la figura 5, obteniéndose un coeficiente de seguridad con respecto al límite elástico del material de 1,13.

4.2. Caso de carga 2 – Escalon 50mm

El segundo caso de carga analizado corresponde a un escalón de 50 mm aplicado en el soporte de las barras del pulverizador, generado por una irregularidad del terreno. Este caso de carga ha sido definido como una sucesión de tres steps dinámicos con una duración total de 4,1 segundos. En la figura 6 se muestra la evolución temporal de los desplazamientos verticales de nodos pertenecientes a cada una de las secciones del modelo numérico. En la evolución temporal de desplazamientos se observa como el primer step, en el cual únicamente se aplica la gravedad, tiene una duración de 1 segundo. A continuación, se introduce el escalón mediante dos desplazamientos consecutivos de igual magnitud y sentido opuesto, con una duración total de 0,2 segundos. Desde el segundo 1,2 hasta el final del cálculo se muestra evolución del comportamiento de la barra sometida únicamente la fuerza de la gravedad.

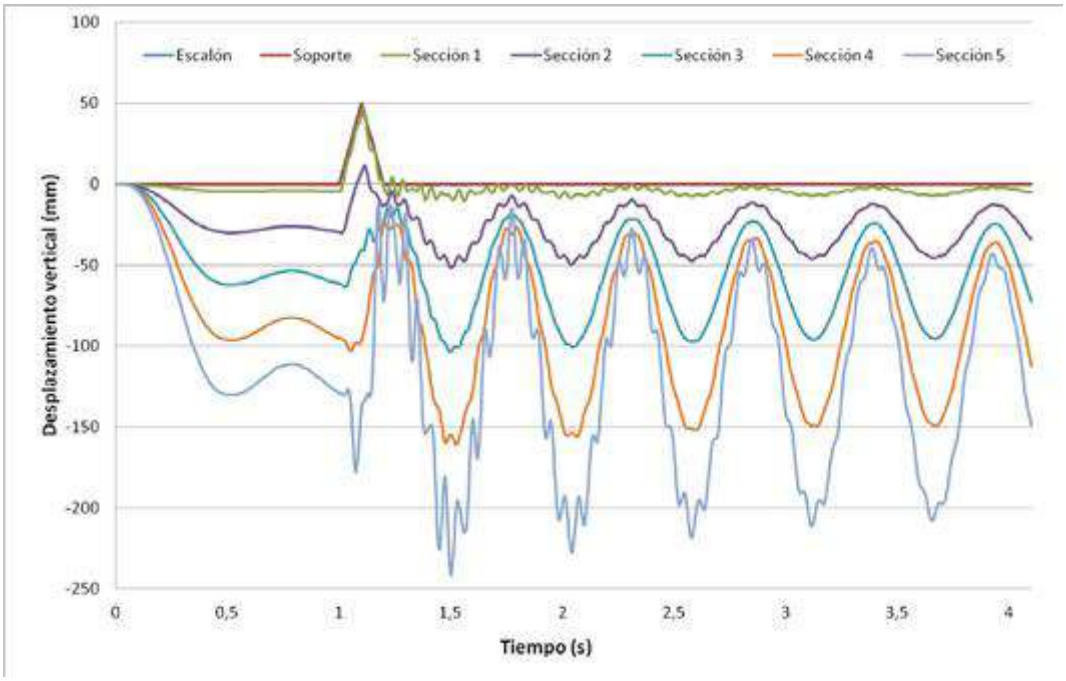


Figura 6. Evolución temporal de los desplazamientos verticales (mm) en el caso de carga Escalón 50mm.

Analizando la evolución temporal de los desplazamientos verticales se observa que el desplazamiento máximo en la fase de aplicación de la gravedad se produce a los 0,5 segundos de comenzar el cálculo, volviendo al punto de desplazamiento máximo transcurrido 1 segundo de cálculo. En esta fase los desplazamientos verticales máximos se localizan en el extremo de la barra alcanzado una flecha máxima de 130mm.

En referencia al comportamiento de la estructura después del escalón, se observa como los desplazamientos máximos se localizan en el extremo de la barra, llegando hasta los 241mm, reduciéndose la magnitud de los desplazamientos en las diferentes secciones conforme están

más cerca del soporte. Adicionalmente, analizando la diferencia del comportamiento de las diferentes secciones que componen la estructura de las barras se aprecia una diferencia de comportamiento entre la sección 1, que apenas presenta variaciones de desplazamiento vertical, y el resto de secciones de la barra, en la cuales estos desplazamientos presentan mayor magnitud. Estos resultados permiten verificar que la flexión en la barra comienza a ser significativa a partir de la sección 2 de la estructura.

Analizando las tensiones de Von Mises se obtiene que el perfil superior de la sección 2 es el componente donde se registran los valores máximos, como se muestra en la figura 7, alcanzando 275,14 MPa, lo que supone un coeficiente de seguridad con respecto al límite elástico del material de 1,00.

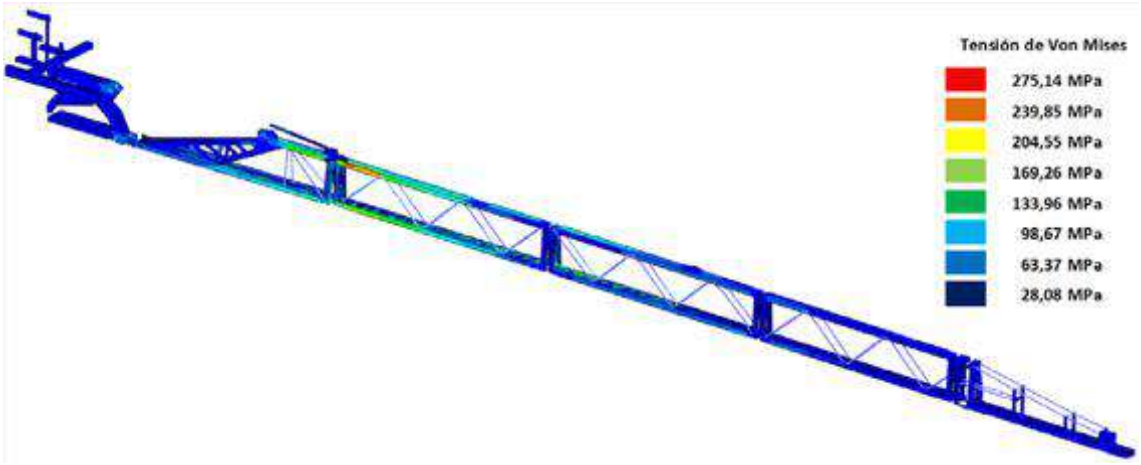


Figura 7. Tensiones de Von Mises. (MPa) en el caso de carga Escalón 50mm.

4.3. Caso de carga 3 – Escalon 20mm

El análisis del modelo inicial concluye con el caso de carga de Escalón de 20mm. Este caso de carga es análogo al caso de carga 2 con la excepción de la magnitud del escalón introducido, la cual en este caso es de 20mm en lugar de 50mm. Por otro lado, en función de los resultados obtenidos del caso de carga de Escalón de 50mm, la duración del primer step, en el cual se aplica únicamente la gravedad, ha sido reducida de 1 segundo a 0,5 segundos, obteniéndose un desplazamiento vertical máximo al final de esta fase de 130mm, como se muestra en la figura 8. Esta reducción de tiempo implica un gran ahorro del conste computacional en los cálculos numéricos, al mismo tiempo que se mantiene el valor máximo de desplazamiento vertical en el primer step del cálculo numérico.

Los resultados obtenidos evidencian un comportamiento similar de la barra del pulverizador al caso de carga de Escalón 50mm, variando los valores numéricos de desplazamientos y tensiones de Von Mises. Concretamente los desplazamientos máximos debidos al efecto del escalón se localizan en el extremo de la barra, obteniéndose un valor máximo de 174mm. Por otro lado las tensiones máximas de Von Mises se obtienen en el perfil superior de la sección 2, siendo los valores máximos de 254,05MPa, lo que supone un coeficiente de seguridad con respecto al límite elástico del material de 1,08.

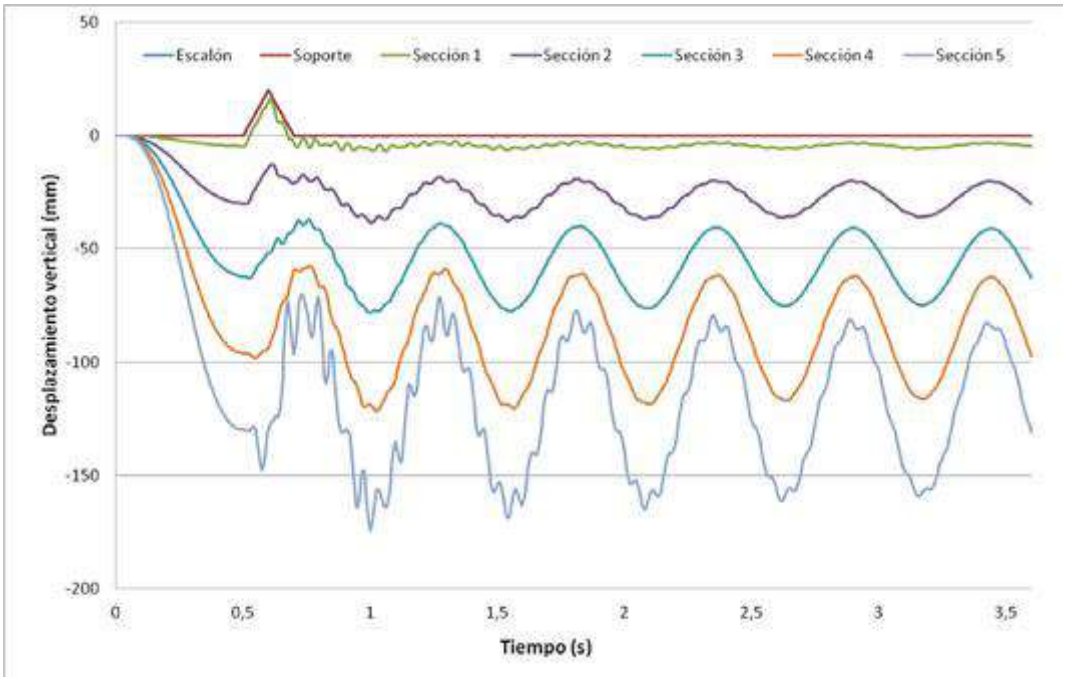


Figura 8. Evolución temporal de los desplazamientos verticales (mm) en el caso de carga Escalón 20mm.



Figura 9. Tensiones de Von Mises. (MPa) en el caso de carga Escalón 20mm.

5. Optimización del modelo inicial

Una vez ha finalizado el análisis del diseño inicial de las barras de un pulverizador hidráulico de 26 metros, y en función de los resultados obtenidos, se ha realizado un proceso de optimización del diseño inicial con el fin de conseguir un coeficiente de seguridad de 3 en la totalidad de los componentes de la estructura para el caso de carga 3, Escalón de 20mm.

El caso de carga 3 ha sido seleccionado para el proceso de optimización por presentar unos valores de aceleración de 4g frente a los 10g del caso de carga 2, valores que se obtienen partir de la distancia del escalón y el tiempo empleado en recorrerlo, siéndolo los valores de aceleración vertical registrados en ensayo en campo cercanos a 2g [13]. La aceleración de 4g es superior al obtenido de forma experimental, lo que permite desarrollar un diseño ausente de fallo. Por otro lado la definición del criterio de coeficiente de seguridad mínimo de 3 con

respecto al límite elástico, corresponde a un criterio de diseño con el que se pretende evitar el fallo por fatiga de la estructura debido a efectos dinámicos.

En el proceso de optimización se ha desarrollado un trabajo iterativo en el cual se ha ido modificando el material y espesor de los componentes en función del coeficiente de seguridad obtenido. Concretamente el cambio de material se realizado asignando acero S275 a los componentes con coeficiente de seguridad mayor que 3, acero S355 a los componentes con coeficiente de seguridad entre 2 y 3, y acero STRENX700 a los materiales con coeficiente de seguridad menor que 2. Las propiedades mecánicas de los aceros empleados en el proceso de optimización de las barras del pulverizador hidráulico se muestran en la tabla 2. En los casos en los cuales el coeficiente de seguridad presentaba un valor numérico próximo a 2 ó 3, en vez de cambiar el material del componente se ha incrementado el espesor del mismo.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero empleado en el proceso de optimización

Material	Modulo de Young (MPa)	Coeficiente de poison	Densidad (kg/m³)	Límite elástico (MPa)	Límite tracción (MPa)	Elongación (%)
S275	210.000	0,3	7.800	275	410	19
Acero	210.000	0,3	7.800			
S355	210.000	0,3	7.800	355	500	17
STRENX700	210.000	0,3	7.800	700	750	12

Analizando los desplazamientos verticales obtenidos en el modelo optimizado, los cuales se muestran en la figura 10, se observa un comportamiento similar al modelo original, pero con una reducción de 20mm en la flecha máxima de la estructura y una mayor amortiguación de las oscilaciones del conjunto, lo que implica una mejora según un criterio de rigidez.

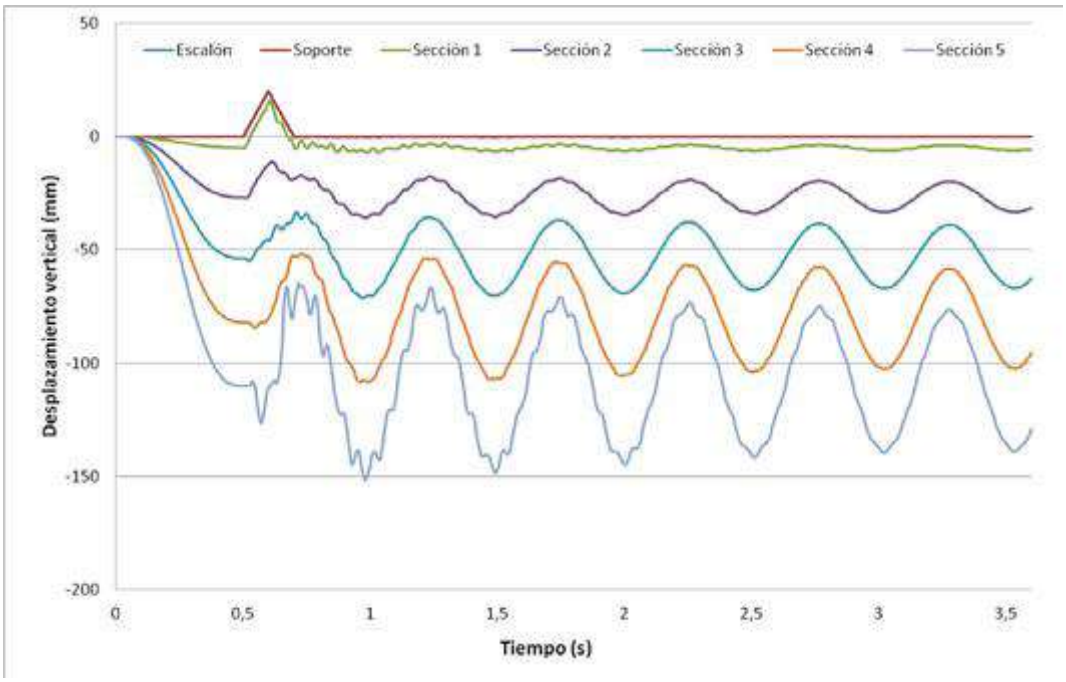


Figura 10. Evolución temporal de los desplazamientos verticales (mm) en el caso de carga Escalón 20mm del modelo optimizado de barras de pulverizador hidráulico.

Desde el punto de vista de la resistencia, se ha conseguido un diseño en el cual la totalidad de los componentes que conforman la estructura de las barras tienen un coeficiente de seguridad mayor que tres, lo que permite obtener un diseño valido ante el fallo por fatiga. Los valores de tensiones de Von Mises obtenidos de los cálculos numéricos se muestran en la figura 11.

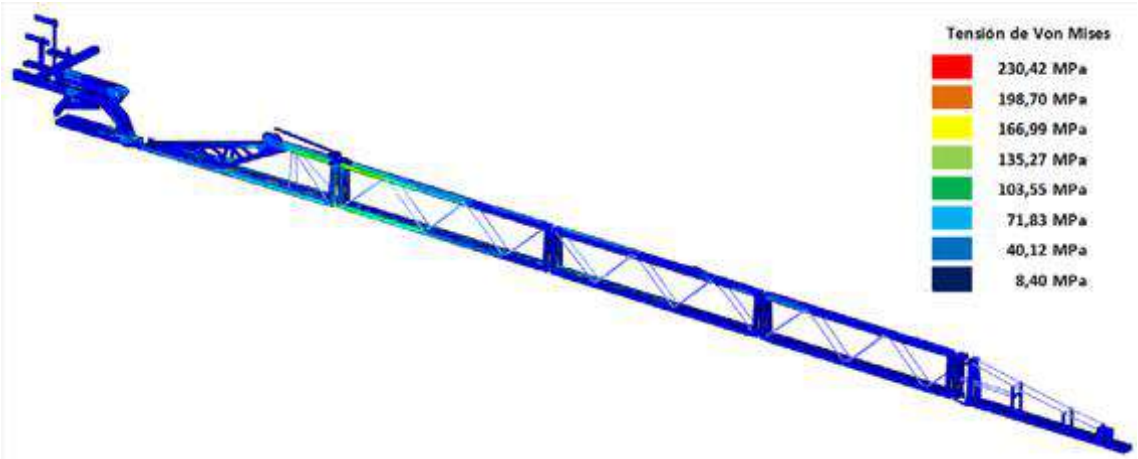


Figura 11. Tensiones de Von Mises. (MPa) en el caso de carga Escalón 20mm del modelo optimizado de barras de pulverizador hidráulico.

6. Conclusiones

En el estudio se ha presentado el trabajo de análisis y optimización de las barras de un pulverizador hidráulico suspendido de 26 metros de cobertura de trabajo ante solicitaciones generadas por los efectos dinámicos del trabajo en campo.

El proceso de análisis y optimización ha sido realizado mediante técnicas numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos (MEF), para lo que ha sido necesario la definición de la geometría, materiales, condiciones de contorno, así como casos de carga. Concretamente han sido definidos tres casos de carga, que corresponden a un caso estático de aplicación de la gravedad y dos casos dinámicos que reproducen irregularidades del terreno.

En el proceso de optimización ha sido definido el criterio seguido en la optimización del diseño inicial de las barras del pulverizador hidráulico, el cual consiste en que todos los componentes de la estructura deben presentar un coeficiente de seguridad con respecto al límite elástico del material mayor que 3 en el caso de carga de escalón de 20mm, con el fin de asegurar la ausencia del fallo por fatiga.

Al finalizar el proceso de optimización se ha conseguido alcanzar el objetivo del coeficiente de seguridad, mediante la aplicación de aceros S275, S355 y STRENX700, al mismo tiempo que se mejoraba el comportamiento frente a rigidez de la estructura de barras.

Para finalizar, el trabajo realizado ha permitido definir una metodología de análisis y optimización del diseño de barras de pulverizador hidráulico, basada en el Método de los Elementos Finitos (MEF), la cual permite analizar el comportamiento estructural de las barras sometidas a esfuerzos dinámicos generados por las irregularidades del terreno y optimizar su diseño. Al aplicar esta metodología se podrá evitar el fallo estructural de las barras de un pulverizador hidráulico de gran anchura de cobertura de pulverización, al mismo tiempo que se permite realizar el correcto tratamiento en campo con las barras extendidas.

Referencias

1. Beermann, H.J. (1984) Static Analysis of Commercial Vehicle Frames –A Hybrid Finite-Elements and Analytical Method. International Journal of Vehicle Design. 1984, 5(1–2) pp 26–52.
2. Cappello, F. Ingrassia, T. Mancuso, A. et al. Methodical Redesign of a Semitrailer. 9th International Conference on Computer Aided Optimum Design in Engineering. Computer Aided Optimum Design in Engineering IX Book Series: Wit Transactions on the Built Environment. 2005, Volume 80, pp. 359–369
3. Carrera, M. Castejon, L. Miralbes, R. et al. (2010) Behaviour IA Rear Underrun Protection System on Car-to-Tank Vehicle Impact Used for Fuel Transportation, International Journal of Heavy Vehicles Systems. 2010, 17(3–4). pp. 199–215.
4. Deng, Y.D. Wang, J. Wen, Y. et al. The Static and Dynamic Characteristics Study of Aluminum Tank Semitrailer. 2nd International Conference on Manufacturing Science and Engineering. Manufacturing Process Technology. 2011 PTS 1–5 Book Series: Advanced Materials Research, Volume 189–193, pp. 2233–2237.
5. Kodiyalam, S. & Sobieszczanski-Sobieski, J.. Multidisciplinary Design Optimization - Some Formal Methods, Framework Requirements, and Application to Vehicle Design. International Journal of Vehicles Design. 2001, 25(1–2), pp. 3–22.
6. Karaoglu, C. & Kuralay, N.S.. Stress Analysis of a Truck Chassis with Riveted Joints. Finite Elements in Analysis and Design. 2002, 38(12), pp1115–1130.
7. Miralbes, R. & Castejon, L.. Fatigue Design of Tanker Semi-Trailers, *Dyna. 2010, 85(6).* pp. 480–488.
8. Hoefinghoff, J. Jungk, A. Knop, W. et al.. Using 3D Field Simulation for Evaluating UHF RFID Systems on Forklift Trucks. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2011, 59(2)*, pp.689–691.
9. Miralbes, R. Malon, H & Castejon L. (2011) Diseño de accesorios para el acoplamiento en carretillas manipuladoras: plumines y portapalets. En: Libro de resúmenes del XV International Congress on Project Engineering.2011, ISBN 978-84-615-4542-1
10. Vidal, M. Bone, A. Garcia-Ramos, F.J. Malon, H & Villacampa, R. Desarrollo de máquina para la aplicación localizada de cebo rodenticidas en parcelas agrícolas. En: Libro de resúmenes del XV International Congress on Project Engineering.2011, ISBN 978-84-615-4542-1
11. Malon, H. Garcia-Ramos, F.J. Vidal, M. & Bone, A. Design and optimization of a chassis for an Air-assisted Sprayer with two fans using the Finite Element Method. Proyect Management and engineering research. 2014, DOI: 10.1007/978-3-319-26459-2_8
12. Sicilia, V.J. Análisis estructural de un remontador de cereales para almacenamiento de maíz. Trabajo fin de Grado. Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural. Universidad de Zaragoza, 2015.
13. Jeon, Hong Young, "Instrumented Self-Propelled Sprayer to Determine Dynamic Boom Effects on Droplet Application Uniformity. " Master's Thesis, University of Tennessee, 2003.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Avaliação da influência da poda no desempenho da máquina de colheita em pomares superintensivos de amendoeira

António B. Dias[1], J. Reis[2], J. Rebola,[2] J. Falcão[2], Anacleto Pinheiro[1], José O. Peça [1]

[1] Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas (ICAAM)/Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora. Núcleo da Mitra, Apartado 94, 7002-554 Évora, Portugal; adias@uevora.pt; jmop@uevora.pt; pinheiro@uevora.pt

[2] Torre das Figueiras Sociedade Agrícola Lda. Herdade da Torre das Figueiras, Apartado 23, 7450 – 999 Monforte

Resumo: O sucesso da tecnologia de colheita dos olivais superintensivos terá contribuído para a implantação de pomares superintensivos de amendoeira. Nestes pomares é necessário garantir que a dimensão da copa se adeque às dimensões da máquina de colheita para minimizar as perdas de amêndoa e os danos nas árvores. Para aumentar o conhecimento sobre esta tecnologia, estabeleceu-se num pomar comercial, um ensaio para avaliar o efeito da poda na produção de amêndoa e no desempenho da máquina de colheita. O pomar foi plantado em setembro de 2014, na Herdade da Torre das Figueiras – Monforte - Portalegre - Portugal (39º 04′ N; 07º 29′ W), com a orientação Este-Oeste, entrelinha de 5 m e 1,5 m de afastamento entre as árvores na linha. Definiram-se os seguintes tratamentos: T0 – poda de verão: corte horizontal da copa e corte lateral em cada uma das faces, em 2015 e 2017. Em 2015, os cortes laterais foram executados em julho e os cortes horizontais em julho e em setembro. Em setembro de 2017, após a colheita, realizou-se corte lateral em cada uma das faces da copa e corte horizontal da copa. Em Julho de 2016 eliminaram-se manualmente ramos excessivamente desenvolvidos para a entrelinha. Poda de inverno: em 2016, poda manual para eliminar ramos vigorosos; em 2017, corte horizontal da copa seguido de poda manual para melhorar a exposição solar no interior da sebe; T1 – sem intervenções de poda em 2015, 2016 e 2017; T2 – poda de verão: corte lateral em cada uma das faces da copa, realizado em julho de 2015; corte lateral em cada uma das faces da copa e corte horizontal em setembro de 2017, após a colheita; T3 – poda de verão: corte horizontal da copa e corte lateral em cada uma das faces, em 2015 e 2017. Em 2015, os cortes laterais foram executados em julho e os cortes horizontais em julho e em setembro. Em setembro de 2017, após a colheita, efectuou-se corte lateral em cada uma das faces da copa e corte horizontal da copa. Em 2018, em todos os tratamentos, procedeu-se a uma poda manual de inverno para eliminar ramos vigorosos excessivamente desenvolvidos para a entrelinha. Em 2017, selecionaram-se aleatoriamente 3 blocos de 10 árvores em cada linha para monitorizar a altura da árvore e a largura da copa na perpendicular à linha. Em 2017 e 2018 procedeu-se à colheita de cada linha, registando a massa de amêndoa colhida e o tempo de trabalho, tendo-se avaliado por amostragem as perdas de amêndoa para o solo. Verificaram-se diferenças na produção de amêndoa entre os anos, bem como diferenças significativas entre os tratamentos em 2018. Houve uma diminuição de perdas de amêndoa para o solo de 2017 para 2018. Em 2018 o tratamento 1 registou uma percentagem de perdas significativamente superior aos outros tratamentos.

Palavras chave: poda mecânica; fruteiras; produção; colheita contínua

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3476

1. Introdução

Após a generalização dos olivais superintensivos, tem-se assistido à instalação de pomares superintensivos de amendoeira. Este sistema de condução tem como objectivo permitir a redução dos custos de colheita, visto que pode utilizar as mesmas máquinas de colheita contínua da vinha e do olival [3]. Este autor refere ainda que a opção por este tipo de plantação permite reduzir as necessidades de mão-de-obra para a plantação e para a poda, bem como a melhoria da entrada em produção, o incremento da produção e a redução da alternância produtiva e a melhoria da qualidade do miolo de amêndoa.

Na condução destes pomares existe a preocupação em garantir que a dimensão da copa se adeque às dimensões da máquina de colheita. Dever-se-á conduzir o pomar como uma sebe desorganizada, multieixo, na qual a largura de copa que não deve ultrapassar os 70-80 cm e os 2.75m de altura [3]. O recurso à poda mecânica deverá ser efectuado desde o primeiro ano, quer com cortes laterais da copa, quer com corte horizontais na parte superior da mesma. As intervenções de poda manual deverão ser efectuadas apenas quando for necessário eliminar ramos secos e ramos muito vigorosos [3].

Atendendo ao facto de existirem poucas referências sobre a condução de pomares superintensivos de amendoeira, estabeleceu-se, num pomar comercial, um ensaio para avaliar o efeito das intervenções de poda na produção de amêndoa e na eficiência de recolha.

2. Material e Métodos

2.1. Pomar

O pomar foi plantado em setembro de 2014, na Herdade da Torre das Figueiras – Monforte - Portalegre - Portugal (39º 04' N; 07º 29' W), num Solo Mediterrânico Pardo Para-Barros [1] armado em camalhões, com entrelinha de 5 m e 1,5 m de afastamento entre as árvores na linha e as linhas numa orientação Este-Oeste. Foram utilizadas plantas com 6 meses de viveiro, provenientes da empresa Agromillora Catallana. Inicialmente as árvores foram tutoradas para garantir a formação em eixo central, procurando garantir um afastamento da base da copa ao solo de cerca de 0,5 m.

O pomar dispõe de rega gota a gota, estimando-se em 1500 m^3 a dotação anual de rega nos dois anos de ensaio.

Foram efectuados tratamentos fitossanitários para controlo da mancha ocre (*Polystigma amygdalinum* P.F. Cannon*)*, do crivado (*Stigmina carpophila*), da moniliose *(Monilinia Laxa* Honey) e dos ácaros (*Tetranychus urticae* Koch and *Panonychus ulmi* Koch).

As infestantes foram controladas com herbicida na linha e com máquina de destroçar erva na entrelinha.

A fertilização foi efectuada através da rega e foliarmente, tendo sido aplicadas cerca de 30 unidades de azoto, 20 de fosforo e 40 de potássio.

O ensaio foi instalado na parcela com a cultivar 'Soleta', enxertada em rootpac 20 (*Prunus besseyi x Prunus cerasifera*) (www.rootpac.com).

2.2. Equipamentos

As intervenções de poda mecânica de 2016, 2017 e 2018 foram realizadas com uma máquina de podar de discos R&O (Reynolds & Oliveira Ltd.) com uma barra de corte de 3,0m de largura (Figura 1), montada no carregador frontal de um tractor 4WD com 97 *kW* (DIN) de potência máxima [2].

Em 2015, as intervenções de poda mecânica foram realizadas com um corta sebes portátil Sthill, accionado por motor de explosão (Figura 2).

Em 2017 e em 2018 utilizou-se uma máquina automotriz Gregoire G9.330 (Figura 3), na colheita da amêndoa.



Figura 1. Máquina de podar montada em tractor, a efectuar poda de verão



Figura 2. Corta sebes portátil Sthil



Figura 3. Máquina automotriz Gregoire G9.330 na colheita do ensaio em 2017

2.3. Metodologia

Na parcela com a cultivar 'Soleta' foram aleatoriamente selecionadas 12 linhas com 93 árvores. Definiram-se os seguintes tratamentos (Figura 4):

- T0 (Poda agricultor) - poda de verão: corte horizontal da copa ("topping") e corte lateral em cada uma das faces, em 2015, 2017 e 2018. Em 2015, os cortes laterais foram executados em julho e os cortes horizontais em julho e em setembro. Em Julho de 2016 eliminaram-se manualmente ramos excessivamente desenvolvidos para a entrelinha. Em setembro de 2017, após a colheita, realizou-se corte lateral em cada uma das faces da copa e corte horizontal da copa. Em junho de 2018 realizou-se corte lateral em cada uma das faces da copa e corte horizontal da copa. Poda de inverno: em 2016, poda manual para eliminar ramos vigorosos; em 2017, corte horizontal da copa seguido de poda manual para melhorar a exposição solar no interior da sebe;

- T1 – sem intervenções de poda em 2015, 2016 e 2017;

- T2 – poda de verão: corte lateral em cada uma das faces da copa, realizado em julho de 2015; corte lateral em cada uma das faces da copa e corte horizontal em setembro de 2017 e em setembro de 2018, após a colheita;

- T3 – poda de verão: corte horizontal da copa e corte lateral em cada uma das faces. Em 2015, os cortes laterais foram executados em julho e os cortes horizontais em julho e em setembro.

Em setembro de 2017, após a colheita, efectuou-se corte lateral em cada uma das faces da copa e corte horizontal da copa. Em julho de 2018 efectuou-se corte lateral em cada uma das faces da copa e corte horizontal da copa.

Em 2018, em todos os tratamentos, procedeu-se a uma poda manual de inverno para eliminar ramos vigorosos excessivamente desenvolvidos para a entrelinha.

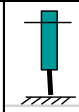
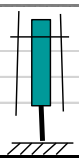
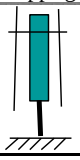
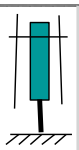
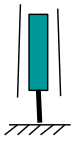
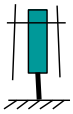
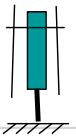
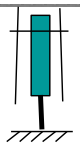
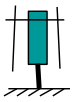
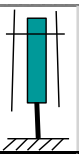
Tratamento		2015 (1º ano)	2016 (2º ano)	2017 (3º ano)	2018 (4º ano)
T0	Poda Inverno	Sem poda	Poda manual	 Topping + Poda manual	Poda manual
	Poda Verão	 Topping + 2 caras laterais	Poda manual	 Topping + 2 caras laterais após colheita	 Topping + 2 caras laterais Junho
T1	Poda Inverno	Sem poda	Sem poda	Sem poda	Poda manual
	Poda Verão	Sem poda	Sem poda	Sem poda	Sem poda
T2	Poda Inverno	Sem poda	Sem poda	Sem poda	Poda manual
	Poda Verão	 2 caras laterais	Sem poda	 Topping + 2 caras laterais após colheita	 Topping + 2 caras laterais após colheita
T3	Poda Inverno	Sem poda	Sem poda		Sem poda / Poda manual
	Poda Verão	 Topping + 2 caras laterais	Sem poda	 Topping + 2 caras laterais após colheita	 Topping + 2 caras laterais julho

Figura 4. Sequência das intervenções de poda realizadas nos diferentes tratamentos desde a plantação

Em 2017, selecionaram-se aleatoriamente 3 blocos de 10 árvores em cada linha para monitorizar a altura da árvore, a distância da base da copa ao solo, a largura da copa na perpendicular à linha e as perdas de amêndoa para o solo.

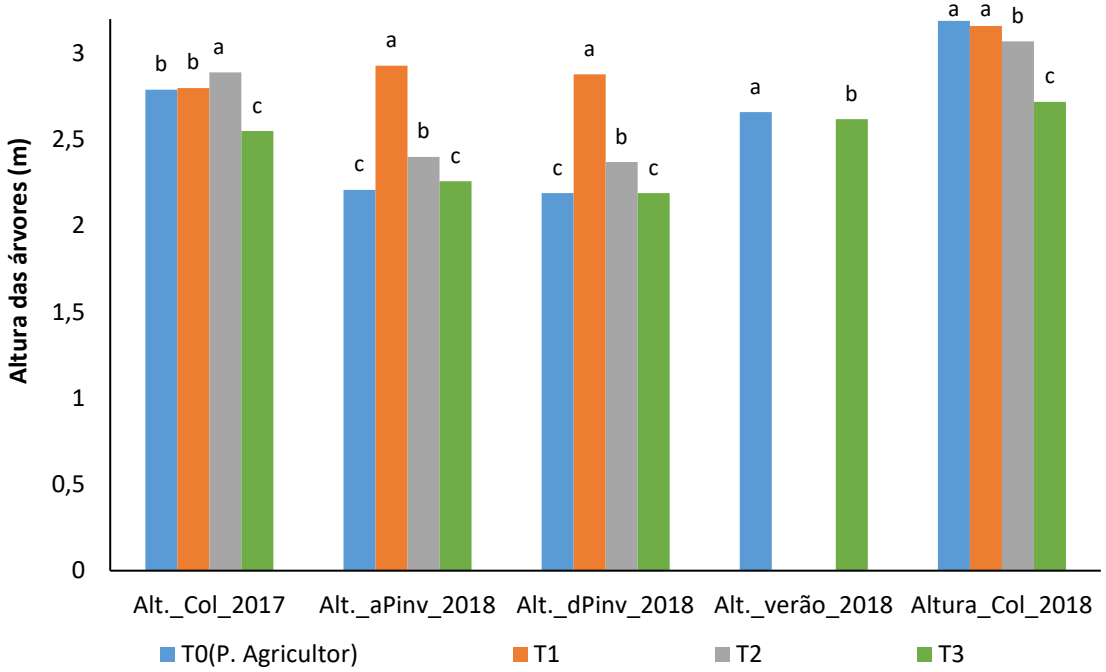
Em 2017 e 2018 procedeu-se à colheita de cada linha, registando a massa de amêndoa colhida e o tempo de trabalho, tendo-se avaliado por amostragem as perdas de amêndoa para o solo.

Foi feita a análise de variância (ANOVA), utilizando o programa SPSS 24. Sempre que a análise de variância revelou diferenças significativas, foi feito o Teste de Separação Múltipla de Médias de Duncan para um nível de significância de 5%.

3. Resultados e discussão

3.1. Altura das árvores

Em relação à altura das árvores à colheita de 2017 (Figura 5), verificaram-se diferenças significativas entre os tratamentos (P<0.05). O tratamento T2 apresentava as árvores mais altas, as quais diferiam significativamente (P≤0.05) dos restantes tratamentos. O tratamento T3 apresentava as árvores mais baixas as quais diferiam significativamente (P≤0.05) dos outros tratamentos. Esta monitorização mostra que apesar do agricultor ter realizado um "topping" no inverno de 2017, no tratamento T0, durante a primavera houve emissão de lançamentos na parte superior da copa levando a que essas árvores tivessem uma altura que não diferia da registada nas árvores que estavam sem podar desde a plantação (tratamento T1).



Legenda: Alt._Col_2017 – altura das árvores à colheita, em 2017; Alt._aPinv_2018 – altura das árvores antes da poda de inverno de 2018; Alt._dPinv_2018 – altura das árvores depois da poda de inverno de 2018; Alt._verão_2018 – altura das árvores depois da poda de verão de 2018; Alt._Col_2018 – altura das árvores à colheita, em 2018

Colunas acompanhadas de letras diferentes diferem significativamente entre si, segundo o teste de separação de médias de Duncan (P≤0,05)

Figura 5 – Altura média das árvores por tratamento.

A maior altura registada no tratamento T2 poderá estar associada aos cortes laterais da copa realizados em 2015, que levaram a que estas árvores tenham sido sempre mais altas (Dias et al, 2018). No caso do tratamento T3, a menor altura poderá ser consequência do "topping" realizado na fase inicial de desenvolvimento das árvores, levando a que estas tenham sido sempre mais baixas (Dias et al, 2018).

Antes da poda de inverno de 2018 registaram-se diferenças significativas (P<0.05) entre os tratamentos na altura das árvores. O tratamento T1 tinha as árvores mais altas as quais diferiam significativamente (P≤0.05) dos outros tratamentos. O "topping" pós colheita efectuado em 2017 reduziu a altura das árvores dos tratamentos T0, T2 e T3. Embora tenha havido a preocupação em efectuar o "topping" à mesma altura em todos os tratamentos, verifica-se (Figura 5) que o tratamento T2 tinha as árvores significativamente (P≤0.05) mais altas do que os tratamentos T0 e T3. Sendo o

controlo da altura de corte realizado pelo operador com o carregador frontal do tractor, poderá ter havido alguma alteração no seu posicionamento, originando as diferenças registadas.

Não se registaram diferenças consideráveis na altura das árvores, antes e depois da poda de inverno de 2018. Tal deve-se ao facto de na poda de inverno se ter efectuado poda manual em todos os tratamentos, para eliminar ramos vigorosos excessivamente desenvolvidos para a entrelinha, o que não teve praticamente nenhuma influência na altura das árvores. De referir que nos tratamentos T0, T2 e T3 as árvores tinham uma altura inferior à altura máxima da unidade de colheita (2.6m) da máquina automotriz.

Após as intervenções de poda de verão verificaram-se diferenças significativas ($P<0.05$) entre os tratamentos, com o tratamento T0 a registar os maiores valores. As diferenças registadas estão associadas à dificuldade em ajustar e manter a uniformidade da altura de corte. Nestes tratamentos as árvores ficaram com uma altura maior do que tinham após a poda de inverno e com valores próximos da altura máxima da unidade de colheita da máquina automotriz.

Em relação à altura das árvores à colheita de 2018 (Figura 5), verificaram-se diferenças significativas entre os tratamentos ($P<0.05$). O tratamento T3 apresentava as árvores mais baixas, as quais diferiam significativamente ($P\leq0.05$) dos restantes tratamentos. Tal estará associado ao facto do "topping" de verão ter sido efectuado no final de julho de 2018 e de não ter havido emissão de novos lançamentos na parte superior da copa após esse corte, conforme se pretendia. No caso do tratamento T0, houve um aumento da altura das árvores desde a poda de verão até à colheita da amêndoa, não se registando diferenças significativas em relação ao tratamento 1 ($P\leq0.05$). Embora os lançamentos emitidos após a poda de verão no tratamento T0 sejam ramos ladrões, que não têm fruta e são flexíveis, estes resultados indiciam que o "topping" de verão poderá estar a ser efectuado precocemente.

Salientar ainda que o tratamento T2 apresentava árvores com uma altura significativamente ($P\leq0.05$) inferior ao tratamento 0. Os ramos que surgiram após o corte pós colheita de 2017 (tratamento T2) são ramos ladrões, flexíveis e sem fruta, o que poderá ser um bom indicador da mais valia desta solução para controlar a altura das árvores.

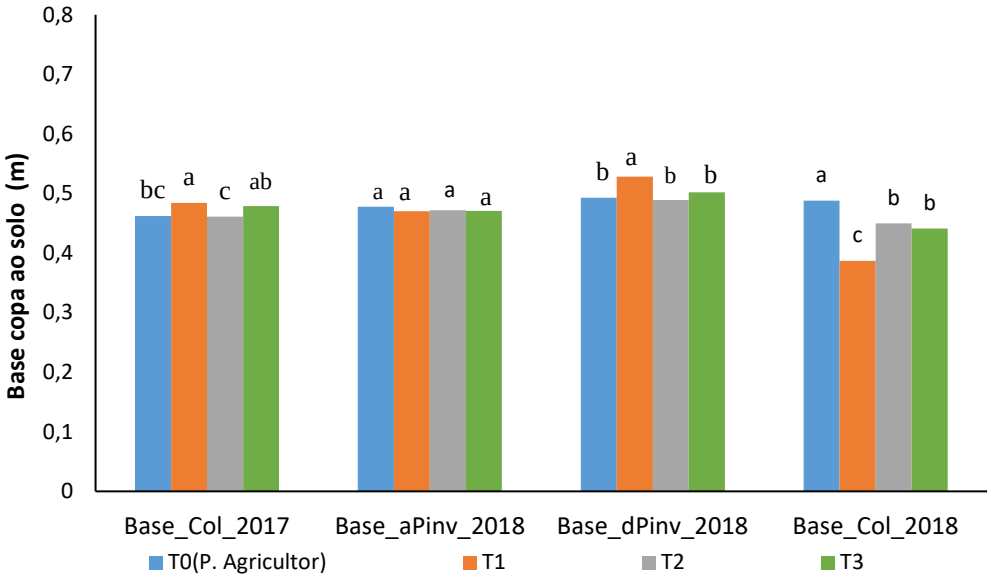
3.2. Base da copa ao solo

Na figura 6 mostra-se o resultado da monitorização do afastamento da base da copa ao solo para cada tratamento, em diferentes momentos. Deve referir-se que em 2015 e 2016 houve a preocupação em deixar todas as árvores com um afastamento da base da copa ao solo de cerca de 0,5m. Os resultados obtidos refletem essa uniformidade.

De realçar que após a poda de inverno de 2018 se verificaram diferenças significativas entre os tratamentos ($P<0.05$), com o tratamento T1 a registar o maior afastamento ao solo. Tendo havido uma intervenção de poda manual em todos os tratamentos, este resultado mostra que no tratamento T1 terão sido cortados mais ramos na base da copa, aumentando a seu afastamento ao solo. Trata-se de pequenas diferenças, que dependem da decisão do podador, baseadas apenas na observação visual.

Antes da colheita de 2018 verificaram-se diferenças significativas entre os tratamentos ($P<0.05$), com o tratamento T1 a registar o menor afastamento da base da copa ao solo. Neste tratamento os ramos das árvores tendem a ser mais compridos do que nos restantes devido ao facto das árvores terem estado sem podar desde a plantação até 2018 e de em 2018 a poda manual se ter baseado apenas em desramações. Tal leva a que estes ramos revelem uma maior tendência em fletir devido à produção que suportam, levando a que a sua extremidade se aproxime do solo.

Esta monitorização vem contribuir para confirmar a necessidade de manter um afastamento da base da copa ao solo de cerca de 0,5m. Ramos mais baixos podem ser quebrados pela máquina de colheita e a amêndoa que suportarem tenderá a perder-se para o solo, por ficarem ao nível das placas retráteis da interface máquina-tronco das árvores.

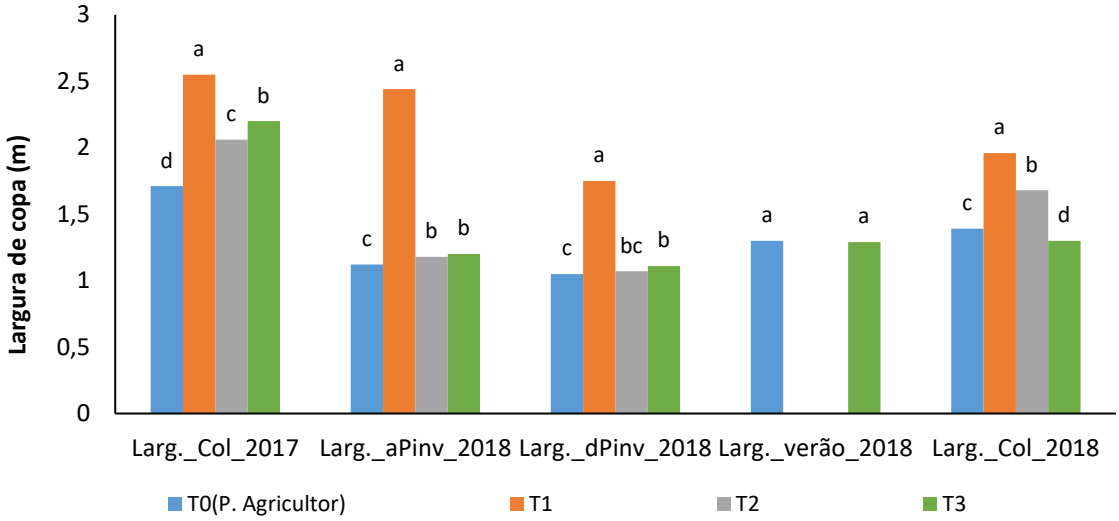


Legenda: Base._Col_2017 – base da copa à colheita, em 2017; Base_aPinv_2018 – base da copa antes da poda de inverno de 2018; Base_dPinv_2018 – base da copa depois da poda de inverno de 2018; Base_Col_2018 – base da copa à colheita, em 2018
Colunas acompanhadas de letras diferentes diferem significativamente entre si, segundo o teste de separação de médias de Duncan (P≤0,05)

Figura 6. Afastamento da base da copa ao solo, em média, por tratamento.

3.3. Largura de copa

Na figura 7 mostra-se os resultados da monitorização da largura da copa. Antes da colheita de 2017 registaram-se diferenças significativas entre os tratamentos (P<0.05), tendo o tratamento T1 revelado uma largura de copa significativamente superior (P≤0.05) à dos restantes tratamentos. Estas diferenças devem-se ao facto de neste tratamento as árvores terem estado sem podar desde a plantação, enquanto no tratamento T0 houve intervenções de poda manual, quer em 2016, quer em 2017, que serviram para eliminar ramos excessivamente desenvolvidos para a entrelinha.



Colunas acompanhadas de letras diferentes diferem significativamente entre si, segundo o teste de separação de médias de Duncan (P≤0,05)

Figura 7. Largura média da copa das árvores após a poda, por tratamento, em cada um dos anos.

Antes da poda de inverno de 2018 verificaram-se diferenças significativas (P<0.05) entre os tratamentos, tendo o tratamento T1 registado uma largura de copa significativamente superior (P≤0.05) aos restantes tratamentos, os quais revelaram uma grande uniformidade. Tal deve ao facto de nestes tratamentos se ter realizado uma intervenção de poda mecânica pós-colheita.

Após a poda de inverno de 2018 a situação manteve-se, apesar da redução da largura de copa no tratamento T1. A intervenção de poda manual realizada neste tratamento consistiu em desramações, eliminando os ramos mais vigorosos para a entrelinha. Tal não foi suficiente para que a largura de copa ficasse a um nível idêntico à dos outros tratamentos.

Não se verificaram diferenças significativas (P>0.1) na largura de copa após os cortes de verão visto que o posicionamento da barra de corte foi idêntico, de modo a eliminar apenas os lançamentos para a entrelinha. O sistema de autoguiamento controlado por GPS montado no tractor com a máquina de podar contribuiu para a uniformidade dos cortes efectuados.

O trabalho realizado durante o ano de 2018 permitiu diminuir a largura de copa, comparativamente ao que se registou em 2017, tendo-se verificado diferenças significativas entre os tratamentos (P<0.05).

Conforme seria de esperar o tratamento T1 registou a maior largura de copa, a qual foi significativamente (P≤0.05) superior à dos restantes tratamentos, que diferiram entre si.

O tratamento T2 registou uma largura de copa significativamente (P≤0.05) superior aos tratamentos onde se realizaram podas de verão (T0 e T3). A poda de verão efectuada em Julho permite que as árvores à colheita tenham uma largura significativamente inferior à registada no tratamento podado em Junho (T0). Tal mostra que a resposta vegetativa ao corte de julho será menor do que ao corte de junho. De referir que podem ocorrer perdas de amêndoa para o solo com estes cortes, principalmente se existirem ramos excessivamente salientes.

3.4. Capacidade de trabalho

Na figura 8 mostra-se a capacidade de trabalho na intervenção de poda manual por tratamento, em cada um dos anos.

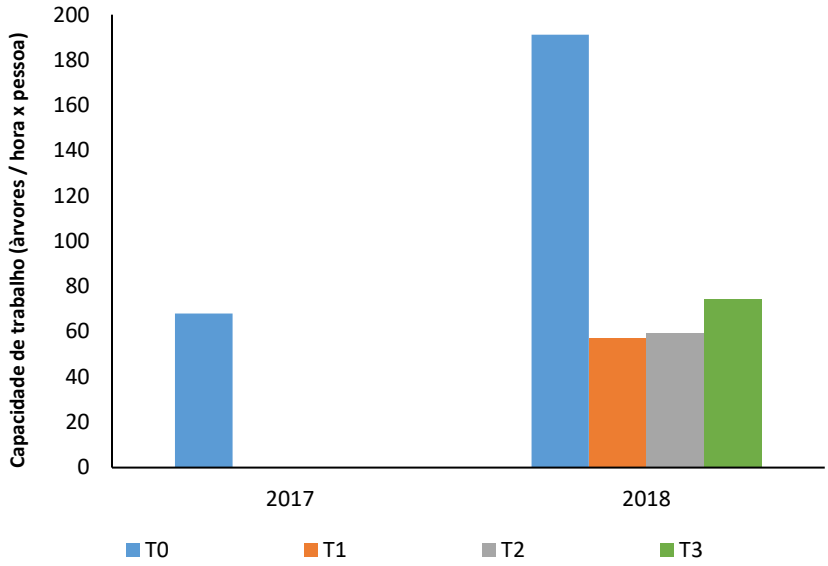


Figura 8 – Capacidade de trabalho na execução da poda manual, por tratamento, em cada um dos anos.

A poda manual efectuada em 2017 no tratamento T0 contribuiu para que no ano seguinte (2018) o tempo gasto na poda manual fosse consideravelmente mais baixo.

Não se verificaram diferenças consideráveis no tempo despendido na poda manual entre os tratamentos T1, T2 e T3 visto que estas modalidades estiveram até 2018 sem serem submetidas a intervenções de poda manual (Figura 4). A intervenção de poda de 2018 foi similar em qualquer destes tratamentos, tendo-se eliminado ramos excessivamente lenhificados que estavam a competir com o eixo central inicialmente definido. Este tipo de intervenção foi substancialmente diferente da executada no tratamento T0, que serviu para eliminar alguns ramos que tendiam crescer para a entrelinha.

Na figura 9 mostra-se a capacidade de trabalho da máquina de podar de discos por tratamento em função da época de realização das intervenções de poda. A capacidade de trabalho da máquina de podar de discos no tratamento T0 em 2017 resulta de apenas se ter efectuado "topping", para o qual apenas é necessária uma passagem de máquina por cada linha de árvores. No caso das restantes intervenções, foram sempre efectuadas 3 passagens de máquina por cada linha de árvores, bem como as respectivas manobras de cabeceira. Tal como seria de esperar não se registaram diferenças assinaláveis na capacidade de trabalho na execução dos cortes de verão, independentemente de serem realizados após a colheita (2017) ou antes da colheita (tratamentos T0 e T3, em 2018).

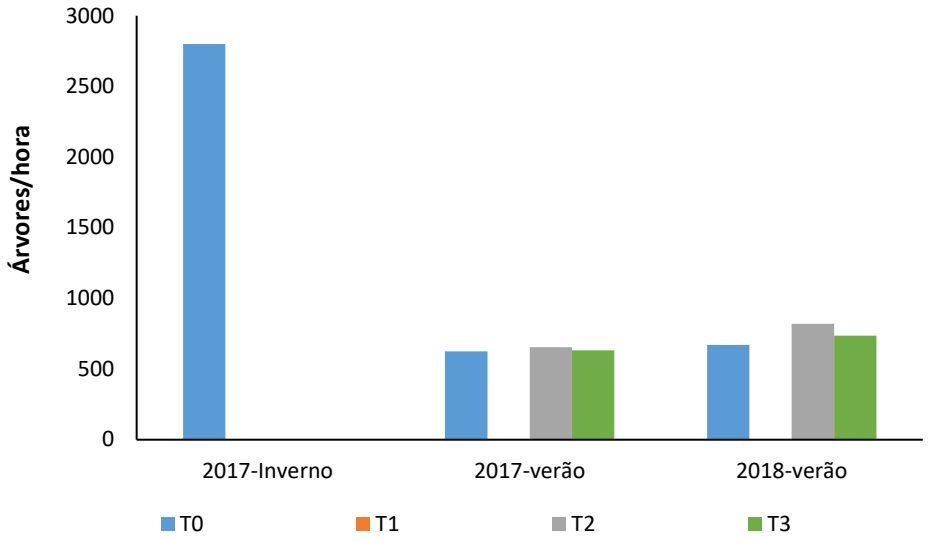


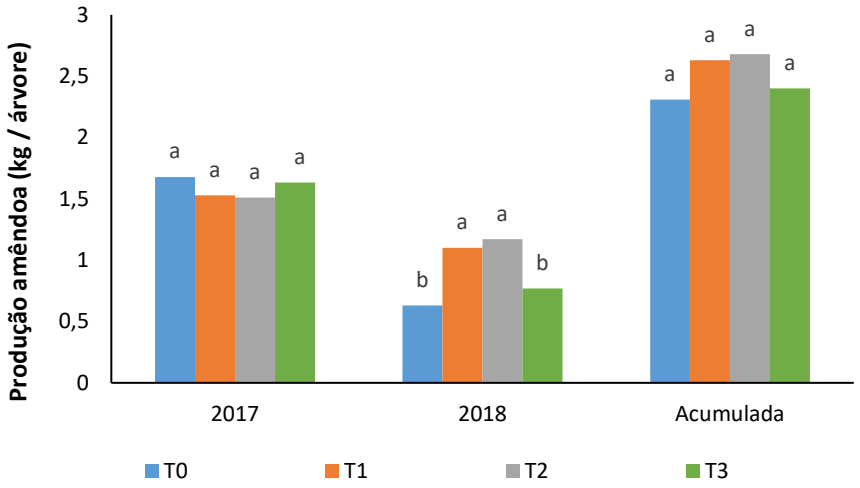
Figura 9 – Capacidade de trabalho na execução da poda mecânica, por tratamento, em cada um dos anos

3.5 Produção de amêndoa

Na figura 10 mostra-se a produção de amêndoa por árvore obtida por cada tratamento em 2017 e 2018, bem como a produção acumulada nos dois anos. Em 2017 não se verificaram diferenças significativas entre os tratamentos ($P>0.1$), com os tratamentos T1 e T2 a registarem a produção mais baixa.

Em 2018 verificaram-se diferenças significativas ($P<0.05$) entre os tratamentos na produção de amêndoa. Os tratamentos T1 e T2 produziram significativamente ($P\leq0.05$) mais do que os tratamentos T0 e T3. Tal revela alguma tendência para a alternância de produção visto que os tratamentos que produziram mais em 2017 tiveram um decréscimo de produção em 2018.

Em termos de produção de amêndoa acumulada não se verificaram diferenças significativas entre os tratamentos ($P>0.1$), com os tratamentos T1 e T2 a registarem os valores mais elevados.



Colunas acompanhadas de letras diferentes diferem significativamente entre si, segundo o teste de separação de médias de Duncan (P≤0,05)

Figura 10 – Produção média de amêndoa por árvore (kg matéria seca) e por tratamento.

3.6 Eficiência de recolha

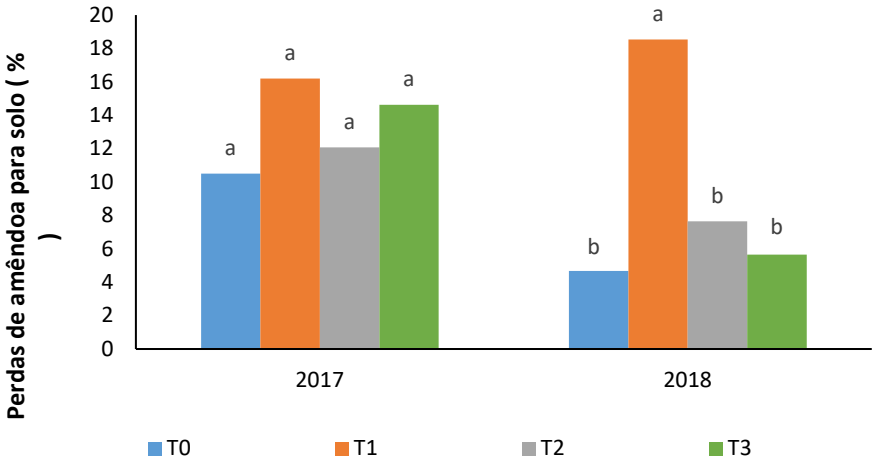
Na figura 11 mostram-se as perdas de amêndoa para o solo por árvore durante a colheita obtidas em cada tratamento em 2017 e em 2018.

Em 2017 não se verificaram diferenças significativas entre os tratamentos (P>0.1), com os tratamentos T1 e T3 a registarem as maiores perdas.

A ausência de intervenções de poda no tratamento T1 leva a que as árvores cresçam livremente revestindo-se de ramos longos e flexíveis, que permitiram a passagem da máquina de colheita sem que se verificasse a ocorrência de danos consideráveis. Naturalmente que uma parte da produção se perdeu para o solo.

A menor percentagem de perdas verificou-se no tratamento T0, o qual estará associado á menor largura de copa e ao facto dos ramos da parte superior da copa não terem produção por serem fundamentalmente ramos ladrões emitidos após o "topping" de inverno realizado neste ano.

A ocorrência de maiores perdas no tratamento T3 em relação ao tratamento T2 poderá dever-se à maior largura de copa das árvores do tratamento T3.



Colunas acompanhadas de letras diferentes diferem significativamente entre si, segundo o teste de separação de médias de Duncan (P≤0,05)

Figura 11. Perdas de amêndoa para o solo por árvore (kg matéria seca) e por tratamento.

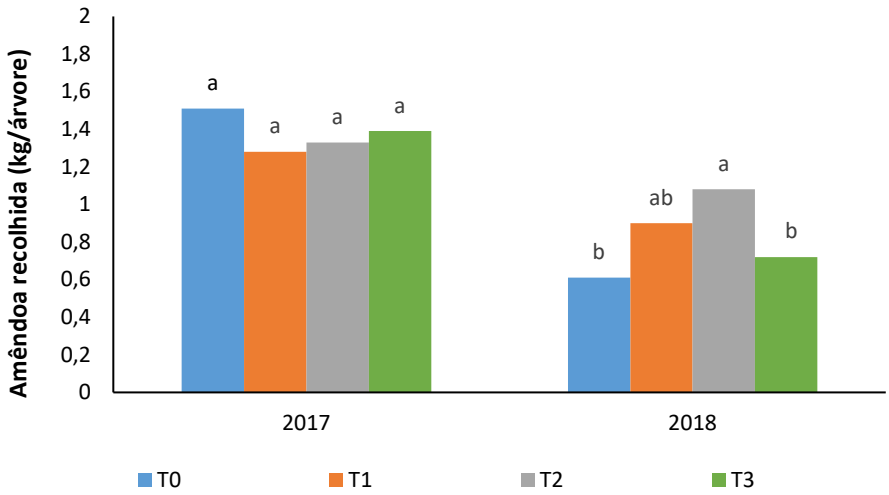
Em 2018 verificaram-se diferenças significativas (P<0.05) entre os tratamentos nas perdas de amêndoa para o solo, com o tratamento T1 a registar perdas significativamente superiores (P≤0.05) aos restantes tratamentos. Neste ano a maior parte das perdas deste tratamento tiveram origem nos ramos altos que excediam a altura da unidade de colheita da máquina automotriz (Figura 12). Estes ramos suportavam parte da produção, pelo que o impacto com a estrutura da máquina de colheita e a sua flexão levava a que as amêndoas aí situadas caíssem para o solo. De referir que nos restantes tratamentos as intervenções de poda realizadas em 2018 para controlo da dimensão das árvores permitiram reduzir a percentagem de perdas de amêndoa para o solo.



Figura 12 – Ramos com amêndoa acima máquina colheita

3.7 Produção recolhida

Na figura 13 mostra-se a massa de amêndoa recolhida por árvore em cada tratamento, em 2017 e em 2018.



Colunas acompanhadas de letras diferentes diferem significativamente entre si, segundo o teste de separação de médias de Duncan (P≤0,05)

Figura 13 – Massa de amêndoa recolhida por árvore (kg matéria seca), por tratamento.

Em 2017 não se verificaram diferenças significativas entre os tratamentos (P>0.1), tal como se tinha registado em termos de produção de amêndoa e de eficiência de recolha.

Em 2018 verificaram-se diferenças significativas (P<0.05) entre os tratamentos na massa de amêndoa recolhida por árvore, com o tratamento T2 a diferir significativamente (P≤0.05) dos tratamentos T0 e T3. Embora o tratamento T1 tenha registado maior percentagem de perdas de amêndoa para o solo (Figura 11), o maior nível produtivo deste tratamento foi suficiente para assegurar a recolha de uma massa de amêndoa superior à registada nos tratamentos T0 e T3.

3.8 Custos de poda

Tendo por base as capacidades de trabalho indicadas nas figuras 8 e 9 e a produção recolhida (Figura 13) calculou-se o custo da poda de 2017 e 2018, por kg de amêndoa recolhida em cada um dos tratamentos. Neste cálculo considerou-se que a máquina de podar de discos custa 70 Euros/hora em regime de prestação de serviços e que a poda manual em prestação de serviços custa 70 euros/dia e por pessoa, incluindo a motosserra e o combustível.

Na figura 14 mostra-se a variação do custo da poda pela amêndoa recolhida, em cada um dos tratamentos. O maior número de intervenções de poda manual do tratamento T0 (poda do agricultor) originou um acréscimo de custo comparativamente aos outros tratamentos. Tal foi mais evidente no caso do tratamento T1, no qual apenas houve uma intervenção de poda manual. O maior custo dos tratamentos T2 e T3 relativamente ao tratamento T1 deve-se às intervenções de poda mecânica realizadas. Será conveniente assegurar a continuidade deste ensaio de modo a perspectivar os custos de poda durante um maior período de tempo.

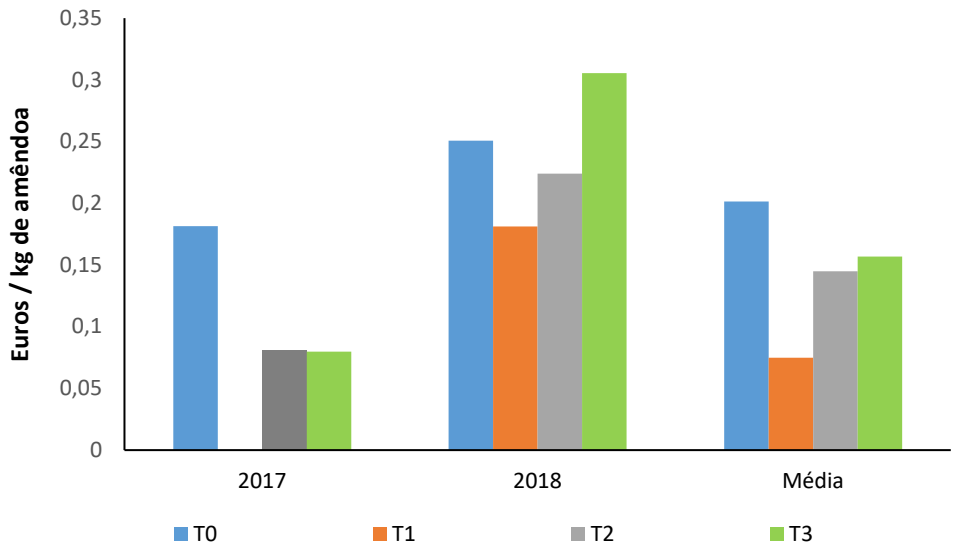


Figura 14. Custo da poda por quilograma de amêndoa recolhida

4. Conclusões

Os resultados obtidos vêm confirmar a necessidade de adequar a dimensão das árvores à máquina de colheita para minimizar as perdas de amêndoa para o solo.

A utilização da máquina de podar de discos permite realizar esse trabalho rapidamente conforme seria de esperar. As intervenções em verde parecem ser uma solução a considerar nomeadamente no controlo da altura das árvores, visto que a emissão de novos lançamentos tende a ser menor.

Será necessário dar continuidade a estes trabalhos durante um maior período para avaliar o efeito na produção de amêndoa, na eficiência de recolha da máquina de colheita e nos custos de poda.

5. Agradecimentos

Este trabalho só foi possível graças à disponibilização de todos os meios pela Torre das Figueiras Sociedade Agrícola Lda.

Referências

1. Cardoso, J. 1965. Os solos de Portugal a Sul do rio Tejo. Direção Geral dos Serviços Agrícolas, Lisboa.
2. Peça, J.O., Dias, A.B., Pinheiro, A.C., Santos, L., Morais, N., Pereira, A.G., Reynolds de Souza, D. 2002. Mechanical pruning of olive trees as an alternative to manual pruning. p. 295-299. Acta Hort. 586, 295-299.
3. Torrents, J. 2015. Estado actual del cultivo superintensivo del almendro, Actas Simposio Nacional de Almendro y otros Frutos secos, Lérida, Espanha 24 Set. p.29-43.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Comparación de los sistemas de formación en seto y en vaso libre con la variedad de almendro 'Soleta'

José Casanova-Gascón[1,*], Marcos Figueras-Panillo[1], Ignasi Iglesias-Castellarnau[2], José M. Roca-Farré[3], Pablo Martín-Ramos[1]

[1] Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte s/n, 22071 Huesca; jcasan@unizar.es.
[2] Agromillora Catalana. Plaça Manel Raventós 3-5, St. Sadurní d'Anoia, 08770 Barcelona
[3] Futuralmond, Avda. de Lleida 20, 25185 La Granja d'Escarp, Lleida

Resumen: El aumento de la demanda de almendra, el desarrollo de nuevas variedades autofértiles y de floración tardía, y el establecimiento de plantaciones en nuevas zonas de regadío han propiciado notables progresos en las técnicas productivas del cultivo del almendro. Una de las más importantes ha sido el aumento de la densidad de plantación, gracias al desarrollo de portainjertos enanizantes. En este trabajo se presenta una comparación entre dos sistemas de formación con la variedad de almendro 'Soleta': en seto sobre portainjerto Rootpac-20, frente a la formación en vaso libre sobre portainjerto GF-677. Para ello, se ha realizado un seguimiento, a lo largo de un ciclo vegetativo, de varios parámetros que reflejan el estado clorofílico (fluorescencia y SPAD) y la intercepción lumínica (LAI/fPAR), y se han evaluado otros condicionantes productivos (floración, cuajado y producción) en momentos puntuales del ciclo. Se han observado diferencias entre ambos sistemas en cuanto a peso medio del fruto, producción por volumen de copa y otras características. El grado de eficiencia en el aprovechamiento de los recursos o *inputs* productivos ha resultado enteramente favorable al nuevo sistema de formación en seto, por lo que su potencial para convertirse en un sistema de referencia en las plantaciones modernas (haciendo uso de cosechadoras cabalgantes similares a las utilizadas para vid y olivo) parece indudable.

Palabras clave: almendro; eficiencia; seto; sistemas de formación; Soleta

1. Introducción

EE.UU., y más concretamente California, lidera la producción mundial de almendra, con un 80% de cuota de mercado. No obstante, en cuanto a área de cultivo se refiere, la Unión Europea concentra el 39% de la superficie mundial de almendro, localizándose en España el 84% de esta y casi un tercio de la superficie mundial [1], con 633.562 ha, concentradas principalmente en la zona mediterránea: en Aragón (20%), Cataluña (7%), Comunidad Valenciana (17%), Murcia (12%), Andalucía (30%) y Castilla la Mancha (8%) [2].

En apenas unos años, el almendro ha pasado de ser un cultivo marginal que se desarrollaba en los suelos pobres y áridos de los campos españoles a representar una producción alternativa a las tradicionales de fruta, cereales o cítricos. Este cambio en el manejo del cultivo ha provocado que en la actualidad el almendro ofrezca una rentabilidad un 10-15% superior a los cereales o al olivo para una misma finca [3]. Paralelamente, el consumo de almendra ha aumentado notablemente, pues la demanda mundial ha crecido a un ritmo del 5% anual [3].

En España, a la coyuntura internacional favorable se han unido otros factores, como el impulso de nuevas variedades de floración tardía (meses de marzo y abril), apenas expuestas a

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3446

las heladas primaverales, autofértiles (menos expuestas a las condiciones climáticas durante la floración), y la introducción del cultivo en regadío.

Desde hace poco menos de una década, se ha comenzado a analizar el comportamiento de plantaciones de almendro de muy alta densidad o superintensivas (con más de 2.000 árboles/ha). En ellas se están ensayando patrones poco vigorosos, sistemas de formación y poda adecuados a este sistema, y la recolección integral mediante cosechadoras cabalgantes, que son utilizadas en el olivar en seto y en la vid en espaldera [4]. Esta conjunción de innovaciones posibilita pensar en un modelo productivo, el seto, basado en paredes productivas y no en árboles individuales [5]. Si bien este tipo de plantación se encuentra en fase experimental y su comportamiento a medio y largo plazo resulta desconocido [4], se presupone gozará de las ventajas –ya comprobadas– obtenidas en los cultivos nombrados anteriormente (vid en espaldera y olivo en seto) [5]: aumento de la eficacia de los tratamientos fitosanitarios y del manejo en general, minimización del mantenimiento del suelo, aceleración de la entrada en producción, posibilidad de cosechado con máquinas cabalgantes, reducción de la mano de obra necesaria y mejora de la rentabilidad del cultivo. Este modelo o sistema de formación denominado SHD o 2D (bidimensional) o SES (*Super Efficient System*), aunque constituye una novedad en almendro, viene utilizándose durante décadas en frutales y está basado en patrones enanizantes [5-7]. Dichos patrones posibilitan disponer de copas más pequeñas y eficientes, y a la vez reducir los costes de producción gracias a la mejor accesibilidad a la copa y a la mecanización.

El propósito general del presente estudio ha sido la realización de un seguimiento de los estados fenológicos y de cultivo a lo largo del ciclo vegetativo, comparando dos sistemas de producción (intensivo *vs*. superintensivo) durante una campaña en términos agronómicos, a través de diversos parámetros productivos. Los resultados obtenidos son de utilidad para la realización de estudios de viabilidad de la implantación del sistema superintensivo en futuras plantaciones en la zona.

2. Material y métodos

2.1. Localización

El estudio se ha llevado a cabo durante el año 2018 en una parcela experimental de almendro dentro de la finca "Mas d'en Félis", en el término municipal de La Granja d'Escarp (Lleida, España) (polígono 5, parcela 592), a 78 metros sobre el nivel del mar, en la zona más occidental de la provincia de Lérida, con coordenadas UTM 31N X=280848,46 e Y=4587769,08. La plantación de almendros en ambos sistemas se realizó a principios de 2010. Para la plantación en seto, las calles se orientaron en dirección norte-sur en la medida en que la topografía de la parcela lo permitió.

2.2. Material vegetal y marcos de plantación

Los dos sistemas de formación se han evaluado con la variedad 'Soleta' ('Blanquerna' × 'Belle d'Aurons'; siglas de la selección: F-4-10, clon 503, nº de registro en la OEW 20054616), obtenida por el CITA (Aragón). Variedad autofértil, de floración tardía, de maduración medio-tardía, y con una interesante calidad y producción.

Para el estudio se han comparado combinaciones de Soleta con dos patrones plantados con diferentes marcos de plantación y sistemas de formación: por una parte, árboles injertados sobre patrón Rootpac 20 (Agromillora Catalana), con un marco de plantación de 4×1 m (2500 árboles/ha), sistema de formación de seto anárquico, de 2,35 m de altura, 1,10 m de anchura, y altura a la cruz de 0,5 m; y por otra, árboles injertados sobre patrón GFF-677 (INRA), con un marco de plantación de 6×6 m (278 árboles/ha), con un sistema de formación de vaso libre y unas dimensiones de 4,85 m de altura, 4,9 m de diámetro máximo, y altura a la cruz de 1,3 m.

2.3. Prácticas culturales

En la finca se ha utilizado riego localizado de alta frecuencia, siendo las dosis aplicadas de 6500 m^3/ha en seto y 7500 m^3/ha en vaso. Para la fertilización se tuvieron en cuenta las características del suelo, así como la meteorología de la zona, que presenta una precipitación inferior a los 300 mm.

En cuanto a manejo del suelo, las líneas de la plantación se mantuvieron limpias de malas hierbas mediante la aplicación de herbicidas, mientras que las calles permanecieron en no-laboreo, y la eliminación de malas hierbas se realizó mediante pases de desbrozadora. Los tratamientos fitosanitarios se aplicaron con un equipo de tractor y atomizador, realizándose según las recomendaciones del asesor de la finca.

La poda, tanto de formación como de producción, se llevó a cabo de forma mecánica, con una máquina de discos rotativos. La recolección se realizó de forma mecanizada para los dos tipos de sistema de formación, aunque el equipamiento empleado fue diferente: los setos se recolectaron mediante máquina cabalgante, mientras que en los árboles en vaso se utilizó un equipo vibrador de troncos y paraguas recolector.

2.4. Diseño experimental

En el caso de los árboles en seto, y por su pequeño volumen, se marcaron cinco bloques de tres árboles consecutivos cada uno. En el caso de los árboles en vaso, se determinó como unidad experimental un árbol aislado, eligiéndose tres al azar.

2.5. Conteos de flores, fruto cuajado y recolección

En los frutales, el número inicial de flores diferenciadas durante el año anterior es el primer componente de la producción [8]. En el almendro la regularidad de la producción requiere la formación de un gran número de flores cada año (elevada densidad floral) y su adecuada polinización con el fin de obtener un cuajado aceptable y, a su vez, una cosecha rentable [9-11]. El cuajado es el porcentaje de flores que persisten hasta la maduración y depende de la viabilidad del polen y los carbohidratos disponibles, que pueden variar anualmente [12]. Un cuajado elevado se considera una característica deseable, que se ha relacionado con una elevada densidad floral y una buena calidad de la flor [13,14].

En marzo se realizó un conteo del número total de flores de cada una de las unidades experimentales durante el estado fenológico D (momento en el que se ven los pétalos), y en julio se procedió a un conteo de frutos para determinar la tasa de cuajado. Se escogió una fecha avanzada para este conteo para evitar errores producidos por frutos expurgados por el propio árbol que no lleguen a maduración. En septiembre se recolectaron los frutos para cada una de las unidades experimentales de ambos sistemas de formación, extrayéndose muestras homogéneas de 1 kg de almendra con cáscara de cada una de las repeticiones para obtener los resultados de rendimiento y humedad, así como para el estudio de la forma del fruto y la semilla.

2.6. Equipamiento y determinaciones

Las medidas de fluorescencia se realizaron con un Handy PEA (*Plant Efficiency Analyser*; Hansatech Instruments), los días 31 de mayo, 6 de julio, 19 de julio, 7 de agosto, 22 de agosto y 1 de septiembre de 2018. Para cada bloque de árboles en formación seto se tomaron 10 medidas, y para cada individuo en formación vaso se tomaron 17 medidas.

El estado de la clorofila en hoja se monitorizó de forma quincenal a lo largo de todo el periodo vegetativo (mayo-septiembre). Para ello, se utilizó un medidor SPAD-502 (Minolta). En los árboles en seto, se recogieron 20 valores de cada árbol, distribuyéndose equitativamente entre las orientaciones este y oeste. En los árboles en vaso, se distribuyeron las medidas a lo largo de todo el perímetro de la copa, obteniéndose un total de 30 medidas para cada árbol y fecha.

Las medidas de radiación fotosintéticamente activa se llevaron a cabo con un ceptómetro lineal AccuPAR LP-80 (Decagon Devices, Inc.), con periodicidad quincenal, al mediodía solar. Para los árboles en seto se realizaron 9 medidas por unidad experimental. Para los árboles en vaso se tomaron 21 medidas para cada uno de los tres árboles, distribuyéndose en tres líneas con siete medidas en cada una. A partir de las medidas, se determinaron dos índices: el fPAR (Fracción Absorbida de la Radiación Fotosintéticamente Activa) y el LAI (Índice de Área Foliar).

2.7. Análisis estadístico

El análisis estadístico se llevó a cabo con el software IBM SPSS Statistics v.22.

3. Resultados y discusión

3.1. Mediciones de fluorescencia y clorofila (SPAD)

El análisis de fluorescencia (medida de la fluorescencia variable (Fv) y estimación de la eficiencia cuántica máxima de la fotoquímica del PSII (Fv/Fm)) no ha evidenciado diferencias significativas entre árboles en seto y en vaso, con valores indicativos de la ausencia de estrés ambiental en las plantas (Fv/Fm>0,8), similares a los reportados por Ranjbarfordoei, *et al.* [15]. Los resultados obtenidos difieren de los del estudio realizado por Ben Yahmed, *et al.* [16], en el que para el patrón Rootpac-20 se obtuvieron valores de Fv/Fm inferiores a 0,52, lo que sugería que este patrón podría influir en la eficiencia del PSII, y presentaría una menor tolerancia, menor capacidad fotosintética y menor eficiencia que GF-677.

Los resultados de las mediciones del SPAD han sido similares para vaso y para seto a lo largo del periodo de estudio (Figura 1). Los valores obtenidos, coherentes con los de López-López, *et al.* [17] y Erdal, *et al.* [18], son indicativos de un aumento constante de la concentración clorofílica en hojas durante el ciclo vegetativo. A diferencia de lo observado por Jiménez, *et al.* [19], que obtuvieron menores concentraciones de clorofila para el patrón Rootpac-20 que para GF-677, en este estudio las concentraciones fueron similares para ambos patrones, lo que sugiere una buena adaptación de Rootpac-20 a las condiciones de los suelos mediterráneos. Así pues, a partir de este método también se puede concluir que el estado de las plantas fue adecuado para ambos sistemas de formación.

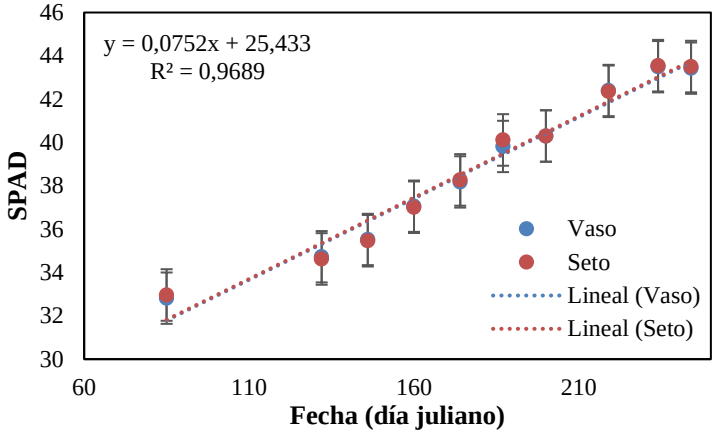


Figura 1. Análisis de la evolución temporal del SPAD para la variedad 'Soleta' conducida en vaso y en seto. En el eje de abscisas se muestra el día del año (2018).

3.2. Radiación fotosintéticamente activa

En el sistema en seto, se han observado diferencias significativas entre la parte externa y la parte interna del seto (Figura 2, arriba), tanto en intercepción de luz (fPAR) como en el índice de área foliar (LAI). En los árboles formados en vaso libre (Figura 2, abajo) se han apreciado diferencias en el fPAR y la LAI según las regiones bajo la copa (central, intermedia y más externa).

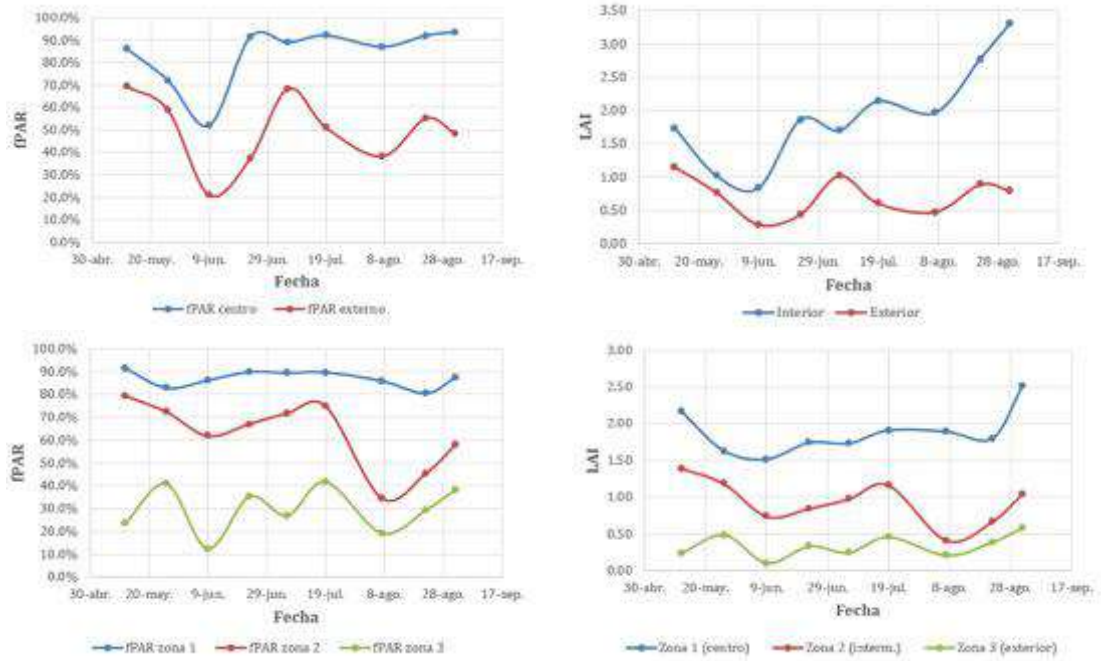


Figura 2. Evolución del fPAR (izquierda) y LAI (derecha) para las dos regiones estudiadas de los setos (arriba) y de los árboles en vaso (abajo) a lo largo de todo el periodo de estudio y para la variedad 'Soleta', año 2018.

El análisis de intercepción lumínica, aunque no permite comparar ambos sistemas debido a su dependencia de la geometría del árbol, permite advertir la existencia de zonas donde la intercepción lumínica fue muy alta para el sistema de formación en vaso. La zona más interna en este sistema de formación podría presentar problemas de "hojas sumidero" u órganos incorrectamente iluminados. En cualquier caso, en ninguna de las zonas se plantearon problemas de inducción floral, ya que estos se producen cuando la intercepción baja del 20%.

Con el objeto de determinar los porcentajes horarios y diarios de intercepción lumínica del seto y del vaso libre, en el año 2019 se realizará la medida del PAR en la interlínea de ambos sistemas, en dirección perpendicular a las líneas de los árboles (de tronco a tronco) y en tres fechas a lo largo del período vegetativo (julio, agosto y septiembre).

3.3. Parámetros productivos

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los resultados de medidas productivas –con sus valores mínimo, máximo, media y desviación típica–, que se comentan en detalle en las subsecciones siguientes.

Tabla 1. Efecto del sistema de formación en los parámetros productivos de la variedad 'Soleta' en el año 2018 en la Finca Mas d'en Felix (La Granja d'Escarp, Lleida).

Variable	Sistema	Obs	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica
Nº flores (n)/árbol	Seto	15	843,00	4985,00	**2300,00**	1094,57
	Vaso	3	14079,00	27977,00	**22991,33**	6316,78
Fruto cuajado (n)/árbol	Seto	15	266,00	583,00	**418,73**	88,81
	Vaso	3	3700,00	5835,00	**4537,67**	930,24
Volumen copa (m^3)/árbol	Seto	15	2,05	2,05	**2,05**	0,00
	Vaso	3	59,80	67,85	**64,25**	3,34
Perímetro tronco (mm)	Seto	15	228,00	301,00	**269,73**	23,32
	Vaso	3	525,00	595,00	**558,67**	28,64
Cuajado fruto (%)	Seto	15	7,32	53,97	**22,65**	12,05
	Vaso	3	15,15	26,28	**20,76**	4,54
Fruto entero (g/árbol)	Seto	15	2172,17	4928,82	**3364,67**	719,26
	Vaso	3	70862,75	114923,08	**88201,33**	19172,22
Almendra limpia (g/árbol)	Seto	15	1122,73	2535,95	**1741,00**	369,72
	Vaso	3	26540,30	36245,80	**32480,90**	4250,45
Producción/perímetro(g/mm)	Seto	15	4,29	8,51	**6,43**	1,13
	Vaso	3	50,55	65,19	**58,00**	5,98
Productividad (g/mm^2)	Seto	15	0,21	0,38	**0,30**	0,05
	Vaso	3	1,21	1,47	**1,30**	0,12
Radio tronco (mm)	Seto	15	36,31	47,93	**42,95**	3,71
	Vaso	3	83,60	94,75	**88,96**	4,56
Área tronco (mm^2)	Seto	15	4138,85	7213,46	**5835,97**	991,55
	Vaso	3	21944,67	28186,70	**24914,70**	2557,23

3.4. Floración y cuajado

Tanto la floración como el cuajado han dado lugar a resultados muy variables, que ponen a la vista la heterogeneidad entre individuos/árboles dentro de cada sistema. Las desviaciones han sido significativamente menores en la media de número de frutos cuajados que en la media de número de flores, lo que parece indicar que es el primer parámetro el que presenta una mayor regularidad. En base a los datos recogidos, se puede concluir que las tasas de cuajado en ambos sistemas han sido similares.

Tombesi, *et al.* [20] estudiaron la tasa de cuajado en una plantación con una densidad similar a los individuos en formación vaso estudiados en el presente documento. Observaron que, al igual que en los resultados mostrados en la tabla anterior, la tasa de cuajado presentaba una alta variabilidad entre individuos y entre diferentes años, desde un 18,4% hasta un 36,0%. Sin embargo, Kodad, *et al.* [21] obtuvieron unas tasas de cuajado significativamente inferiores, con valores de 16,6±6,4% y 17,3±6,6% en los años 2003 y 2004, respectivamente.

3.5. Peso de los frutos enteros

El peso de los frutos con mesocarpio ha sido mucho mayor en la formación en vaso que en la formación en seto, pudiendo ser referida dicha discrepancia a diferencias en la maduración (el fruto en la formación en vaso estaba menos maduro y, por tanto, presentaba mayor grado de humedad). El peso medio del fruto sin mesocarpio también ha presentado grandes diferencias entre la formación en seto y en vaso, siendo significativamente mayor en esta última (Tabla 2). A título orientativo, Socias i Company, *et al.* [22] obtuvieron un peso medio de fruto para la variedad 'Soleta' de 3,63 g.

Tabla 2. Efecto del sistema de formación en el peso medio de la almendra entera (gramos) de la variedad 'Soleta' en el año 2018 en la Finca Mas d'en Felix (La Granja d'Escarp, Lleida). Letras diferentes indican diferencias significativas entre sistemas para *P≤0,05*.

Sistema	Peso (g)	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Grupos
Seto	2,444	0,043	2,354	2,534	A
Vaso	3,367	0,056	3,250	3,483	B

3.6. Rendimiento del fruto

El rendimiento medio del fruto ha presentado diferencias significativas entre la formación en seto y en vaso, siendo un 2,7% mayor en la primera (Tabla 3). Socias i Company, *et al.* [22] obtuvieron rendimientos de fruto para la variedad 'Soleta' entre el 27% y el 35%.

Tabla 3. Efecto del sistema de formación en el rendimiento medio del fruto (en porcentaje) de la variedad 'Soleta' en el año 2018 en la Finca Mas d'en Felix (La Granja d'Escarp, Lleida). Letras diferentes indican diferencias significativas entre sistemas para *P≤0,05*.

Sistema	Medias LS	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Grupos
Vaso	35,423	0,439	34,514	36,333	A
Seto	38,119	0,340	37,414	38,823	B

3.7. Producción por volumen de copa

La producción por volumen de copa (kg con endocarpio/m^3 de copa) en la formación en vaso ha sido casi la mitad (0,142 kg/m^3 menor) que en la formación en seto (Tabla 4). Este aspecto es importante en la futura evolución del sistema en seto, ya que indica un mayor aprovechamiento de la luz, con menos zonas de sombra en el árbol y con un volumen de hojas que se alcanza más rápidamente. Teniendo en cuenta que esta es la primera plantación experimental, se puede proponer la formación de setos de menor anchura de calle, mayor anchura y mayor altura de seto.

Tabla 4. Efecto del sistema de formación en las diferencias de producción por volumen de copa (kg con endocarpio/m^3 de copa) de la variedad 'Soleta' en el año 2018 en la Finca Mas d'en Felix (La Granja d'Escarp, Lleida). Letras diferentes indican diferencias significativas entre sistemas para *P≤0,05*.

Sistema	Medias LS	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Grupos
Vaso	0,151	0,035	0,078	0,225	A
Seto	0,293	0,015	0,260	0,326	B

3.8. Producción y peso del grano

Las producciones de cascara y grano obtenidas en el año 2018 para cada uno de los sistemas se exponen en la Tabla 5. Los rendimientos han sido superiores en vaso que en seto (Tabla 5).

Tabla 5. Efecto del sistema de formación en las producciones de almendra (cascara y grano) de la variedad 'Soleta' en el año 2018 en la Finca Mas d'en Felix (La Granja d'Escarp, Lleida). Letras diferentes indican diferencias significativas entre sistemas para *P≤0,05*.

Sistema	Prod. cáscara (kg/árbol)	Prod. grano (kg/árbol)	Prod. cáscara (kg/ha)	Prod. grano (kg/ha)
Vaso	26,96 A	9,48 A	7.470 A	2.635 A
Seto	1,57 B	0,66 B	3.140 B	1.659 B

Sin embargo, es preciso remarcar que el seto del presente estudio corresponde a la denominada primera versión o V1, plantado en el año 2010 con una distancia entre filas de 4 m y 1 m entre árboles, similar a la que se utilizaba en frutales. Posteriormente, se redujo la distancia a 3,5 m × 1,2 m entre árboles (V2). En esta nueva versión, el árbol se condujo en un sistema en seto con ramificación múltiple y copa desorganizada a base de cortes consecutivos en verano para su formación sin eje central, con la que se han obtenido ya en fincas comerciales producciones próximas a los 3.000 kg de almendra grano/ha. Más recientemente, y con objeto de optimizar la intercepción de luz por el seto, la distancia se ha reducido a 3 m entre filas, para así obtener una relación anchura calles/altura seto lo más próxima posible a 1:1,1 (la correspondiente por la latitud a sistemas de formación 2D), además de optimizar la ocupación del volumen de copa como en la V2, con una copa desorganizada. Esta versión (V3) es la utilizada actualmente en las nuevas plantaciones, con el objetivo de alcanzar los 3.000 kg de grano/ha en el 4º año de plantación y siempre con un manejo técnico óptimo.

Dentro de cada sistema de formación, la almendra en grano ha mantenido tamaños muy homogéneos, pero la producida en vaso ha sido mayor con respecto a la de seto (Tabla 6). Ello podría deberse a una carga floral (o carga de frutos) por volumen de copa superior en el seto, que se podría optimizar con técnicas de regulación como el aclareo de flores.

Tabla 6. Análisis del peso medio de la almendra en grano, desviación típica y correlación con el rendimiento, comparando los dos sistemas de formación.

Sistema	Media pepita (g)	Desviación (g)	Correlación
Seto	0,93	0,04	-0,70
Vaso	1,19	0,09	0,48

4. Conclusiones

En el presente estudio se han comparado dos sistemas de formación para almendro, el seto y el vaso libre, con unas condiciones similares de cultivo durante la campaña 2018. Los análisis de fluorescencia y SPAD indican que el estado general de la planta en ambos sistemas de formación ha sido adecuado y que no ha existido manifestación de estrés. El análisis de intercepción lumínica sugiere la existencia de zonas donde la intercepción lumínica ha sido muy alta para el sistema de formación en vaso, pudiendo presentar problemas de "hojas sumidero". Las tasas de cuajado han sido similares en ambos sistemas de formación. El peso medio del fruto ha sido significativamente mayor en vaso, mientras que el rendimiento de fruto ha resultado significativamente mayor en seto. Se deduce, pues, que el sistema de formación en seto es más eficiente, aunque menos productivo, que el sistema de formación en vaso. No obstante, la evolución técnica del nuevo sistema de almendro en seto ha llevado en la actualidad a una mejora significativa de la eficiencia productiva, gracias a la reducción de las distancias de plantación y a la optimización de la ocupación de la copa por la vegetación mediante la conducción y la poda, con respecto al sistema evaluado en el presente estudio o V1. Es lo que se conoce como versiones V1, V2 y V3 (actual). Por ello, y por las ventajas que presenta en cuanto a manejo, los esfuerzos orientados a la mejora del sistema de formación en seto parecen estar enteramente justificados.

Referencias

1. Consejería de Agricultura Pesca y Desarrollo Rural. *Caracterización del sector de la almendra en Andalucía*; Junta de Andalucía: Sevilla, 2016; p 37.
2. MAPA. Estadísticas de superficies y producciones de cultivos. https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/superficies-producciones-anuales-cultivos/
3. Miarnau, X.; Torgueti, L.; Batlle, I.; Romero, A.; Rovira, M.; Alegre, S. La revolución del almendro: Nuevas variedades y modelos productivos. In *Simposio nacional de almendro y otros frutos secos*, IRTA, Ed. Generalitat de Catalunya: Lérida, Spain, 2015; pp 1-54.
4. Arquero, O.; Belmonte, A.; Casado, B.; Cruz-Blanco, M.; Espadafor, M.; Fernández, J.; Gallego, J. *Manual del almendro*. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, Servicio de Publicaciones y Divulgación, Junta de Andalucía: Sevilla, 2013; p 78.
5. Roca, J.M.; Gómez, J.M.; López, M. El almendro en seto SHD: La recolección con máquinas cabalgantes. *Olint* **2014**, *25*, 35-47.
6. Iglesias, I. Sistemas de plantación 2D: una novedad en almendro una realidad en frutales. Hacia una alta eficiencia. *Revista de Fruticultura* **2019**, *67*, 22-44.
7. Iglesias, I. Costes de producción, sistemas de formación y mecanización en frutales, con especial referencia al melocotonero. *Revista de Fruticultura* **2019**, *69*, 50-59.
8. Werner, D.; Mowrey, B.; Chaparro, J. Variability in flower bud number among peach and nectarine cultivars. *HortScience* **1988**, *23*, 578-580.
9. Felipe, A.J. *El almendro: el material vegetal*. Mira Editores: Zaragoza, 2000.
10. Godini, A. Almond fruitfulness and role of self-fertility. *Acta Horticulturae* **2002**, 191-203.
11. Kester, D.; Griggs, W. Fruit setting in the almond: The effect of cross-pollinating various percentages of flowers and the pattern of flower and fruit drop. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science* **1959**, *74*, 214-219.
12. Stephenson, A.G. Flower and fruit abortion: Proximate causes and ultimate functions. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **1981**, *12*, 253-279.
13. Socias, R.; Alonso, J.M.; Aparisi, J.G. Fruit set and productivity in almond as related to self-compatibility, flower morphology and bud density. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **2015**, *79*, 754-758.
14. Bernad, D.; Socias, R. Bud density and shoot morphology of some self-compatible almond selections. *Acta Horticulturae* **1998**, *470*, 273-279.
15. Ranjbarfordoei, A.; Samson, R.; Van Damme, P. Photosynthesis performance in sweet almond [*Prunus dulcis* (Mill) D. Webb] exposed to supplemental UV-B radiation. *Photosynthetica* **2011**, *49*, 107-111.
16. Ben Yahmed, J.; Ghrab, M.; Ben Mimoun, M. Eco-physiological evaluation of different scion-rootstock combinations of almond grown in Mediterranean conditions. *Fruits* **2016**, *71*, 185-193.
17. López-López, M.; Calderón, R.; González-Dugo, V.; Zarco-Tejada, P.; Fereres, E. Early detection and quantification of almond red leaf blotch using high-resolution hyperspectral and thermal imagery. *Remote Sensing* **2016**, *8*.
18. Erdal, Í.; Türkmen, R.; Akgün, A. Variations in chlorophyll, SPAD values and some nutrient concentrations depending on chlorosis in peach leaves. *Lucrări Ştiinţifice* **2016**, *59*, 13-16.
19. Jiménez, S.; Pinochet, J.; Abadía, A.; Moreno, M.Á.; Gogorcena, Y. Tolerance response to iron chlorosis of *Prunus* selections as rootstocks. *HortScience* **2008**, *43*, 304-309.
20. Tombesi, S.; Lampinen, B.D.; Metcalf, S.; DeJong, T.M. Yield in almond is related more to the abundance of flowers than the relative number of flowers that set fruit. *Calif. Agric.* **2017**, *71*, 68-74.
21. Kodad, O.; Socias i Company, R. Densidad floral, cuajado y características de los frutos del almendro en relación al tipo de ramificación. *ITEA: Información Técnica Económica Agraria* **2008**, *104*, 433-447.
22. Socias i Company, R.; Felipe Mansergas, A. 'Belona' y 'Soleta', dos nuevos cultivares de almendro. *ITEA, información técnica económica agraria: revista de la Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario* **2006**, *102*, 398-421.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Comprobación de un sistema de aplicación variable basado en mapas de vegetación obtenidos con un vehículo aéreo no tripulado (UAV)

J. Campos[1], M. Gallart[1], J. Llop[1], R. Salcedo[1], P. Ortega[1], E. Armengol[1], E. Gil[1]

[1] Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología, Universidad Politécnica de Cataluña, Esteve Terradas, 8 - 08860 - Castelldefels, Barcelona (España); javier.campos@upc.edu.

Resumen: Las características de la vegetación son un aspecto fundamental a tener en cuenta para determinar el volumen de aplicación de productos fitosanitarios. El alto grado de variabilidad intraparcelaria ha aumentado la dificultad de obtener soluciones generales para la determinación del volumen óptimo de aplicación. En este sentido, actualmente se está trabajando con sistemas de aplicación variable a tiempo real considerando las características de la vegetación. Este estudio presenta el proceso de pulverización variable en base a mapas de prescripción, desde la creación del mapa de prescripción hasta la obtención del mapa de aplicación real. Los ensayos se realizaron en Torrelavit (Barcelona) en una parcela de viña de 2.21 ha de la variedad Chardonnay. El mapa de prescripción se obtuvo combinando las imágenes multiespectrales obtenidas con un UAV con la información proporcionada por DOSAVIÑA®. Este mapa de prescripción fue cargado en un prototipo de aplicación variable, obteniendo un mapa de aplicación real después del proceso de aplicación. Los resultados obtenidos muestran la posibilidad de ahorra alrededor de un 20% la cantidad de agua gastada y la cantidad de materia activa respecto a un tratamiento convencional de productos fitosanitarios.

Palabras clave: Mapa de prescripción, mapa de aplicación real, Dosaviña®

1. Introducción

La aplicación de fitosanitarios en base a la vegetación ha sido ampliamente estudiada [p. ej. 1, 2, 3]. En todos los casos, el objetivo principal ha sido la adaptación de la cantidad total del producto fitosanitario a las características del cultivo. El alto grado de variabilidad en las características de la vegetación ha aumentado la dificultad de obtener soluciones generales bien adaptadas a todos los cultivos y situaciones. En este sentido, la aplicación variable es capaz de reducir el efecto de la variabilidad intraparcelaria, ajustando el volumen de caldo a las características de la vegetación en cada momento.

Actualmente se pueden diferenciar dos tipos de tecnología de aplicación variable: unas están basadas en la aplicación en tiempo real a partir de información obtenida por sensores; y otras se fundamentan en mapas de prescripción.

La tecnología de aplicación variable basada en sensores en tiempo real elimina la necesidad del conocimiento previo del cultivo, ya que se aplica en función de lo que los sensores determinen en cada momento [p.ej. 4, 5].

Por otro lado, la tecnología de aplicación variable basada en mapas de prescripción presenta la necesidad de realizar previamente a la aplicación el estudio del cultivo, ya sea mediante datos recopilados manualmente en campo o mediante teledetección. En este sentido, [6] evaluaron la capacidad de un pulverizador hidráulico modificado para la

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3431

aplicación variable de herbicida basada en diferentes mapas de prescripción con el volumen de aplicación prescrito al controlador del pulverizador concluyendo que el sistema era capaz de combatir los rodales de malas hierbas en cultivos de maíz y soja. En otro estudio, [7] desarrollaron un prototipo de aplicación variable en base a mapas, obtenidos de imágenes espectrales aéreas, para combatir las malas hierbas en el cultivo del arándano. Cabe destacar que la tecnología de aplicación variable de productos fitosanitarios en base a mapas de prescripción es ampliamente utilizada comercialmente en cultivos extensivos, pero no en cultivos 3D, donde la tecnología es muy incipiente.

Los objetivos de este trabajo fueron el desarrollo y puesta a punto de un sistema de aplicación variable de productos fitosanitarios en base a mapas de prescripción realizados a partir de imágines espectrales obtenidas mediante UAV para viña, la determinación de la precisión del sistema, y el cálculo de los ahorros potenciales respecto a una aplicación convencional.

2. Materiales y métodos

2.1. Ubicación de los ensayos

Los ensayos se realizaron en una parcela de viña de 2.21 ha situada en la comarca del Penedès (Barcelona) (X: 392194 m, Y: 4588000 m, ETRS89 UTM31). Se trata de una parcela de la variedad Cabernet Sauvignon con un sistema de formación Guyot Doble y un marco de plantación de 1.2 m entre plantas y 2.2 m entre hileras. Los ensayos se llevaron a cabo durante el estado fenológico BBCH 77-79 [8].

2.2. Adquisición de datos para la caracterización de la vegetación

La parcela se sobrevoló con un vehículo aéreo no tripulado (UAV) cargado con una cámara multiespectral RedEGDE (Micasense, Seattle, USA), equipada con 5 bandas espectrales (R, G, B, RedEdge y NIR). El vuelo se realizó a 95 m sobre el nivel del suelo y se planificó para realizar un 80% de solape frontal y un 60% de solape lateral.

2.3. Pulverizador adaptado para la aplicación variable

El sistema de aplicación variable de instaló en un pulverizador hidroneumático (Saher, Barcelona) con un tanque de 1000 L y con un ventilador axial de 800 mm de diámetro. Con el fin de seguir el mapa de prescripción, se equipó el pulverizador con a) un sensor de presión GEMS 1200 series (Gems Sensors & Controls, Plainville, USA) para monitorizar en todo momento la presión real y poder reajustarla en función de lo establecido por el mapa de prescripción, b) un sistema de control electrónico (Estel S.L., Barcelona) compuesto por un receptor GNSS con una frecuencia de 1 Hz, una pantalla táctil y un controlador de secciones. La función del sistema de control eléctrico fue posicionar al pulverizador en la parcela mediante el receptor GNSS, determinar el volumen de aplicación prescrito en función del mapa previamente cargado y modificar la presión de trabajo para ajustarse al caudal de las boquillas deseado.

2.4. Sistema de ayuda a la decisión óptima del volumen de aplicación

Se utilizó el sistema de ayuda a la decisión (DSS) DOSAVIÑA® [9] basado en el método "leaf wall area" (LWA) [10] para la determinación del volumen de aplicación óptimo a pulverizar basado en las características estructurales de la vegetación.

2.5. Metodología del proceso

El proceso completo de la aplicación variable basada en mapas se muestra en la Figura 1. Se obtuvo una ortofoto a partir de las imágenes espectrales adquiridas con la cámara multiespectral embarcada en el UAV. La ortofoto fue calibrada radiométricamente utilizando cuatro estándares

de escalas de grises (22, 32, 44 y 51% de reflectancia de escala de grises) colocados en el suelo durante el vuelo, con el fin de transformar valores digitales de escala de grises de 12 bits en valores de reflectancia. A partir de estos nuevos valores se calculó el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) [11] (Ecuación 1).

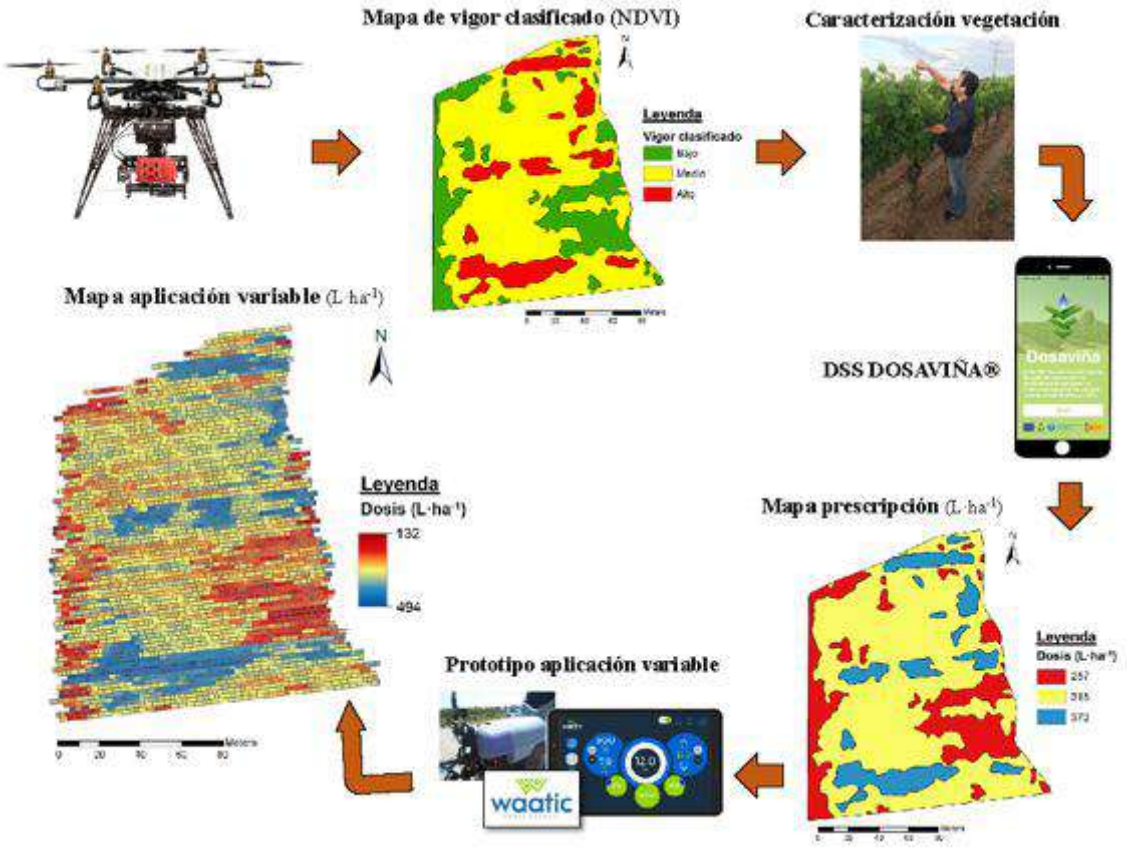


Figura 1. Esquema del proceso: desde el UAV hasta el mapa de aplicación real

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Debido al crecimiento en líneas de la viña, la imagen fue segmentada por un umbral de NDVI con el fin de eliminar malas hierbas, sombras y suelo entre líneas de cultivo. Una vez aplicado el umbral de NDVI, se realizó una interpolación por el método de distancia inversa ponderada (IDW) para obtener un mapa continuo de NDVI. Finalmente, se realizó un procesado de este mapa con el objetivo de agrupar los valores de NDVI en tres niveles, que luego se suavizaron mediante un filtrado por el vecino más próximo para obtener el mapa de vigor clasificado final. El proceso completo se realizó utilizando el software QGIS [12]. Una vez creado el mapa de vigor clasificado en tres zonas de vigor diferenciadas (bajo, medio y alto), fueron localizadas en la parcela. Para obtener el volumen de aplicación óptimo mediante DOSAVIÑA® [13], se realizaron 15 caracterizaciones manuales de la vegetación en cada una de las zonas de vigor diferenciadas (Tabla 1).

Tabla 1. Caracterización de la vegetación y volúmenes obtenidos mediante DOSAVIÑA®

Vigor	Altura vegetación (m)	Anchura vegetación (m)	LWA* ($m^2_{vegetación}$·ha^{-1})	Volumen (L·ha^{-1})
Bajo	0.92	0.37	8363.6	257
Medio	1.11	0.44	10045.5	315
Alto	1.27	0.48	11545.5	372

*LWA calculado para una distancia entre hileras de 2.2 m

Los valores obtenidos se introdujeron en el mapa de vigor utilizando el software QGIS [12] para obtener el mapa de prescripción. El mapa de prescripción fue cargado mediante USB a la pantalla táctil instalada previamente en el pulverizador. Además, se cargó en el sistema información relativa a los parámetros de trabajo para cada zona de vigor (Tabla 2). El número y el tipo de boquilla se mantuvieron constantes en todos los casos, utilizando boquillas de cono hueco Albuz ATR (Albuz Saint-Govain, Evreux, Francia).

Tabla 2. Condiciones de aplicación para cada una de las zonas de vigor

Vigor	Volumen (L·ha^{-1})	Tipo de boquilla	Nº de boquillas	Presión (bar)	Velocidad (km·h^{-1})
Bajo	257	ATR Amarillo	8	6	6.8
Medio	315	ATR Amarillo	8	9.2	6.8
Alto	372	ATR Amarillo	8	12.8	6.8

Una vez cargados los parámetros en la pantalla táctil, se inició la pulverización. Desde el inicio, el sistema registró con una frecuencia de 1 segundo la posición del pulverizador en la parcela, el volumen de aplicación real y la presión de trabajo ajustada. Al final, el sistema generó un mapa de aplicación real que se descargó desde la pantalla táctil mediante USB.

2.6. Comparación del mapa de prescripción con el mapa de aplicación real

Con el fin de evaluar el sistema de aplicación variable utilizado, se compararon el mapa de prescripción y el mapa de aplicación real utilizando el software QGIS [12]. Se generaron aleatoriamente 44,000 puntos aproximadamente para realizar la comparación. Cada uno de estos puntos georeferenciados adquirió un valor prescrito "r" y un valor real "p". Para cada valor del valor esperado "r", se asignaron 11 intervalos de tolerancia (cada uno de ellos representaba un aumento del 5% en comparación con el anterior, desde el 0% hasta el 50% de desviación). Se determinó si el valor de p estaba dentro del rango calculado [r-i, r+i]. Una vez comparados todos los puntos, también se calculó el porcentaje de coincidencia entre los valores esperados y los reales. Finalmente, para visualizar el nivel de precisión del mapa de aplicación real, se realizó una interpolación siguiendo el método de distancia inversa ponderada (IDW).

3. Resultados y discusión

3.1. Mapas generados

En este subapartado se muestran los mapas generados durante todo el proceso de aplicación variable. La secuencia de mapas generados es la siguiente: (1) mapa de NDVI, (2) mapa de vigor clasificado, (3) mapa de prescripción y (4) mapa de aplicación real (Fig. 2).

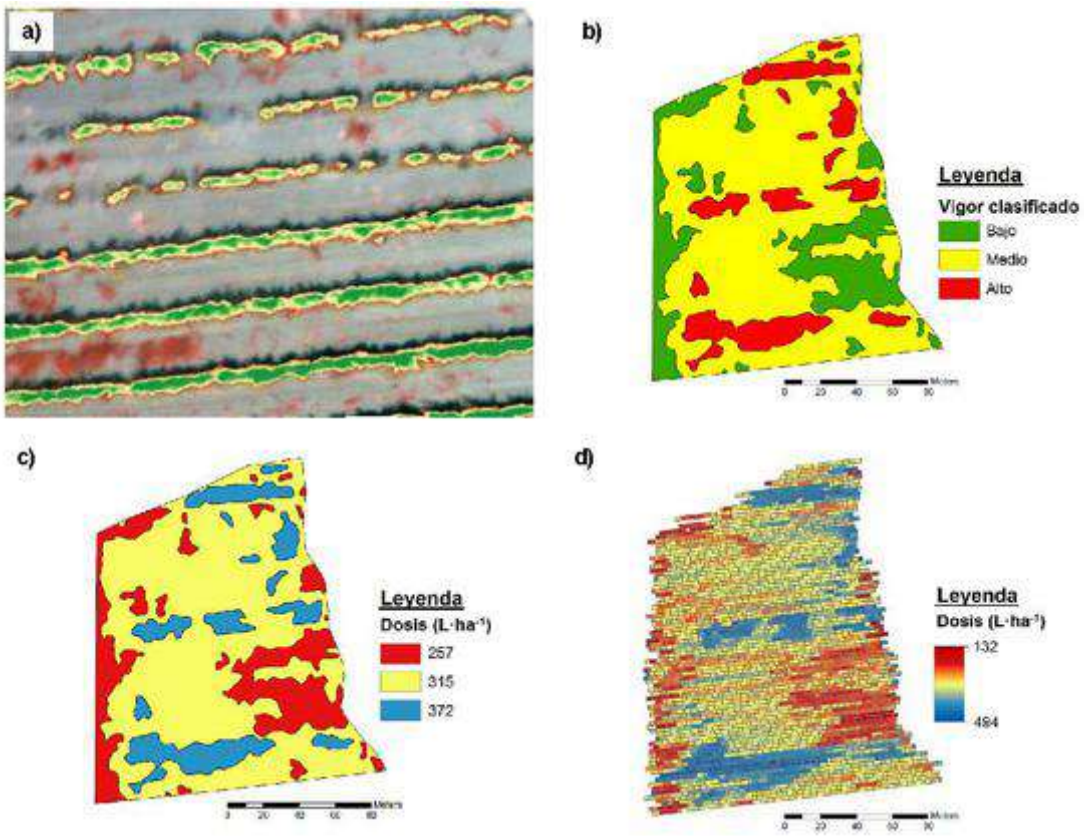


Figura 2. a) Mapa de NDVI puro; b) Mapa de vigor clasificado; c) Mapa de prescripción; d) Mapa de aplicación real

Mapa de NDVI

Con las imágenes obtenidas con la cámara multiespectral embarcada en el UAV, se generó el mapa de NDVI (Figura 2a). Este mapa nos indica el estado de la vegetación

Mapa de vigor clasificado

Una vez obtenido el mapa de NDVI, se procesó para obtener tres zonas diferenciadas en la parcela. El mapa de vigor obtenido se muestra en la Figura 2b. Este mapa nos determina zonas diferenciadas de vigor. Teniendo en cuenta la superficie total de la parcela (2.21ha), las zonas de vigor se han distribuido de la siguiente manera: la zona de bajo vigor (zona verde) representa un 20% de la superficie total, la zona de vigor medio (zona amarilla) representa un 66% de la superficie total y la zona de vigor alto (zona naranja) representa un 14% de la superficie total de la parcela.

Mapa de prescripción

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para cada una de las zonas caracterizadas manualmente. Los valores obtenidos fueron 257 $L{\cdot}ha^{-1}$ para el vigor bajo, 315 $L{\cdot}ha^{-1}$ para el vigor medio y 372 $L{\cdot}ha^{-1}$ para el vigor alto. A partir de estos valores se generó el mapa de prescripción (Figura 2c).

Mapa de aplicación real

Durante el proceso de aplicación el sistema de aplicación variable guardó información respecto a la posición del pulverizador en la parcela, el volumen de aplicación real y la presión real de

trabajo, con una frecuencia de 1 s. Al final, el sistema generó un mapa de aplicación real (Figura 2d) que se descargó desde la pantalla táctil instalada en el pulverizador.

3.2. Precisión del sistema

Para cuantificar la correspondencia entre el mapa de prescripción y el mapa de aplicación real, se establecieron diferentes umbrales desde 0% hasta 50% de tolerancia. El umbral más restrictivo (0%) determinó el porcentaje de puntos en los que no había diferencia entre el mapa de prescripción y el mapa de aplicación real. En este caso, sólo el 1,3% de los puntos se clasificaron exitosamente. En el extremo opuesto, la tolerancia más alta (50%) cuantificó el porcentaje de puntos en los que se detectaron variaciones de ±50% del volumen aplicado. En este caso, el 99,8% de los puntos se clasificaron exitosamente. Suponiendo que desde un punto de vista práctico se pudiera permitir una tolerancia de ±10%, el sistema clasificó el 75% de los puntos exitosos. La Figura 3 muestra la precisión distribuida alrededor de la parcela, clasificada según el nivel de umbral establecido. Las zonas oscuras de los mapas indican las zonas en las que la precisión del sistema superó los umbrales establecidos. El porcentaje principal de zonas oscuras corresponde a las zonas de transición, donde se ordenó al pulverizador que modificara la presión de trabajo. Como muestran los resultados, en términos de comparación entre el mapa actual y el mapa de prescripción, el método de aplicación de dosis variable obtuvo una buena precisión.

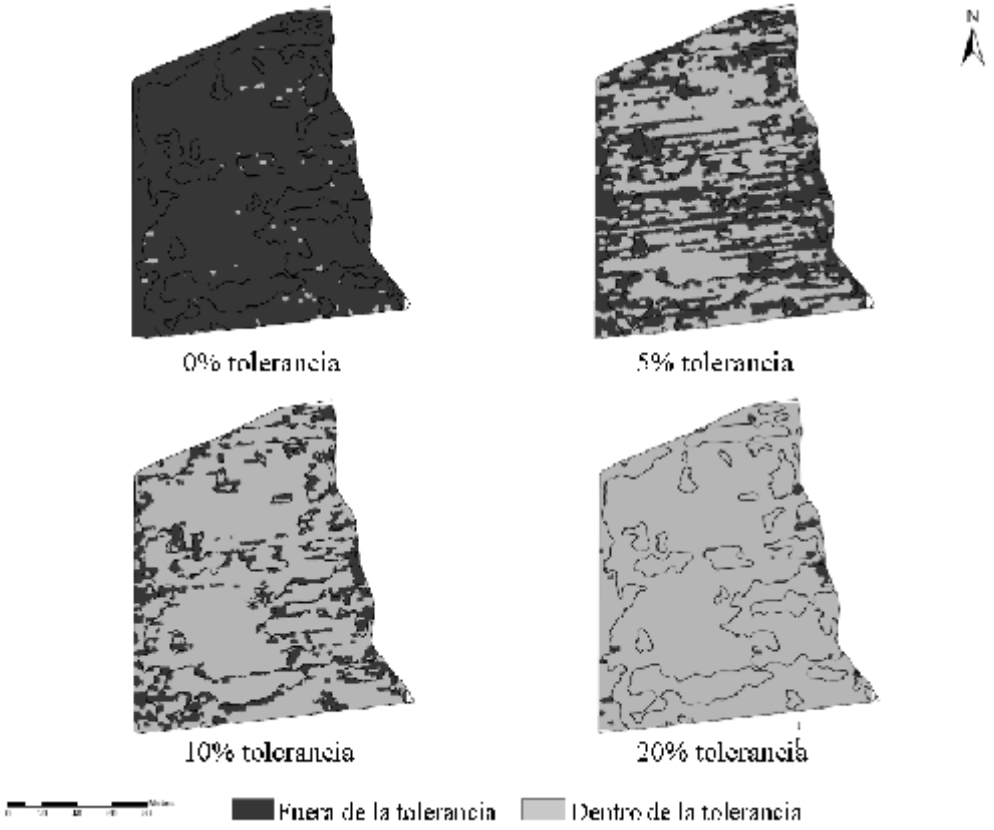


Figura 3. Distribución de la precisión a lo largo de la parcela

3.3. Cuantificación de ahorros

El proceso de aplicación variable basado en mapas se comparó con una aplicación convencional basado en un volumen constante de 380 L·ha^{-1} ha, volumen normalmente utilizado por los agricultores de la zona. Para estos dos casos, se calculó la cantidad de agua utilizada, el

tiempo total de aplicación suponiendo 45 minutos para el llenado de la máquina y la cantidad hipotética de materia activa (m.a.) utilizada, suponiendo una concentración de cobre de 0,4% (400 $g \cdot hL^{-1}$) (Tabla 3). Los resultados muestran un efecto positivo del uso de la aplicación de dosis variable. A pesar de no obtener un ahorro en el tiempo empleado, la cantidad de líquido consumido y la cantidad de materia activa se redujeron en un 18.4% utilizando la aplicación variable de productos fitosanitarios basada en mapas.

Tabla 3. Comparación entre una aplicación convencional y una aplicación variable (VRA)

	Vol. ($L \cdot ha^{-1}$)	**Vol. aplicado (L)**	**Ahorro vol. (%)**	**Nº llenados**	**Tiempo (h)**	**Ahorro tiempo (%)**	**m.a. (kg)**	**Ahorro m.a. (kg)**
Conv	380	808	0	1	6.8	0	3.23	0
VRA	257/315/372	659	18.4	1	6.8	0	2.64	18.4

4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha puesto a prueba un prototipo de aplicación variable de productos fitosanitarios en base a mapas de prescripción. Los resultados mostrados anteriormente ponen de manifiesto algunos hechos importantes: 1)El sistema es capaz de cargar y leer un mapa de prescripción y modificar la presión de trabajo según su posición en la parcela; 2) El mapa de vigor clasificado se transformó de manera fácil a un mapa de prescripción teniendo en cuenta las características estructurales de la vegetación; 3) Se ha obtenido una precisión de aproximadamente el 80% con el sistema, asumiendo una tolerancia del 10% de desviación; 4) El uso de mapas de vigor clasificados combinados con el uso del DOSAVIÑA® para determinar el volumen óptimo de aplicación puede reducir alrededor de un 20% la cantidad de agua gastada y la cantidad de materia activa, siempre y cuando se mantenga la concentración.

5. Agradecimientos

Este trabajo se ha financiado parcialmente por los "Ajuts a les activitats de demostració (operació 01.02.01 de Transferència Tecnològica del Programa de desenvolupament rural de Catalunya 2014–2020)" y la beca FI-AGAUR. La validación del Dosaviña ha sido desarrollada en el marco del proyecto LIFE PERFECT project: Pesticide Reduction using Friendly and Environmentally Controlled Technologies (LIFE17 ENV/ES/000205).

Referencias

1. Furness G.O. Distance calibration and a new pesticide label format for fruit trees and grapevines in Australia. Proceedings of the Seventh Workshop on Spray Application Techniques in Fruit Growing. Cuneo, Italy, 2003, pp. 293–303.
2. Pergher G., Petris R. Pesticide dose adjustment in vineyard spraying and potential for dose reduction. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript ALNARP 08 011. 2008, Vol. X.
3. Gil E., Gallart M., Llorens J., Llop J., Bayer T., Carvalho C. Spray adjustments based on LWA concept in vineyard. Relationship between canopy and coverage for different application settings. International Advances in Pesticide Applications. Aspects of Applied Biology, 2014, 122 25-32.
4. Giles D.K., Delwiche M.J., Dodd, R.B. Sprayer control by sensing orchard crop characteristics: orchard architecture and spray liquid savings. J. Agric. Eng. Res, 1989, 43, 271–289.
5. Gil E., Escolà A., Rosell J.R., Planas S., Val, L. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. Crop Protection, 2007, 26, 1287-1297.
6. Vogel J.W., Wolf R.E., Dille A. Evaluation of a Variable Rate Application System for Site-Specific Weed Management. ASAE. Paper No. 051120, St Joseph, MI, USA, 2008.
7. Michaud M., Watts K.C., Percival D.C., Wilkie K.I. Precision pesticide delivery based on aerial spectral imaging. Canadian Journal of Biosystems Engineering. 2008, 50, 2.9-2.15

8. Meier U. BBCH-Monograph. Growth stages of plants - Entwicklungsstadien von Pflanzen - Estadios de las plantas - Développement des Plantes. Blackwell Wissenschaftsverlag, Berlin und Wien. 1997, 622 p
9. UMA-UPC. 2018. DOSAVIÑA®. Decision Support System for determining the optimal volume rate in vineyard. URL: https://dosavina.upc.edu (last accessed August 2018)
10. Walklate P., Cross J. An examination of Leaf-Wall-Area dose expression. Crop Protection, 2012, 35, 132-134.
11. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 1973, 309-317.
12. QGIS Development Team, 2012. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. https://qgis.org.
13. Gil E., Llorens J., Landers A., Llop J., Giralt L. Field validation of DOSAVIÑA, a decision support system to determine the optimal volume rate for pesticide application in vineyards. European Journal of Agronomy, 2011, 35(1), 33-46; doi:10.1016/j.eja.2011.03.005

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Deteção remota aplicada aos espaços verdes urbanos do Mediterrâneo

C. M.G. Pedras[1], H.M. Fernandez[2], R. Lança[3], F. M. Granja-Martins[4]

[1] Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food (LEAF), Instituto Superior de Agronomia, University of Lisbon, Universidade Algarve; cpedras@ualg.pt
[2] Research Centre for Spatial and Organizational Dynamics (CIEO), Universidade Algarve, Faro, Portugal; hfernand@ualg.pt
[3] Universidade Algarve, Faro, Portugal; rlanca@ualg.pt
[4] Research Centre for Spatial and Organizational Dynamics (CIEO), Universidade Algarve, Faro, Portugal; fmmartin@ualg.pt

Resumo: A tendência crescente de urbanização tem gerado uma maior procura pela água para a rega dos espaços verdes urbanos. Em clima mediterrâneo (Algarve, Portugal) a rega é necessária quase todo o ano. Sempre que o sistema de rega não é o mais adequado, ou as plantas não são as menos exigentes em água, resulta num aumento da evapotranspiração, do escoamento superficial e/ou percolação profunda. O consumo de água (potável) pode ser bastante reduzido com uma cuidadosa seleção das plantas, sistemas de rega eficientes e boas práticas de condução da água. O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência do uso da água nos espaços verdes urbanos de São Brás de Alportel (Algarve) no que se refere à caracterização da vegetação, aos dados climáticos, à análise dos sistemas de rega, ao cálculo das necessidades hídricas das plantas e ao índice de vegetação, NDVI. Este índice permitiu estudar a paisagem urbana através da observação mensal das diferença-.s no estado e no desenvolvimento da vegetação. Na maioria dos jardins foi possível estabelecer uma relação entre as necessidades de água de rega e o NDVI, e entender se a atual manutenção é a mais adequada à paisagem urbana regada e sustentável.

Palavras chave: NDVI, Espaços verdes urbanos, Evapotranspiração, Consumo de água, Desempenho dos sistemas de rega.

1. Introdução

A área dos espaços verdes tem vindo a aumentar consideravelmente nos meios urbanos por assegurarem um conjunto de funções e serviços dos quais dependem a qualidade de vida dos utentes das cidades. Dentro dos vários serviços e funções que reúnem, destaca-se a permeabilidade para o escoamento de águas superficiais, a atenuação de efeitos de poluição atmosférica e acústica, a melhoria estética das cidades, as áreas de habitat, entre outras características, que têm motivado o aumento de áreas verdes no interior das cidades. Mas, se por um lado, estes espaços apresentam vários aspetos positivos, por outro, um dos grandes problemas da manutenção de um espaço verde é a quantidade de água que é utilizada na rega.

A água de rega dos espaços verdes das cidades tem vindo a representar uma parte crescente no consumo total de água urbana, na maior parte dos casos potável, em zonas mediterrâneas onde é necessário recorrer à rega durante quase todo o ano. Estes espaços são caracterizados por apresentarem uma grande heterogeneidade de espécies de plantas no que se refere às necessidades hídricas. Assim, é necessária a determinação das necessidades hídricas para

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.4170

entender se o sistema de rega satisfaz os objetivos para o qual foi projetado ou se pelo contrário a água está a ser aplicada por excesso ou por defeito.

Tendo como base a qualidade visual de um espaço verde, estudos na área dos sistemas de informação geográfica e da deteção remota têm vindo a oferecer novas perspetivas de interagir com o ambiente. A recolha de imagens aéreas tinha um elevado custo de aquisição, mas o paradigma mudou com a utilização dos veículos aéreos não tripulados. A estes veículos pode ser acoplado sensores que permitem recolher informação sobre determinados parâmetros biofísicos da vegetação [1] pelo que têm vindo a ser, cada vez mais, usados como indicadores de qualidade ambiental. Uma vegetação saudável apresenta um claro contraste entre a luz refletida na banda do visível e a banda do infravermelho próximo [2]. Dada a relação entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o coeficiente de cultura (Kc) [3], esta pode ser usada para análise da distribuição geográfica da evapotranspiração e da gestão da água em grandes áreas com vegetação. Este estudo visou, assim, estudar a atual manutenção dos jardins urbanos públicos da vila de São Brás de Alportel e definir as estratégias que permitem melhorar a eficiência no uso da água de rega e minimizar o seu impacto no ambiente, mantendo a qualidade paisagística dos mesmos. Para tal foi analisada em simultâneo a informação relativa às necessidades hídricas dos espaços verdes, a água rega aplicada pela Câmara de São Brás de Alportel, o desempenho dos sistemas de rega e o índice de vegetação NDVI.

2. Materiais e métodos

O estudo decorreu nos espaços verdes urbanos da vila de São Brás de Alportel (Algarve, sul de Portugal) em 2016 (Figura 1). Esta vila encontra-se na transição entre o litoral e a serra e apresenta 45 espaços verdes urbanos (Figura 2) com área de 3.6 ha. O clima é temperado com invernos suaves e verões quentes e secos (classificação Köppen: Csa). A temperatura média mensal varia entre 10.3ºC e 24.2ºC em janeiro e agosto, respetivamente ([4]: 31J/01C, serie 1942-2018). A precipitação concentra-se principalmente nos meses de novembro a fevereiro com 59% da precipitação anual (797 mm) ([4]: 31J/01C, serie 2010-2018).

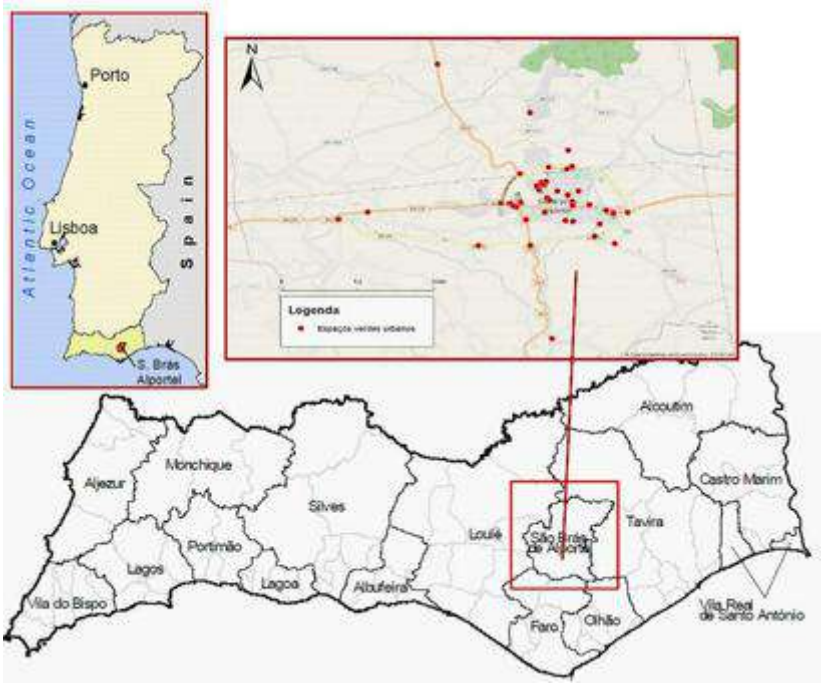


Figura 1 – Localização da Vila de São Brás de Alportel.

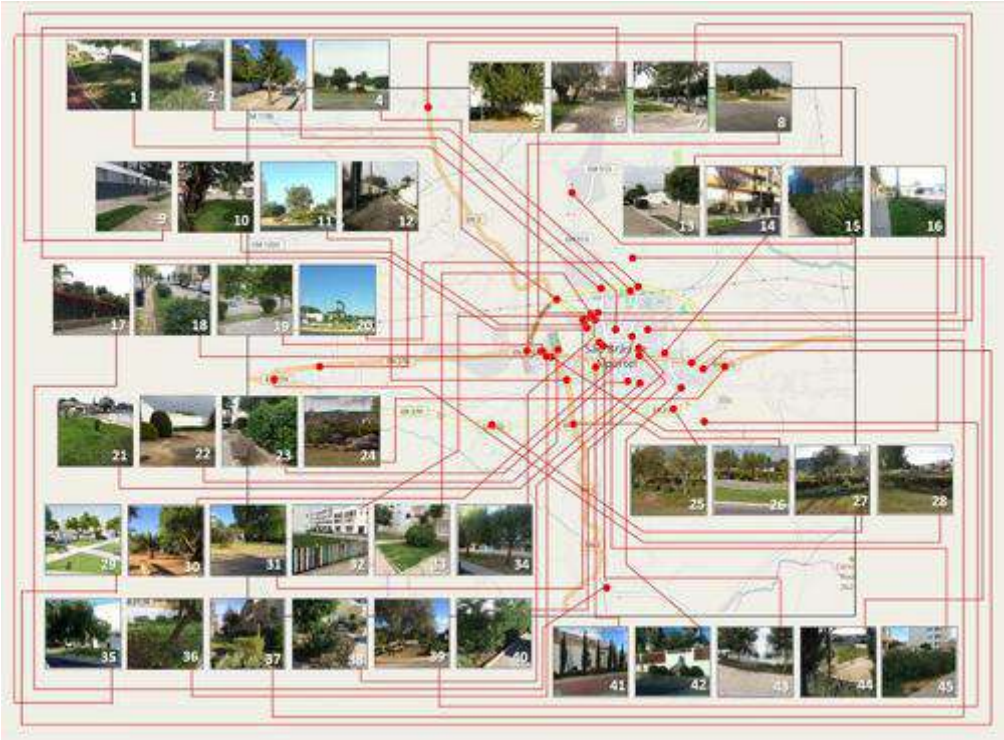


Figura 2 – Localização dos 45 espaços verdes urbanos na vila de São Brás de Alportel

A rega dos espaços verdes urbanos usa a rede de distribuição pública de água potável. Os métodos de rega mais usados são aspersão e microrrega. No entanto, há ainda espaços verdes regados manualmente. Alguns jardins têm dois tipos de rega em simultâneo, por exemplo, aspersão e microrrega (Quadro 1).

Quadro 1 - Sistemas rega dos espaços verdes urbanos de São Brás de Alportel.

Nº JARDIM	TIPO DE REGA	Nº JARDIM	TIPO DE REGA	Nº JARDIM	TIPO DE REGA
1	AMR	16	A	31	AMRM
2	A	17	MR	32	A
3	MR	18	A	33	A
4	A	19	A	34	A
5	A	20	A	35	A
6	A	21	A	36	AMR
7	A	22	AM	37	A
8	A	23	AMRM	38	A
9	A	24	A	39	AMR
10	A	25	A	40	MR
11	A	26	A	41	MR
12	MR	27	A	42	MR
13	MR	28	A	43	MR
14	AMR	29	A	44	AMR
15	AMR	30	AMR	45	MR

Legenda:
A – Aspersão; AM – Aspersão e Manual; AMR – Aspersão e Microrrega; AMRM – Aspersão, Microrrega e Manual; MR – Microrrega.

A cobertura mais comum é a relva (*stenotaphrum secundatum* e *zoysia* sp.) complementada com outra vegetação, nomeadamente oliveiras (*olea europaea)*, alecrim (*rosmarinus officinalis*), rosmaninho (*lavandula* spp.), loendro (*nerium oleander*) e cipreste (*cupressus sempervirens*).

A evapotranspiração do espaço verde ou da paisagem [5], ET_L (mm/dia) foi calculada pela da seguinte equação:

$$ET_L = K_L \times ET_O \quad (1)$$

onde, ET_o é a evapotranspiração de referência (mm/dia), K_L é o coeficiente da paisagem (adimensional). O valor de K_L [5] obtém-se da equação:

$$K_L = K_v \times K_d \times K_{mc} \times K_{sm} \quad (2)$$

em que, K_v é o coeficiente de vegetação, que caracteriza a ET_L para um solo quase ou totalmente coberto por um dado tipo de vegetação, não sujeita a sombreamento nem stress hídrico, e em condições de máxima evapotranspiração (ET) para a sua espécie, K_d é o coeficiente de densidade de plantação e serve para adequar ET_L a diferentes densidades das plantas de um dado tipo de vegetação, K_{mc} é o coeficiente de microclima, para tomar em consideração o microclima onde as plantas se desenvolvem no que se refere às condições que favorecem ou limitam a ET da vegetação e K_{sm} é o coeficiente de stress intencional que traduz a condução da rega, com ou sem stress hídrico.

As necessidades brutas de rega (*GIWR*) são obtidas da equação:

$$GIWR = \frac{ET_L - P}{UD} \quad (3)$$

sendo P a precipitação efetiva (mm) e UD é a uniformidade de distribuição (%).

As avaliações aos sistemas de rega em funcionamento foram realizadas de acordo com os procedimentos descritos em [6] e [7], sendo UD dada pela seguinte equação:

$$UD = 100 \times \frac{z_{lq}}{z_{la}} \quad (4)$$

em que: Z_{lq} é a altura média de água recolhida no menor quartil (mm) e Z_{la} é a média das alturas de água recolhidas (mm).

O índice de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) definido por [1] é a razão entre a diferença das refletâncias máximas e mínimas da vegetação, pela soma dessas mesmas refletâncias, permitindo distinguir a vegetação saudável (mais próximo de 1) da vegetação que sofre algum tipo de stress (mais próximo de 0). O NDVI é definido pela equação:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (5)$$

sendo: ρNIR a refletância do infravermelho próximo e ρRed a refletância do vermelho.

No presente estudo foram recolhidas imagens com a camara Canon SX260 HS acoplada num veículo aéreo não tripulado (Phantom2). Esta camara regista imagem NIR-green-blue (bandas: infravermelho próximo, verde e azul), por isso foi substituído na Equação 5 a reflêtancia do vermelho pela refletância do azul, obtendo-se o designado NDVI modificado [8].

3. Resultados e discussão

A Figura 3 apresenta a localização dos sistemas de rega avaliados: A) a rega por aspersão e B) sistema de microrrega. Na rega por aspersão obtiveram-se valores de UD 40% determinados a partir de 50 coletores distribuídos na parcela. Na microrrega foram recolhidos volumes de água em 32 gotejadores e obteve-se UD 60%.



Figura 3 – Localização da zona da avaliação dos sistemas de rega.

Esta análise recaiu sobre os jardins com sistema de rega por aspersão: 1, 2, 14, 22, 25, 26, 27, 28, 30, 33, 34, 35, 36 e 37. Nestes jardins ET_L foi determinado considerando as plantas mais exigentes em água. A Figura 4 mostra, para o ano de 2016, os valores de precipitação (linha azul), a água de rega aplicada pelo município (barra verde) e das necessidades brutas de rega (linha preta). Nos meses de verão a precipitação foi praticamente nula, no entanto, em maio 2016 verificou-se um valor elevado de precipitação (135 mm) o que não é comum ocorrer. Por outro lado, verificou-se ainda que na maioria dos meses desse ano, o volume de água aplicado pela rega foi maior que os valores de *GIWR*. Há assim, um potencial de poupança de água (de cerca de 19800 mm/ano) que poderá trazer benefícios económicos e ambientais.

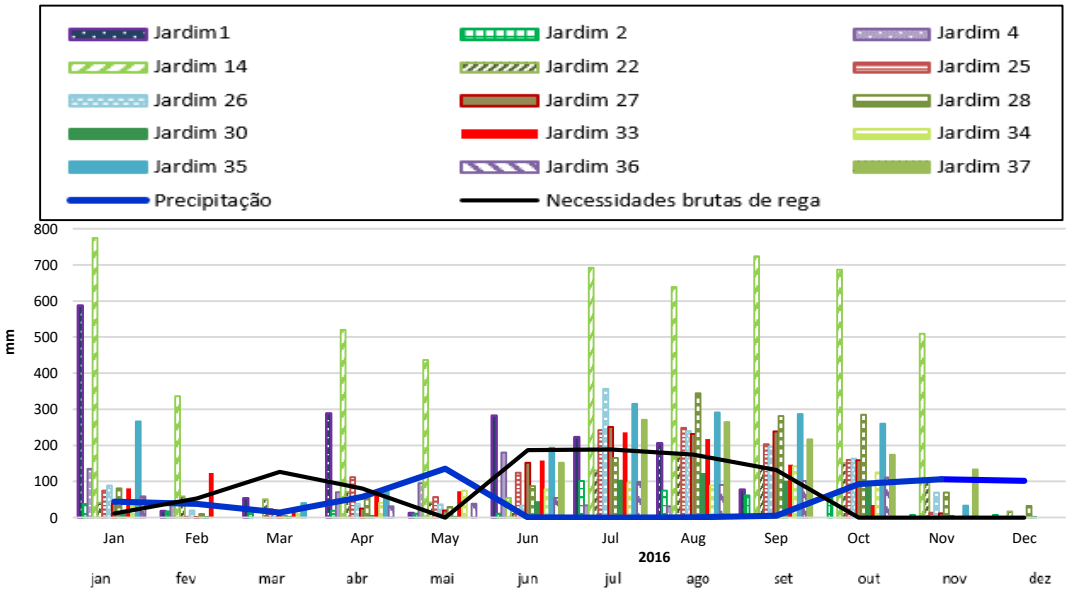


Figura 4 –Precipitação (linha azul), evapotranspiração (barras de várias cores) e necessidades brutas de rega (linha preta) mensais dos jardins com aspersão em São Brás de Alportel.

A Figura 5 mostra os ortofotomosaicos onde estão espacializados os 45 espaços verdes urbanos existentes em São Brás de Alportel. A produção dos ortofotomosaicos foi realizada com imagens aéreas *NIR-Green-Blue* a 100 m de altitude. Os ortofotomosaicos são de falsa cor, em que a vegetação está representada por uma coloração laranja.

A Figura 6 mostra mapa de NDVI modificado dos jardins públicos se São Brás de Alportel: 1, 2, 3, 6, 8, 9, 20, 30, 32, 33, 34, 35, 36 e 40. Os elementos antrópicos e os corpos de água estão representados com uma coloração laranja (valores negativos), o solo nú e vegetação com stress com cor amarela (valores próximos de zero) e vegetação saudável representada com cor verde (valores próximos de 1).

A Figura 7 mostra os mapas de valores de NDVI modificado do jardim numero 33 para duas datas distintas: 20 de maio (esquerda) e 9 de junho (direita). A imagem de 20 maio apresenta valores de NDVI mais elevados (zona A e B), o que sugere uma maior atividade fotossintética da cobertura verde, isto é, mais biomassa. É também neste mês de maio que a precipitação é mais elevada (135 mm) e simultaneamente o jardim é regado (73 mm). A imagem de 9 de junho apresenta um decréscimo de NDVI, principalmente na zona B, em que a precipitação foi quase nula e a rega (158 mm) não foi suficiente para colmatar o valor de GIWR (187 mm). Numa análise geral, verifica-se que há um bom aspeto visual em todos os jardins durante o ano (valores médios de NDVI acima de 0.5), mesmo nos meses em que não ocorreu precipitação, tendo sido utilizada a rega para satisfazer as necessidades hídricas das plantas.

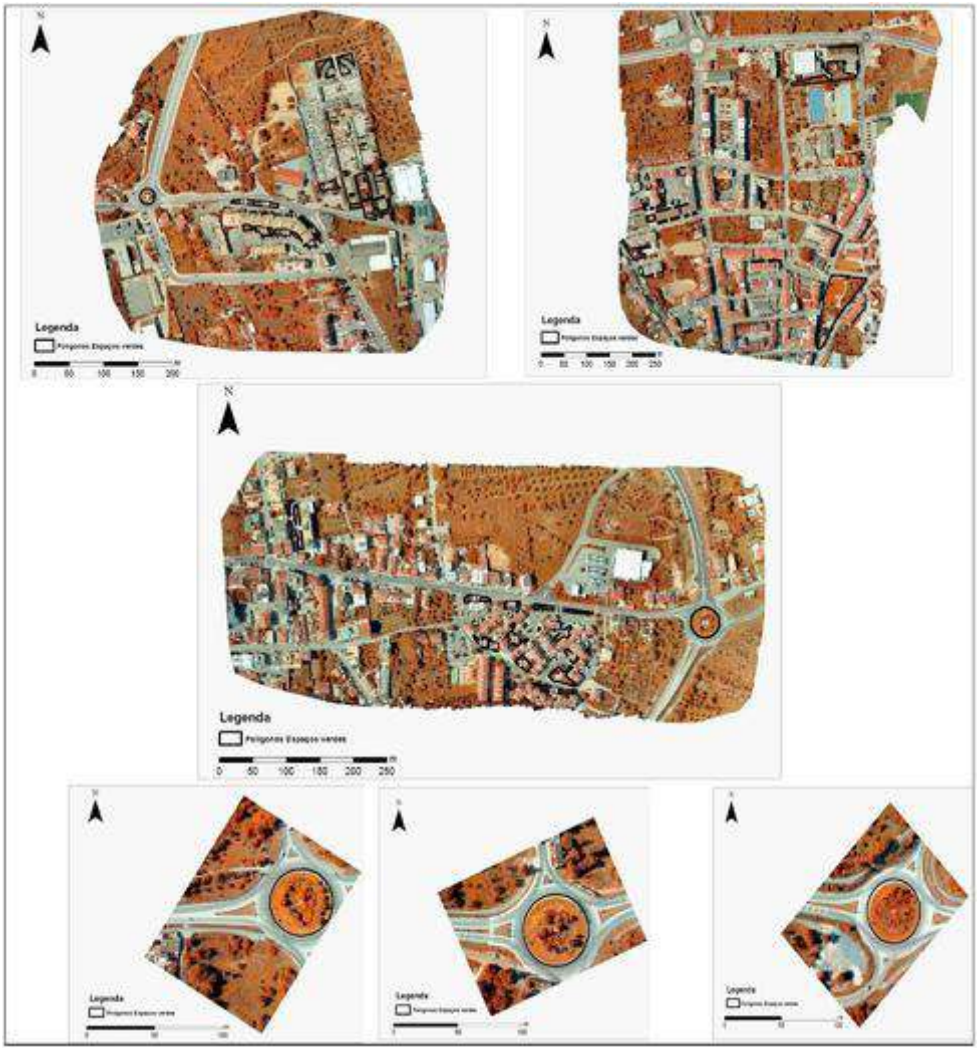


Figura 5 – Imagens aéreas *NIR-green-blue* de seis jardins urbanos existentes em São Brás de Alportel

O município pretendeu promover a sustentabilidade jardins fornecendo conhecimento que ajudasse a população a entender estratégias promovem a eficiência do uso da água em zonas mediterrâneas. Assim, foi desenvolvido um aplicativo para telemóvel denominado: São Brás de Alportel GARDENS (Figura 8). Nesta aplicação podemos selecionar o jardim do mapa e visualizar todas as informações relacionadas, nomeadamente a vegetação, características do sistema de rega e as práticas sustentáveis implementadas. Por outro lado, a aplicação também permite calcular a evapotranspiração.

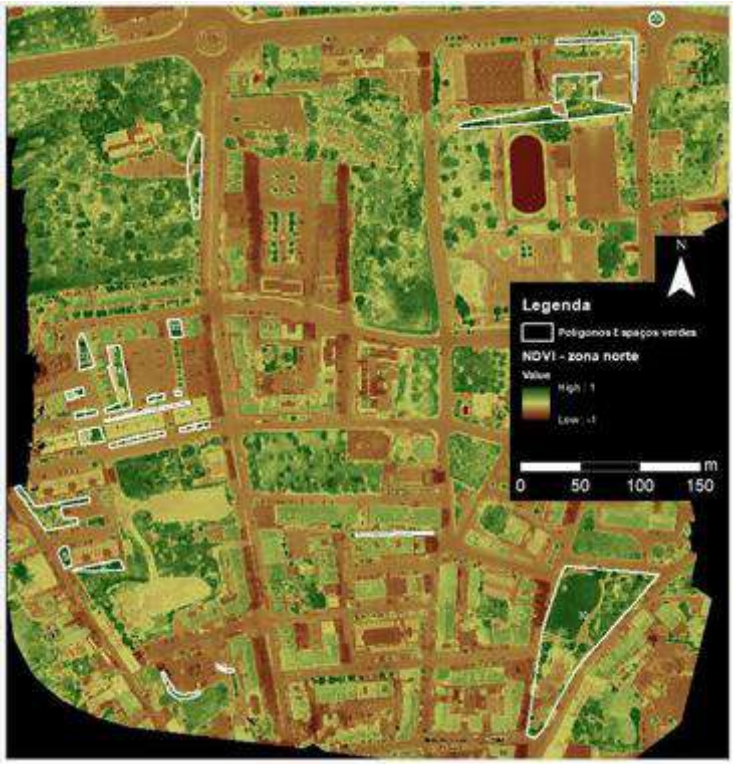


Figura 6 – NDVI modificado nos jardins (delimitados a branco) da Câmara Municipal de São Brás de Alportel.

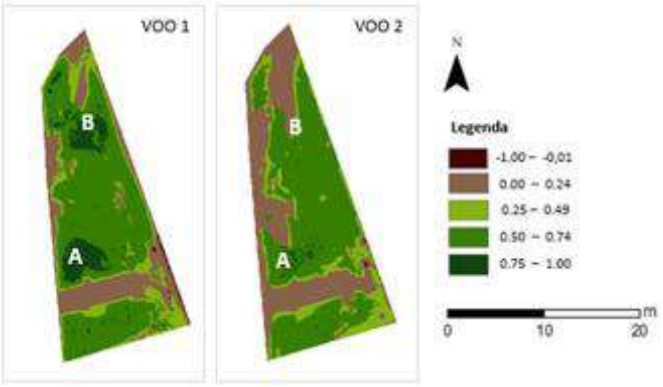


Figura 7 – NDVI do jardim 33 recolhido duas datas distintas: 20 de maio e 9 de junho.



Figura 8 – Aplicação: GARDENS de São Brás de Alportel.

4. Conclusões

As metodologias de deteção remota aplicadas aos espaços verdes urbanos do mediterrâneo juntamente com o estudo à microescala dos jardins permitiram analisar espaços verdes urbanos de São Brás de Alportel. Deste modo foi possível identificar os jardins que registaram valores de consumo de água superiores às necessidades brutas de rega e determinar o potencial de poupança de água (de cerca de 19800 mm/ano) que poderá trazer benefícios económicos e ambientais para o município. O NDVI permitiu ainda mapear níveis de produção de biomassa o que mostra que a vegetação pode ser sujeita a ligeiro défice hídrico mantendo a sua qualidade visual.

5. Agradecimentos

A Câmara Municipal de São Brás de Alportel que viabilizou a realização deste estudo.

Referencias

1. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. & Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ETRS. In: 3º ERTS-1 symposium. Nasa SP-351, Washington D.C. NASA, (1974), (pp. 309-317).
2. Chuvieco S. E. Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio. Ariel, Madrid. 2002.
3. Tasumi M., Allen R. G., Trezza R. & Wright J. Satellite-Based Energy Balance to Assess Within-Population variance of crop coefficient curves. J. Irrig. Drain. Eng. 2005, 131, (pp. 94-109).
4. SNIRH (2001). Dados da estação meteorológica de São Brás de Alportel. Autoridade Nacional da água, Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. Consultado a 26/07/2018, in: http://snirh.apambiente.pt/snirh/_dadosbase/site/simplex.php?OBJINFO=DADOS&FILTRA_BACIA=992&FILTRA_COVER=920123704&FILTRA_SITE=920685676
5. Allen R. G., Wright J. L., Pruitt W. O., Pereira L. S., & Jensen M. E. Water Requirements. In Design and Operation of Farm Irrigation Systems (2nd Edition), American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2007, pp. 208–288.
6. [6] Merriam J. L. & Keller. Farm irrigation system evaluation. A guide for management. 3ª Ed, Utah State University, Logan, 1978.
7. ASAE-EP458. - Design and installation of microirrigation systems, in: ASAE Standards 2004.
8. Standards Engineering Practices Data, St Joseph (EUA), 2004, ASAE, pp. 992-928.
9. Zhao, T., Stark, B., Chen, Y., Ray, A. L., & Doll, D. A detailed field study of direct correlations between ground truth crop water stress and normalized difference vegetation index (ndvi) from small unmanned aerial system. In 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015, pp. 520-525.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Diseño y primeros resultados de una plataforma móvil eléctrica de registro de datos para agricultura de precisión

J. Martínez-Guanter[1,2], F. Tucci[1], O. E. Apolo-Apolo[1], J. Agüera[3], G. Egea[1], D. Andújar[4], M. Pérez-Ruiz[1]

[1] Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos. Universidad de Sevilla; manuelperez@us.es
[2] Agroplanning Agricultura Inteligente S.L. Programa Torres-Quevedo 2017 (PTQ-17-09506)
[3] Dpto. de Ingeniería Rural. Universidad de Córdoba.
[4] Centro de Automática y Robótica, CSIC-UPM, 28500 Arganda del Rey, Madrid

Resumen: La monitorización cercana requiere de equipamiento montado a bordo de vehículos agrícolas, implementos o cualquier plataforma que permitan obtener rasgos agronómicamente relevantes. Las plataformas móviles para el fenotipado de características biofísicas de los cultivos permiten obtener una alta repetibilidad de las mediciones, al tiempo de no ser invasivas sobre las labores normales de cultivo. De la misma forma que el diseño de estas plataformas está condicionado por la variedad de sensores que deben alojar, deberá ser adecuado al tipo de cultivo del que se pretende obtener información precisa, y que su uso no requiera de una intensiva participación humana. Los objetivos se centraron en **(i)** desarrollar una plataforma móvil eléctrica, sencilla y modular, diseñada para alojar una gran variedad de sensores que permitan la caracterización fenotípica de cultivos, y **(ii)** probar su rendimiento en campo, la reproducibilidad de los resultados y su capacidad para obtener mediciones sobre el volumen de copa de los naranjos de una parcela comercial. Para este segundo objetivo, y tras unas primeras comprobaciones en laboratorio sobre aspectos como la velocidad, la carga óptima, y la estabilidad, se llevaron a cabo pruebas de campo empleando un sensor LiDAR escaneando de forma lateral y una cámara de profundidad Kinect de Microsoft. En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos del desarrollo técnico de la plataforma para la caracterización electrónica del volumen de copa de cítricos, con los que se pretende en el futuro generar información de alto valor para el agricultor que le permitan ajustar aspectos como las aplicaciones de agroquímicos o labores como la poda.

Palabras clave: LiDAR, monitorización, fenotipado

1. Introducción

El cultivo de cítricos en el sur de Europa tiene habitualmente lugar en parcelas de un número relativamente grande de hectáreas, consideradas unidades de producción uniformes. En ellas, tradicionalmente las tareas de manejo o las estimaciones de rendimiento no han tenido en cuenta la variabilidad espacial de los mismos. La agricultura de precisión permite un tratamiento diferenciado, monitoreando cada árbol individualmente como una entidad productiva única. Una caracterización precisa de cada uno de los árboles permite realizar tareas de aplicación variable de fertilizante o pesticidas, poda selectiva o predicciones del rendimiento de frutos más ajustadas [1]. Caracterizar la estructura fenotípica del cultivo, y en particular el volumen de la

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3395

copa de cada árbol en las diferentes etapas de crecimiento del cultivo resulta de gran interés, ya que proporciona información importante acerca de sus necesidades y potencial producción [2].

La productividad en el cultivo de cítricos tiende a disminuir cuando el tamaño del árbol aumenta y la competición por recursos como el espacio, la luz, el agua o nutrientes se acrecienta [3] [4]. Trabajos como [3] o [5] ponen de manifiesto la estrecha relación entre el volumen medido de los árboles y su rendimiento en fruto, así como la necesidad de un adecuado control de su tamaño y forma. De igual forma, las tareas de aplicación variable de pulverización y fertilización pueden ajustarse a la variabilidad espacial del volumen de la copa. Se ha desarrollado maquinaria capaz de adaptar su geometría y sus elementos aplicadores al tamaño del cultivo [6][7]. Incluso nuevas tecnologías como los UAVs [8] se han desarrollado para aplicar en forma de bajos volúmenes en sistemas productivos, lo que permite un ahorro considerable de inputs y un aumento de los retornos económicos para los productores.

La caracterización del tamaño de los árboles y el volumen de la copa se ha realizado convencionalmente mediante medidas manuales. Estos métodos simples son laboriosos, consumen demasiado tiempo y requieren de muchas muestras para ser representativos [9].

De forma alternativa a la caracterización manual, se han desarrollado numerosos trabajos con diferentes sensores para una mejor cuantificación del volumen de copa. Entre estos sensores, los más utilizados para estas medidas han sido los de ultrasonidos y los escáneres LiDAR.

Los sensores de ultrasonidos funcionan de forma activa mediante el envío de una onda ultrasónica y su posterior recepción, obteniendo mediante la diferencia de tiempo la distancia al objetivo. Las mediciones del volumen del árbol con ultrasonidos se llevan a cabo mediante el uso simultáneo de varios sensores con una disposición vertical [10]. Su uso ha sido ampliamente estudiado en [11][12][3], y se ha incluido en maquinaria comercial desde los inicios de la década de los 2000. Sin embargo, las mediciones de estos sensores se ven afectados por la textura de la superficie, el ángulo y la distancia al sensor.

Los escáneres LiDAR terrestres, mucho más precisos en sus mediciones, funcionan también de forma activa mediante el envío y recepción de un haz de luz, y el cálculo de las distancias mediante su rebote. Los sensores LiDAR se han empleado con éxito notable en la caracterización de las estructuras del cultivo arbóreos [13][14][15] y vegetales [16][17], debido a su versatilidad para ser montados sobre plataformas terrestres y generar nubes de puntos 3D precisas. Además, se han empleado de forma combinada en diferentes orientaciones sobre plataformas robotizadas para generar modelos 3D con mayor densidad y más ajustados a la realidad [18]. En [19] se empleó un sistema basado en LiDAR y se obtuvo un error relativo del 4.4% en la estimación del volumen unitario de árboles. Se ha empleado por [13] para obtener una correlación R^2= 0.97 sobre las medidas manuales y para calcular índices del cultivo como el LAI [20] Además, se ha empleado tanto en plataformas terrestres como aéreas o drones para realizar tareas de fenotipado de alto rendimiento de cultivos arbóreos y extensivos.

Además de estos dos sensores, números trabajos han explorado el uso de cámaras de profundidad o RGB-D para la generación de modelos de árboles y su caracterización. El uso de estos sensores comerciales ha sido validado en comparación con un LiDAR terrestre para modelar plantas de remolacha azucarera [21]. Se concluyó que los sensores RGB-D podrían reemplazar sistemas láser en algunos de los escenarios de fenotipado. En [22] y [23] se reconstruyeron estructuras arbóreas en viñedo y chopos estimando el Índice de Área Foliar (LAI) y su volumen demostrando el potencial de estos sensores para la reconstrucción tridimensional.

Como ya se ha comentado, el desarrollo de todas estas metodologías de medición del volumen de copa ha ido ligado a diferentes plataformas terrestres o aéreas de fenotipado [24]. Estas plataformas, en muchos casos robóticas, permiten estudiar mayores áreas con repetibilidad, pueden montar un gran número de sensores simultáneamente y aportan una mayor flexibilidad que las mediciones manuales o con estaciones fijas. Además, como en el caso de este trabajo las plataformas terrestres permiten el desplazamiento horizontal de los sensores y la generación de

la tercera dimensión necesaria para la caracterización de los elementos en campo. Por todo lo anterior, el objetivo general de este trabajo es el de desarrollar de forma efectiva una plataforma terrestre móvil de fenotipado, y el empleo de ésta en la caracterización y cuantificación del volumen de copa de un cultivo de naranjos. El objetivo específico dentro de esta caracterización será el de comparar las mediciones del volumen de copa con diferentes métodos de medición empleando dos sensores LiDAR y una cámara RGB-D.

2. Materiales y métodos

2.1. Desarrollo de la Plataforma Terrestre de Fenotipado

Para ser capaces de generar una toma de datos desde un elemento móvil en campo que asegurase la fiabilidad de la información obtenida y la repetibilidad de las medidas, se desarrolló una plataforma terrestre capaz de albergar el conjunto de sensores necesarios y su disposición de forma modular.

Se diseñó una plataforma (Figura 1a) fabricada y adaptada para este trabajo, de construcción metálica, con 2 motores eléctricos, con ruedas delanteras directrices y traseras motrices. El diseño modular, ajustable en altura, permite disponer de espacio suficiente para embarcar en ella los diferentes componentes del sistema de alimentación de sensores, sistemas electrónicos de medida y ordenadores. Una barra horizontal regulable en altura se empleó como soporte a los diferentes sensores empleados en este trabajo (Figura 1b). La plataforma se diseñó con un ancho de vía estrecho buscando su versatilidad a la hora de generar datos en no sólo en cultivos con marcos de plantación amplios como el del naranjo, sino también en aquellos cultivos cuyas calles presentan menores distancias (ej. en ensayos de mejora del maíz). Las características técnicas de dicha plataforma se recogen en la tabla 1 a continuación.



(a) (b)

Figura 1. (a) Vista general de la plataforma desarrollada, con montaje de sensores y sistema de odometría en la parte posterior, (b) detalle de montaje del sensor LiDAR en la parte delantera para el registro de nubes de puntos 3D del cultivo.

Tabla 1. Características técnicas de la plataforma de fenotipado

Dimensiones (largo, alto, ancho)	1770, 1910, 550 mm
Ancho de vía y batalla	470 mm, 1200 mm
Velocidad máxima	0.5 $m \cdot s^{-1}$
Velocidad mínima	0.1 $m \cdot s^{-1}$
Masa total plataforma	200 kg
Diámetro ruedas	400 mm

2.2 Sensores, Instrumentación y Software a bordo de la plataforma

2.2.1. Sensor LiDAR

Un sensor LiDAR (LMS111-10100, SICK, Waldkirch, Alemania) cuyos parámetros técnicos de funcionamiento se resumen en la tabla 2, fue empleado para la caracterización 3D del cultivo. Se instaló de forma fija en la parte delantera de la plataforma con una orientación angular de 90º respecto al suelo, generando escaneos verticales transversales del cultivo. La alimentación del sensor LiDAR se realizó mediante el sistema eléctrico de la plataforma y un convertidor de voltaje.

Tabla 2. Características técnicas del sensor LiDAR LMS 111 empleado

Rango de escaneo óptimo	0.5 a 20 m
Field of View (FOV)	270º
Frecuencia de escaneo	50 Hz
Resolución angular	0.5º
Banda espectral láser	Infrarrojo (905 nm)
Grado de protección	IP67

Como sistema de referencia local se empleó una solución basada en odometría, capaz de aportar la coordenada Z en base al movimiento longitudinal a través de las filas de naranjos. A una rueda independiente con giro libre montada en la parte trasera de la plataforma se le añadió un encoder óptico incremental de alta resolución (modelo 63R256, Greyhill Inc., Chicago,IL, USA) de forma solidaria al eje. La medida del avance basada en odometría se obtuvo mediante el análisis de los pulsos recibidos por medio de un microcontrolador de bajo coste Arduino UNO (Arduino Project, Ivrea, Italy). Para la configuración del sistema y la captura y registro de los escaneos del sensor, se empleó el entorno de software LabWiew (National Instruments CO., Texas, USA) con una interfaz de Ethernet para su conexión con el ordenador a bordo de la plataforma.

2.2.2. Sensor RGB-D Kinect

El sensor de profundidad o cámara RGB-D empleado fue un sensor comercial Microsoft Kinect V2 (Microsoft, Redmond, USA). Este equipo, lanzado inicialmente para videojuegos, ha demostrado ser de gran utilidad en tareas de investigación ya que incluye en un mismo equipo un sensor infrarrojo, una cámara de profundidad ToF, y un sensor RGB. Las imágenes RGB capturadas por este sensor tienen una resolución de 1920x1080, con un FOV de 84.1ºx53.8º. El sensor infrarrojo tiene un FOV de 70ºx60º, con una distancia máxima de escaneo de 5.5 m. Aunque el uso de este sensor se ve condicionado por las condiciones de luz, se decidió su uso porque éstas eran adecuadas en un entorno de escaneo con árboles de gran tamaño que mitigaban la luminosidad. El sensor Kinect no depende de un sistema de odometría para la posterior reconstrucción de las nubes de puntos. Al igual que el LiDAR, se dispuso en la parte delantera de la plataforma para realizar los escaneos 3D de los árboles situados a la derecha del avance.

2.3. Localización de los ensayos de campo

El desarrollo de este trabajo se realizó en una explotación comercial de naranjos situada en Alcalá del Río en la provincia de Sevilla (37°30'42.8"N 5°58'12.3"W). La finca tiene una superficie de 4 ha, con una plantación de cítricos de la variedad Navelina, plantados en 1992. Las líneas de los naranjos, dispuestas de Norte a Sur, presentan un marco de plantación de 5,5m x 4 m.

La zona de estudio dentro de la parcela se acotó en 4 filas de árboles, con 5 árboles cada una. En cada una de estas filas se realizaron dos repeticiones con pases de la plataforma desarrollada a izquierda y derecha, obteniéndose en cada caso el escaneo de ambas caras de cada árbol.

2.4. Metodología de análisis de los datos de campo

Una vez registrados los escaneos laterales empleando el LiDAR, y las imágenes RGB y datos de profundidad 3D empleando el sensor RGB-D, se llevó a cabo el análisis offline de dicha información. Para ello, se siguió el flujo de trabajo que se muestra en la figura 2 a continuación.

Para la generación de las nubes de puntos 3D capturadas mediante el sensor LiDAR se empleó una rutina desarrollada en Matlab (MathWorks, MA, USA). El análisis de la información 3D captada por el sensor RGB-D se realizó empleando de forma combinada el software propietario de Kinect Studio (Microsoft, Redmond, USA) y el software de trabajo con nubes de puntos CloudCompare (GNU License, Paris, France). En él se empleó el algoritmo de caracterización de puntos externos denominado α -shape para calcular el volumen de la copa del árbol. En las primeras iteraciones de este trabajo, se ha definido un valor de α=1 para l cálculo del volumen. El resultado del cálculo del volumen a partir de estos datos de LiDAR se comparó de forma estadística con el arrojado por la misma metodología de reconstrucción 3D a partir de los datos del sensor RGB-D.

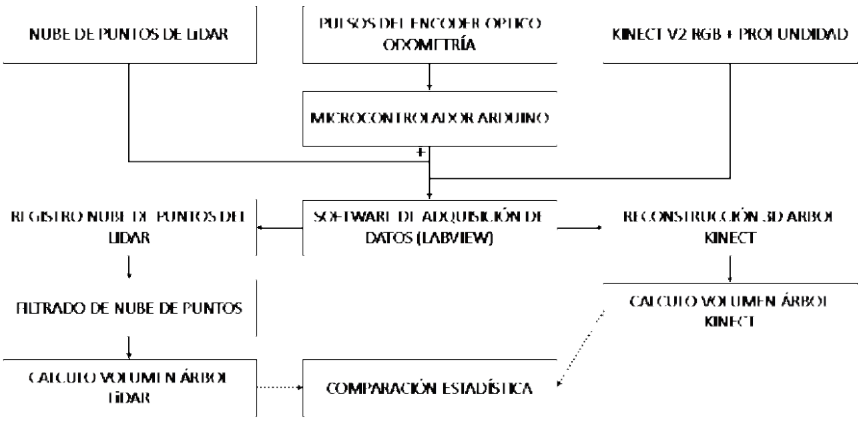


Figura 2. Diagrama de tratamiento y análisis de los datos 3D recogidos por los sensores LiDAR y RGB-D

3. Resultados y discusión

3.1. Desarrollo y primeras pruebas de la plataforma

El desarrollo satisfactorio de la plataforma terrestre para fenotipado, permitió la obtención de los primeros resultados acerca de la caracterización de los árboles de cítricos en la parcela de estudio. En estas primeras pruebas de campo, además de generar dichos datos, se validó el uso de esta plataforma como herramienta modular, flexible y robusta, que permite una repetibilidad de las mediciones que resulta clave a la hora de validarlas en diferentes campañas a lo largo de los próximos años. Se validó su uso, maniobrabilidad y diferentes velocidades de avance para poder ser empleada en sucesivos años, en diferentes cultivos y con diferentes sensores. Una de

las barreras encontradas en este primer año con respecto al desarrollo de la plataforma, es la necesidad de realizar constantes ajustes en la trayectoria mediante el volante que incorpora, incluso a bajas velocidades. Este punto se explorará en próximos trabajos, de forma que se siga una trayectoria rectilínea gracias a la incorporación de un sistema de auto-guiado por GPS RTK.

3.2. Caracterización del volumen de naranjos

Mediante los sucesivos escaneos con la plataforma desarrollada, se obtuvieron las nubes de puntos 3D correspondientes a cada una de las filas estudiadas de naranjos. Las densidades de puntos obtenidas con el sensor LiDAR fueron de una media de 5.79 puntos por vóxel de 1 cm^3, lo que indica una alta resolución de la nube de puntos y una alta calidad de los resultados obtenidos. La generación de estas nubes de puntos con el sensor LiDAR correspondieron en todos los casos al trayecto completo entre filas de cultivo, generándose una nube de puntos 3D de la fila completa de naranjos, como muestra la figura 3 a continuación.

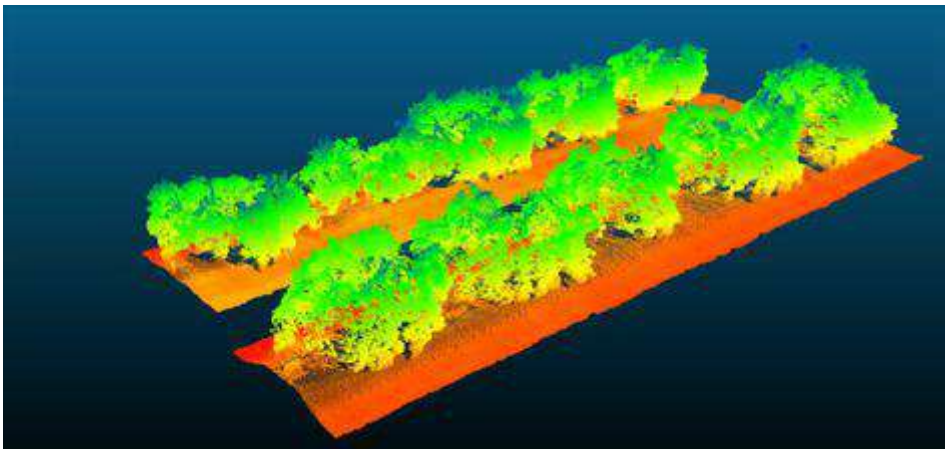


Figura 3. Nubes de puntos 3D obtenidas con el sensor LiDAR a partir de los escaneos de dos filas de naranjos.

El cálculo del volumen individual de cada uno de los árboles de la parcela se realizó aislando en primer lugar cada uno de ellos de forma manual con respecto a la nube de puntos general, (figura 4) y calculando individualmente su volumen mediante la función α-shape descrita anteriormente.

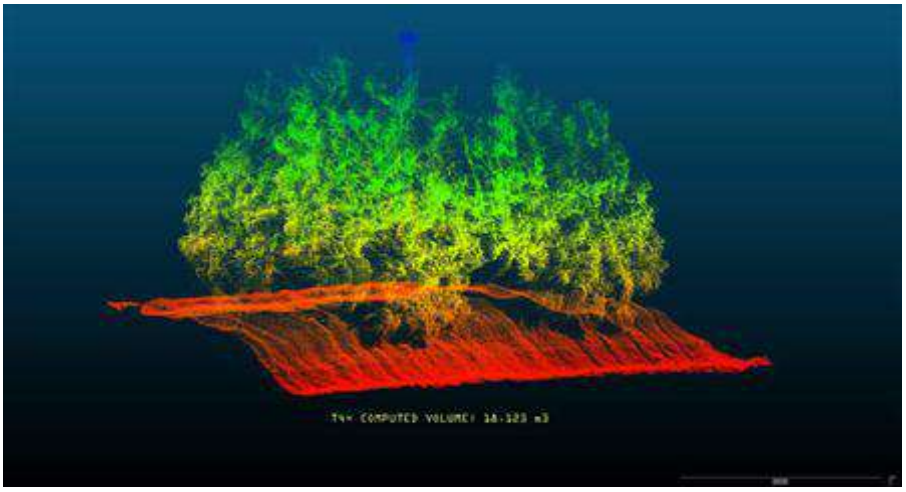


Figura 4. Nube de puntos 3D de un árbol objeto de estudio

Por su parte, los resultados de la generación de nubes de puntos a partir de los registros obtenidos mediante el sensor Kinect se muestran en la figura 5 a continuación.

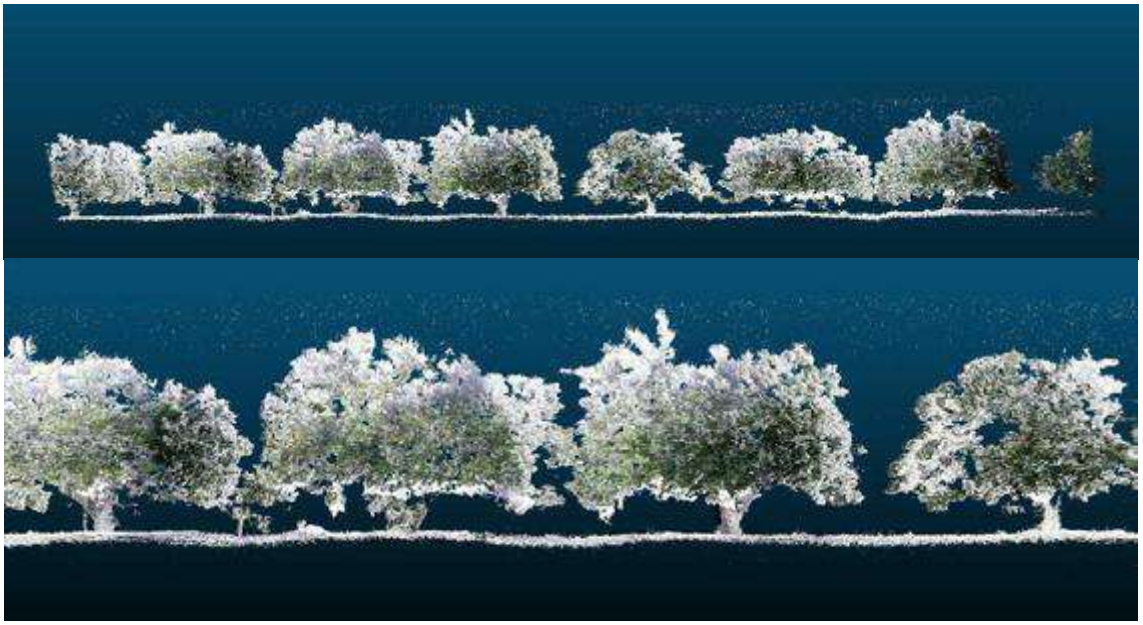


Figura 5. Nube de puntos 3D a partir de sensor RGB-D Kinect de toda la fila (arriba) y detalle de algunos de los árboles objeto de estudio (debajo).

En la comparación de los volúmenes obtenidos mediante la metodología expuesta en el apartado 2.4 se obtuvo, para cada árbol individual un volumen a partir de las nubes de puntos del sensor LiDAR y RGB-D. Los resultados de dicha comparación por cada uno de los árboles estudiados se muestran en la figura 6 a continuación. La diferencia media de volumen calculado con ambos sensores fue de 2.72 m^3. Esta diferencia puede ser reducida en sucesivos filtrados de puntos de las nubes 3D correspondientes a ruido o rebotes de otros elementos como el polvo o partículas en suspensión, de forma que se pueda minimizar la diferencia y por tanto el error cometido en la estimación automática de volumen con dos sensores diferentes.

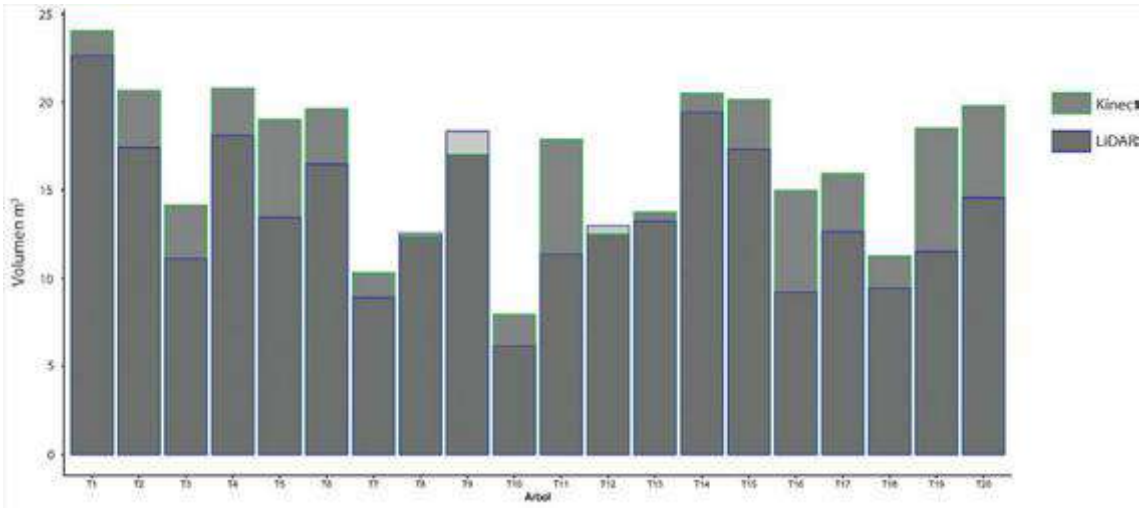


Figura 6. Comparación de los volúmenes de los 20 árboles estudiados en este trabajo mediante el sensor LiDAR y el RGB-D.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se han expuesto el desarrollo de una plataforma terrestre de fenotipado y los primeros resultados en su aplicación como herramienta para la determinación del volumen de los árboles de naranjo de una explotación comercial. Sin duda, el desarrollo de plataformas de fenotipado está teniendo un crecimiento notable en los últimos años debido a la miniaturización de los sensores, su versatilidad y la repetibilidad que ofrecen para realizar un seguimiento exhaustivo de los cultivos. Los sensores empleados para determinar el volumen de copa de los árboles en este estudio (LiDAR y Kinect) han demostrado ser efectivos a la hora de realizar dichas mediciones. Pese a que tienen un coste económico diferente (el LiDAR resulta mucho más caro que el sensor RGB-D), los resultados obtenidos no indican gran diferencia en sus mediciones. Esto puede conllevar una más rápida adopción de soluciones de este tipo que permitan al sector caracterizar su cultivo de forma robusta, rápida y sencilla, lo que sin duda tendrá un impacto relevante en la adaptación de las tareas agrícolas de aplicación variable, poda selectiva o predicción de rendimientos en cosecha. El grupo de investigación continuará, en los próximos desarrollos, trabajando en mejorar los resultados y en la obtención de nuevos parámetros fenotípicos desde este tipo de plataformas.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto *Pressing* (Referencia: AGL2016-78964-R) financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Los autores agradecen el contrato Torres Quevedo (PTQ-17-09506) concedido a JMG y al contrato predoctoral para el desarrollo del programa de I+D+i de la Universidad de Sevilla (IV.3 2017) concedido a OEAA.

Referencias

1. Maja, J. M., & Ehsani, R. Development of a yield monitoring system for citrus mechanical harvesting machines. Precision agriculture, (2010) 11 (5), 475-487.
2. Ehsani, R., Hwan, L. E. E. A Measurement System for Quantifying Citrus Foliage Volume and Porosity. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, (2008) 4(4), 333-338.
3. Zamman, Q.U., Schumann, A. W. Performance of an ultrasonic tree volume measurement system in commercial citrus groves. Precision Agriculture, (2005) 6 (5), 467-480.
4. Tucker, D. P. H., Wheaton, T. A. and Muraro, R. P. Citrus Tree Spacing and Pruning. Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agriculture Science. (1991) p. 1–15.
5. Wheaton, T. A., Whitney, J. D., Castle, W. S., Muraro, R. P., Browning, H. W. and Tucker, D. P. H.. Citrus Scion and rootstock, topping height, and tree spacing affect tree size, yield, fruit quality, and economic return. Journal American Society of Horticultural Science (1995) 120(5), 861–870.
6. Chen, Y., Zhu, H., & Ozkan, H. E.. Development of a variable-rate sprayer with laser scanning sensor to synchronize spray outputs to tree structures. Transactions of the ASABE, (2012) 55(3), 773-781.
7. Vieri, M., Lisci, R., Rimediotti, M., & Sarri, D. (2013). The RHEA-project robot for tree crops pesticide application. Journal of Agricultural Engineering.
8. Martinez-Guanter, J., Agüera, P., Agüera, J., Pérez-Ruiz, M.; Spray and economics assessment of a UAV-based ultra-low-volume application in olive and citrus orchards, Precision Agriculture, 2019, pp 1-18.
9. Colaço, A. F., Trevisan, R. G., Molin, J. P., Rosell-Polo, J. R., Escolà, A. Orange tree canopy volume estimation by manual and LiDAR-based methods. Advances in Animal Biosciences, (2017) 8(02), 477–480.
10. Tumbo, S. D., Salyani, M., Whitney, J. D., Wheaton, T. A. and Miller, W. M. Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurement of citrus canopy volume. Applied Engineering in Agriculture (2002) 18(3), 367–372.
11. Li, B., Whitney, J. D., Miller, W. M. and Wheaton, T. A.; Ultrasonic-based Canopy Volume Measurements of Citrus Trees for Precision Agriculture. ASAE (2002) Paper No. 02-021053.

12. Gil, E., Escolà, A., Rosell, J. R., Planas, S., & Val, L.; Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. Crop Protection, (2007) 26(8), 1287–1297.
13. Rosell, J. R., Llorens, J., Sanz, R., Arnó, J., Ribes-Dasi, M., Masip, J., … Palacín, J. Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning. Agricultural and Forest Meteorology, (2009). 149(9), 1505–1515
14. Pérez-Ruiz, M., Rallo, P., Jiménez, M., Garrido-Izard, M., Suárez, M., Casanova, L., ... & Morales-Sillero, A. Evaluation of over-the-row harvester damage in a super-high-density olive orchard using on-board sensing techniques. Sensors, (2018) 18(4), 1242.
15. Miranda-Fuentes, A., Llorens, J., Gamarra-Diezma, J. L., Gil-Ribes, J. A., & Gil, E. Towards an optimized method of olive tree crown volume measurement. Sensors (Switzerland), (2015) 15(2), 3672–3687.
16. Martínez-Guanter, J., Garrido-Izard, M., Valero, C., Slaughter, D., & Pérez-Ruiz, M. Optical sensing to determine tomato plant spacing for precise agrochemical application: Two scenarios. Sensors, (2017) 17(5), 1096.
17. Shi, Y., Wang, N., Taylor, R. K., Raun, W. R. Improvement of a ground-LiDAR-based corn plant population and spacing measurement system. Computers and Electronics in Agriculture, (2014) 112, 92–101.
18. Garrido, M., Paraforos, D., Reiser, D., Vázquez Arellano, M., Griepentrog, H., & Valero, C. 3D Maize Plant Reconstruction Based on Georeferenced Overlapping LiDAR Point Clouds. Remote Sensing, (2015). 7(12), 17077–17096.
19. Wei, J., & Salyani, M. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 1. Prototype development. Transactions of the ASAE, (2004) 47(6), 2101.
20. Rosell Polo, J. R., Sanz Cortiella, R., Llorens Calveras, J., Arnó Satorra, J., Ribes Dasi, M., Masip Vilalta, J., ... & Val, L. A tractor-mounted scanning LIDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: A comparison with conventional destructive measurements. Biosystems Engineering, 2009, vol. 102, núm. 2, p. 128-134.
21. Paulus, S., Behmann, J., Mahlein, A. K., Plümer, L., & Kuhlmann, H. Low-cost 3D systems: suitable tools for plant phenotyping. Sensors, (2014) 14(2), 3001-3018.
22. Bengochea-Guevara, J. M., Andújar, D., Sanchez-Sardana, F. L., Cantuña, K., & Ribeiro, A., A low-cost approach to automatically obtain accurate 3D models of woody crops. Sensors (Switzerland), (2018) 18(1), 1–17.
23. Andújar, D., Dorado, J., Fernández-Quintanilla, C., & Ribeiro, A. An Approach to the Use of Depth Cameras for Weed Volume Estimation. Sensors, (2016) 16(7), 972.
24. Deery, D., Jimenez-Berni, J., Jones, H., Sirault, X., & Furbank, R. Proximal remote sensing buggies and potential applications for field-based phenotyping. Agronomy, (2014) 4(3), 349-379.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Estudio de la agitación en tanques de pulverizadores agrícolas mediante simulaciones informáticas

Jorge Badules[1], Mariano Vidal[2], Antonio Boné[3], F. Javier García-Ramos[4]

[1] Escuela de Doctorado, Universidad de Zaragoza.
[2] Escuela Politécnica Superior de Huesca, Universidad de Zaragoza; anbone@unizar.es
[3] Escuela Politécnica Superior de Huesca, Universidad de Zaragoza; vidalcor@unizar.es
[4] Escuela Politécnica Superior de Huesca, Universidad de Zaragoza; fjavier@unizar.es

Resumen: Los pulverizadores agrícolas disponen en sus depósitos sistemas de agitación para garantizar una adecuada homogeneidad de la mezcla en lo relativo a concentración de materia activa y evitar la sedimentación de los productos en suspensión. El estudio empírico de la eficacia de estos sistemas, bien sea para garantizar la uniformidad de la disolución, bien para optimizar los propios agitadores, puede resultar muy costoso en tiempo y recursos. Como alternativa se utilizan simulaciones informáticas basadas en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). En el presente estudio, se han aplicado modelos CFD de cálculo numérico para estudiar el movimiento del fluido en el interior del depósito de un pulverizador comercial, comparando los datos de velocidad obtenidos con mediciones reales llevadas a cabo con un velocímetro acústico Doppler. Se concluye que, modelando adecuadamente, el CFD puede suponer una herramienta útil para el fabricante, ya que predice de forma correcta el comportamiento general del líquido dentro del depósito, incluyendo líneas de flujo principales o velocidades por zonas.

Palabras clave: modelización, CFD, depósito, velocidad

1. Introducción

Los plaguicidas son productos utilizados en todo tipo de cultivos para luchar contra las malas hierbas, insectos u hongos. La aplicación de estos productos requiere realizar una disolución en agua con las concentraciones recomendadas por el fabricante del producto, variables en función del tipo de producto y problema fitosanitario. Esta mezcla es almacenada en los tanques o depósitos de los pulverizadores agrícolas, que son las máquinas más usadas para la aplicación de los productos fitosanitarios en parcela.

Los tanques de los pulverizadores incorporan agitadores que mueven el líquido en el que se ha disuelto el producto, evitando sedimentaciones. Para el estudio de la agitación, existe un procedimiento normalizado, la norma ISO 5682-2 [1], que requiere, tras un tiempo de agitación, recoger muestras en varios puntos del tanque para medir la concentración de materia activa. La realización de esta prueba en la práctica no es sencilla. Adicionalmente, si se quisiera analizar la influencia que tienen sobre la agitación los parámetros que conforman el sistema de agitación (tipo de boquilla, caudal de agitación, nivel de agua en el depósito, etc.) los ensayos serían muy costosos tanto en tiempo como en recursos.

Por este motivo se han propuesto varias alternativas para estudiar los sistemas de agitación de los tanques, que exploran varias vías [2], como por ejemplo el empleo de medidores de

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3345

turbidez [3,4,5], el estudio de imágenes tomadas en depósitos transparentes [6], o estudiar la agitación de forma indirecta mediante la medición de velocidades dentro del depósito [7]. Otra vía diferente cuyo estudio se ha explorado es el empleo de la dinámica de fluidos computacional (CFD) [8]. El CFD es una técnica de cálculo numérico por ordenador mediante la que se pueden estudiar una gran variedad de problemas en los que intervienen fluidos. Su uso en el estudio de agitación de tanques, es teóricamente ideal, ya que permitiría a los diseñadores de estas máquinas probar diferentes soluciones de forma previa al desarrollo del primer prototipo, proporcionando una gran cantidad de información. Sin embargo, los resultados que se obtienen no siempre son concluyentes [9].

La principal vía de aplicación de los modelos CFD a los sistemas de agitación ha sido la estimación de velocidades del líquido en el interior del depósito y su posterior comparación con valores empíricos reales [10]. Otra vía de investigación ha sido intentar correlacionar la concentración de materia activa medida experimentalmente con la velocidad teórica calculada con CFD [11].

El objetivo del presente trabajo ha sido comparar los datos experimentales de velocidad medidos en el depósito de un pulverizador comercial, con los calculados por ordenador mediante CFD. La medición experimental se ha realizado con un velocímetro acústico Doppler [7] en diferentes condiciones de nivel de líquido en el depósito, presión en las boquillas de los agitadores y número de agitadores en funcionamiento

2. Materiales y métodos

2.1. Máquina y materiales

Para este estudio se ha usado un pulverizador hidroneumático con un tanque de 3000 L (GarMelet S.L.), de geometría cilíndrica partido por un rompeolas en forma de casquete esférico en dos cámaras interconectadas. El depósito tiene un hueco cilíndrico que lo atraviesa transversalmente y por donde pasa un eje motriz, según la Figura 1. Tiene 4 agitadores de efecto Vénturi en el interior del depósito, de dos modelos diferentes, que remueven el líquido y pueden funcionar bien simultáneamente o bien sólo los dos de mayor caudal, estando colocados cada uno en esquinas opuestas.

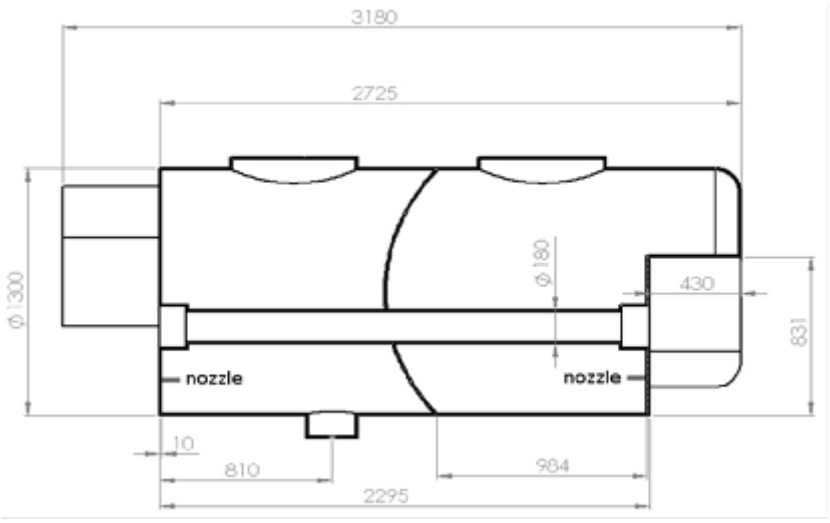


Figura 1. Corte longitudinal del depósito.

La medición de velocidades se ha realizado con un velocímetro acústico Doppler modelo 3D MicroADV 16 MHz de SonTek (San Diego, CA, USA). Este medidor dispone de tres sensores y un receptor, que mide la velocidad del fluido situado a 5 cm del mismo, según [7].

Para garantizar que el velocímetro se dispone exactamente en la coordenada deseada y que no se mueve durante la toma de datos, se tuvo el auxilio de una estructura metálica fabricada expresamente para el experimento donde se fijó el velocímetro.

2.2. Modelo informático

Para la resolución de todos los modelos se ha empleado como código CFD el programa ANSYS-Fluent (ANSYS,Inc., Canonsburg, PA, USA).

Tras estudiar varias posibilidades, se ha optado por realizar cálculos estacionarios en los que el volumen del modelo está ocupado íntegramente por agua, lo que disminuye los tiempos de cálculo y facilita la convergencia de los mismos. En ningún caso se modela el aire que queda en la parte superior del depósito no ocupada por el líquido. Por el contrario, esta estrategia tiene el problema de que necesita un modelo de cálculo diferente para cada volumen de agua en el depósito que se quiera estudiar (figura 2).



Figura 2. Perspectiva de diferentes mallados usados en los modelos de 1000, 2000 y 3000 L. El mallado es más fino en los agitadores y en las paredes del depósito que en el interior.

En otras palabras, un modelo en el que se pudieran implementar diferentes fases, permitiría usar un mismo mallado para cualquier volumen de agua en el depósito a estudiar, especificando en cada cálculo hasta dónde llega el nivel, pero esto requiere un gran esfuerzo computacional. Realizar varios modelos más simples es ventajoso siempre que lo que se quiera estudiar sea sólo la distribución de velocidades en el líquido del interior del depósito, si bien se deben asumir estas dos simplificaciones:

- El volumen del líquido en el tanque, es constante. Esto no sería correcto en el uso real de la máquina, pero sí en un ensayo como el realizado, ya que el agua que se inyecta en los agitadores proviene del circuito de retorno de la bomba que toma el agua del propio tanque.
- El oleaje es despreciable, también aceptable ya que el ensayo real es con la máquina parada.

En nuestro caso, al haber analizado el tanque, con 1000, 2000 y 3000 L, se necesitaron 3 modelos diferentes, cuyas características se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Características de los modelos CFD

	Modelo 1000 L	**Modelo 2000 L**	**Modelo 3000 L**
Celdas	965.063	1.494.857	1.046.289
Tamaño mínimo de celda	4,42 x 10-4 m	4,55 x 10-4 m	4,75 x 10-4 m
Tamaño máximo de celda	0,025 m	0,025 m	0,035 m
Tipo de malla		No estructurada	
Remallado en paredes		SI, 6 capas	

Uno de los problemas que presenta esta simplificación, es la modelización de la lámina libre de agua en el tanque. Ni se puede imponer condición de contorno "pared", ni es una superficie de salida de fluido. Como táctica, se ha optado por imponer condición de entrada de fluido, especificando que la masa de fluido que entra por ese contorno es cero.

El modelo de turbulencia adoptado ha sido el estándar k-ε, y en cuanto a funciones de pared se ha adoptado el modelo escalable. El esquema de cálculo utilizado es el de segundo orden, con el algoritmo SIMPLE.

En cálculo estacionario, los residuos de cálculo alcanzan rápidamente valores menores a 10^{-4}, a excepción de los de la ecuación de continuidad. Éstos nunca llegan a alcanzar dichos valores, y son más elevados cuanto mayor sea el número de celdas tenga el modelo (provocado por el volumen de agua en el tanque) y número de agitadores funcionando. Por este motivo se limitó el número de celdas del modelo de 3000 L incrementando el tamaño de las celdas en el interior del modelo. En este contexto, se considera que el cálculo ha convergido cuando los valores de dichos residuos son estables, que coincide cuando se estabilizan los valores monitorizados (figura 3). Para ello se necesitan unas 4 horas de cálculo en las que se calculan unas 1500 iteraciones con un ordenador de 16 GB de RAM con una CPU Intel i7 4820k.

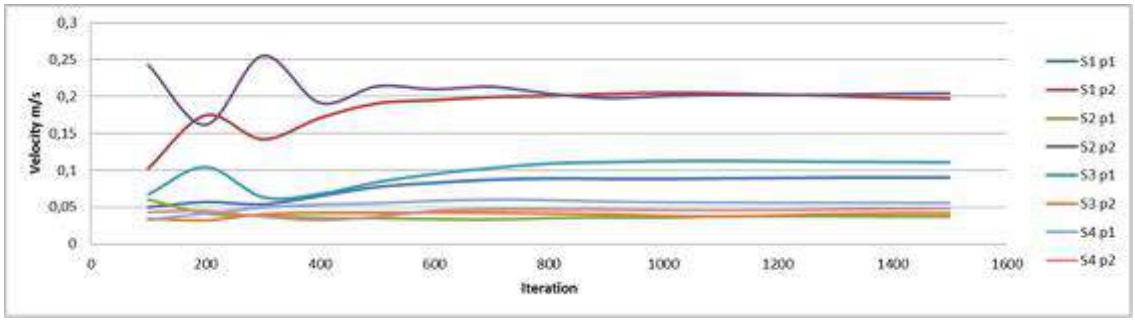


Figura 3. Gráfica que representa, en un modelo de 1000 L, la velocidad calculada en 8 puntos de muestra conforme avanzan las iteraciones de cálculo. Se concluye que en este caso, es suficiente con 1500 iteraciones, ya que el cálculo lleva estabilizado desde la iteración 900.

El punto crítico del modelo informático es la modelización de la boquilla del agitador. En un primer momento, se realizó una reproducción lo más exacta posible de la geometría de todos los elementos del depósito del pulverizador, lo que incluía disponer boquillas en los agitadores de 2,5 mm de diámetro de orificio, pero se observó que de esta forma se obtenían unos resultados inferiores en magnitud a los reales. De aquí se dedujo que el efecto de contracción del chorro en la boquilla no era despreciable, por lo que se introdujo un diámetro menor.

La condición de contorno "salida de fluido", necesaria para el cálculo de los modelos, se dispuso cerca de la zona donde se extrae el líquido del depósito, en la zona inferior.

2.3. Recopilación de datos experimentales

El experimento real es el explicado en [7]. En el depósito indicado en el apartado 2.1 se establecieron 4 secciones de mediciones, y en cada sección, hasta 8 puntos de medida (en función del nivel de agua en el depósito), tal y como se indica en la figura 4.

El número de simulaciones realizado ha sido en total 18:

- 3 niveles de agua diferentes en el depósito: 1000, 2000 y 3000 L
- 3 presiones diferentes en las boquillas de agitación: 8, 10 y 12 bares
- 2 configuraciones diferentes de los agitadores: 2 y 4 boquillas simultáneas

Con 1000 L en el depósito, sólo se pudieron tomar medidas en los puntos 1 y 2, mientras que, con 2000 L, sólo en los puntos 1, 2, 3, 4 y 5. Las medidas en todos los puntos de muestreo (figura 4) sólo estuvieron disponibles por lo tanto con 3000 L de agua en el depósito.

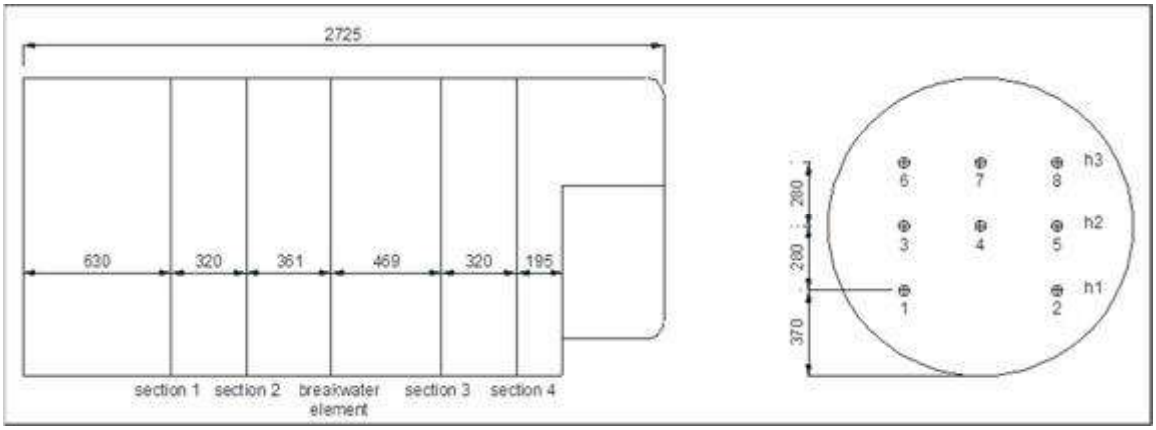


Figura 4. Ubicación de secciones y puntos de medida en el depósito del experimento.

3. Resultados y discusión

3.1. Influencia del nivel del depósito y presión del circuito de agitación

Si se realiza la media de velocidades de todos los puntos de muestreo, distinguiendo entre niveles del depósito y presiones del circuito de agitación (figura 5), la simulación CFD predice razonablemente bien que el factor más determinante en la velocidad de agitación es el nivel de agua en el depósito, de modo que la velocidad del fluido aumenta cuanto menor es el nivel de agua en el depósito. La influencia de la presión (y por lo tanto del caudal) en las boquillas de agitación es menos importante, aunque la tendencia es que a mayor presión mayor velocidad; esta tendencia se hace más acusada cuando disminuye el nivel de agua en el depósito.

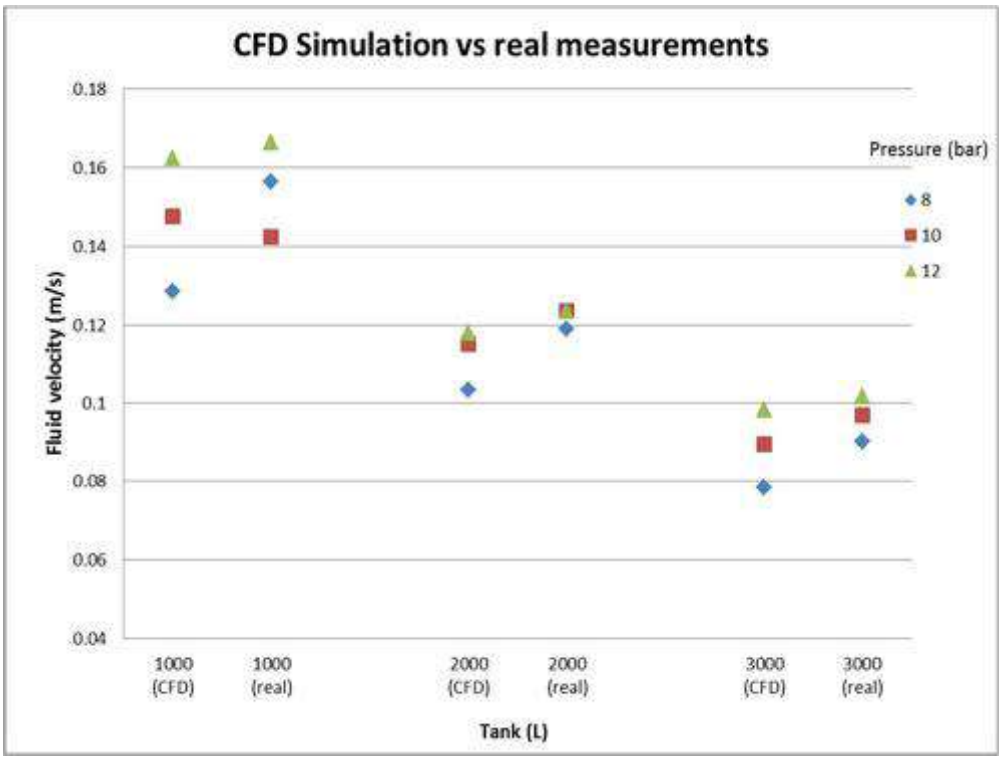


Figura 5. Velocidad del fluido según el nivel de agua en el depósito y la presión en el circuito de agitación.

3.2. Influencia del número de boquillas en funcionamiento

Si se estudia el número de boquillas en funcionamiento, la simulación CFD llega a las mismas conclusiones que el experimento real. La velocidad de agitación del fluido es similar con el depósito lleno, independientemente de que haya 2 o 4 boquillas funcionado. Pero cuando el nivel del depósito baja, es claramente más ventajoso usar sólo 2 boquillas. La conclusión obvia para el modelo de máquina empleado, es, que es innecesario para el fabricante montar 4 boquillas, simplificando la construcción y el coste de la máquina, ya que con ello no sólo no se obtiene una mejora de la agitación, sino que es contraproducente conforme disminuye el nivel de líquido en el depósito.

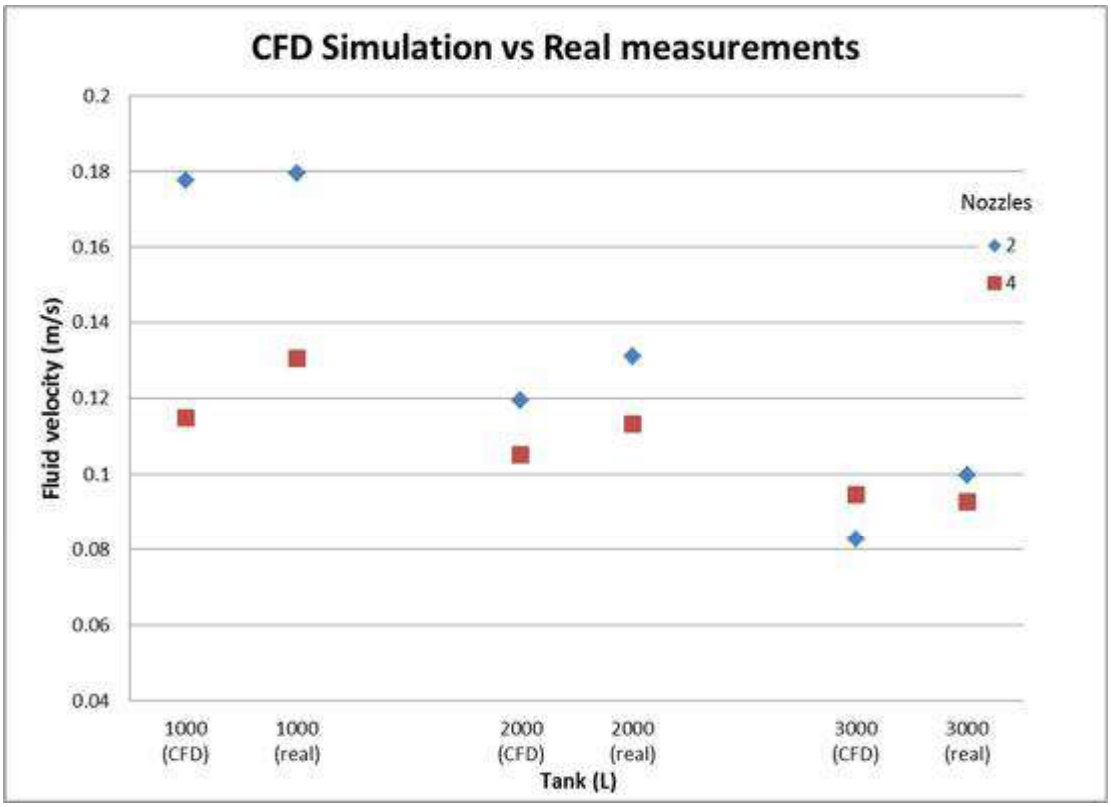


Figura 6. Velocidad del fluido según el número de boquillas en funcionamiento

La simulación CFD permite comprender el fenómeno que explica esta aparente paradoja. En el depósito estudiado, la alineación aproximada de los agitadores con los agujeros del rompeolas, hace que las corrientes generadas por un agitador tiendan a atravesar dicho agujero. Cuando sólo funcionan dos boquillas, lo hacen en esquinas contrapuestas del depósito, de forma que no existe interacción entre ambas. Pero cuando funcionan las 4, lo hacen enfrentadas 2 a 2 (figura 7), por lo que las corrientes generadas por unas tienden a contrarrestar las producidas por otras. Por lo tanto se deduce que la ubicación de las boquillas y de los agujeros del rompeolas central, son determinantes en el comportamiento del fluido dentro del depósito.

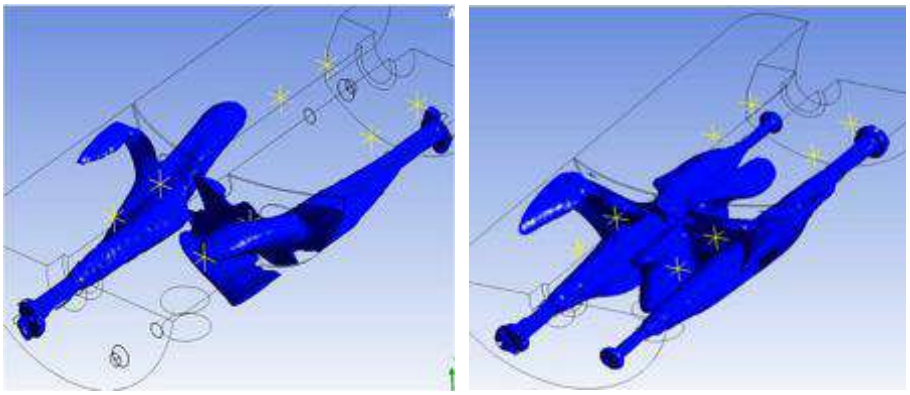


Figura 7. Diagrama de isovelocidades 0,2 m/s con 2 y 4 boquillas funcionando en un depósito con 1000 L de líquido.

3.3. Velocidades por planos y secciones

Si se comparan los datos realizando medias de velocidades de los puntos pertenecientes a una misma altura, se observa que las velocidades teóricas obtenidas en el modelo informático se ajustan bastante bien a las experimentales, aunque en la altura 2 (a 65 cm del fondo) se obtienen valores CFD sensiblemente inferiores a los determinados experimentalmente.

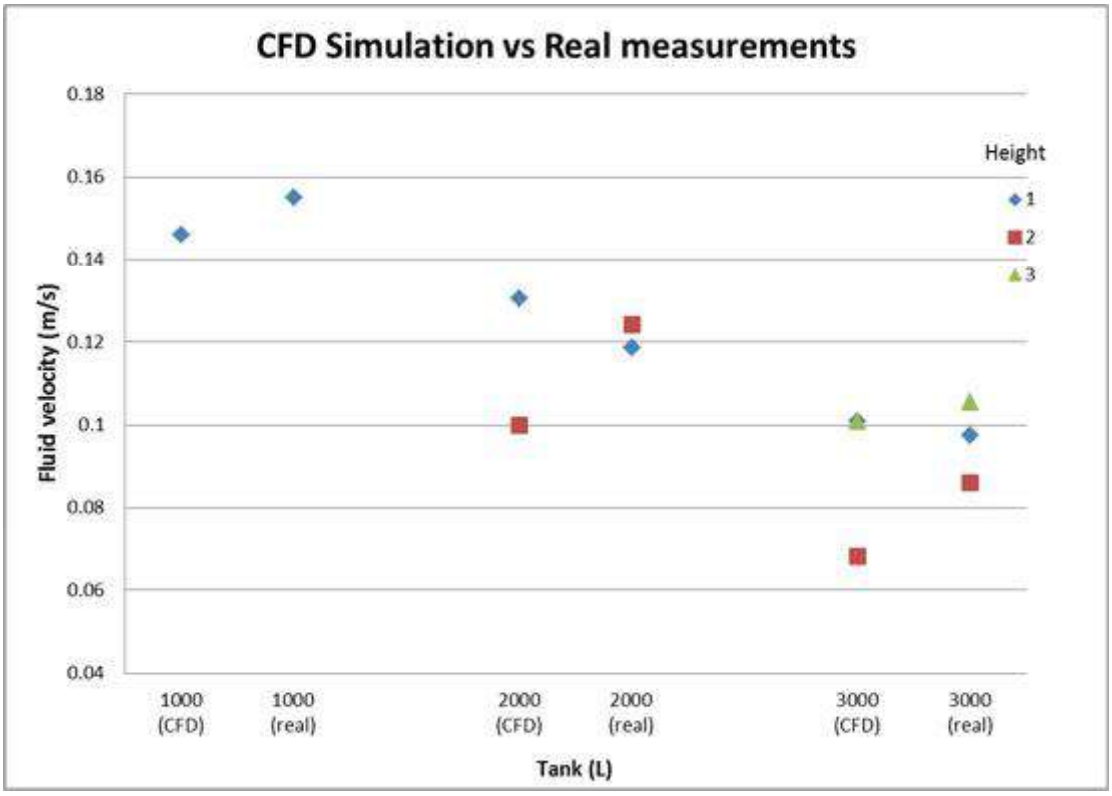


Figura 8. Velocidad del fluido según la altura de mediciones (1: 37 cm; 2: 65 cm, 3: 93cm)

Si se realiza el estudio por secciones, la simulación por CFD predice correctamente que la que se ha determinado como sección 2 en el depósito es la que presenta mayores velocidades en todo caso. También es correcta la simulación informática en determinar que a menor nivel de agua en el depósito, las diferencias de velocidad entre secciones aumentan.

Hay algunos aspectos en los que los resultados obtenidos se alejan de la medición real, como por ejemplo en la disparidad de comportamiento de las secciones 1 y 3 con el depósito lleno con 1000 L; la medición real indica que la velocidad de ambas secciones es significativamente diferente, mientras que la simulación informática la da similar para ambas y con un valor intermedio.

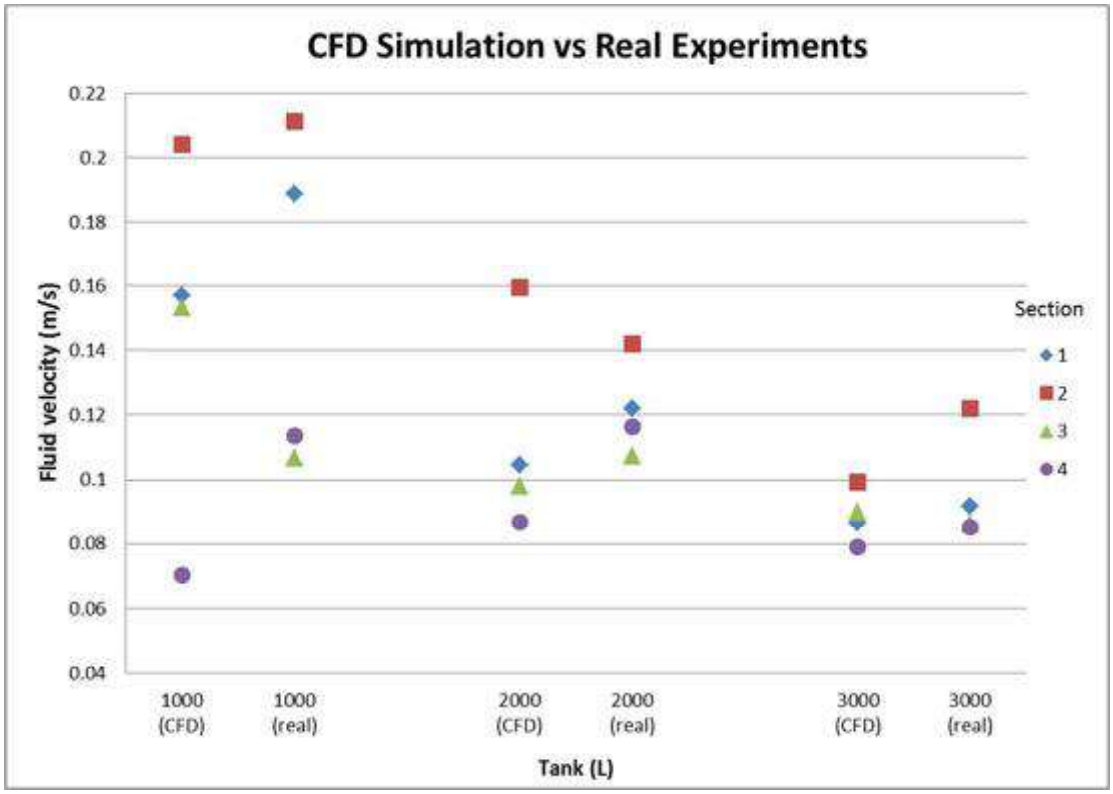


Figura 9. Velocidad del fluido según la sección de medición

3.4. Comparación por puntos de medida

Finalmente, se han comparado las velocidades medias observadas en los diferentes puntos de medición. Cualitativamente se observa que el que se ha denominado punto 1 es el que tiene las mayores velocidades, salvo en el caso del depósito con 3000 L en que es superado por el punto 7. La mayor disparidad es la velocidad del punto 5 en la simulación del depósito con 2000 L.

Debe mencionarse que las velocidades teóricas calculadas en la simulación CFD tienen siempre un intervalo mayor a las obtenidas en la medición. Así por ejemplo con 1000 L, tenemos una velocidad real media mínima de 0,15 m/s en el punto 2 y una máxima de 0,16 en el punto 1, mientras que en la simulación CFD nos da una velocidad mínima de 0,128 para el punto 2 y una máxima de 0,164 para el punto 1. En el caso del depósito con 3000 L, tenemos en la realidad una velocidad máxima de 0,133 m/s en el punto 7 y una mínima de 0,078 en el punto 5, mientras que la simulación CFD nos da unos valores de 0,136 y 0,065 respectivamente. En conclusión, las simulaciones CFD realizadas parecen infravalorar las velocidades mínimas.

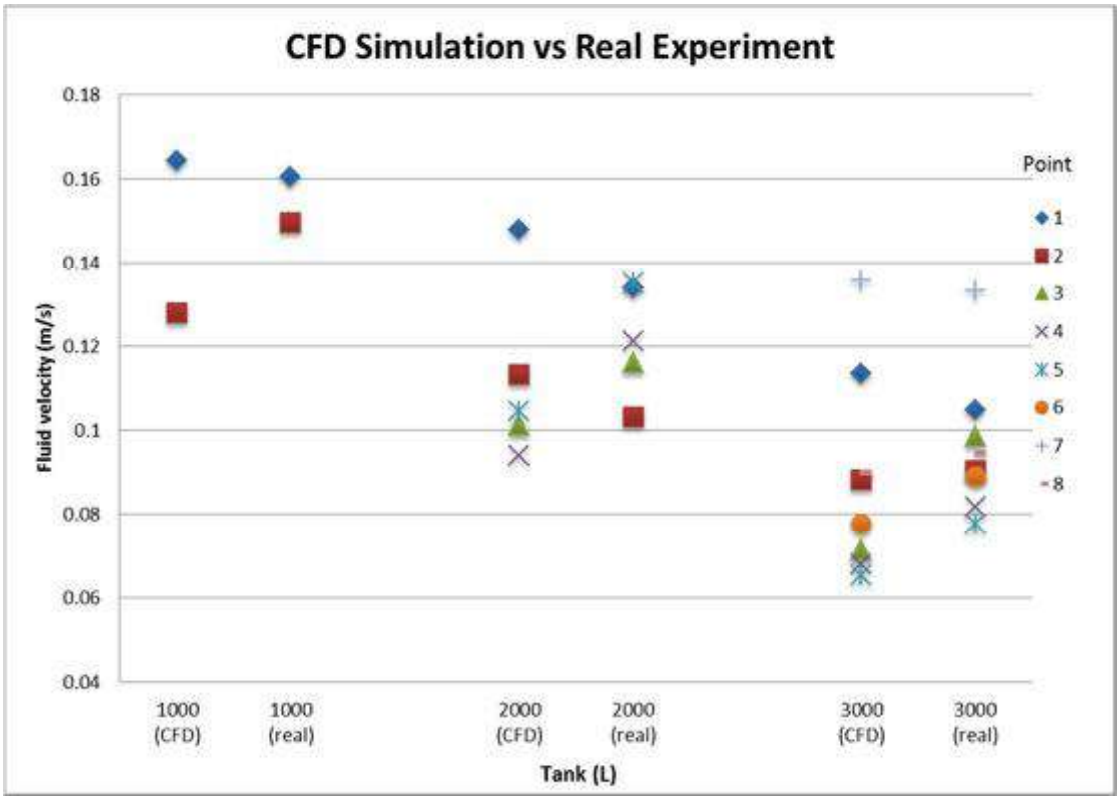


Figura 10. Velocidad del fluido según el punto de medición

3.5. Análisis cuantitativo de los errores

El criterio general de validez de modelos de CFD [12] es conseguir un error por debajo del 30 % calculado con la ecuación 1.

$$E = \frac{1}{N}\sum \frac{|V_m - V_c|}{V_m} x100 \quad (1)$$

Bajo este criterio, la comparación de datos estimados y reales punto por punto arroja errores elevados (tabla 2) con errores tolerables en un tercio de ellos, lo cual iría en consonancia con otros autores [9] que también han obtenido un porcentaje de correlación punto a punto bajo en experimentos similares.

Tabla 2. Errores de los modelos considerando todos los puntos de medida

Modelo	Error (%)	% puntos con medidas < 30%
1000	47,89	25
2000	46,58	42
3000	42,41	38
Media	***45,62***	***35***

Sin embargo, las medias de velocidades obtenidas en el experimento real son muy similares a las medias de velocidades obtenidas mediante simulación CFD. En la comparación, por ejemplo, del modelo CFD de 1000 L a 10 bar con 4 agitadores, respecto del experimento real, la media de los valores es 0,116 y 0,125 respectivamente, lo que, al contrario que el análisis punto a punto, supone una aproximación bastante aceptable con un error del 7%. El caso expuesto es un ejemplo,

ya que en todos los casos (tabla 3), las medias obtenidas con CFD son aproximaciones muy buenas a las medias medidas experimentalmente.

Tabla 3. Porcentaje de error de las medias de velocidades entre mediciones reales y simulaciones informáticas.

	2 agitadores			4 agitadores		
Modelo	**8 bar**	**10 bar**	**12 bar**	**8 bar**	**10 bar**	**12 bar**
1000	20%	12%	8%	14%	7%	14%
2000	10%	4%	12%	16%	10%	5%
3000	23%	16%	14%	3%	1%	7%

Aunque es posible que la introducción del medidor dentro del depósito influya en las corrientes generadas en el líquido cuando éstas se miden experimentalmente, por la forma del velocímetro cabe esperar que la influencia sea pequeña. Una explicación a este hecho sería que el CFD magnifica los resultados de velocidades, tanto al alza como a la baja, de manera que los errores por exceso se compensan con los errores por defecto haciendo que el conjunto de valores no se desvíe de la media más de un 30 %.

4. Conclusiones

Los modelos CFD han permitido predecir de forma correcta el comportamiento general del fluido en el depósito considerando valores medios de velocidad en función de los parámetros del sistema de agitación (nivel de agua en el depósito, presión del circuito hidráulico y número de boquillas activas).

Por lo tanto, con la metodología empleada, el CFD se puede convertir en una herramienta útil de diseño para el fabricante, que permita la toma de decisiones relativas al diseño del sistema de agitación de forma previa a la fabricación del primer prototipo.

Sin embargo, la estimación de velocidades punto a punto sólo consigue estimar velocidades del fluido en el 35% de los puntos de medida con errores menores del 30%, mostrando una baja fiabilidad. La metodología descrita es útil para conocer el comportamiento del fluido pero no para estimar velocidades concretas en un punto.

5. Agradecimientos

Se agradece a la empresa GarMelet SL su colaboración en la realización del estudio.

Referencias

1. ISO. Equipment for crop protection - Spraying equipment -Part 2: Test methods for hydraulic sprayers; ISO 5682-2. International Organization for Standadization: Geneva, Switerlrand, 1997.
2. Balsari, P.; Tamagnone, M.; Allochis, D.; Marucco, P.; Bozzer, C. Sprayer tank agitation check: A proposal for a simple instrumental evaluation. Fourth European Workshop on Standardised procedure for the Inspection of Sprayers –SPISE 4- Lana (South Tyrol), Marck 27-29, 2012.
3. Ozkan, H.E.;Ackerman, K.K. Instrumentation for measuring mixture variability in sprayer tanks. Appl. Eng. Agric. 1999, 15 (1), 19-24
4. Ucar, T.; Ozkan, H.E.; Fox R.D.; Brazee R.D.; Derksen R.C. Experimental study of jet agitation effects on agrochemical mixing in sprayer tanks. J. Agric. Eng. Res. 2000, 78, 195-207.
5. Vondricka, J.; Schulze, P. Measurement of mixture homogeneity in direct injection systems. T. ASABE. 2009, 52(1), 61-66
6. Tamagnone, M.; Balsari, P.; Bozzer, C.; Marucco, P.; Assesment of parameters needed to design agitation systems for sprayer tanks. Asp. Appl. Biol. 2012, 114, 167-174.

7. García-Ramos, F.J.; Badules, J.; Bone; A. Gil, E.; Aguirre, J.; Vidal, M. Application of an acoustic Doppler velocimeter to analyse the performance of the hydraulic agitation system of an agricultural sprayer. Sensors 2018(11):3715
8. Armenante, P.M.; Luo C.; Chou, C.; Fort, I.; Medek, J. Velocity profiles in a closed unbaffled vessel: comparision between experimental LDV data and numerical CFD predictions. Chem. Eng. Sci. 1997, 52(20), 3483-3492.
9. Ucar,T.; Fox R.D.; Ozkan, H.E.; Brazee R.D. Simulation of jet agitation in sprayer tanks: comparision of predicted and measured water velocities. T. ASAE. 2001, 44(2) 223-230.
10. Chen, M.; Ñiao, B.; Pan, J.; Li, Q.; Gao, C. Improvement of the flow rate distribution in quench tank by measurement and computer simulation. Mat. Lett. 2006, 60, 1659-1664.
11. Micheli, G.B.; Padilha, A.; Scalon, V.L.; Numerical and experimental analysis of pesticide spray mixing in spray tanks. Eng. Agric. Jaboticaabal. 2015, 35(6), 1065-1078.
12. Delele, M.A., 2009. Engineering design of spraying systems for horticultural applications using computational fluid dynamics. Universidad Católica de Leuven, Bélgica.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Estudio sobre la clasificación de la eficiencia energética de los tractores agrícolas

M. Suárez[1], R. Romero[1]

[1] ETSIAM (UCLM), Paseo de los Estudiantes, s/n, 02071, Albacete, España; mariano.suarez@uclm.es

Resumen: Eficiencia Energética consiste en optimizar la relación entre la cantidad de energía consumida y el servicio final obtenido, por medio de la implementación de medidas a niveles tecnológicos y de gestión. Desde el pasado hasta la actualidad, se han considerado distintos métodos para definir los términos de eficiencia energética en los tractores. En este documento se consideran las variaciones de clasificación que se producen en una muestra de tractores con distintos posibles métodos de clasificación, comparándolos entre ellos y estudiando las consideraciones que tienen dichos ensayos para ser usados en clasificación energética de tractores. Estos sistemas de clasificación son obtenidos de los sistemas de determinación de características de los tractores que se basan en el estudio de los códigos de ensayo de tractores de la OCDE. La clasificación de un método alternativo es comparada con respecto a las clasificaciones de eficiencia energética de tractores que se pueden justificar por el uso de los datos del ensayo de tractores de la OCDE, considerando la robustez de la estabilidad del ensayo a la barra.

Palabras clave: ensayo, toma de fuerza, potencia a la barra, tracción

1. Introducción

Eficiencia Energética consiste en optimizar la relación entre la cantidad de energía consumida y el servicio final obtenido por medio de la implementación de medidas a niveles tecnológicos y de gestión.

El parámetro que más convenientemente define la eficiencia energética en los tractores agrícolas es el consumo específico. El consumo específico indica la capacidad que tiene un motor para transformar la energía química de un combustible en energía mecánica, y se expresa como la cantidad de combustible que hay que consumir (en gramos) para obtener una determinada potencia (en kilovatios- kW) durante una hora (g/kWh), o lo que es equivalente, para obtener un trabajo (kJ).

En el funcionamiento del tractor hay diferentes tipos de causas que producen la alteración de la eficiencia energética del mismo, y por lo tanto del efectivo aprovechamiento de energía. Un conjunto de causas se debe a la tecnología propia de los motores de los tractores, los elementos y condiciones de los circuitos anexos a los motores, y la puesta a punto. Otro tipo de causas se fundamentan en la constitución del propio vehículo, entre las que se encuentran los elementos de la transmisión, los sistemas de rodadura, y la distribución de pesos. Un último tipo de causas se deben a las condiciones de funcionamiento del motor y del uso que se haga del tractor en las condiciones de suelo según tipologías y tamaños de los aperos.

Bajo estas perspectivas se muestra difícil conocer que grupos de tractores entre todos son los más eficientes. Ello se manifiesta más complicado cuando en ensayos realizados a tractores con relativas pocas horas de funcionamiento, no se aprecian valores exactamente coincidentes con los

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3459

realizados a los que son utilizados como referencia, según distintos estudios de ensayos de tractores en uso de determinados modelos.

Desde el pasado hasta la actualidad, se han considerado distintos métodos para definir los términos de eficiencia energética en los tractores.

Muchos de los sistemas se basan en el estudio de los códigos estándar de la OCDE [1] para los ensayos oficiales de prestaciones de los tractores agrícolas y forestales.

Según Márquez [2], el sistema DLG-PowerMix determina el consumo por medio de ensayos realizados sobre una pista de hormigón, utilizando un carro dinamométrico modificado, simulando los ciclos de trabajo para diferentes operaciones agrícolas durante distintos tiempos, considerando que la máquina es la adecuada a la potencia del tractor, y en el que se ha incorporado un torquímetro en la toma de fuerza y un tester de hidráulicos, para proporcionar las cargas que se corresponderían con los trabajos de los aperos.

Otros posibles sistemas basan su fundamento en el análisis de las características de los distintos elementos que constituyen un tractor.

Independientemente de las anteriores consideraciones, y en base a los datos de los ensayos de los códigos de la OCDE [1], se van a establecer algunos criterios sobre los distintos métodos que podrían arrojar información sobre una clasificación energética y la comparación entre las mismas.

2. Materiales y métodos

Unos de los problemas, que se suscitan en las metodologías de la clasificación de la eficiencia energética de tractores, es conocer qué muestra es representativa de la población de tractores, que consideración hay que valorar al ser un mercado en constante evolución, y que clasificación se proporciona a un tractor del que no se encuentran datos.

Estos problemas surgen entre otros cuando se van incorporando factores a las clasificaciones energéticas. De estos estudios se puede deducir, en gran medida, que el valor que los clasifica van a ser conforme al criterio de aquellos que lo valoran, cuanto en tanto otro valor u otro criterio y razonamiento podría ser tan válido como el admitido y justificado técnicamente.

2.1. Materiales

Con el objeto de poder procesar la información del objeto de este artículo, se procede al estudio de un reducido conjunto de tractores cuya potencia se encuentra en el intervalo de 90 a 140 kW sacados de las fichas de los mismos publicados en Agrotécnica [3].

La muestra de tractores está formada por los siguientes modelos:

Case IH puma 130, Case IH puma 145, Case IH puma 160, Case IH puma 170, Case IH puma 200 , Massey Ferguson 5465, Massey Ferguson 5475, Massey Ferguson 7619, Massey Ferguson 7620, Massey Ferguson 7622, New Holland 7624, New Holland 7.185, New Holland 7.200, New Holland 7.210, New Holland 7.220, New Holland 7.250.

2.2. Métodos

En este artículo y para hacerlo comprensible, se va a realizar una clasificación energética de tractores dividida en tres grupos: alta (A), común (B) y baja (C). Cada grupo está formado por los tractores que se encuentren dentro de las líneas de tendencias o regresión del Cs (consumo específico) respecto a la potencia (kW) de los tractores de la muestra y estableciendo unos márgenes inferiores y superiores del 3,5% respecto a la línea de regresión media (7% de intervalo total). Con una muestra tan pequeña no se ha estimado una tendencia exponencial como la propuesta por el IDAE [4], pero respetando los márgenes de la clasificación energética del IDAE [4].

2.2.1. Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor por medio del mínimo consumo específico

Esta metodología considera que el parámetro que mejor define la eficiencia energética de los tractores es el mínimo consumo específico.

2.2.2. Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor por medio del mínimo consumo específico aplicando correcciones debidas a las condiciones atmosféricas.

Otra clasificación se puede estimar corrigiendo las potencias y obteniendo valores de referencia en condiciones similares, por el hecho de que los tractores no hayan sido ensayados en las mismas condiciones atmosféricas. La norma UNE [5] proporciona los modelos de las correcciones a aplicar.

2.2.3. Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos de las curvas características del tractor.

La clasificación energética se va a realizar en base a la determinación de un índice promediado expresado en g/kWh del ensayo del tractor en diversas condiciones de seis puntos que están distribuidos por toda la gama de posible funcionamiento del motor. Estos seis puntos se corresponden con:

Régimen nominal y potencia máxima producida a ese régimen (potencia nominal).

Zona de actuación del regulador a un régimen superior al nominal y potencia equivalente al 80% de la nominal.

Velocidad de giro del motor al 90% del régimen nominal y potencia igual al 80% de la potencia nominal.

Velocidad de giro del motor igual al 90% del régimen nominal y potencia equivalente al 40% de la potencia nominal.

Velocidad de giro del motor al 60% del régimen nominal y potencia igual al 60% de la potencia nominal.

Velocidad de giro del motor al 60% del régimen nominal y potencia igual al 40% de la potencia nominal.

2.2.4. Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos estimados de las curvas características del tractor.

La clasificación se realiza en base a la estimación de los 6 puntos del motor del método anterior y que se determinan por medio de modelos obtenidos de las relaciones que se dan en los ensayos de construcción de las curvas características de los motores de los tractores cuando no se tiene el ensayo oficial a los 6 puntos según Gil [6].

2.2.5. Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos estimados del tractor considerando la existencia de sistema de gestión usando valores del método 2.2.4.

Otra clasificación energética se puede establecer si se aplica la teoría de utilizar un índice corrector a los valores de la metodología 2.2.4 que poseen sistema de gestión según Gil [6].

2.2.6. Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos del tractor considerando la existencia de sistema de gestión usando valores del método 2.2.3.

Otra clasificación energética se puede establecer si se aplica la teoría de utilizar un índice corrector a los valores de la metodología 2.2.3 en los tractores que poseen sistema de gestión según Gil [6].

2.2.7. Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos estimados del tractor considerando la eficiencia de la transmisión.

Se realiza otra clasificación según el método 2.2.5 considerando una eficiencia media de la transmisión según Gil [6].

2.2.8. Eficiencia energética considerando el conjunto del tractor con valores obtenidos del ensayo a la barra

Se realiza una última clasificación estudiando el valor del consumo específico del ensayo a la barra estudiando la robustez del mismo proporcionado por los ensayos de los laboratorios de Nebraska [7].

En los boletines de ensayos del código 2 de la OCDE [1], hay un valor muy robusto sobre la eficiencia energética del tractor, concretado en el valor del consumo específico (Cs) en los ensayos a la tracción realizado a distintas marchas. Y siendo robusto, se pueden apreciar diferencias apreciables de su valor según los casos, indicativo de la sensibilidad del uso del Cs en el ensayo de tractores debido a la peculiaridad de las curvas de isoconsumo y las alteraciones que se producen en las condiciones de funcionamiento de los motores.

En teoría el valor de consumo específico en esta variedad de ensayos a la barra a distintas marchas, debería de coincidir con el del mismo régimen en el ensayo a la toma de fuerza, considerando que el "acelerador" se coloca en la posición máxima. Debido a la sensibilidad que se da en las curvas de isoconsumo, las alteraciones puntuales que se producen en los funcionamientos de los motores, así como las simplificaciones que en ocasiones se realizan (despreciar la existencia de los rendimientos de transmisión en la toma de fuerza, entre otros), hace que los valores no confronten. Ahora bien, el valor referido puede ser determinante para realizar otro modelo de clasificación energética, o bien para considerarlo como coeficiente en una clasificación energética, pues ofrece la ventaja de ser obtenido considerando al tractor como un conjunto en el que se valoran distribución de pesos, dimensiones de los sistemas de rodadura y transferencias de carga, incluidos otros factores por ser un ensayo realizado con las características de diseño del tractor.

3. Resultados y discusión

Los resultados de aplicar estos métodos se proporcionan en los siguientes apartados.

El número de orden de los tractores de las siguientes tablas se corresponden con la mayor eficiencia energética y que coinciden con los menores consumos específicos según el método aplicado, de tal forma que el 1º es el más bajo y el 16º el más alto.

3..1 Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor por medio del mínimo consumo específico

La clasificación energética considerando la eficiencia del motor por medio del mínimo consumo específico se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de los tractores clasificados según mínimo consumo energético N_n (potencia en kW)-Cs (consumo específico en g/kWh)

	CIH Puma 130	**CIH Puma 145**	**CIH Puma 160**	**CIH Puma 170**	**CIH Puma 200**	**MF 5465**	**MF 5475**	**MF 7619**
N_N	92,5	103,5	107,6	112,5	132,0	78,9	86,3	113,0
Csmin	223	215	220	212	214	233	238	215
Clase	B	B	B	B	B	B	C	B
Orden	13º	7º	12º	1º	3º	15º	16º	8º
	MF 7620	MF 7622	MF 7624	NH 7.185	NH 7.200	NH 7.210	NH 7.220	NH 7.250
N_N	121,0	131,8	139,8	96,1	110,3	100,8	112,5	132,0
Csmin	218	214	217	214	216	224	212	214
Clase	B	B	B	A	B	B	B	B
Orden	11º	4º	10º	5º	9º	14º	2º	6º

Todos los tractores se corresponden con la clasificación energética común (B), excepto uno de la clase A (Alta) y otro de la clase C (baja), según puede observarse en la figura 1.

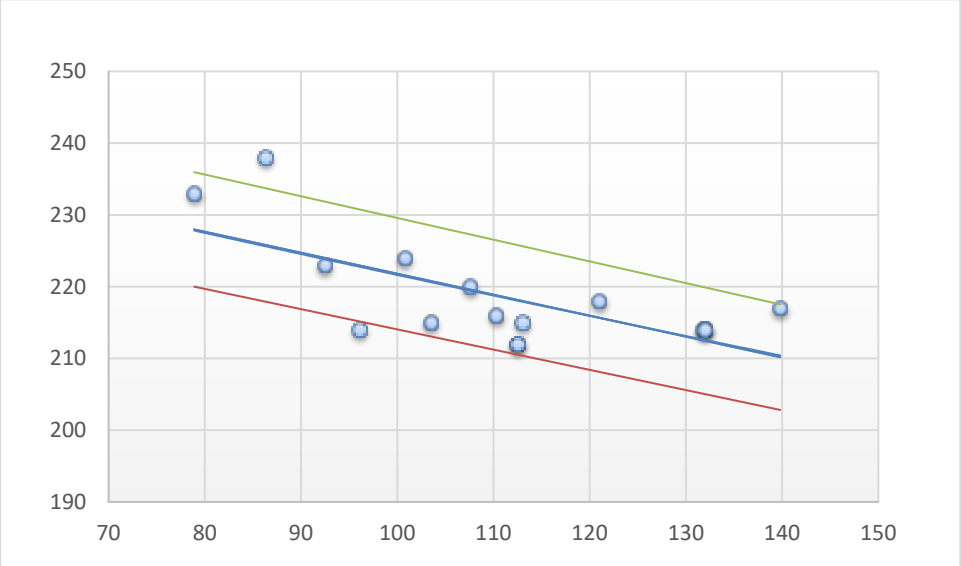


Figura 1. Clasificación energética de tractores según su mínimo consumo específico del motor

3.2. Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor por medio del mínimo consumo específico aplicando correcciones debidas a las condiciones atmosféricas.

La clasificación energética considerando la eficiencia del motor por medio del mínimo consumo específico aplicando correcciones debidas a las condiciones atmosféricas se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de los tractores clasificados según mínimo consumo energético N_n (potencia en kW)-Cs (consumo específico en g/kWh)

	CIH puma 130	**CIH puma 145**	**CIH puma 160**	**CIH puma 170**	**CIH puma 200**	**MF 5465**	**MF 5475**	**MF 7619**
N_N	92,5	101,0	108,9	112,4	129,5	77,3	83,9	107,7
Csmin	223	215	220	212	214	233	238	215
Clase	B	B	B	B	B	B	C	B
Orden	13º	7º	12º	1º	3º	15º	16º	8º
	MF 7620	**MF 7622**	**MF 7624**	**NH 7.185**	**NH 7.200**	**NH 7.210**	**NH 7.220**	**NH 7.250**
N_N	117,1	128,2	135,3	95,1	109,2	103,9	112,3	129,5
Csmin	218	214	217	214	216	224	212	214
Clase	B	B	B	A	B	B	B	B
Orden	11º	4º	10º	5º	9º	14º	2º	6º

3.3. Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos de las curvas características del tractor.

La clasificación energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos de las curvas características del tractor se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de los tractores clasificados según mínimo consumo energético N_n (potencia en kW)-Cs (consumo específico en g/kWh)

	CIH puma 130	**CIH puma 145**	**CIH puma 160**	**CIH puma 170**	**CIH puma 200**	**MF 5465**	**MF 5475**	**MF 7619**
N_N	92,5	103,5	107,6	112,5	132,0	78,9	86,3	113,0
Cs 6 p	255	241	256	247	243	295	291	248
Clase	B	A	B	B	B	C	C	B
Orden	13º	3º	14º	9º	5º	16º	15º	11º
	MF 7620	**MF 7622**	**MF 7624**	**NH 7.185**	**NH 7.200**	**NH 7.210**	**NH 7.220**	**NH 7.250**
N_N	121,0	131,8	139,8	96,1	110,3	100,8	112,5	132,0
Cs 6 p	245	240	244	241	238	251	247	243
Clase	B	B	C	A	A	B	B	B
Orden	8º	2º	7º	4º	1º	12º	10º	6º

3.4. Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos estimados de las curvas características del tractor.

La clasificación energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos estimados de las curvas características del tractor se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Valores de los tractores clasificados según mínimo consumo energético N_n (potencia en kW)-Cs (consumo específico en g/kWh)

	CIH puma 130	**CIH puma 145**	**CIH puma 160**	**CIH puma 170**	**CIH puma 200**	**MF 5465**	**MF 5475**	**MF 7619**
N_N	92,5	103,5	107,6	112,5	132,0	78,9	86,3	113,0
Cj	271	265	280	272	269	316	316	272
Clase	A	A	B	B	B	C	C	B
Orden	10º	4º	3º	11º	8º	16º	15º	12º
	MF 7620	**MF 7622**	**MF 7624**	**NH 7.185**	**NH 7.200**	**NH 7.210**	**NH 7.220**	**NH 7.250**
N_N	121,0	131,8	139,8	96,1	110,3	100,8	112,5	132,0
Cj	265	263	268	266	257	280	272	269
Clase	B	B	C	A	A	B	B	B
Orden	5º	2º	7º	6º	1º	14º	13º	9º

3.5. Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos estimados del tractor considerando la existencia de sistema de gestión usando valores del método 2.2.4.

La clasificación energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos estimados del tractor considerando la existencia de sistema de gestión usando valores del método 2.2.4 se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Valores de los tractores clasificados según mínimo consumo energético N_n (potencia en kW)-Cs (consumo específico en g/kWh)

	CIH Puma 130	**CIH puma 145**	**CIH puma 160**	**CIH puma 170**	**CIH puma 200**	**MF 5465**	**MF 5475**	**MF 7619**
Tipo de trasmisión	Power Shift	Power Shift	CVT	Power Shift	Power Shift	Mecánica	Mecánica	CVT
Cj	271	265	276	272	269	316	316	251
Clase	A	A	B	B	C	C	C	A
Orden	10º	6º	13º	11º	8º	15º	16º	4º
	MF 7620	**MF 7622**	**MF 7624**	**NH 7.185**	**NH 7.200**	**NH 7.210**	**NH 7.220**	**NH 7.250**
Tipo de trasmisión	CVT	CVT	CVT	Semi-powshift	Power Shift	CVT	Semi-powshift	Semi-powshift
Cj	245	243	248	266	257	277	272	269
Clase	A	B	B	A	A	B	B	C
Orden	2º	1º	3º	7º	5º	14º	12º	9º

3.6. Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos del tractor considerando la existencia de sistema de gestión usando valores del método 2.2.3.

La clasificación energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos del tractor considerando la existencia de sistema de gestión usando valores del método 2.2.3 se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de los tractores clasificados según mínimo consumo energético N_n (potencia en kW)-Cs (consumo específico en g/kWh)

	CIH puma 130	**CIH puma 145**	**CIH puma 160**	**CIH puma 170**	**CIH puma 200**	**MF 5465**	**MF 5475**	**MF 7619**
Tipo de trasmisión	Power Shift	Power Shift	CVT	Power Shift	Power Shift	Mecánica	Mecánica	CVT
Ck	255	241	252	247	243	295	291	232
Clase	B	A	B	B	C	C	C	A
Orden	12º	8º	6º	13º	10º	15º	16º	4º
	MF 7620	**MF 7622**	**MF 7624**	**NH 7.185**	**NH 7.200**	**NH 7.210**	**NH 7.220**	**NH 7.250**
Tipo de trasmisión	CVT	CVT	CVT	Semi-powshift	Power Shift	CVT	Semi-powshift	Semi-powshift
Ck	229	224	228	241	238	249	247	243
Clase	A	B	B	A	A	B	B	C
Orden	3º	1º	2º	9º	7º	5º	14º	11º

3.7. Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos estimados del tractor con valores de la eficiencia de la transmisión.

La clasificación energética considerando la eficiencia del motor mediante el consumo específico de combustible en 6 puntos estimados del tractor considerando la eficiencia de la transmisión se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Valores de los tractores clasificados según criterio 3.7 con la N_n (potencia en kW)-Cs (consumo específico en g/kWh)

	CIH puma 130	**CIH puma 145**	**CIH puma 160**	**CIH puma 170**	**CIH puma 200**	**MF 5465**	**MF 5475**	**MF 7619**
N_N	92,5	103,5	107,6	112,5	132,0	78,9	86,3	113,0
Ckt	288	276	297	272	271	336	333	275
Clase	A	A	C	B	C	C	C	B
Orden	12º	11º	14º	7º	5º	16º	15º	9º
	MF 7620	**MF 7622**	**MF 7624**	**NH 7.185**	**NH 7.200**	**NH 7.210**	**NH 7.220**	**NH 7.250**
N_N	121,0	131,8	139,8	96,1	110,3	100,8	112,5	132,0
Ckt	261	262	261	270	275	296	272	271
Clase	A	B	C	A	B	B	B	C
Orden	1º	3º	2º	4º	10º	13º	8º	6º

3.8. Eficiencia energética considerando la eficiencia del motor por medio del conjunto del tractor con valores obtenidos del ensayo a la barra

Los valores e índices de los tractores proporcionados por Nebraska [7], ensayados a la barra para distintas marchas al régimen de la potencia máxima proporcionada en el ensayo a la toma de fuerza, y comparados con estos se muestran en la tabla 8. En esta tabla también se muestra algún valor no considerado previsible, para poder observar el grado de desviación que en algún caso se puede producir pues no se encuentra próximo a los intervalos dados en Cs barra. Estos casos si son puntuales no afectan a la bondad del método.

Tabla 8. Parámetros de la robustez del Cs (consumo específico en g/kWh) respecto a la N_{max} (potencia en kW) en los ensayos a la barra

	CIH puma 130	**CIH puma 145**	**CIH puma 160**	**CIH puma 170**	**CIH puma 200**	**MF 5465**	**MF 5475**	**MF 7619**
Intervalo Cs barra (1)	0,268 0,277	0,254 0,274	0,267 0,275	0,258 0,265	0,251 0,259	0,292 0,302	0,296 0,319	0,270 0,286
Cs N_{max} TDF (2)	0,227	0,220	0,228	0,217	0,216	0,255	0,254	0,229
Ratio (1)/(2)	1,2	1,2	1,19	1,2	1,18	1,27	1,21	1,21
Valor fuera del intervalo (1)	Estable	Estable	292	282	271	Estable	Estable	Estable
	MF 7620	**MF 7622**	**MF 7624**	**NH 7.185**	**NH 7.200**	**NH 7.210**	**NH 7.220**	**NH 7.250**
Intervalo Cs barra (1)	0,269 0,278	0,268 0,272	0,262 0,275	0,247 0,265	0,262 0,273	0,284 0,304	0,258 0,265	0,251 0,259
Cs N_{max} TDF	0,230	0,227	0,231	0,221	0,219	0,231	0,217	0,216
Ratio (1)/(2)	1,19	1,19	1,16	1,16	1,22	1,27	1,2	1,18
Valor fuera del intervalo (1)	Estable	Estable	288	Estable	Estable	368	Estable	271

Este valor en unas únicas condiciones de funcionamiento del motor, en muchas marchas, y proporcionado por varios ensayos, indica el orden del consumo energético capaz de proporcionar el motor del tractor en condiciones de trabajo en pista y como referencia de los que después se puedan proporcionar en campo. Se puede apreciar como un límite inferior, haciendo notar así mismo por medio del ratio (1)/(2) de la tabla 8, la proporción entre los valores en pista y los ensayados a la toma de fuerza.

Si tomamos la media del intervalo de los valores estables, y sin considerar aquellos que puntualmente se puedan desviar de ese intervalo por la justificación expuesta en metodología, se puede realizar otra clasificación que proporciona los valores y categorías de la tabla 9.

Tabla 9. Valores de los tractores clasificados según criterio 3.8 con N_n (potencia en kW)-Cs (consumo específico en g/kWh)

	CIH puma 130	**CIH puma 145**	**CIH puma 160**	**CIH puma 170**	**CIH puma 200**	**MF 5465**	**MF 5475**	**MF 7619**
N_N	92,5	103,5	107,6	112,5	132,0	78,9	86,3	113,0
Cts	272	264	271	261	255	297	307	278
Clase	B	A	B	A	B	B	C	B
Orden	11º	6º	10º	4º	1º	15º	16º	13º
	MF 7620	**MF 7622**	**MF 7624**	**NH 7.185**	**NH 7.200**	**NH 7.210**	**NH 7.220**	**NH 7.250**
N_N	121,0	131,8	139,8	96,1	110,3	100,8	112,5	132,0
Cts	273	270	268	256	267	294	261	256
Clase	B	C	C	A	B	C	A	B
Orden	12º	9º	8º	2º	7º	14º	5º	3º

3.9. Comparación de resultados entre metodologías

Según el estudio de las tablas precedentes se destaca que:

Tractores con idéntica eficiencia energética absoluta (idéntico valor de consumo específico) están clasificados en distinta categoría debido fundamentalmente a la magnitud de potencia que poseen. Por ello se observa que el orden establecido en la tabla 3, según valores de eficiencia energética, no se corresponde con prelación de clases, como se observa en el CIH puma 145 y el MF 7622, que poseyendo un mismo C_s tienen distinta clasificación.

El hecho de que se corrijan los parámetros de los tractores por las condiciones atmosférica no tiene influencia en la alteración de las clasificaciones debido a que la mayoría de los laboratorios europeos en los que se realizan ensayos OCDE se encuentran en zonas frías y a poca altura sobre el nivel del mar, por lo que las correcciones tienen poca influencia sobre los resultados.

Se produce la alteración de 1 tractor en la clasificación del mismo que pasa del grupo B al A cuando los 6 puntos son conocidos (2.2.3) con respecto a los que necesitan ser estimados (2.2.4).

Los tractores con sistema de gestión se ven mejorados en la clasificación (2.2.5) respecto a los que no la tienen y con respecto a las que arrojan con las de los 6 puntos (2.2.4). La complejidad de los sistemas de gestión, su programación, el tipo de transmisión, y el punto del ensayo del motor ha permitido en estudios realizados encontrar contradicciones sobre la mejora de la clasificación en determinados tractores con sistemas de gestión. La alteración del parámetro de eficiencia de combustible por estos tractores puede hacer desplazar la clasificación de otros de la muestra.

Se producen en torno al 25% de alteraciones en la clasificación de los tractores de la muestra cuando se consideran las transmisiones. Curiosamente esto se da en tractores con transmisión más automáticas. Tractores que mejoraban su clasificación con sistemas de gestión vuelven a perderla con los sistemas de transmisión. Cajas más complejas producen mayores pérdidas de carga, aunque los sistemas de gestión y conducción lleguen a corregir la falta de eficiencia energética.

Tractores que carecen de tecnologías no manifiestan parámetros de eficiencia energética inferiores a los que cuentan con excesiva tecnología.

El 50% de los tractores alteran su clasificación si se compara el método IDEA con respecto al del mínimo consumo específico (2.2.1)

El 25 % de los tractores alteran la clasificación según el método de los 6 puntos (2.2.3) con respecto a la de la tracción en pista.

Un 50% alteran su clasificación considerando el método de la transmisión respecto con la de tracción en pista.

Si se usa la de mínimo consumo específico la mayoría de los tractores están en común B, solo un A y un C. Si es de 6 puntos se reparte más el número de tractores en las distintas clases (tres A y tres C).

Nunca un tractor salta dos niveles de clasificaciones.

Solo dos tractores permanecen estables en todas las clasificaciones.

4. Conclusiones

Resulta complejo el sistema de clasificaciones estudiado y se demuestra la alta sensibilidad que la consideración de parámetros o coeficientes producen, tendiendo a variar las clasificaciones cuando son usados los datos de los ensayos de la OCDE.

Referencias

1. Code 2 OCDE standard code for the official testing of agricultural and forestry tractor performance. www.oecd.org/dataoecd/60/39/49526086.pdf. 30/septiembre/2014
2. (Márquez, 2012). Márquez, L., 2012. Tractores agrícolas. Tecnologías y utilización. Blake y Helsey España Editorial.
3. (Agrotécnica, 2013). Marquez, L., 2013. Revista Agrotécnica. Blake y Helsey Espña Editorial. Junio 2013.
4. (IDAE, 2014). Instituto para la diversificación y el ahorro de la energía. http://www.idae.es/index.php/id.82/relmenu.340/mod.pags/mem.detalle. 30/septiembre/2014
5. UNE 68028:2003. Tractores agrícolas. Ensayos de potencia en la toma de fuerza. Factores de corrección.
6. (Gil, 2008). Gil, V. 2008. Eficiencia energética de los tractores agrícolas. Tesis doctoral UPM.
7. (Nebraska, 2014). Nebraska Tractor Test Laboratory – University of Nebraska–Lincoln. http://tractortestlab.unl.edu/testreports. 30/septiembre/2014

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Instalación de secado de residuos por medio de intercambiador de calor de superficie rascada

J. M. Magide[1], H. Varela[2]

[1] Área de Máquinas y Motores Térmicos, Departamento de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Santiago de Compostela. C/ Benigno Lego, s/n. 27002 Lugo (España); josemanuel.magide@usc.es
[2] Investigador colaborador externo del Grupo de Investigación Biomodem de la Universidad de Santiago de Compostela; hiram.varela@udc.es

Resumen: En las industrias cárnicas se produce sangre residual, que constituye un peligroso y costoso residuo, el cual se puede revalorizar con un equipo adecuado, como el que han patentado los autores. Dicho equipo hierve la sangre a vacío, para eliminar su humedad y transformarla en harina. Se presentan los primeros resultados de un prototipo, con especial hincapié en el sistema de vacío. Se determinaron las fugas de aire y las necesidades de aspiración en base a ellas. Los sistemas de ebullición a vacío necesitan algún equipo de decantación que separe vapores de líquidos; y esta separación se suele modelizar, para casos generales, con la ecuación de Souders. Pero la ecuación de Souders parece no considerar correctamente el efecto de succión de Venturi en este caso.

Palabras clave: vacío, fugas, harina de sangre, Souders

1. Introducción

Los mataderos e industrias cárnicas en general, generan sangre como residuo. Y este residuo puede resultar muy peligroso, pues si no se gestiona adecuadamente, su carga microbiana puede desencadenar problemas de sanidad pública que derivarían en el potencial cierre de la industria [1]. La solución habitual que emplean éstas consiste en la contratación de un gestor de residuos, el cual incinera la sangre, sin obtener de ella ningún valor. Además, estos gestores suponen un gasto importante para la economía de la industria afectada [2].

Resulta paradójico el hecho de que la sangre, un producto que puede ser muy contaminante, posee a su vez una gran cantidad de componentes de alto valor económico, como la lisina, metionina, hierro, albúmina, etc [1].

El Grupo de Investigación al que pertenecen los autores de este artículo ha desarrollado una tecnología novedosa que permite la transformación de la sangre en una forma inocua y no contaminante – la llamada "harina de sangre"- y que al mismo tiempo preserva y contiene todos los componentes de alto valor [2]. La tecnología se encuentra patentada a nivel europeo, por medio de las patentes 201630675: "Sistema de desecado de sangre líquida" y 201730019: "Dispositivo y procedimiento para la obtención de un producto desecado a partir de sangre o derivados".

En la actualidad los autores cuentan con un prototipo terminado y en fase experimental, instalado en un matadero de tamaño mediano en la provincia de Lugo. El principio de funcionamiento del prototipo es el siguiente: la sangre se introduce en un intercambiador de calor de placas, el cual posee en su interior una hélice rotatoria con capacidad de centrifugado. La hélice por una parte limita las incrustaciones y por otra incrementa la velocidad de transferencia de calor. La sangre hierve a vacío dentro del intercambiador, y los vapores que

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3475

produce se hacen coalescer en un condensador vertical, aguas abajo del cual se encuentra la bomba de vacío.

Los sistemas de vacío son muy habituales en la industria alimentaria, y se debe ser muy cuidadoso en su diseño, pues con gran facilidad presentan problemas de fugas de aire y conducciones con una inesperada succión por efecto Venturi [3]. Otro de los riesgos que presentan es el colapso por pandeo de las estructuras que lo contienen y diversos daños o flechas mecánicas que puede provocar.

En este artículo se exponen los primeros resultados con el prototipo, en relación a la gestión del vacío. Más específicamente, se estudian los tres riesgos principales que pueden sufrir las instalaciones de vacío [3]: fugas de aire, succión violenta y pandeo mecánico.

2. Materiales y métodos

Los autores cuentan con un prototipo finalizado y en fase de experimentación, en un matadero. Por tratarse de una tecnología a vacío, la primera prueba a realizar es la gestión de los tres riesgos ya mencionados. Todos ellos son inherentes al fenómeno del vacío.

En lo sucesivo, se indicarán presiones con valor negativo cuando éstas son medidas relativas en relación a la presión atmosférica. Es decir, el vacío absoluto se correspondería con -1 bar.

En los subapartados 2.1-2.7 se explicarán los componentes más importantes del prototipo. Son la esencia de la instalación, y de ellos dependen las características del sistema de vacío resultante. Es sabido que los sistemas a vacío, cuando se aplican para hacer hervir alimentos, poseen comportamientos a veces muy inestables e incluso erráticos [3], que nos pueden forzar a seguir un esquema de prueba y error más extenso de lo deseable. Así, por ejemplo, hervir la sangre a un vacío de -0.5 bar es un proceso poco violento, la liberación de gases es muy paulatina. Sin embargo, tan sólo incrementando el vacío hasta -0.7 bar, se provoca una liberación de gases mucho más violenta, que puede causar el arrastre de partículas sólidas como la propia harina, lo cual es indeseable. Este fenómeno se suele llamar "evaporación de flash" [3] y es conocido en la industria alimentaria. Por otra parte, la liberación de gases está también altamente condicionada por el tipo de intercambiadores de calor. A mayor turbulencia, mayor violencia en su liberación. Y es conocido por el experto en la materia que la presencia de hélices rascadoras, como es el caso del presente prototipo, genera una turbulencia muy importante [1]. Es por ello que fue desde el inicio una incógnita el cómo respondería nuestro sistema.

Los autores, conscientes de la dificultad que conlleva el diseño de un sistema a vacío de estas características, divulgan la lista con los principales componentes (apartados 2.1-2.7), para que el lector interesado en estas tecnologías pueda extrapolar y prever los resultados que se obtendrán en sus propios equipos experimentales.

En los apartados 2.8-2.10 se expone la metodología seguida para el estudio de los tres riesgos principales que conlleva toda tecnología de evaporación a vacío: fugas de aire, el fenómeno de la succión violenta y el pandeo mecánico. Este último fenómeno es muy específico del vacío, nunca aparece en los sistemas a presión positiva. Y se trata de un hándicap importante, pues a igualdad de resistencia mecánica, un intercambiador de calor que soporte perfectamente 10 bar de presión positiva, puede llegar a pandear (colapsar hacia el interior), con una presión negativa de tan sólo -0.5 bar. En este estudio se midió la presencia de pandeo por un método cualitativo pero contrastado [2].

2.1. Intercambiador de calor de placas

Posee un diseño novedoso, con un total de tres cámaras cilíndricas encajonadas. En la cámara central se dispone sangre para ser evaporada y transformada en harina, y por las cámaras anterior y posterior circula agua caliente a una temperatura de 75º C, con un caudal de 400 L/h.

El agua a 75 ºC transmite el calor hacia la cámara central, en la que hierve sangre a una temperatura de 45 ºC, pues es el punto de ebullición que corresponde a una presión de 100 milibares (-0.9 bar). Tenemos por tanto un diferencial térmico de 30 ºC. El agua caliente suele consistir en aguas residuales de un matadero, que en vez de ser desaprovechadas se recuperan en este prototipo.

En la Figura 1 se muestra una fotografía donde se ven las tres cámaras citadas: anterior, central y posterior. Se observa que la central posee una virola con mayor altura. En su interior se alberga sangre en ebullición y una hélice de cuatro aspas.



Figura 1. Las tres cámaras que constituyen el intercambiador de calor de placas.

2.2. Decantador

La salida de vapores del intercambiador de placas pasa por un decantador gravimétrico, que es un equipo consistente inicialmente en un pequeño depósito de diámetro DN100 (114.3 mm de diámetro exterior, 4.5 mm espesor) con un par de placas deflectoras. Su misión es separar los gases de los vapores, lo cual logra tanto con su diámetro, que debe ser suficiente para ralentizar la velocidad de los gases hasta un valor en que no venza a la gravedad actuando sobre las gotas de agua y sólidos, como con los deflectores, que provocan coalescencia y agregación de partículas líquidas [4].

En la Figura 2 se muestra una fotografía del decantador, colocado verticalmente por encima de la cámara central, para que por el pasen los vapores generados con la ebullición de la sangre.



Figura 2. El decantador, por encima del intercambiador de placas.

2.3. Sistema motor reductor-eje-hélice

Para producir harina, la sangre ha de someterse a un secado por ebullición a vacío. Esto presenta los inconvenientes de que ésta tenderá a incrustarse en las superficies de las placas y a ralentizar la transmisión de calor. Para ello el prototipo consta de una hélice de cuatro aspas, interior a la cámara central, accionada por un eje desde un motor exterior, que cuenta con un variador de vueltas mecánico, que permite variar las revoluciones de 42 hasta 240 rpm. Como la cámara central se encuentra a vacío, y al mismo tiempo se encuentra atravesada por este eje, la estanqueidad de la misma se vería comprometida de no ser un sello mecánico que se dispone para su preservación.

En la Figura 3 se muestra el conjunto motor-reductor, eje y sello mecánico.



Figura 3. El motor-reductor, eje y sello.

2.4. Bomba de vacío

Para sostener el vacío en la cámara central, se necesita una bomba. En nuestro caso es de la tipología de anillo líquido, 4 kw, del fabricante Robuschi.

En la Figura 4 se muestra la bomba de vacío y su conexión de aspiración (a la izquierda) y de expulsión (a la derecha).



Figura 4. Bomba de vacío de anillo líquido.

2.5. Condensador

Entre el intercambiador de placas y el decantador se interpone un condensador, cuya finalidad es condensar los gases a líquidos. Esto lo que consigue es quitarle carga de trabajo a la bomba de vacío [5, 6]. Técnicamente sería factible el mismo prototipo sin el condensador, pero haría falta una bomba de vacío mucho más grande. Por otra parte, el condensador enfría

aquellos gases que no sean condensables y que llegan hasta la propia bomba; esto repercute en le mejor funcionamiento de la misma, pues la bombas de anillo líquido aumentan su caudal de aspiración si los gases que aspira vienen más fríos [5]. En nuestro caso, la bomba trabaja a 120 m3/h.

El condensador es de la tipología de carcasa y tubos; cuenta con un único paso (es decir, se recorren todos los tubos en una única pasada) y un total de nueve tubos DN20 de 2 metros de largo. Por el interior de los tubos circulan los vapores que salen del intercambiador de placas, y por su exterior agua de red, a una temperatura inferior a 15ºC. La carcasa posee en su interior un total de 19 placas deflectoras, que se disponen con el objetivo de hacer zigzaguear al agua y así aumentar la velocidad de transferencia de calor.

En la Figura 5 se aprecia el condensador.



Figura 5. Condensador.

En la Figura 6 se aprecia el interior del condensador, con las placas deflectoras que hacen zigzaguear al agua de red, incrementando así notablemente la velocidad de transmisión de calor.



Figura 6. Interior del condensador.

2.6. Instrumentación

Los instrumentos de medida son dos vacuómetros y dos termómetros. Los termómetros y vacuómetros son de la marca MEI, con arreglo a la Norma UNE-EN 837-1/AC:1998 [7].

En la Figura 7 se aprecian el termómetro y vacuómetro sobre el decantador.



Figura 7. Termómetro y vacuómetro.

Las temperaturas del agua fría que alimenta al condensador, así como del agua caliente que alimenta a las placas anterior y posterior, se midieron con un termómetro de mercurio de laboratorio, marca Terinber.

2.7. Equipación de sellado

En toda instalación de vacío, son clave los elementos de sellado, pues de ellos dependen las fugas. En nuestro caso los elementos que más contribuyen a la estanqueidad son la presencia de juntas de caucho de tipo FF (Full Face) entre pares de bridas metálicas y un sello mecánico de grafito para el eje del motor, de la marca Lidering. Además, para las uniones de las diversas tuberías se emplearon diversas bridas, roscas y abrazaderas. Las roscas se sellaron con hilo de teflón.

2.8. Método de cálculo de fuga de aire

Para el cálculo de la fuga de aire, se procede a realizar un vacío de -0.9 bar en la instalación, se detiene la bomba de vacío y acto seguido se cronometra el tiempo que tarda en descender hasta -0.7 bar. En este rango de presiones el descenso de vacío se puede aproximar bien por una recta. Se realiza el experimento con aire ambiente a una temperatura de 20 ºC. Acudiendo a las tablas de propiedades físicas del aire seco, se obtiene que a esa temperatura su densidad es de 1.22 kg/m3 [8]. Y dado que la fuga de aire es lenta se puede considerar que se comporta en el sistema como un gas ideal, por lo que aplica la ecuación PV = nRT. De ella se deduce que el número de moles (n) de aire dentro de la instalación (y por tanto su densidas) variará linealmente con la presión (P), puesto que el volumen (V), la temperatura (T) y la constante de los gases (R) se mantienen constantes.

El volumen de la instalación se ha medido, a partir de la planimetría, en 0.04 m3. Calculando la diferencia de densidades del aire entre -0.9 y -0.7 bar y sabiendo el tiempo que ha tardado en producirse ese incremento de presión, se aproxima la tasa lineal de entrada de masa de aire en función del tiempo. Si consideramos la densidad del aire a 20 ºC y -0.9 bar, que será (1.22 · 0.1) kg/m3, podemos determinar el volumen de aire que entra en una hora, a un nivel de vacío de -0.9 bar sostenido constante por la acción de la bomba de vacío [8].

2.9. Succión violenta: cálculo del diámetro de decantación

Las instalaciones de vacío en las cuales se produce la ebullición de líquidos, han de diseñarse con especial cuidado para que no se produzca un efecto Venturi de succión violenta que pueda arrastrar materiales indeseados hasta la bomba de vacío. En nuestro caso, queremos hervir sangre a un vacío de -0.9bar, lo que nos arroja una temperatura de ebullición de en torno a 45 ºC [8]. Pero nos interesa que solamente sea el vapor de agua lo que sea succionado por la bomba, no el residuo seco (la harina), que posee un elevado valor económico y si se escapa con el vapor hacia la bomba se impide el objetivo de su secado. Si por alguna razón de diseño erróneo la sangre en ebullición entra en contacto con un tubo de aspiración de diámetro estrecho, será succionado de forma muy violenta hacia la bomba de vacío, estropeando todo el proceso [6]. Para entender el fenómeno, basta contemplar que si la bomba de vacío aspira 120 m3/h, como es nuestro caso, a través de un conducto DN25 (27.2 mm de diámetro interior), provocará una velocidad de gases superior a 57 m/s. Una corriente tan rápida, incluso a vacío, tiene una capacidad de succión y arrastre que posiblemente empuje hacia la bomba mucho más que el mero vapor de agua; posiblemente también sólidos como la harina.

Para solucionar estos hándicaps hemos instalado el decantador gravimétrico. Es un depósito con un diámetro lo bastante grande para reducir la velocidad de gases hasta un valor que no pueda arrastrar sólidos en contra de la gravedad. El valor del diámetro se suele calcular mediante la expresión (1) de Souders y Brown [6]:

$$V = k\sqrt{\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V}} \quad (1)$$

Donde 'V' es la velocidad en m/s, 'k' una constante a determinar en función de las características de la instalación, 'ρL' la densidad del líquido y 'ρV' la densidad del gas. En el caso de un decantador sin malla de desnebulización, como es nuestro caso, el valor de 'k' considerado suele ser de 0.107/2 [6].

Además, el decantador ha de tener diámetro suficiente para ser capaz de frenar el flujo de gases de "vapor de flash". Este fenómeno consiste en una generación brusca de una cantidad importante de vaporización debido a una bajada brusca de presión. Debido a las imperfecciones de las instalaciones de vacío, con frecuencia se producirán bajadas repentinas de presión, más o menos bruscas, y tanto más acusadas cuando menor sea la presión. Por ejemplo, a -0.7 bar se acusan más que a -0.5 bar. Esto se debe a que la temperatura de ebullición se ve más afectada por oscilaciones a baja presión que a alta presión. En otras palabras, la temperatura de ebullición no varía linealmente con la presión [6].

2.10. Resistencia mecánica

Fruto de verse sometidos a vacío, los equipos pueden llegar a colapsar, combarse. Es lo que se llama el pandeo. Aquellos equipos que poseen geometrías circulares, cilíndricas o elipsoidales, será más difícil que se comben, sin embargo, las superficies planas sufrirán en mucha mayor medida. En el caso del prototipo que aquí se divulga, el intercambiador de calor de placas, provisto de placas planas de 508 mm de diámetro, es el punto crítico. Las placas son de acero inoxidable AISI316L y poseen un espesor de 6 mm.

Un método que proponemos para detectar posibles flechas o combamientos en exceso, especialmente de las superficies planas de las placas de intercambio, es la medición de la fuga de vacío. Es un método cualitativo pero a la vez efectivo. En nuestro caso, se ha podido validar midiendo de manera precisa la distancia que se llegaban a hundir las placas en su punto central.

Si dos superficies en contacto, con interposición de junta, se comban una respecto a la otra, por acción de esfuerzos mecánicos, la superficie cubierta por las juntas será menor y tenderá a volverse más irregular, lo cual debería incidir en un peor sellado. En otras palabras, el grado de pandeo del equipo se ha de notar directamente en una bajada de vacío en el vacuómetro.

3. Resultados y discusión

Se analizan a continuación los primeros resultados obtenidos con el prototipo, en relación a los tres riesgos principales.

3.1. Medición de la fuga de aire

La bomba tarda aproximadamente 8 segundos en llevar la instalación hasta el vacío deseado de -0.9 bar. Una vez en este valor, la desconectamos y cronometramos el tiempo hasta que descienda a -0.7 bar, arrojando una media de 41 segundos. A continuación determinamos la fuga de aire:

$M_{inicial} = V \cdot \varrho_{aire} \cdot 0.1 = 0.04$ [m3] $\cdot$ 1.22 [kg/m3] $\cdot$ 0.1 = 0.00488 kg de aire, a -0.9 bar

$M_{final} = V \cdot \varrho_{aire} \cdot 0.3 = 0.04$ [m3] $\cdot$ 1.22 [kg/m3] $\cdot$ 0.3 = 0.01464 kg de aire, a -0.7 bar

$M_{final} - M_{inicial} = 0.01464 - 0.00488 = 0.00976$ kg de aire

0.00976 [kg] $\cdot$ 3600 [s/h] / 41 [s]= 0.857 kg/h

En un tiempo de una hora entran a la instalación 0.857 kg de aire atmosférico por fugas. Para ver cómo afecta a la bomba de vacío, se han de convertir en m^3/h, a la presión del proceso, -0.9 bar:

0.857 [kg/h] / (0.1 $\cdot$ 1.22 [kg/m^3]) = **7.02 m^3/h**

Un valor de fuga que se encuentra muy por debajo de la capacidad de la bomba, que es de 120 m^3/h, por lo que resulta ser adecuada.

El prototipo ha sido diseñado para evaporar en torno a 10 litros de agua por hora, dato que se ha confirmado de forma experimental. Esta agua se evapora, y constituiría la mayor carga de trabajo para la bomba de vacío, en el supuesto de que no hubiese condensador. A -0.9 bar el vapor de agua saturado posee una densidad de 0.067 kg/m^3 [8]. Si queremos evaporar 10 litros, tenemos un caudal de vapor de agua de 10/0.067 = 149.5 m^3/h, lo cual estaría por encima de las capacidades de la bomba. La presencia del condensador convierte al estado líquido a más del 90% de este vapor, de modo que resta trabajo a la bomba de vacío, tal y como se ha podido comprobar experimentalmente.

Teniendo en cuenta las fugas de aire y un 10% del vapor que no consigue condensar, se obtiene un caudal de aspiración de 7.02 + 0.1 $\cdot$ 149.5 = 21.97 m^3/h, que sigue estando muy por debajo de las capacidades de la bomba. La razón de haber adquirido una bomba sobredimensionada es mantenerla para el escalado hacia una planta piloto.

Un detalle de especial relevancia es que se detectó que en sistemas de evaporación a vacío las bombas recomendables son las del tipo de anillo líquido. Una bomba de tipología diferente usaría mecanismos lubricados con aceite, y cantidades muy pequeñas de vapor de agua emulsionarían con el mismo y darían lugar a la inutilización de la bomba. Si la instalación se diseña muy cuidadosamente, se podría llegar a separar casi todo el agua antes de llegar a la bomba [5], y sería factible, pero del prototipo se concluye que no resultaría rentable, pues haría falta un condensador muy sobredimensionado.

El condensador del prototipo que aquí se divulga posee una capacidad de condensación más de tres veces superior al vapor generado, y sin embargo resulta en la práctica muy difícil condensar más del 90% del vapor de agua [4], por razones termodinámicas que se pueden consultar en la bibliografía. Por todo eso no se recomiendan otras bombas que no sean de anillo líquido para este tipo de aplicación.

Por último, es destacable que no se encontró ningún incremento de la fuga dependiente de la velocidad de rotación del eje. Ésta se varió desde 0 hasta 240 rpm, y en ningún momento se detectó incremento de fuga. En cualquier caso, este resultado era esperable, e incluso se prevé que la fuga disminuya con la velocidad de rotación, puesto que, si el sello se encuentra correctamente instalado, con las superficies de grafito y cerámica haciendo contacto correctamente, el grafito tiende a desprender con la rotación una película de desgaste que lubrica y cubre imperfecciones, ayudando a sellar todavía mejor.

3.2. Valoración de la succión violenta

El proceso de secado de sangre para producir harina se completó correctamente, pero experimentamos ciertas dificultades en una fase inicial. El problema consistió en que el diámetro del decantador, DN100, no fue suficiente para impedir el arrastre de líquidos con los gases que aspiraba la bomba de vacío. En cuestión de segundos la mayor parte de la sangre había llegado a la bomba de vacío, lo cual es indeseable pues se pretende que sólo lleguen gases incondensables, y los sólidos queden en el intercambiador de placas. Sin embargo, de acuerdo a la ecuación de Souders [4], el diámetro sí que estaba bien calculado, pues resulta:

$$V = k\sqrt{\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V}} = 0.0535\sqrt{\frac{1000\left[\frac{Kg}{m^3}\right] - 0.067[\frac{Kg}{m^3}]}{0.067\,[\frac{Kg}{m^3}]}} = 6.53\frac{m}{s} \quad (2)$$

Es incluso superior a la velocidad permitida por el decantador:

$$V = \frac{120\left[\frac{m^3}{h}\right]}{3600\left[\frac{s}{h}\right]} : \pi\left(\frac{0.1053[m]}{2}\right)^2 = 3.82\frac{m}{s} \quad (3)$$

Donde se tomó el diámetro interior del decantador, de 0.1053 m.

El problema se solucionó con un decantador DN300 (diámetro exterior 323.9 mm), lo cual sugiere que para el caso de ebullición a vacío el parámetro 'k' que se acepta de forma generalizada para la ecuación de Souders, no modela correctamente el poder de ascenso de los gases. Se sugiere considerar un diámetro al menos el doble de lo obtenido con dicha ecuación.

La principal explicación de la ineficacia de la ecuación de Souders en este caso radica en las evaporaciones de flash que se producen a un nivel de vacío de -0.9 bar, según lo ya comentado.

3.3. Valoración de la resistencia mecánica

Los equipos resistieron las condiciones de presión a las cuales fueron sometidas. No se detectaron incrementos de fuga una vez sometido el prototipo a presión, de lo cual se deriva que los espesores de los materiales resultaron correctos (6 mm para las placas).

El nivel de presión soportado fue de 0.9 bar en el interior de los tubos del condensador, por acción del vacío, y de 5.9 bar en la cámara central (la que contiene sangre a evaporar). Esta presión se compone de la ejercida por el agua caliente que circula por las cámaras anterior y posterior (5 bar) y la del vacío existente en la propia cámara central.

4. Conclusiones

Principales conclusiones del trabajo presentado.

Se han presentado los primeros resultados de un prototipo que transforma sangre en harina, en relación a los tres riesgos principales de un sistema de vacío. Se observó que el tipo de bomba de vacío idóneo en este equipo es la de anillo líquido, pues resulta muy difícil evitar

que llegue vapor de agua a la misma. Para una producción de 10 litros de agua a evaporar cada hora, una bomba de vacío de 25 m3/h resultaría en principio suficiente, siempre y cuando se disponga de un condensador correctamente diseñado. Y especial cuidado se ha de tener a la hora de diseñar el decantador gravimétrico, pues la ecuación de Souders resulta infravalorar la capacidad de succión en este tipo de instalaciones.

Referencias

1. Magide J.M., Varela H. Tecnología y procedimiento de transformación de sangre en harina. Eurocarne. 2017, 262, 53-63.
2. Magide J.M., Varela H. Procedimiento de aceleración del secado de un fertilizante orgánico a partir de sangre y huesos de industrias cárnicas. I Symposium Ibérico de Ingeniería hortícola, Lugo, España, 2018.
3. del Arco Vicente L. Termotecnia. Calor industrial. 1985, 85-120.
4. McCabe W., Smith J., Harriot P. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. 2007, 482-517.
5. Moran M., Shapiro H. Fundamentos de termodinámica técnica. 2012, 315-395.
6. Perry R., Green D. Chemichal Engineer's Handbook. 1999, 1027-1126.
7. Norma UNE-EN 837-1/AC:1998. Manómetros. Parte 1: Manómetros de tubo Bourdon. Dimensiones, metrología, requisitos y ensayos.
8. Magide J.M., Méndez M., González X.P. Termotecnia. 2010, 3.1-3.16.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Mechanical mandarin thinning related to fruitlet developing stage

Angelo Romano[1], Antonio Torregrosa[2], Sebastià Balasch[3], Coral Ortiz[2]

[1] Università degli Studi di Firenze
[2] Universitat Politècnica de València, Dpto. Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Cno. Vera s/n, 46022 Valencia; torregro@dmta.upv.es
[3] Universitat Politècnica de València, Dpto. de Estadística e Investigación Operativa aplicadas y Calidad. Cno. Vera s/n, 46022 Valencia

Abstract: Mandarin thinning is done by hand, increasing labor cost and raising total crop production costs. Mechanical thinning has been tested in peaches and other fruits. To achieve the maximum efficiency thinning requires to be applied at a specific stage of vegetative development. In this research study the mechanical thinning of mandarin branches during the different fruit developing stages has been assessed using a vibratory laboratory device (amplitudes 0.015 m and 0.030 mm and frequencies 34.8 Hz and 37.8 Hz). Branches with flower buds, flowers, small green fruits and medium green fruits were tested during 12 weeks and two different seasons. It was possible to detach mechanically flower buds, flowers and green fruits using different combinations of amplitudes and frequencies. Removal percentage decreased when increasing retention traction force, according to a logarithmic regression model. During fruit setting (weeks 5, 6 and 7) removal percentage was higher, when the retention force is very low. The first weeks just after the natural thinning could be consider the adequate time for a mechanical thinning operation.

Keywords: mandarin thinning, fruitlet, developing stage

1. Introduction

Fruit thinning is the removal of certain flowers or fruitlets in order to improve fruit yield and quality and return bloom for the following year [1]. There are three methods for thinning: hand, mechanical and chemical. Hand thinning is not often applied as a commercial cultural practice in citriculture due to the high cost [2].

Different studies confirmed the effect of chemical thinning agents (synthetic auxins) on mandarin thinning ([3], [4]). However, many chemicals are being released by the chemical companies [1] and other thinning method could be assessed.

Mechanical thinning has been tested in peaches using inertial trunk shakers and electromagnetic shakers ([5], [6]). Besides, in stone fruits and pome fruits, flower and fruit thinning has been studied using drum shakers ([7], [8], [9]). The studies proved that mechanical thinning save time and reduce thinning cost.

In order to design a useful mechanical branch shaker thinning device for citrus fruits, defining the adequate vibration frequency and amplitude is necessary. However, during field shaking tests many non-controlled factors are affecting the results.

[10] designed a laboratory electromagnetic shaker to determine adequate frequency and amplitude when detaching cherry coffee. A metallic device was fitted to the shaker to hold the coffee branches during the vibration tests.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3300

[11] used a laboratory unidirectional vibratory device to vibrate mandarin branches in order to assess the adequate frequency, amplitude and time for mechanical harvest reducing the experimental field non-controlled factors.

[12] assessed frequency response of late-season 'Valencia' orange to selective harvesting by vibration using a laboratory unidirectional magnetic shaker. The excitation signal used was a random noise with frequencies from 0 to 60 Hz, and a total duration of 60 s. A set of 5 piezoelectric triaxial accelerometers was used to determine acceleration characteristics.

To achieve the maximum efficiency of the crop management practices they require to be applied at a specific stage of vegetative development [13]. In the citrus thinning operation this factor is crucial.

The objective of the present study was to assess citrus mechanical thinning according to fruit developing stage using a laboratory device.

2. Materials and methods

The branches were selected and collected from an orchard of 'Clemenrubi' mandarin located in Sagunto (Valencia, Spain, Google maps coordinates: 39.645122, -0.303941). During 2017 season every week, during 12 consecutive weeks, between 8 and 20 branches were selected and tested. Branches with flower buds, flowers, small green fruits and medium green fruits, from phenological stage number 56 to phenological stage number 72 were tested, based on the BBCH scale [14], Table 1.

Table 1. Frequency, amplitude and phonological stage according to the week of the test.

		2017						2018			
Date	**Week**	**Frequency (Hz)**	**Amplitude (mm)**	**Phenological stage**	**Nº**	**Date**	**Week**	**Frequency (Hz)**	**Amplitude (mm)**	**Phenological stage**	**Nº**
10-mar	0	7/10,5/13/ 13,7/34,8	15/30/120	56 Flower bud	9						
23-mar	1	11,2/13,4/ 34,1/35,2/41	15/30	56 Flower bud	9						
30-mar	2	23,2/34,8/ 37,8	15/30	59 Hollow flower bud	9						
06-abr	3	23,2/34,8	15/30	65 Flower	8						
12-abr	4	34,8	15/30	67 Withered flower	8						
19-abr	5	34,8/37,8	15/30	71 Fruit setting	11						
26-abr	6	34,8/37,8	15/30	72 Green fruit	14						
04-may	7	34,8/37,8	15/30	72 Green fruit	16						
10-may	8	34,8/37,8	15/30	72 Green fruit	20						
17-may	9	34,8/37,8	15/30	72 Green fruit	16						
24-may	10	34,8/37,8	15/30	72 Green fruit	16	23-may	1	18,9/37,8	30	72 Green fruit	12
31-may	11	34,8/37,8	15/30	72 Green fruit	16	30-may	2	18,9/37,8	30	72 Green fruit	14
						06-jun	3	18,9/37,8	30	72 Green fruit	14
						13-jun	4	18,9/37,8	30	72 Green fruit	12
						21-jun	5	18,9/37,8	30	72 Green fruit	12
						27-jun	6	18,9/37,8	30	72 Green fruit	12
						04-jul	7	18,9/37,8	30	72 Green fruit	14
						11-jul	8	18,9/37,8	30	72 Green fruit	14

During 2018 season every week, during 8 consecutive weeks, between 12 and 14 branches were selected and tested. In this second season small green fruits, medium green fruits and high size green fruits (phonological stage number 72) were tested, stating the test later than the previous season (week 1 from 2018 season was related to week 10 from 2017 season.

A modified laboratory unidirectional vibratory device was used to vibrate the mandarin branches based on the one developed by [11]. A connecting rod converts the rotational motion from an electric motor (0.75 kW, ABB-M1001, www.news.abb.com) into linear motion to vibrate the branch, Figure 1. A frequency converter is used to vary the vibration frequency from 4.5 Hz to 40 Hz. The vibration amplitude is modified from 0.015 m to 0.18 m by placing the connecting rod into the different disc holes (A). The branch is located in a vertical downward position (B).

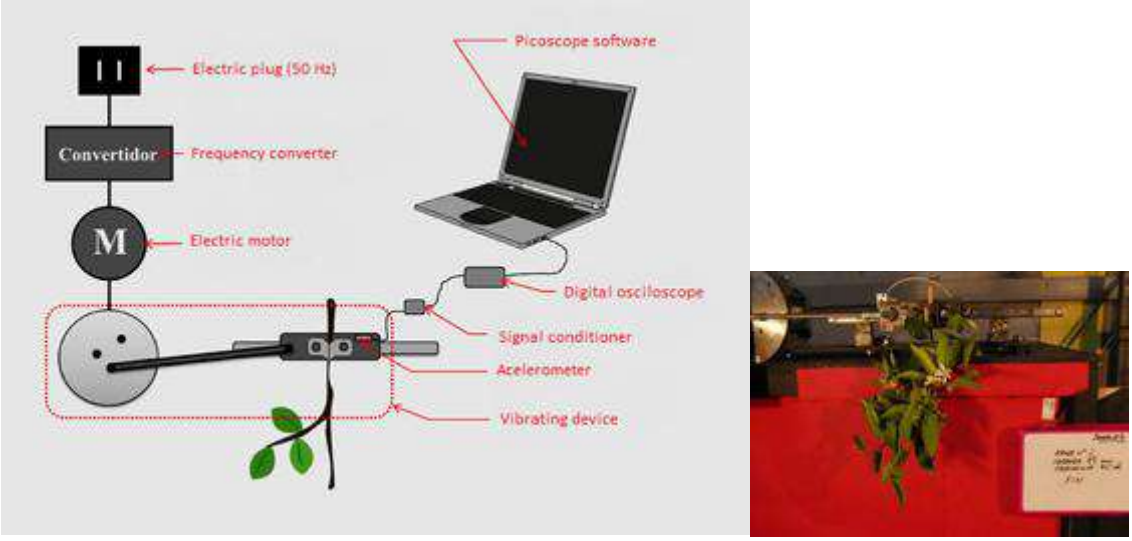


Figure 1. The laboratory unidirectional vibratory device.

Frequencies and accelerations applied were calculated using a triaxial accelerometer (Kistler type 8763A500; range ± 500 G; sensitivity 10 mV G−1; mass 3.3 g; mini cube design 0.01 m length; www.kistler.com) and a high speed camera (Casio EXF1, www.exililm.com) at 300 frames/s.

The first two weeks from 2017 season, a broad range of frequencies were tested in order to determine the most adequate conditions to detach flower buds. After the first two weeks, two amplitudes (0.015 m and 0.030 mm) and two frequencies (34.8 Hz and 37.8 Hz) were tested.

Physical characteristics, mass, maximum equatorial diameter and retention traction force, of the flower buds, flowers and green fruits were measured during the 12 weeks.

A high-speed color video camera (Casio EXF1, www.exilim.com) was used to record the branch movements at 300 photographs per second.

A universal test machine (Ibertest, www.ibertestint.com) was used to measure the retention traction force, Figure 2. The branch sample was located upside down grabbed by the traction clamp at the lower part (Figure 2, A) and the flower bud, flower (Figure 2, B) or green fruit (Figure 3) was grab by the gripper devise.

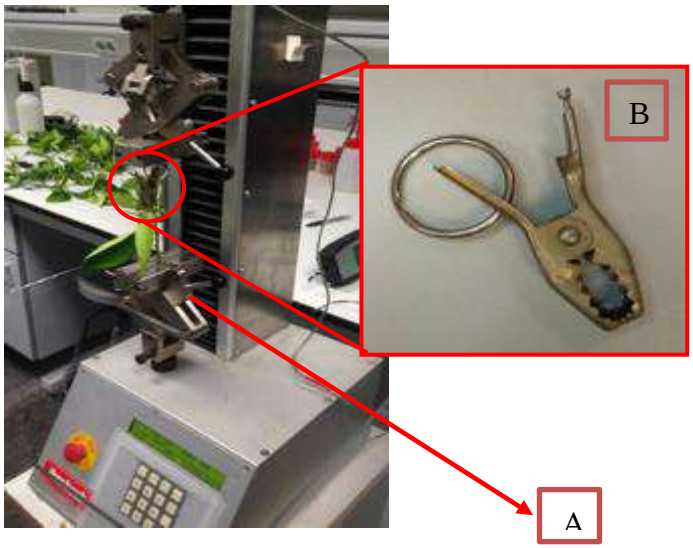


Figure 2. Universal test machine used for the traction retention force test and the gripper device for flower buds and flowers.



Figure 3. The gripper device used for green fruits.

Removal percentage during 10 seconds vibration of flower buds, flowers, small green fruits and medium green fruits were measured.

3. Results

3.1. Physical parameters development according to time

When studying mass, diameter and removal traction force from 2017 and 2018 seasons, it was confirmed that green fruits (phenological stage 72) from the first week in 2018 did not correspond to those from week 10 from 2018. Green fruits from week 1 of 2018 season were similar to those from week between 6 and 7 from 2017 season. This fact could be due to the differences in the two seasons and also to the different procedure followed to choose the branches.

Diameter, mass and retention force development during the phonological stage development is shown in Figure 4.

Until the week 3 (flower buds, and withered flower buds, phenological stages 56-59, diameter of the flower buds and flowers is very low. From the week 4 to the week 8, the diameters are lower than 4.2 mm. This initial phase of the fruitlet growth is related to the increase in the pericarp thickness several weeks after the petal fall [15]. From week 8 a high increase of the green fruit diameter is registered. Related to the second phase of the fruitlet growth with a cell enlargement, the vacuolisation of the juice sacs and an increase in the size of the locules.

Related to mass, it is lower than 1.2 g until week 8, when a drastic change in the mass of the green fruits is produced.

Retention force evolution is very similar to mass. However, retention force is one week ahead of the mass, starting the drastic increment in the seventh week.

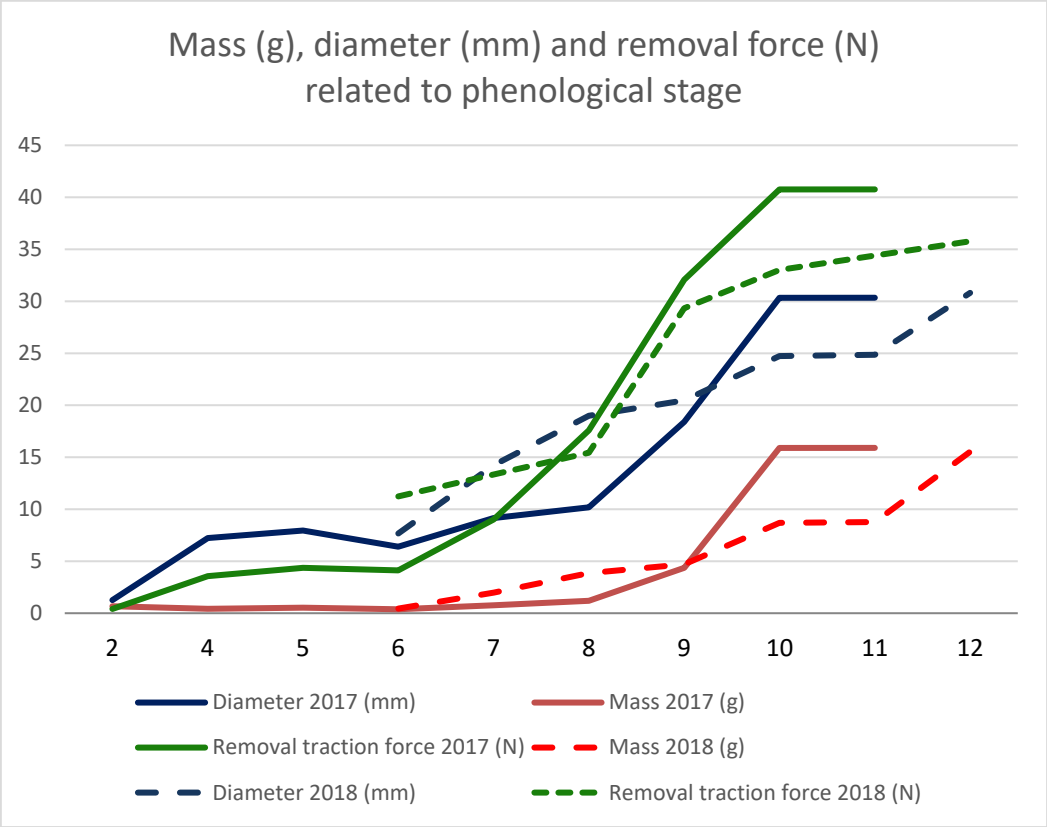


Figure 4. Mass (g), equatorial diameter (mm) and retention removal force (N) of the flower buds, flowers and green fruits according to the weeks in 2017 and 2018 seasons.

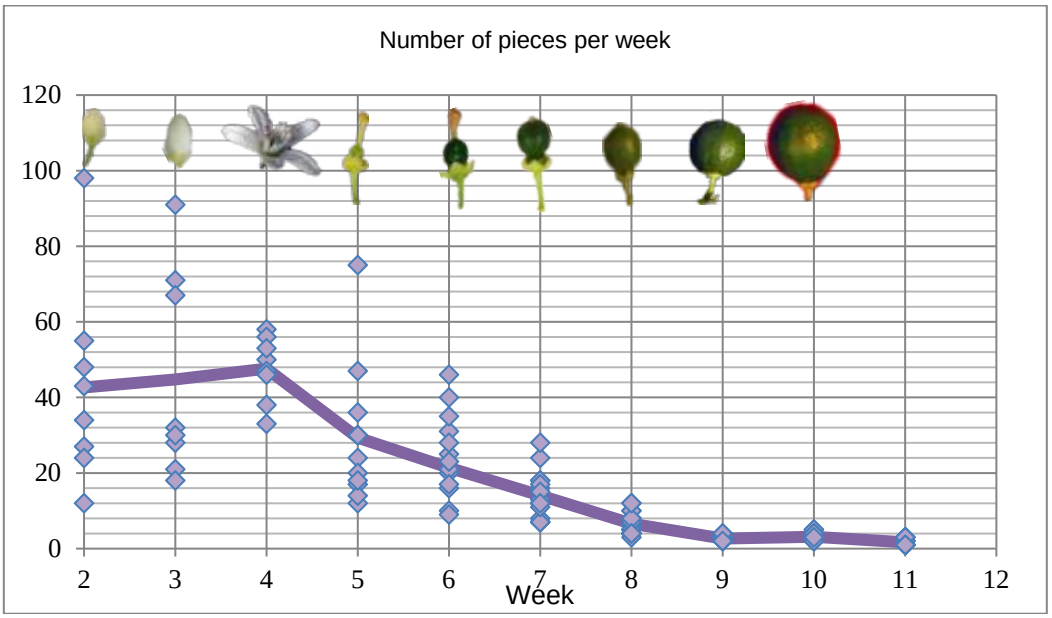


Figure 5. Number of pieces (flower buds, flowers or fruits) according to the week.

The number of pieces registered along the weeks reduced drastically after the week number 7, related to the natural thinning of the tree in 2017 season, Figure 5.

3.2. Removal percentage according to vibration amplitude and frequency

Both vibrating parameters, amplitude and frequency and development time (week), significantly affected removal percentage, Table 2.

Table 2. Variance analysis of the effect of the factors frequency, week and amplitude on the variable removal percentage for 2017 and 2018 seasons.

		2017 season			
Source	**Square Sum**	**df**	**Average Square**	**F-value**	**P-value**
PRINCIPAL EFFECT					
A:Frequency	3843.15	1	3843.15	4.69	0.0322
B:Week	20297.2	9	2255.24	2.75	0.0057
C:Amplitude	50585.4	1	50585.4	61.77	0.0000
RESIDUES	100733	123	818.967		
TOTAL (CORRECTED)	171463	134			
		2018 season			
Source	**Square Sum**	**df**	**Average Square**	**F-value**	**P-value**
PRINCIPAL EFFECT					
A:Frequency	48810.0	1	48810.0	113.11	0.0000
B:Week	9798.8	6	1633.13	3.78	0.0022
RESIDUES	35384.3	82	431.516		
TOTAL (CORRECTED)	93993.1	89			

Despite the small difference between the two frequencies studied in 2017, the average removal percentage when vibrating with a 34.8 Hz frequency was around 33% compared to nearly 48% when vibrating with 37.8 Hz frequency. In 2018 the differences in removal percentage between the two vibrating frequencies was very significant as it was expected, 11.1% for 18.9 Hz and 57.21 % for 37.8 Hz, with 30 mm amplitude in both cases.

The removal percentage when using the 30 mm amplitude was always higher than the removal percentage when using 15 mm amplitude, Figure. When using 30 mm amplitude the removal percentages were always very high, more than 30 %. It could be more interesting using the 15 m frequency. However, it is important to remark that the removal percentages are considered when vibrating during 10 seconds. A sorter vibration with 30 mm could be acceptable.

During the weeks 2 and 3, phenological stages 56, 59 and 65, the removal percentages increases, being possible to remove flower buds, hollow flower buds and small flowers with the frequencies and amplitudes studied.

Removal percentages in the week 4 (withered flower stage, phenological stage 67) are reduced. This could be due to the increment of the air resistance when vibrating related to the opening of the petals.

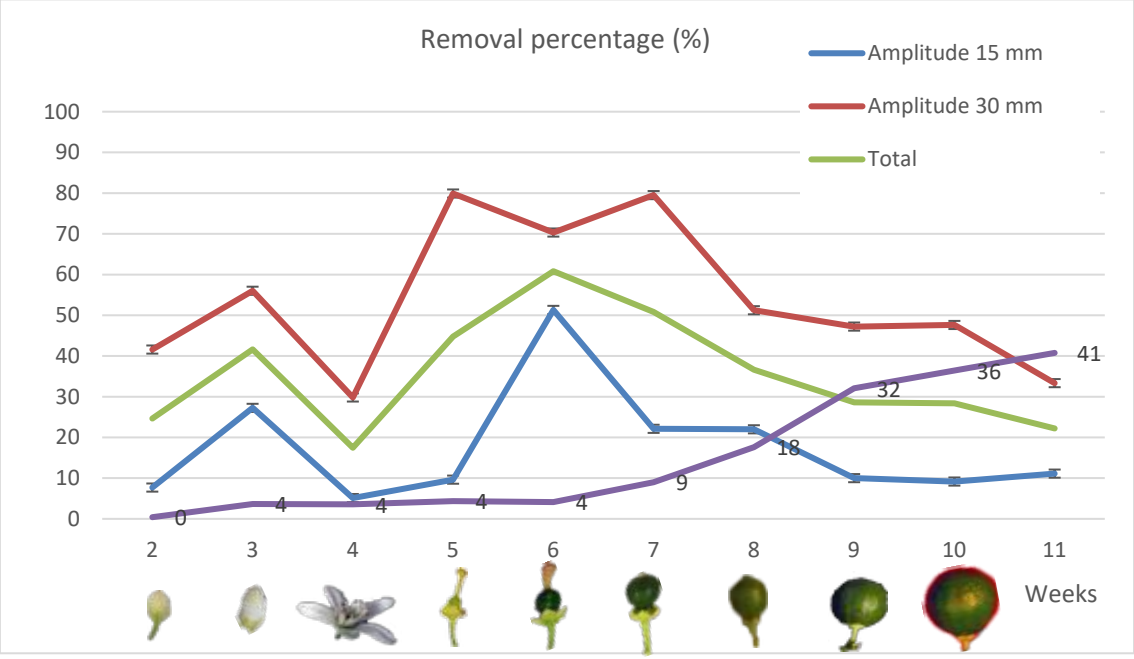


Figure 6: Removal percentage (%) development according to amplitude (15 mm, 30 mm and total) and related to retention traction force (N) for 2017 season.

In 2017, the highest removal percentages are found during the weeks 5, 6 and 7, when the retention force is very low, Figure 6. This tendency is also confirmed in 2018 with a brief delay This period corresponds to the natural thinning. After these weeks, the amount of fruits is naturally drastically reduced (Figure 5) and the retention force increases and the removal percentage decreases. The first weeks just after the natural thinning could be considered adequate for mechanical thinning.

Considering only the green fruits, a logarithmic regression model was found between the removal percentage of the green fruits (%) and the retention traction force (N), with 87.6 % R2, Figure 7, equation [1].

$$\text{Removal percentage (\%)} = 67.5 - 16.1 \ln Ft \quad [1]$$

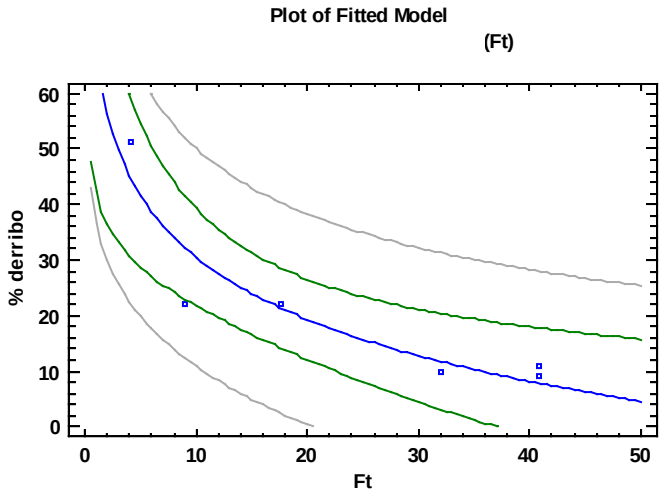


Figure 7. Logarithmic regression model between the removal percentage of the green fruits (%) and the retention removal force (Ft, N).

4. Conclusions

It is possible to detach flower buds, flowers and green fruits using different combinations of amplitudes (30 mm or 15 mm) and frequencies (34.8 and 37.8), under the laboratory conditions studied.

- Amplitude, frequency and phenological stage significantly affect removal percentage.

The removal percentage when using the 30 mm amplitude was always higher (more than 30 %) than the removal percentage when using 15 mm amplitude, with frequencies of 34.8 and 37.8 Hz. The average removal percentage when vibrating with a 34.8 Hz frequency was around 33% compared to nearly 48% when vibrating with 37.8 Hz frequency.

- Equatorial diameter and retention traction force have very low values until the sixth-seventh week (phenological stage 72), when the fruit setting is finishing and a significant change of slope increment is registered. Mass has a similar development with a week delay.
- Removal percentage decreases when increasing retention traction force, according to a logarithmic regression model.
- Removal percentage is higher during the weeks 5, 6 and 7 during fruit setting, when the retention force is very low coinciding with the tree natural thinning. The first weeks just after the natural thinning could be consider the adequate time for a mechanical thinning operation.

5. Acknowledgment

The present study has been funded by Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) and FEDER (Project RTA2014-00025-C05-02).

References

1. Ouma G. Fruit thinning with specific reference to citrus species: A review. Agriculture and Biology Journal of North America. 2012, 3(4): 175-191
2. Stander, O.P.J and Cronjé P.J.R. Reviewing the Commercial Potential of Hand Thinning in Citrus with a Cost-benefit Analysis of Summer Hand Thinning of 'Nadorcott' Mandarin. HortTechnology. 2016, 6(2), 206-212
3. Mesejo C., Rosito S., Reig C., Martinez-Fuentes A., Agustí, M. Journal of Plant Growth Regulation. 2012, 31: 186-194.
   DOI: 10.1007/s00344-011-9230-z
4. Gonzatto M.P., Böettcher G.N., Schneider L.A., Silveira J.C., Petry H.B., Pedroso de Oliveira R., Schwarz S.F. 3,5,6-trichloro-2-pyridinyloxyacetic acid as effective thinning agent for fruit of 'Montenegrina' mandarin. Ciência Rural, Santa Maria. 2016, 46(12), 2078-2083.
   DOI: 10.1590/0103-8478cr20140057
5. Powell, A.A., Hancock, B.G., Puls, E.E., Helmers Jr., S.G., Brown Jr., M.H. Utilizing mechanical fruit thinning in commercial peach orchards. HortScience. 1975, 10 (2), 142.
6. Rosa U.A., Cheetancheri K.G., Gliever C.J., Lee S.H., Thompson, J., Slaughter, D.C., An electro-mechanical limb shaker for fruit thinning. Comput. Electron. Agric. 2008, 61, 213–221.
7. Schupp J.R., Baugher, T.A., Miller, S.S., Harsh, R.M., lesser, K.M. Mechanical Thinning of Peach and Apple Trees Reduces Labor Input and Increases Fruit Size. HortTechnology. 2008, 18 (4), 660-670.
8. Miller, S.S., Schupp, J.R., Baugher T.A., Wolford S.D. Performance of Mechanical Thinners for Bloom or Green Fruit Thinning in Peaches. HortScience. 2011, 46(1), 43-51.
9. Seehuber C., Damerow L. and Blanke M.M. Concepts of selective mechanical thinning in fruit tree crops. Acta Horticulturae. 2013, 998: 77-83
   DOI: 10.17660/ActaHortic.2013.998.8

10. Santos F.L., Marçal de Queiroz D., Carvalho-Pinto F.A., Terra-Santos N. Analysis of the coffee harvesting process using an electromagnetic shaker. Acta Scientiarium Agronomy. 2010, 32(3). DOI: 10.4025/actasciagron.v32i3.6782
11. Ortiz C., Torregrosa T. Determining adequate vibration frequency, amplitude, and time for mechanical harvesting of fresh mandarins. Transactions of the ASABE. 2013, 56(1), 15-22 DOI: 10.13031/2013.42581
12. Castro-Garcia S., Blanco-Roldán G.L., Ferguson L., González-Sánchez E.J., Gil-Ribes J.A. Frequency response of late-season 'Valencia' orange to selective harvesting by vibration for juice industry. Biosystems Engineering. 2017, 155, 77-83. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.11.012
13. Albrigo L.G., Valiente J.I., Beck H.W. Flowering expert system development for a phenology based citrus decision support system. SHS Acta Horticulturae. 2001, 584: VI International Symposium on Computer Modelling in Fruit Research and Orchard Management
14. Agustí,M., Zaragoza S., Bleiholder H., Buhr l., Hack H., Klose R., Staus R. Adaptation of the BBCH scale for the description of Citrus fruits' phenological stages. Fruit. 1997, 52(5): 287-295
15. Guardiola J.L., García-Luis A. Increasing fruit size in Citrus. Thinning and stimulation of fruit growth. Plant Growth Regulation. 2000, 31, 121–132.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Patrones de desprendimiento de cítricos y respuesta del árbol bajo recolección mecanizada con sistemas sacudidores de copa

F. Aragon-Rodriguez[1], R. R. Sola-Guirado[1], S. Castro-Garcia[1], J. A. Gil-Ribes[1]

[1] G.I. AGR 126 "Mecanización y Tecnología Rural". E.T.S.I. Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, Ctra. Nacional IV, km. 396, 14014 Córdoba; scastro@uco.es

Resumen: La recolección mecanizada es una importante alternativa para afrontar los problemas de disponibilidad de mano de obra, los costes de producción y mejorar la rentabilidad de la explotación. La viabilidad de la recolección mecanizada está marcada por la calidad de la fruta y la eficiencia su derribo y para ello es necesaria una adaptación entre máquina y árbol. El objetivo del trabajo es la determinación del patrón de abscisión de naranja dulce con sistema sacudidor de copa en comparación con otros sistemas de desprendimiento y, al mismo tiempo, establecer recomendaciones para alcanzar un elevado porcentaje de derribo. Se ensayaron 4 parcelas de naranja variedad 'Valencia' durante las campañas 2017/2018, empleando un sacudidor de copa Oxbo-3210. El patrón de desprendimiento según el tipo de recolección fue determinado junto el análisis de la vibración en la copa del árbol. La frecuencia de rotura tipo AZ-C predominó en caída natural (89,0%) y la recolección manual (79,5%) y se fue igualando con AZ-A en el sacudidor de copa (58,8%). La zona de contacto con las varas mostró un valor medio de A_{RMS} de 2,3 veces mayor que la zona sin contacto, además de un 85% de desprendimiento frente a un 27%. Se definió que la forma de seto ancho debe ser adaptado para facilitar el acceso de las varas y que la máquina debe ajustarse entre el valor A_{RMS} y el tiempo mayor de 300 ms^{-2} para lograr un desprendimiento del 100%.

Palabras clave: Citrus sinensis (L.) Osbeck, abscisión, vibración, eficiencia de recolección

1. Introducción

En todo el mundo se produjeron 146 millones de toneladas de cítricos en 2016, incluyendo naranjas, pomelos, limones, mandarinas y otros cítricos [1]. España es el sexto productor mundial de cítricos, con una producción aproximada en 2017/18 de más de 7 millones de toneladas. En España, predominan las plantaciones de cítricos configuradas para la recolección manual, con orientación hacia el mercado en fresco. Las plantaciones que se recogen manualmente están experimentando problemas debido a la disponibilidad de mano de obra y a los altos costes de operación. Dentro de estos costes de operación, la recolección es una fase de enorme importancia económica debido a su alto impacto en el coste final de producción. La recolección manual en el sur de España representa entre el 25 y el 35% del coste final de producción [2].

El desprendimiento de frutos puede producirse por causas naturales o por la acción de un agente externo. El proceso natural de abscisión del fruto es una estrategia de la planta para descartar el fruto maduro o dañado, así como para dispersar las semillas. La cosecha de los cítricos tiene lugar durante la fase de maduración del fruto, antes de que se produzca la caída natural [3].

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3417

Se emplean diferentes métodos manuales y mecanizados para separar la fruta del árbol. Sin embargo, ninguno de los sistemas mecanizados ha sido capaz de igualar la flexibilidad y la capacidad de selección de frutos de la cosecha manual [4]. Por lo tanto, actualmente los cítricos, ya sea para consumo en fresco o para procesamiento industrial, se cosechan principalmente a mano.

El mercado de frutas frescas requiere que la piel y el interior de la fruta no estén dañados y que el cáliz esté intacto, para conservar sus propiedades organolépticas y antifúngicas. Sin embargo, los cítricos para procesamiento industrial pueden tolerar ciertos tipos de daños externos [5]. Para el mercado en fresco, el método más utilizado es el corte manual, cortando por el pedúnculo y manteniendo el cáliz. Cuando la fruta está destinada a la industria, el método manual de recolección por tirón, sin tijeras, es uno de los más frecuentes: la fruta se despega girando el tallo del fruto y tirando de él manualmente [3]. En la actualidad, los sistemas mecánicos de recolección se utilizan para la fruta procesada, empleando principalmente vibradores de tronco [6] y sacudidores de copa [7]. Ambas tecnologías realizan una vibración forzada, que se transmite al fruto y provoca su desprendimiento [8]. Los sacudidores de copa son los sistemas comerciales que permiten realizar un trabajo continuo y alcanzando altos valores de eficiencia en el desprendimiento de la fruta (>90%) si la plantación está adaptada y los operarios están entrenados [9].

Los sistemas sacudidores de copa producen una vibración de la copa de forma continua a la fila de árboles. Las varas penetran en la copa y alcanzan un alto valor de desprendimiento del fruto en las zonas donde hay contacto directo de las varas con las ramas. Sin embargo, el uso del sacudidor de copa puede generar una mayor caída de hojas, brotes y ramas que la recolección manual [10]. La adaptación de la máquina a la variabilidad de la copa del árbol permite reducir los daños en los árboles en comparación con otros sistemas. Por este motivo, la mejora de estas máquinas se ha basado en un doble objetivo: aumentar la eficiencia de desprendimiento de frutos maduros y la reducción de daños causados a los árboles y frutos.

El objetivo de este trabajo es la determinación del patrón de abscisión en naranja dulce con un sistema sacudidor de copa y el establecimiento de recomendaciones, a partir del análisis de la interacción de las varas en la copa, en la formación de la plantación con el fin de alcanzar un elevado porcentaje de derribo de frutos. Se determinaron los parámetros de vibración necesarios para separar la fruta y la viabilidad de ésta para ser destinada al mercado en fresco o al procesamiento industrial.

2. Materiales y métodos

2.1. Parcelas de ensayo

Los ensayos de campo se realizaron en Córdoba, al sur de España en 4 parcelas de naranjas dulces comerciales para la producción de zumo (Citrus sinensis (L.) Osbeck cv. `Valencia') durante las temporadas de cosecha de 2017 y 2018, después de la floración y antes de la caída natural de frutos inmaduros. Los árboles fueron conformados en seto ancho, con tres o más ramas principales en caballones de aproximadamente 0,4 m. Se disponía de distancia suficiente entre filas para permitir la maniobrabilidad del sistema sacudidor de copa. La Tabla 1 muestra los datos de las parcelas de ensayo.

Tabla 1. Características de las plantaciones de cítricos recolectados mecánicamente mediante sacudidor de copa.

	Parcela 1	**Parcela 2**	**Parcela 3**	**Parcela 4**
Fecha de plantación	2006	2005	2007	2005
Área de la parcela (ha)	54,7	38,0	33,1	29,0
Árboles por ha	440	330	440	330
Marco de plantación (m)	7x3	7x4	7x3	7x4
Altura del seto (m)	4,0	4,0	4,3	4,4
Anchura del seto (m)	3,9	4,1	4,5	4,6

2.2. Maquinaria de recolección

La recolección mecanizada de los frutos se llevó a cabo con un sistema sacudidor de copa lateral (Ploeger Oxbo Group; Oxbo 3210, Nueva York, EE.UU.), arrastrado por un tractor, trabajando en condiciones regulares, con un rango de velocidad de avance de entre 1 y 1,5 kmh^{-1}. El sacudidor de copa monta 288 varas de metal de 1,4 m de longitud hasta su extremo libre, vibrando a una frecuencia comprendida entre 4,5y 5 Hz. La máquina cosechó ambos lados del seto en pasadas independientes, con una capacidad de trabajo aproximada de 0,4-0,5 hah^{-1} (Figura 1).



(a) (b)

Figura 1. Sistema sacudidor de copa arrastrado por tractor (Oxbo, 3210) utilizado en los ensayos de recolección de cítricos. a) Vista frontal antes de la recolección. b) Vista trasera después de la recolección.

2.3. Medidas en las ramas

Se seleccionó un área representativa de la copa del árbol, en la que se concentran los frutos, de entre 4 y 5 m^2 (Figura 2). La sección transversal se dividió en 16 a 20 sectores de estudio, según el ancho del seto, a intervalos de 0,5 m, tanto horizontal como verticalmente. Antes de la recolección mecánica, se seleccionaron un total de 90 ramas que tenían fruta madura y se distribuían en diferentes sectores. El diseño estadístico estableció un muestreo aleatorio estratificado, cada conglomerado era una parcela y en cada parcela se seleccionaron aleatoriamente de 18 a 24 ramas fructíferas. La muestra garantizaba al menos 3 mediciones en cada sector. A cada rama se le asignó un valor de posición en la sección transversal en un punto cercano a la fruta que pudiese sostener el sensor. La proporción de desprendimiento de los frutos se determinó por el número de frutos de cada rama antes y después del proceso de recolección.

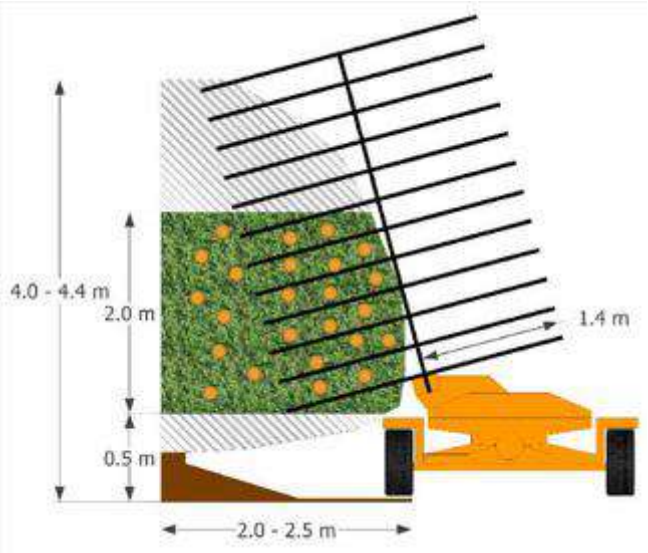


Figura 2. Sección transversal de la copa del árbol con y sin contacto directo con las varas del sistema sacudidor de copa.

La medición de la vibración en las ramas se registró con un conjunto de acelerómetros triaxiales MEMS (Gulf Coast Data Concepts LLC X200-4, Waveland, MS) con un rango de medición de ±2000 ms^{-2}, una resolución de 16 bits, una sensibilidad de 0,06 ms^{-2} y una frecuencia de muestreo de 400 Hz. El análisis de las señales de aceleración se realizó en el dominio del tiempo utilizando software abierto R [11] y en el dominio de las frecuencias utilizando el software NV Gate v8.0.

En el dominio del tiempo, las variables de vibración estudiadas fueron:

- Tiempo de vibración (T_{vib}): tiempo (s) transcurrido entre el primer y el último valor de Ar medido en la rama, que va desde valores de A_r de 20 ms^{-2} hasta 600 ms^{-2}.
- Aceleración media de pico (A_{pk}): el valor medio de los 10 valores máximos de pico de Ar (ms^{-2}) para T_{vib_20}.

En el dominio de la frecuencia, las variables de vibración estudiadas fueron:

- Frecuencia: número de ciclos por segundo (Hz) de las varas en la copa.
- Aceleración RMS (A_{RMS}): suma vectorial de los valores cuadráticos medios (RMS) de cada eje del acelerómetro a la frecuencia de vibración.

2.4. Medidas en los frutos

Se estudiaron los patrones de abscisión de los frutos para los siguientes métodos de desprendimiento: caída natural, recolección manual sin tijera (conocido como manoteo), sacudidor de copa y prueba de tracción manual. El fruto evaluado de la caída natural fue recogido del suelo durante los períodos de cosecha y no presentaba daños externos visibles. La fruta evaluada por el por método manual fue recogida por los operarios agrícolas. La fruta recogida por el método de recolección mecanizada fue cosechada por el sacudidor de copa. El fruto evaluado con la prueba de tracción manual (Mecmesin; Dynamometer CFG +200, Slinfold, UK), se desprendió aplicando una fuerza de tracción creciente continua sobre el fruto cerca del cáliz en la dirección principal de la rama hasta su desprendimiento.

El patrón de abscisión de la fruta fue determinado para 2540 frutos (1034 y 1506 para las temporadas 2017 y 2018, respectivamente). Los frutos analizados mostraron un peso promedio de 182,4 g (Gram-Group; GRAM SPX, Barcelona, España), un porcentaje de zumo del 54,9%, un diámetro ecuatorial de 70,0 mm (Mitutoyo; Absolute CD 20 DCX, Takatsu-ku, Prefectura de Kanagawa, Japón), una tasa de sólidos solubles de 11.32° Brix (Hanna Instruments S.R.L.;

Refractómetro HI96800, Rhode Island, EE.UU.) y una acidez de 0,83 (Hanna Instruments S.R.L.; Acidez Titulable de Jugo de Frutas HI84532, Rhode Island, EE.UU.).

La clasificación de la AZ se realizó para cada fruta de acuerdo con los siguientes grupos (Figura 3):

- Desgarro con cáscara: rotura con una porción de flavedo.
- AZ-C: ruptura entre pedúnculo y fruto, con disco floral. Este grupo se dividió en dos categorías: fruta con y sin cáliz.
- AZ-A: rotura en otra parte del tallo. Este grupo se dividió en dos categorías: rotura en el pedúnculo o rotura en cualquier parte de la rama.

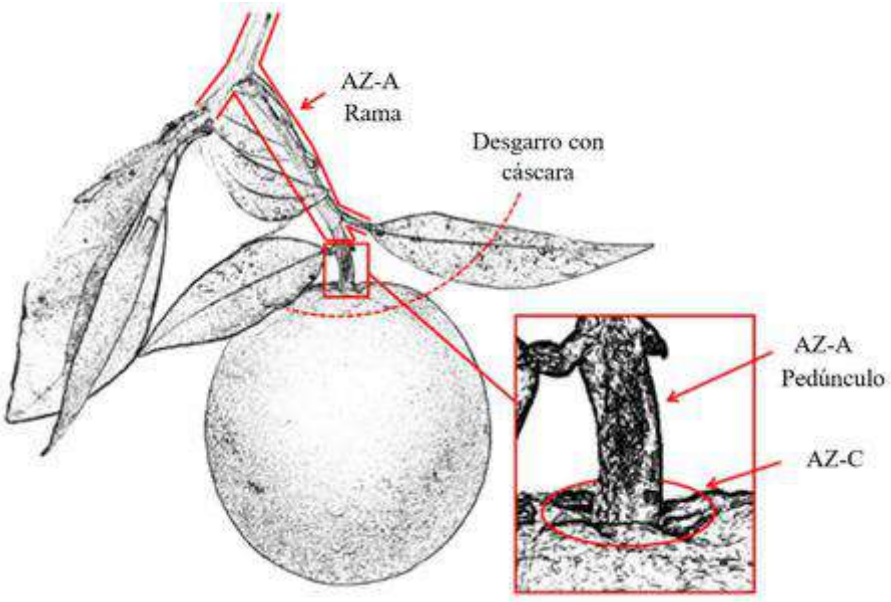


Figura 3. Esquema de zonas de abscisión de cítricos (AZ) bajo diferentes métodos de desprendimiento.

El diseño estadístico establecido fue el muestreo por conglomerados de dos etapas, en el que cada fila era un conglomerado y cada fila se muestreaba al azar, excluyendo el primer y último árbol de la fila, evitando el efecto de borde. El software utilizado para el análisis estadístico fue IBM SPSS Statistics 25 (International Business Machines Corporation; SPSS Statistics 25, Nueva York, EE. UU.).

La evaluación de la prueba de tracción se midió en el área de la copa cosechable con 11 muestras para cada temporada de recolección (2017 y 2018). Cada muestra incluyó 45 frutos antes de la cosecha mecánica y 45 frutos después de la cosecha mecánica para los frutos aleatorios que quedaban en el árbol.

3. Resultados y discusión

3.1. Respuesta del árbol a la vibración

La mayor parte de los frutos (72,7%) se encontraba en la zona de la copa con contacto directo con las varas, en el rango de altura entre 1 y 2 m desde el suelo, y en un rango entre 0,5 y 2 m desde el tronco. Gupta et al. [12] señalan que el área con mayor fructificación se encuentra en ramas primarias de la zona intermedia de la copa a una altura entre 1,14 y 2,29 m, y a una distancia entre 0,78 y 0,83 m del exterior de la copa.

El diámetro de la rama en el punto de medición de la vibración fue de 7,9±2,4 mm (media ± sd), con una variación que osciló entre 10,2 mm para las ramas más cercanas al tronco y al suelo,

y 5,53 mm para las ramas más externas y altas de la copa. Cada rama tenía un valor medio de 3,7±1,8 frutos. Los resultados mostraron una alta variabilidad en la distribución del fruto en la copa y en la morfología de las ramas, tanto en grosor como en longitud. Esta variabilidad es importante para el resultado de los sistemas de recolección mecanizada y fue considerada por Gupta et al. [12] [13] para modelar el árbol y simular el proceso de recolección, con el fin de mejorar el sistema sacudidor de copa. En un intento por mejorar la adaptación de la máquina al árbol, Pu et al. [14] diseñaron y probaron un sistema de sacudidor de copas capaz de aplicar diferentes parámetros de vibración a las partes superior e inferior del árbol. Estos autores mostraron la necesidad de utilizar diferentes parámetros de recolección y lograron un alto índice de desprendimiento de frutos (82,6%) con un bajo daño a los árboles.

La Tabla 2 muestra los resultados de este proceso de vibración medidos en ramas, tanto en la zona de la copa con y sin contacto directo con las varas de la máquina. Para definir el inicio y el final del proceso de vibración, se registraron los valores de aceleración producidos sólo por fuentes naturales, principalmente por el viento y la gravedad, y sin interacción de la máquina. El tiempo de vibración en el que la rama fue excitada por la máquina se definió como el tiempo que transcurre entre los valores de aceleración resultantes superiores a 18 ms^{-2} (T_{vib_18}). El tiempo promedio de vibración ($T_{vib_18)}$ de las ramas fue de 14.3±2.8 s. No se encontraron diferencias significativas (Student's t, $p > 0.05$) entre el tiempo de vibración de las ramas ubicadas en el área de la copa con o sin contacto directo con las varas. Esto indica que todas las ramas vibran al mismo tiempo, pero no todas al mismo nivel de aceleración.

Tabla 2. Parámetros de vibración medidos en las ramas, con y sin contacto directo con las varas, durante la recolección mecanizada con sacudidor de copa.

	Ramas con contacto directo con las varas	**Ramas sin contacto directo con las varas**	**Valor medio**
Tiempo de vibrado (s)	14.8 ± 2.8 a	13.8 ± 2.9 a	14.3 ± 2.8
Frecuencia (Hz)	4.1 ± 0.2 a	4.0 ± 0.3 a	4.1 ± 0.5
A_{RMS} (ms^{-2})	29.6 ± 10.2 a	12.8 ± 6.4 b	26.5 ± 13.6
Valor máximo de aceleración (ms^{-2})	616.7 ± 283.3 a	268.1 ± 164.6 b	495.1 ± 270.9
Desprendimiento del fruto (%)	84.7 ± 30.5 a	25.1 ± 22.2 b	69.1 ± 40.7

Los valores mostrados son la media ± desviación estándar, n=90. Las mismas letras de la misma fila indican que no son significativamente diferentes (Student's t, $p < 0.05$; Wilcoxon-Mann-Whitney test, $p < 0.05$).

Las ramas mostraron un valor medio de frecuencia de vibración de 4,1±0,5 Hz, apropiado para el desprendimiento del fruto [15]. El valor de la frecuencia de vibración no se correlacionó con la posición de la rama en la copa (Pearson = 0,135, $p > 0,05$). Los valores de las A_{RMS} medidos en las ramas se relacionaron positivamente con la proporción de desprendimiento de frutos. La vibración de la rama se caracterizó por un valor A_{RMS} de 26,5±13,6 ms^{-2} para la frecuencia de vibración de la máquina. Las ramas con contacto directo con las varas mostraron un valor medio de A_{RMS} significativamente mayor (29,6±10,2 ms^{-2}) (Student t, $p < 0,05$; Wilcoxon-Mann-Whitney, $p < 0,05$) que las ramas sin contacto directo (12,8±6,4 ms^{-2}). Pu et al [14] mostraron que los valores más altos de aceleración en las ramas (31,4 ms^{-2}) fueron proporcionados por el contacto con las varas de la máquina y estas ramas alcanzaron los valores más altos de eficiencia en el desprendimiento de la fruta. Además, las ramas internas, sin contacto directo con las varas, mostraron un 43% del nivel de vibración del A_{RMS} de las ramas externas. Un resultado similar fue alcanzado por otros autores [16], cuyos resultados mostraron una reducción de la aceleración en las ramas internas de la copa del 42% con respecto a las ramas externas.

La interacción de las varas con las ramas se caracterizó por una sucesión de impactos con un alto valor de aceleración de acuerdo con la frecuencia de vibración de la máquina. Estos impactos presentaron un valor medio de A_{pk} de 495,1±270,9 ms^{-2}. Los valores de A_{pk} en las ramas con contacto directo con las varas (616,7±283,3 ms^{-2}) fueron más altos (Student's t, $p < 0,05$) que en las ramas sin contacto directo (268,1±164,6 ms^{-2}). Los valores de A_{pk} y A_{RMS} mostraron una correlación lineal positiva (Pearson = 0,70, $p < 0,05$) en la copa del árbol. En ambos casos, el contacto directo de la vara representó un incremento de 2,3 veces los valores de aceleración alcanzados en la rama.

El sistema sacudidor de copa alcanzó un valor medio de desprendimiento de fruta de 69,1±40,7%. Sin embargo, presentaba una alta variabilidad dentro de la sección transversal de la copa. Como era de esperar, alcanzó sus valores más altos en las ramas en contacto directo con las varas. La relación de desprendimiento de frutos se redujo de un valor medio del 84,7±30,5% en ramas con contacto directo con las varas al 25,1±22,2% para las ramas sin contacto directo. Savary et al. [17] alcanzó un valor de desprendimiento de fruta del 88% en el exterior de la copa, mientras que en el interior esta cifra se redujo al 57%. Sin embargo, para mejorar la eficiencia de la cosecha, no sólo es necesario que la vara penetre en la copa, sino también que interactúe con la rama. Liu et al [15] analizando el desprendimiento del fruto según el punto de contacto de la vara con la rama, determinó que la operación es más efectiva cuando la vara impacta al 30% de la distancia hasta el extremo libre de la rama.

Los resultados obtenidos de la sección transversal de la copa del árbol han mostrado una alta variabilidad, tanto en la vibración como en los valores del fruto. Para reducir esta variabilidad y mejorar el proceso de recolección mecanizada es necesario conocer los requisitos para separar la fruta del árbol. El análisis de los datos se centró en la discretización de las variables cuantitativas que podían discriminar si existía un desprendimiento de fruta con un valor del 100% y un éxito razonable, empleando una regresión logística. El valor A_{RMS} y el tiempo transcurrido entre una aceleración superior a 300 ms^{-2} (T_{vib_300}) fueron variables significativas para discriminar los eventos de desprendimiento de fruta al 100%. El resultado se definió como una línea recta que separa las condiciones en las que se obtuvo un desprendimiento de fruta del 100% con una precisión medida como el área bajo la curva ROC de 0,95 en el conjunto de validación. La ecuación 1 muestra los valores obtenidos y la figura 4 su representación gráfica.

$$ln\left(\frac{\text{Probabilidad de desprendimiento del 100\%}}{1-\text{Probabilidad de desprendimiento del 100\%}}\right) = 7.13417 - 0.52754\, T_{vib_{300}} - 0.17206\, A_{RMS} \quad (1)$$

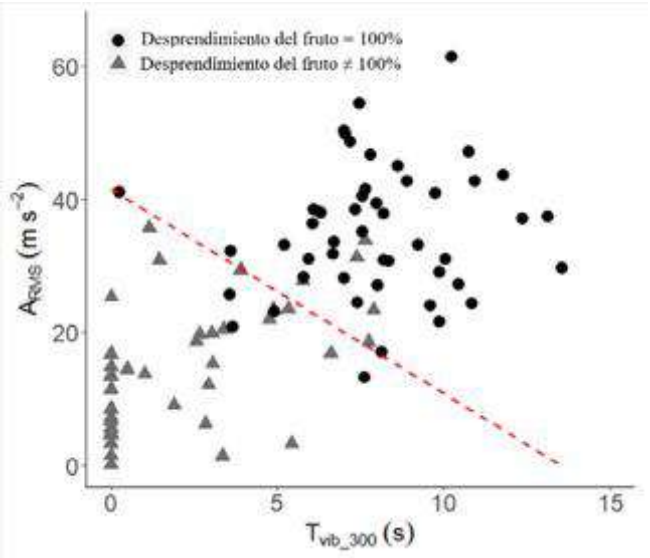


Figura 4. Distribución de valores de desprendimiento del fruto según A_{RMS} (ms^{-2}) y T_{vib_300} (s).

3.2. Patrón de desprendimiento del fruto

La figura 5 muestra los patrones de abscisión según el método de desprendimiento de la fruta. La rotura por desgarro de la cáscara fue mayor con el método manual (7,6%) que con el sacudidor de copa (1%) o la caída natural (0,4%) (prueba post-hoc de Tukey, $p > 0,05$). Sin embargo, los patrones de abscisión de AZ-C y AZ-A mostraron una tendencia opuesta dependiendo del método de desprendimiento de la fruta utilizado.

El AZ-C fue mayor en caída natural (89,0%) y con el método manual (79,5%). Por lo tanto, el método manual causa un desprendimiento en AZ-C similar a la abscisión natural. Nuestros resultados muestran que el AZ-C es el AZ más común, coincidiendo con otros autores [18]. Estos métodos de desprendimiento mostraron diferencias significativas en los valores medios de la fruta para AZ-C (prueba post-hoc de Tukey, $p > 0.05$) en comparación con el sacudidor de copa (58,8%) y la prueba a tracción (45,3%).

En contraste, el AZ-A fue mayor en la fruta con la prueba a tracción (51,8%) y sacudidor de copa (40,2%), y el valor medio disminuyó significativamente para recolección manual (12,9%) y caída natural (10,6%) (prueba post-hoc de Tukey, $p > 0.05$). Utilizando el método manual, hubo un aumento en el porcentaje de frutos con abscisión por desgarro de la cáscara (de 0,4 a 7,6%) y abscisión AZ-A (de 10,6 a 12,9%) en comparación con la caída natural. El sacudidor de copa aumentó la proporción de frutos con la abscisión AZ-A 3,1 veces en comparación con el método de recolección manual.

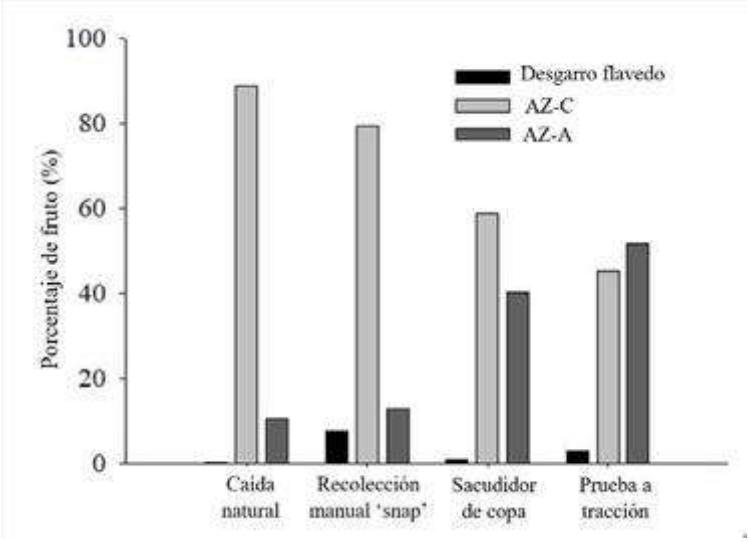


Figura 5. Patrón de abscisión del fruto según zonas de abscisión (AZ) y métodos de desprendimiento.

El porcentaje de frutos con abscisión en AZ-C con cáliz fue mayor con el sacudidor de copa (41,6%) y el método manual (30,2%) que con la prueba a tracción (15,5%) o caída natural (7,3%) (prueba post-hoc de Tukey, $p > 0,05$). El porcentaje de fruta con abscisión de AZ-C y cáliz conservado con sacudidor de copa (41,6%) fue similar a otros resultados obtenidos [19] con vibrador de troncos (41,7%) o vibrador de mano (43,3%). El porcentaje de frutos con abscisión en AZ-A por el pedúnculo fue muy bajo, con un 0,7% para la caída natural, un 0,9% para el método manual, un 3,4% para el ensayo de tracción y un 6,1% para el sacudidor de copa.

El fruto mostró diferencias significativas en la fuerza de retención del fruto (FRF) para el desprendimiento de la fruta según AZ (Figura 6, Antes). El desgarro de la cáscara por rotura del flavedo requirió un FRF medio de 99,3 N, superior al de una rotura AZ-C (88,7 N) y AZ-A (66,6 N; prueba post-hoc de Tukey, $p > 0,05$). El aumento de las roturas por AZ-A con un sacudidor se

relacionó con valores más bajos de FDF. Un resultado similar se obtuvo para los limones [19], donde los valores de FRF con abscisión en AZ-C se redujeron a lo largo de la temporada de cosecha, alcanzando valores para igualar la abscisión en AZ-A, que permaneció constante, al final del período. A diferencia de los limones, la variedad de naranja dulce Valencia tiene un alto contenido de FRF en comparación con otras variedades de naranja [6] [7] lo que facilita la rotura de AZ-A.

En frutos con abscisión de AZ-C, se encontró una regresión lineal entre el FRF y el diámetro del fruto (Pearson=0,401, $p < 0,01$, n=991), el 33% de este fruto se desprendió del cáliz, con valores significativos de FRF más altos (94,0 N) (t-Student, t=7.087, p=0.000) que en el caso de frutos sin cáliz (78,8 N). Una rotura del pedúnculo en AZ-A requería un FRF (81,8 N) superior al de la rama (65,5 N).

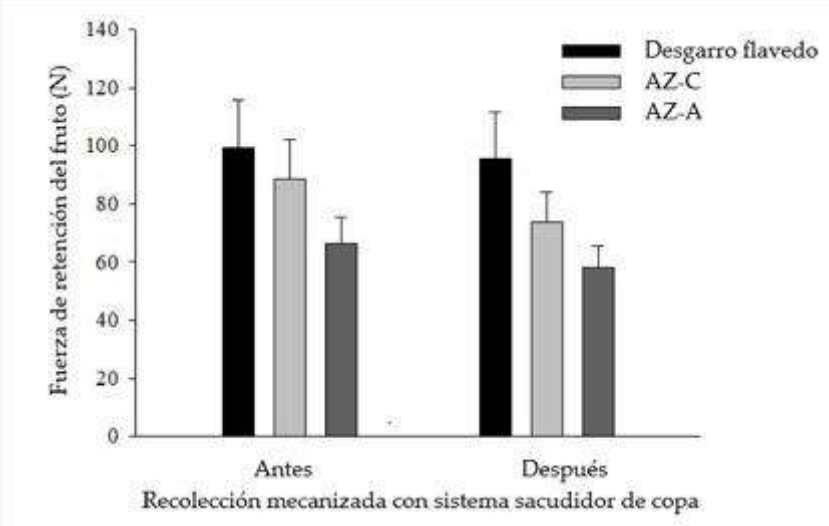


Figura 6. Fuerza necesaria para separar la fruta en la copa del árbol antes y después de la recolección mecanizada con sacudidor de copa de acuerdo con la zona de abscisión del fruto

La fruta desprendida por prueba de tracción con desgarro de la cáscara no mostró diferencias significativas (Student, $t = 1,550$, $p > 0.05$) antes o después de la cosecha mecánica, con un valor medio de 2,42%. Sin embargo, el uso del sacudidor de copa aumentó significativamente la cantidad promedio de fruta con abscisión de AZ-A de 45 a 50% (Student t, $t = -2.05$, nivel de significación $p < 0.1$, $p = 0.54$, $n = 22$) y redujo la cantidad de fruta con abscisión de AZ-C de 50 a 45% (Student t, $t = 1734$, nivel de significación $p < 0.1$, $p = 0.98$, $n = 22$). Además, los frutos que permanecen en el árbol después de la cosecha mecánica con abscisión de AZ-C tuvieron valores medios de FRF (73,6 N) significativamente más bajos (t Student, $t = 7,63$, $p = 0,000$, $n = 22$) que los frutos con la misma abscisión antes de usar la máquina (87,9 N). Esta reducción en el valor medio del FRF se distribuyó de la misma manera entre los frutos que conservaron el cáliz o no (t Student, $t = 4.70$, $p = 0.000$, $n = 22$). El fruto desprendido en la abscisión AZ-A tuvo valores medios más bajos (Student t, $t = 6,07$, $p = 0,000$, $n = 22$) de FRF antes (68,1 N) y después (59,1 N) de la recolección mecanizada. Este efecto también fue descrito por otros autores [20] los cuales atribuyeron las acciones de torsión y flexión durante la cosecha mecánica como la causa principal del desprendimiento de la fruta. En ambos casos, el fruto separado a través de la abscisión AZ-A requería una fuerza de desprendimiento menor que el fruto separado a través de AZ-C. No obstante, el FRF puede variar dependiendo de la forma en que se realice el método [21], disminuyendo a medida que aumenta el ángulo con respecto al eje del fruto [15]. La evaluación del FRF ha mostrado una aplicación limitada para predecir la eficiencia de la cosecha con un

agitador de dosel. Savary et al. [17] mostraron que el valor máximo de FRF bajo condiciones de laboratorio era sólo el 18% del método tradicional de medición de FRF con la prueba de tracción.

4. Conclusiones

Por la parte del árbol, el proceso de vibración durante la recolección mecanizada con el sacudidor de copa mostró una gran variabilidad en los resultados dependiendo de las diferentes partes de la copa. Las ramas que tuvieron contacto directo con las varas de la máquina mostraron un valor medio más alto de desprendimiento del fruto (84,7%) que las ramas sin contacto (25,1%). La transmisión de la vibración de las ramas externas a las internas en la copa no fue efectiva para desprender el fruto. Durante el proceso de vibración, los valores de desprendimiento del 100% se lograron con una combinación de parámetros de recolección en la rama. Lograr un proceso completo de separación de la fruta es posible si tanto la copa del árbol como la maquinaria se ajustan mutuamente para facilitar el contacto del sistema de sacudida y el tiempo de vibración necesario. Por la parte del fruto, se comprobó que los diversos métodos de separación de la fruta producen diferentes patrones de abscisión. La recolección mecánica con sacudidores de copa mostró un patrón de abscisión en AZ-A mayor que la caída natural y el método manual sin tijera donde predomina el AZ-C. El desprendimiento con el sacudidor de copa mostró una menor FRF en la rama (AZ-A) que en el fruto (AZ-C), aumentando la generación de residuos y la caída del fruto con cáliz. La fruta que permaneció en el árbol después de la recolección con sacudidor de copa mostró un valor de FRF más bajo.

5. Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agroalimentaria (INIA, España) con fondos FEDER, a través de los proyectos de investigación RTA2014-00025-C05-03 y RTA2014-00025-C05-05. Se quiere realizar una especial mención al Catedrático Emilio Soria-Olivas y Antonio J. Serrano pertenecientes al IDAL (Intelligent Data Analysis Laboratory) de la Universidad de Valencia por su inestimable apoyo en el análisis y visualización de los datos.

Referencias

1. FAOSTAT. Datos de alimentación y agricultura. Disponible en: http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC (accedido el 14 de mayo de 2019).
2. Junta de Andalucía. Media de costes de producción. Campaña 2016-17. Disponible en: http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/observatorio (accedido el 14 de mayo de 2019).
3. Ladaniya, M. S. 8 - HARVESTING, Citrus Fruit. Academic Press. 2008
4. Sanders, K.F. Orange harvesting systems review. Biosystems Engineering. 2005, 90, (115-125). h
5. Moreno, R., A. Torregrosa, E. Moltó & P. Chueca. Effect of harvesting with a trunk shaker and an abscission chemical on fruit detachment and defoliation of citrus grown under Mediterranean conditions. Spanish Journal of Agricultural Research. 2015, 13.
6. Torregrosa, A., Ortí, E., Martín, B., Gil, J., Ortiz, C. Mechanical harvesting of oranges and mandarins in Spain. Biosystems Engineering. 2009, 104, (18-24).
7. Peterson, D. L. Mechanical harvester for process oranges. Applied Engineering in Agriculture. 1998, 14, (455-458).
8. Castro-Garcia, S., G. L. Blanco-Roldán, L. Ferguson, E. J. González-Sánchez & J. A. Gil-Ribes. Frequency response of late-season 'Valencia' orange to selective harvesting by vibration for juice industry. Biosystems Engineering. 2017, 155, (77-83).
9. Roka, F. M., R. J. Ehsani, S. H. Futch & B. R. Hyman. Citrus mechanical harvesting systems - Continuous canopy shakers. 2014.
10. Spann, T. M., Danyluk, M. D. Mechanical harvesting increases leaf and stem debris in loads of mechanically harvested citrus fruit. HortScience. 2010, 45, (1297-1300).

11. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. 2018
12. Gupta, S.K., Ehsani, R. Kim, N.H. Optimization of a citrus canopy shaker harvesting system: Properties and modeling of tree limbs. T. ASABE. 2015, 58, (971-985).
13. Gupta, S.K., Ehsani, R. Kim, N.H. Optimization of a citrus canopy shaker harvesting system: Mechanistic tree damage and fruit detachment models. T. ASABE. 2016, 59, (761-776).
14. Pu, Y., Toudeshki, A., Ehsani, R., Yang, F., Abdulridha, J. Selection and experimental evaluation of shaking rods of canopy shaker to reduce tree damage for citrus mechanical harvesting. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2018, 11, (48-54).
15. Liu, T.H., Luo, G., Ehsani, R., Toudeshki, A., Zou, X.J., Wang, H.J. Simulation study on the effects of tine-shaking frequency and penetrating depth on fruit detachment for citrus canopy-shaker harvesting. Computers and Electronics in Agriculture. 2018, 148, (54-62).
16. Liu, T. H., R. Ehsani, A. Toudeshki, X. J. Zou & H. J. Wang. Experimental Study of Vibrational Acceleration Spread and Comparison Using Three Citrus Canopy Shaker Shaking Tines. Shock and Vibration, 2017.
17. Savary, S.K.J.U., Ehsani, R., Salyani, M., Hebel, M.A., Bora G.C. Study of force distribution in the citrus tree canopy during harvest using a continuous canopy shaker. Computers and Electronics in Agriculture. 2011, 76, (51-58).
18. Merelo, P., J. Agustí, V. Arbona, M. L. Costa, L. H. Estornell, A. Gómez-Cadenas, S. Coimbra, M. D. Gómez, M. A. Pérez-Amador, C. Domingo, Talón, M., Tadeo, F. R. Cell wall remodeling in abscission zone cells during ethylene-promoted fruit abscission in citrus. Frontiers in Plant Science. 2017, 8.
19. Torregrosa, A., Porras, I., Martín, B. Mechanical harvesting of lemons (cv. Fino) in Spain using abscission agents. Transactions of the ASABE. 2010, 53, (703-708).
20. Savary, S.K.J.U., Ehsani, R., Schueller, J.K., Rajaraman, B.P. Simulation study of citrus tree canopy motion during harvesting using a canopy shaker. T. ASABE. 2010, 53, (1373-1381).
21. Pozo, L., Malladi, A., K.-J. John-Karuppiah, Lluch, Y., Alferez, F., Burns, J. K. Daily Fluctuation in Fruit Detachment Force of 'Valencia' Orange Is related to Time of Day, Temperature, Relative Humidity, Fruit Weight, and Juice Percentage. Proceedings of the Florida State Horticultural Society. 2007, 120, (41-44).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Proceso de acompañamiento a la innovación para el hilerado, triturado y gestión de los restos de poda en olivar

Francisco J. Castillo-Ruiz[1], Gregorio L. Blanco-Roldán[1], Jesús A. Gil-Ribes[1].

[1] G.I. AGR 126 "Mecanización y Tecnología Rural". E.T.S.I. Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, Ctra. Nacional IV, km. 396, 14014 Córdoba;: FJCR g62caruf@uco.es; GLBR ir3blrog@uco.es; JAGR gilribes@uco.es.

Resumen: España ocupa el 16º puesto en los rankings de innovación de la Unión Europea. Para atajar este problema, desde el sector público se ha desarrollado la compra pública innovadora para fomentar la innovación, y la mejora de los servicios públicos. En este sentido, la Universidad de Córdoba desarrolló el convenio de compra pública precomercial (CPP) Mecaolivar y actualmente está desarrollando el CPP Innolivar. Una de las líneas del CPP Innolivar desarrollará un sistema de hilerado, triturado y gestión de los restos de poda para olivar intensivo y tradicional. Previamente se realizó una encuesta a empresas para conocer su situación y su visión del sector. El proceso de acompañamiento a la innovación dentro del convenio, se inició con una consulta previa al mercado en la que participaron 2 empresas. Tras la evaluación de las soluciones propuestas por las empresas se seleccionaron 3 y de estas se seleccionaron 2 empresas para construir los prototipos. Estos prototipos deben dar respuesta a unos puntos establecidos por parte del órgano de contratación en una demanda tecnológica. Todo el proceso es competitivo, y a lo largo del mismo se deben obtener beneficios para los olivicultores, sector de fabricación de maquinaria agrícola y sector público.

Palabras clave: Compra Pública Precomercial, Compra Pública Innovadora, agrupado de restos, poda, biomasa.

1. Introducción

El olivar mundial está formado por una superficie de más de 11 millones de hectáreas [1] que han crecido de forma muy importante en los últimos años. España, en concreto, presenta una superficie de olivar de 2,69 millones de hectáreas que se dedican fundamentalmente a la producción de aceituna para almazara, y en menor medida, a la producción de aceituna de mesa [2]. Los retos tecnológicos a los que se enfrenta el sector son muy diversos, abarcando desde la mejora de la mecanización de distintas operaciones hasta el desarrollo de nuevos productos biológicos para el control de plagas y enfermedades.

No todas las plantaciones generan la misma rentabilidad en cuanto a sus costes de producción [3], en parte por la alta vinculación que existe con la tipología y morfología del cultivo con la competitividad de la producción obtenida. Para conseguir una adecuada sostenibilidad económica se requiere una reducción de los costes de producción, lo que sólo es viable por medio de la mecanización de sus operaciones. Sin embargo, en el caso de plantaciones con configuraciones tradicionales, en pendiente y/o en pequeñas parcelas, se presentan dificultades para la introducción de soluciones mecanizadas, especialmente aquellas que mecanizan las labores de forma integral sin necesidad de mano de obra auxiliar. Las principales innovaciones

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3457

en los últimos años se han centrado en plantaciones de olivar superintensivo, debido a la existencia de maquinaria específica para efectuar una recolección integral, a pesar de que la superficie de olivar superintensivo en España es muy inferior a otras tipologías de cultivo como el olivar tradicional (62,1 %) y el intensivo (36,5 %) [4]. Para mejorar la competitividad de todas las tipologías de plantación, en el actual convenio Innolivar, se están desarrollando 5 bloques con 12 líneas de trabajo que son aplicables a todas las tipologías de olivar [5]. Dentro de ellas, en la línea 4 se pretende desarrollar un equipo para el hilerado, triturado y gestión de los restos de poda en olivar intensivo y tradicional. Esta solución pretende solucionar la problemática derivada de la gestión y aprovechamiento de los restos de poda, que a menudo están infra explotados debido a la falta de sistemas eficientes para su recogida [6], aunque actualmente hay disponibles numerosos equipos y modelos con distintas configuraciones [7].

El objetivo del presente trabajo es describir el proceso de acompañamiento a la innovación para el desarrollo de un sistema para el hilerado, triturado y gestión de los restos de poda en olivar tradicional e intensivo.

2. Materiales y métodos

La estructura del convenio de compra pública pre comercial Innolivar (CPP Innolivar) dentro del cual se encaja la línea 4 que tiene por objetivo desarrollar de un equipo integral de agrupado, picado y gestión de los restos de poda para olivar intensivo y tradicional se dividió en 4 fases (Figura 1). En primer lugar, se realizó una consulta al mercado hacia las empresas del sector y se analizaron las necesidades presentes en las líneas de desarrollo En base a las propuestas presentadas a la consulta al mercado, se realizó una revisión de la demanda tecnológica de la línea. Posteriormente se publicó un proceso de licitación, al que podían optar aquellas empresas que previamente superasen unos criterios de solvencia técnica y económica (Fase 1, etapa 1). De las empresas licitantes, se seleccionaron 3 para iniciar la fase 1, etapa 2, debiendo presentar un estudio de viabilidad y una propuesta de desarrollo del prototipo al final de este periodo. De las 3 empresas seleccionadas, se escogieron 2 en base a la propuesta y estudio de viabilidad presentados, que actualmente se encuentran desarrollando el proceso de prototipado (Fase 2, etapa 1). Posteriormente, se llevará a cabo un proceso de verificación de prototipos (Fase 2, etapa 2), en la que se ensayarán y mejorarán los prototipos ya construidos, y finalmente una fase de serie de pruebas (Fase 3), en la que las empresas deben poner en condiciones de funcionamiento real al menos un prototipo.

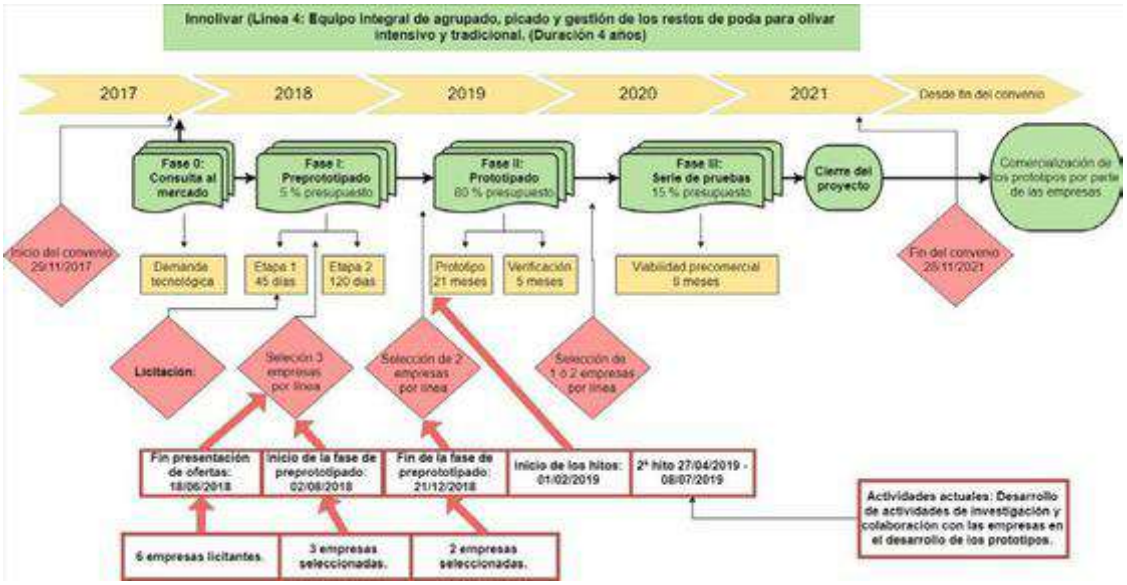


Figura 1. Cronología de la línea 4 del CPP Innolivar. Situación del proyecto en mayo de 2019.

Previo al inicio del convenio se hizo una encuesta a 42 fabricantes que ya comercializaban máquinas para el hilerado o triturado de restos de poda, para determinar sus características. Dicha encuesta se componía de 7 preguntas, de las cuales las 4 primeras permiten marcar una única respuesta, a excepción de la respuesta "agricultor" en la primera pregunta. Las preguntas 5 y 6 permiten marcar varias opciones simultáneamente, mientras que la pregunta 7 sólo se hace al objeto de determinar la localización del fabricante. La encuesta realizada fue la siguiente:

BLOQUE 1. NATURALEZA DEL ENCUESTADO.
Definición del encuestado:
□ Fabricante de maquinaria agrícola o componentes
□ Gabinete de ingeniería
□ UTE (Unión temporal de empresas)
□ Agricultor
□ Otro:_____
Tamaño de la empresa.
□ Autónomo
□ Comunidad de bienes
□ Microempresa (menos de 10 trabajadores; facturación menor de 2 millones de €)
□ Pequeña (Menos de 50 trabajadores; facturación menor de 10 M€)
□ Mediana empresa (Menos de 250 trabajadores; facturación menor de 50 M€)
□ Gran empresa (Más de 250 trabajadores; facturación mayor de 50 M€)
Indique el nivel formativo de la persona que dirige la empresa.
□ Sin estudios
□ Graduado escolar o educación obligatoria
□ Formación profesional
□ Estudios universitarios
¿Qué porcentaje de sus ingresos procede de la exportación?
□ 0 %
□ 0 – 50 %
□ 50 – 100 %
¿Cuál de las siguientes acciones considera que debe llevar a cabo la administración para apoyar al sector del olivar?
□ Aumentar las ayudas directas al agricultor
□ Fomentar la innovación
□ Destinar ayudas para transformar el olivar tradicional a intensivo/superintensivo-
□ Ligar las ayudas a la adquisición de maquinaria e instalaciones
□ Ayudas para la inserción de jóvenes agricultores
¿En qué fase considera que el sector del olivar debe mejorar en mayor medida?
□ Producción en campo y técnicas de cultivo
□ Almazaras y entamadoras
□ Proveedores de maquinaria, instalaciones y equipos para el agricultor y la industria □ Procedimientos y canales de comercialización
Municipio_____ Provincia_____

El desarrollo tecnológico de cada línea, debe basarse en el diseño desarrollo y construcción de un prototipo que dé respuesta a la demanda tecnológica. Esta demanda tecnológica realiza una descripción de las funcionalidades que se pretenden obtener del futuro prototipo, evitando ser demasiado específico para no coartar la capacidad de innovación de las empresas. Definir esta demanda es un punto crítico del proyecto, ya que las funcionalidades descritas son exigibles al prototipo construido.

Desde el inicio de la fase 1, etapa 1, la Universidad de Córdoba ha tomado un papel activo en la búsqueda de empresas que pudiesen proponer soluciones a la demanda tecnológica planteada, sin participar en la propuesta de soluciones, ya que la fase 1 es una etapa competitiva, en la que la participación del órgano de contratación en el proceso de desarrollo no está permitida. Sin embargo, una vez seleccionadas las dos empresas que pasan a la fase 2, la Universidad si puede interactuar con las empresas licitantes, manteniendo en todo caso la confidencialidad de las soluciones propuestas entre ellas, para no alterar el proceso competitivo. Previo al inicio de la fase 2, se firmaron sendos contratos con las dos empresas seleccionadas, para definir los 12 hitos (Tabla 1) en los que se divide el proceso de innovación desde la fase 2 hasta la fase 3. En cada hito se definen los entregables que cada empresa debe tener preparados, y el importe que percibe una vez que se han realizado los entregables, y se ha comprobado por parte de la Universidad, que el trabajo realizado es satisfactorio en base a lo acordado en el contrato y atendiendo siempre a la demanda tecnológica.

Tabla 2. Hitos para cada una de las fases del proyecto.

Hito	Fase, etapa	Tipo
1	Fase 2, etapa 2	Prototipado
2	Fase 2, etapa 2	Prototipado
3	Fase 2, etapa 2	Prototipado
4	Fase 2, etapa 2	Prototipado
5	Fase 2, etapa 2	Prototipado
6	Fase 2, etapa 2	Prototipado
7	Fase 2, etapa 2	Verificación
8	Fase 2, etapa 2	Verificación
9	Fase 2, etapa 2	Verificación
10	Fase 3	Serie de pruebas
11	Fase 3	Serie de pruebas
12	Fase 3	Serie de pruebas

3. Resultados y discusión

Análisis de los resultados obtenidos en el trabajo.

3.1. Subapartados

Para la línea 4, los resultados de la encuesta inicial muestran que las empresas susceptibles de participar en el proceso son en su mayoría fabricantes de maquinaria agrícola, con un tamaño pequeño – medio, y con un grado de formación medio – alto de las personas que dirigen la empresa. En cuanto a la exportación, casi todas las empresas tienen una actividad exportadora relevante, y creen de forma mayoritaria que la administración debería favorecer la compra de maquinaria mediante ayudas, y que el principal campo de mejora del olivar se sitúa en la comercialización del producto (Tabla 2.1. 2.2. 2.3. 2.4. 2.5. y 2.6.)

Tabla 2.1. Tipo de empresa encuestada.

Fabricante de maquinaria agrícola	Gabinete de ingeniería	Otro	Además es agricultor
80,95	9,52	9,52	16,67

Tabla 2.2. Distribución de las empresas encuestadas por tamaños.

Autónomo	Microempresa	PYME	Mediana empresa	Gran empresa
9,52	19,05	52,38	11,90	7,14

Tabla 2.3. Nivel formativo de las personas que dirigen las empresas encuestadas.

Sin estudios	Graduado escolar	Formación profesional	Estudios universitarios
0,00	10,26	17,95	71,79

Tabla 2.4. Porcentaje de ingresos totales derivado de la exportación de las empresas encuestadas.

0 %	0 – 50 %	50 – 10 %
9,52	73,81	16,67

Tabla 2.5. Acciones que las empresas encuestadas creen que debería llevar a cabo la administración para apoyar al sector del olivar.

Más ayudas directas	Fomentar innovación	Transformación del olivar tradicional	Ayudas para adquisición de maquinaria	Jóvenes agricultores
23,81	38,10	35,71	54,76	23,81

Tabla 2.6. Cuestiones en las que las empresas encuestadas creen que debería mejorar sector del olivar.

Producción en campo	Almazaras y entamadoras	Proveedores agricultor e industria	Comercialización
33,33	7,69	35,90	74,36

El proceso de acompañamiento a la innovación dentro del convenio, se inició con una consulta previa al mercado en la que participaron 2 empresas. Para realizar el prototipo de hilerado, triturado y gestión de los restos de poda, 6 empresas presentaron su propuesta durante el periodo de licitación (Fase 1, etapa 1), siendo evaluadas por el órgano de contratación, que escogió 3 empresas para desarrollar sus propuestas y preparar un estudio de viabilidad de las mismas en el mercado (Fase 1, etapa 2). Las empresas seleccionadas entregaron 4 documentos: Una memoria, un documento de integración de las tecnologías preexistentes, un plan de viabilidad de su propuesta en el mercado, y un modelo para determinar qué apartados de la documentación entregada son confidenciales. Con esta documentación, el órgano de contratación seleccionó dos empresas para llevar a cabo el diseño, desarrollo y construcción del prototipo. Para ello se han establecido 12 hitos divididos en tres partes, por un lado el prototipado (diseño, desarrollo y construcción del prototipo), posteriormente la verificación de dicho prototipo realizando pruebas y ensayos tanto en fábrica como en campo, y por último, la serie de pruebas, en la que se pretende ensayar al menos un prototipo en condiciones reales de trabajo (Tabla 1). A lo largo de todo este proceso se lleva a cabo un proceso de mejora continua del prototipo, con el objetivo de llegar a un producto viable a nivel comercial, que suponga un avance respecto a los productos ya existentes en el mercado.



Figura 2. Selección de empresas a lo largo del proceso de innovación.

Actualmente el desarrollo de los prototipos se encuentra en el hito 2, en el que se está realizando el diseño de los mismos junto con la planificación de cara a la integración de los distintos módulos o componentes de los prototipos para su buen funcionamiento.

En el proceso de innovación que se está llevando a cabo, se pueden identificar beneficios para 3 sectores:

- Sector productor de aceite de oliva y aceituna de mesa: Este sector se beneficia del proceso de innovación, al ampliar la gama de productos disponibles para realizar una determinada labor. En este caso para el hilerado, triturado y gestión de restos de poda de olivar.
- Sector de fabricación de maquinaria agrícola: Las empresas fabricantes de maquinaria agrícola se benefician de la aparición de nuevas innovaciones. Las empresas adjudicatarias pueden desarrollar productos innovadores amortiguando de forma muy importante el coste de este proceso. Además la propiedad industrial que se derive de esos desarrollos, tienen un periodo de exclusividad, en el que sólo pueden ser explotadas por las empresas que han ejecutado el desarrollo. Un periodo de disponibilidad pública limitada, en el que la patente puede ser explotada por cualquier empresa del sector, previo pago del correspondiente royalty a los propietarios de la propiedad industrial (Empresa adjudicataria y órgano de contratación). Finalmente, la propiedad industrial queda libre de protección antes de que se deba agotar el periodo máximo de 20 años, para estimular la competencia entre empresas del sector.
- Sector público: En este caso, el órgano contratante obtiene una serie de beneficios derivados de la mejora del servicio público, e incluso en forma de retorno económico. En el primer caso, la participación en este tipo de convenios de innovación genera una serie de externalidades positivas que mejoran el servicio público del órgano de contratación en diferentes aspectos. En lo relativo al retorno económico, para la concesión de este convenio, se exigió que el análisis coste-beneficio arrojase un resultado nulo o positivo para el órgano de contratación.

Por estos motivos, el empleo de estos procesos de acompañamiento a la innovación pueden considerarse una buena herramienta para la mejora del servicio público [8]. Este sistema de acompañamiento a la innovación se conoce Europa como Compra Pública Innovadora, según se

recoge en el marco de la investigación e innovación de la Unión Europea (2014-2020) y en la Estrategia Española de Ciencia y Tecnología y de Innovación 2013-2020 [9].

4. Conclusiones

El desarrollo de convenios entre organismos públicos de investigación y empresas privadas siempre es interesante de cara a estimular y potenciar el desarrollo de innovaciones que puedan llegar al mercado. En este caso concreto se trata del desarrollo de un prototipo de hilerado, triturado y gestión de restos de poda para olivar tradicional e intensivo, que es una línea de desarrollo dentro de un convenio de mayor envergadura con 12 líneas de desarrollo diferentes. A lo largo del proceso de acompañamiento a la innovación, la competitividad entre las empresas es clave para potenciar la implicación de las mismas en el desarrollo.

El proceso de acompañamiento a la innovación ha suscitado el interés inicial de numerosas empresas, aunque finalmente sólo 6 han decidido licitar proponiendo una solución. De ellas, sólo 3 empresas han sido seleccionadas para desarrollar esa propuesta y para preparar un plan de viabilidad, y sólo 2 han sido escogidas para desarrollar el prototipo. Los beneficios a lo largo del proceso son múltiples y afectan a diversos sectores, que en este caso son el sector olivarero, sector de fabricación de maquinaria agrícola y el sector público, debido a la mejora del servicio público.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida a través del Convenio de Compra Pública de Innovación INNOLIVAR en su modalidad de Compra Pública Precomercial, de acuerdo con lo establecido en el Convenio entre el antiguo Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (actual Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades) y la Universidad de Córdoba, cofinanciado en un 80% por fondos FEDER, dentro del Programa Operativo Pluriregional de España 2014-2020 y el apoyo de la Interprofesional del Aceite de Oliva Español (OIAOE). Además los autores agradecen a todas las empresas que han participado en alguna fase del proyecto su interés en participar en este proceso de acompañamiento a la innovación.

Referencias

1. Vilar J & Pereira J.E. (2017). Informe Caja Rural de Jaén sobre coyuntura para la olivicultura internacional. Campaña 2016/17. Último acceso 15-02-2018. Disponible en: http://www.expoliva.info/archivos/informe_caja_rural.pdf
2. ESYRCE. (2018). Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos análisis de las plantaciones de olivar en España. Ministerio de agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Último acceso 14-05-2019 Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/
3. AEMO (Asociación española de municipios del olivo). (2012). Aproximación a los costes del cultivo del olivo. Último acceso 9-05-2019, disponible en: http://www.aemo.es/get.php?pathext=descargas/Costes_AEMO.pdf
4. ESYRCE. (2015). Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos análisis de las plantaciones de olivar en España. Ministerio de agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Último acceso 14-05-2019 Disponible en: http://www.mapama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/espana2015web_tcm7-401244.pdf
5. Innolivar. 2019. Último acceso: 15-05-2019 Disponible en: https://innolivar.es/
6. Spinelli, R., & Picchi, G. (2010). Industrial harvesting of olive tree pruning residue for energy biomass. Bioresource technology, 101(2), 730-735.
7. Pari, L., Suardi, A., Santangelo, E., García-Galindo, D., Scarfone, A., & Alfano, V. (2017). Current and innovative technologies for pruning harvesting: A review. Biomass and bioenergy, 107, 398-410.
8. Abusleme Mardones, C. (2016). Las compras públicas de tecnología e innovación como un elemento central de las políticas públicas del siglo XXI. Revista chilena de derecho y tecnología, 5(2), 95-126.
9. Gómez, G. M. (2014). La Directiva de contratación pública de 2014: ¿nuevas soluciones a viejos problemas?. DS: Derecho y salud, 24(1), 200-208.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Riesgos de incendio asociados a cosechadoras de cereales: análisis de zonas críticas en la maquinaria

Jesús P. Val-Aguasca[1*], María Videgain-Marco[1], Pablo Martín-Ramos[1], Mariano Vidal-Cortés[2], Antonio Boné-Garasa[3], F. Javier García-Ramos[1]

[1] Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca; 648857@unizar.es.
[2] Departamento de Ingeniería Mecánica, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca.
[3] Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca.

Resumen: En Aragón, en los años 2016 y 2017, se han producido 295 y 464 incendios respectivamente, afectando a una superficie total de 915 y 908 ha. De dichos incendios, un 12% de los ocurridos en 2016 y un 7% de los que tuvieron lugar en 2017 fueron debidos a motores y máquinas, mayormente producidos por cosechadoras. El propósito de este trabajo ha sido investigar las zonas críticas de las cosechadoras asociadas al riesgo de incendio a través de la realización de una encuesta dirigida a propietarios de cosechadoras en Aragón. Se ha recabado información tanto sobre características técnicas de las máquinas (marca, potencia, antigüedad de la máquina, hectáreas cosechadas, etc.) como, en su caso, de las características de los incendios producidos (cultivo cosechado, utilización de sistema de picado, zona de la máquina donde se originó el incendio, etc.). En las 275 respuestas obtenidas se han referido 75 casos de incendio. En base a los datos facilitados en la encuesta, se ha analizado si existe alguna relación entre las características de la máquina y la producción de un incendio, y se han comparado las zonas de la cosechadora en la que se ha originado el incendio con información facilitada por una compañía de seguros. Se ha podido concluir que sólo existe una relación estadísticamente significativa de los incendios con el número de hectáreas cosechadas (vida útil de la cosechadora), siendo especialmente alto el riesgo para máquinas con más de 6000 ha acumuladas. Por otra parte, un 32% de los incendios tuvieron su origen en la zona del motor, frente a un 31% en la barra de corte y un 18% en los rodamientos y correas. El uso del picador no favoreció el origen del incendio en ninguna zona concreta de la máquina. El estudio se ha completado con medidas de temperatura *in situ* realizadas sobre varias máquinas en el verano de 2018, registrándose temperaturas superiores a 300 °C en el colector de escape, y superiores a 400 °C en la barra de corte cuando la cuchilla trabajaba en condiciones de rozamiento.

Palabras clave: barra de corte, encuesta, maquinaria agrícola motor, temperatura de combustión

1. Introducción

Los incendios constituyen una amenaza grave tanto por la destrucción de patrimonio medioambiental como de cultivos forestales, bienes materiales y vidas humanas. Las pérdidas agrícolas por incendios no se limitan, a corto plazo, a la destrucción de las cosechas, sino que, a medio plazo, se incrementan con pérdidas de la capacidad productiva estimadas entre un 35-45% de la producción en los años posteriores [1].

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3387

En España, las causas que originan los incendios son de distinta índole. A través de los boletines informativos mensuales publicados por el MAPA, se ha analizado la causalidad de los incendios en Aragón. Los incendios forestales se clasifican en 5 grupos en función de la causalidad: negligencia y accidente, intencionado, natural (rayo), desconocido y reproducción del incendio. En Aragón, en los años 2016 y 2017, se han producido 295 y 464 incendios forestales respectivamente, afectando a una superficie total de 915 y 908 ha. La causa más importante de estos incendios, aparte de la negligencia, ha sido la ignición de motores y máquinas agrícolas (incluidas cosechadoras), con un 12% de los incendios ocurridos en 2016 y un 7% de los que tuvieron lugar en 2017. A este respecto, es preciso destacar el incendio en el municipio de Luna (Zaragoza) de 2015, causado por una cosechadora, que afectó a un total de 13889 ha.

Las posibles causas de generación de incendios en las máquinas agrícolas y concretamente en las cosechadoras son muy variadas. Quick [2] enumera una serie de zonas potenciales para la generación del incendio: motor y conductos de salidas de gases de combustión, transmisiones, cojinetes, frenos, cortocircuitos eléctricos, impacto de los cabezales de siega con piedras u otros elementos e introducción de objetos extraños en la máquina. De todas ellas, la causa más común es la acumulación de material combustible en las zonas con altas temperaturas situadas cerca del motor. Las temperaturas en la superficie de estos elementos pueden alcanzar los 500 °C [2], mientras que las temperaturas de ignición de los residuos de cultivo varían en función del espesor de la muestra, situándose por encima de 200 °C para la paja de trigo [3]. En cuanto a la propagación del incendio, las condiciones de campo pueden favorecer o dificultar el proceso, existiendo 4 factores que condicionan dicha propagación: humedad relativa, temperatura ambiente, velocidad del viento y tipo y condición de cultivo [2,4].

Pese a la importancia de las consecuencias de los incendios agrícolas y forestales, apenas existen estudios centrados en las causas de los incendios en cosechadoras de cereales. Hasta ahora, los estudios más importantes han sido los realizados en Estados Unidos por el grupo de Shutske [5,6], en los que se investigaron más de 4000 incendios en cosechadoras y tractores, pudiendo acceder en 265 casos a la máquina incendiada para realizar sobre ella un estudio detallado. En base a los datos obtenidos, los autores concluyeron que el 74% de los incendios se originaron en la zona del motor por diferentes causas (calentamiento de superficies, salida de gases de combustión y componentes eléctricos). También se concluyó que el material que inició el incendio generalmente fueron los residuos del cultivo recolectado, seguidos por restos de combustible y aceite.

En Australia, otro estudio realizado por el grupo Kondinin [7] a 1170 agricultores informó de que aproximadamente el 25% de los encuestados habían experimentado un incendio en sus cosechadoras. Según los datos facilitados por los agricultores, la principal causa de incendio fue la acumulación de polvo y restos de cosecha en las superficies calientes de la máquina (33% de los casos) seguida por el calentamiento de los cojinetes (22%). También se concluyó que un mantenimiento y limpieza regular de la máquina era clave para la reducción del riesgo de incendio. En otro estudio llevado a cabo también en Australia, Quick [2] analizó 77 casos de incendios en cosechadoras, estimando que el 45% de los incendios se originaron en la zona del motor, seguidos por cojinetes y transmisiones con un 22%. Asimismo, concluye que la acumulación de cargas electrostáticas es una causa importante para el origen del incendio, remarcando la importancia del mantenimiento y la vigilancia del equipo para evitar los incendios.

Ante la ausencia de datos en España, con el presente trabajo se pretende obtener información sobre los riesgos de incendio en cosechadoras en Aragón, a fin de caracterizar el perfil de aquellas máquinas que más riesgo de incendio presentan. Para ello se ha llevado a cabo una encuesta a propietarios de cosechadoras y se han monitorizado en continuo varias máquinas durante toda la campaña de cosecha de verano del año 2018 con objeto de obtener la información de la temperatura en diferentes partes de la máquina.

2. Material y métodos

2.1. Encuesta

Se ha realizado una encuesta entre propietarios de cosechadoras en Aragón dirigida a la identificación de puntos críticos de la maquinaria, además de poder caracterizar el perfil de las máquinas con mayor riesgo de incendio. La encuesta ha sido estructurada en dos bloques: el primero referido a las características técnicas de la máquina (marca, potencia, antigüedad de la máquina, hectáreas cosechadas, etc.) y el segundo a las características del incendio en la cosechadora (cultivo cosechado, zona de la máquina donde se originó en incendio, etc.). En el siguiente enlace se puede visualizar la encuesta completa: http://bit.ly/encuestacosechadoras.

Posteriormente se ha realizado un análisis estadístico de los datos con el software SPSS v.18 (IBM, Chicago, IL, EE.UU.).

El análisis ha constado de tres partes: en primer lugar, se analizó la relación entre las variables potencia, antigüedad y hectáreas anuales cosechadas, creando además una nueva variable "hectáreas acumuladas", que representa el número de hectáreas cosechadas hasta el momento del incendio (es decir, has anuales × antigüedad) y hace referencia al desgaste o uso de la máquina en el momento del incendio. En una segunda etapa, se estudió la relación de las variables anteriormente comentadas con el riesgo de incendio, utilizando tablas de contingencia. Para ello se crearon variables categóricas para las hectáreas acumuladas (0-2000 ha, 2001-4000 ha, 4001-6000 ha y >6000 ha) y para la antigüedad de la máquina (0-10 años, 11-20 años y >20 años). En la tercera parte, se investigaron las zonas de origen de los incendios.

2.2. Monitorización de cosechadoras en campo

A lo largo de la campaña de cosecha 2018, se monitorizaron tres máquinas, instalando sondas de temperatura (termopares tipo K) en diferentes zonas de cada máquina, además de una sonda de temperatura/humedad ambiental (HOBO Pro v2) en el exterior (en las antenas exteriores de las cabinas). Dos de las máquinas seleccionadas (máquina 1 y máquina 2) fueron máquinas de 435 CV; nuevas o con poco tiempo de uso (estrenadas en las campañas 2018 y 2017, respectivamente); pertenecientes a empresas de servicio; que cosechan grandes superficies (>500 ha/año); y con anchuras de corte de 7,70 m. La máquina 1 cuenta con un escape de gases equipado con sistema de adición de urea y sistema de refrigeración *"Dynamic Cooling"*, mientras que la máquina 2 presenta un escape de gases equipado con filtro de partículas y sistema de refrigeración con ventilación lateral. La máquina 3, de un particular, presentaba las siguientes características: potencia de 160 CV, 3200 horas de trabajo acumuladas, 200 ha/año cosechadas, y anchura de corte de 5,10 m.

Los termopares se distribuyeron del siguiente modo: caja de cambios, filtro de urea, colector de escape y salida de la transmisión del motor en la máquina 1; caja de cambios, filtro de partículas, bloque motor y salida de la transmisión del motor en la máquina 2; y bloque motor, tubo de escape y salida de la transmisión del motor en la máquina 3. Todas las sondas se programaron de forma sincronizada para que recogieran datos cada 10 minutos durante las 24 h del día. Se han obtenido datos en continuo desde el 15/06/2018 hasta el 16/07/2018. La Figura 1 muestra el *datalogger* y las sondas utilizadas.

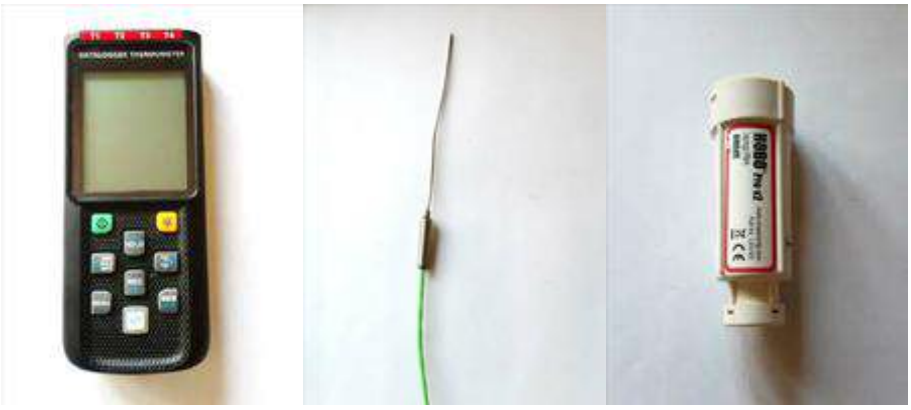


Figura 1. *De izquierda a derecha*: datalogger con cuatro canales de entrada, sonda de temperatura (termopar con cable apantallado) y sonda de temperatura/humedad ambiental.

Adicionalmente, se realizó una prueba con una barra de corte de cosechadora en mal estado y con muy poco mantenimiento, con el corte funcionando y la máquina estacionada. Para ello se colocaron tres termopares diferentes zonas de la barra de corte (en una cuchilla con rozamiento, en una cuchilla normal y en una chapa del corte) para la monitorización de la evolución de la temperatura. Las medidas fueron complementadas con las obtenidas con una cámara termográfica Fluke Ti200. En la Figura 2 se muestra una de las sondas colocadas en la barra de corte.



Figura 2. Sonda de temperatura instalada en barra de corte

3. Resultados y discusión

3.1. Relaciones entre variables

En la Figura 3 se muestra la relación entre las variables hectáreas anuales, potencia, antigüedad y hectáreas acumuladas, partiendo de la hipótesis de que las máquinas que más hectáreas cosechan al año estarán más expuestas y podrían tener más probabilidades de producir un incendio. Se observa que las máquinas que más hectáreas trabajan al año presentan unos mayores niveles de potencia, una menor antigüedad y un mayor número de hectáreas totales acumuladas (mayor desgaste).

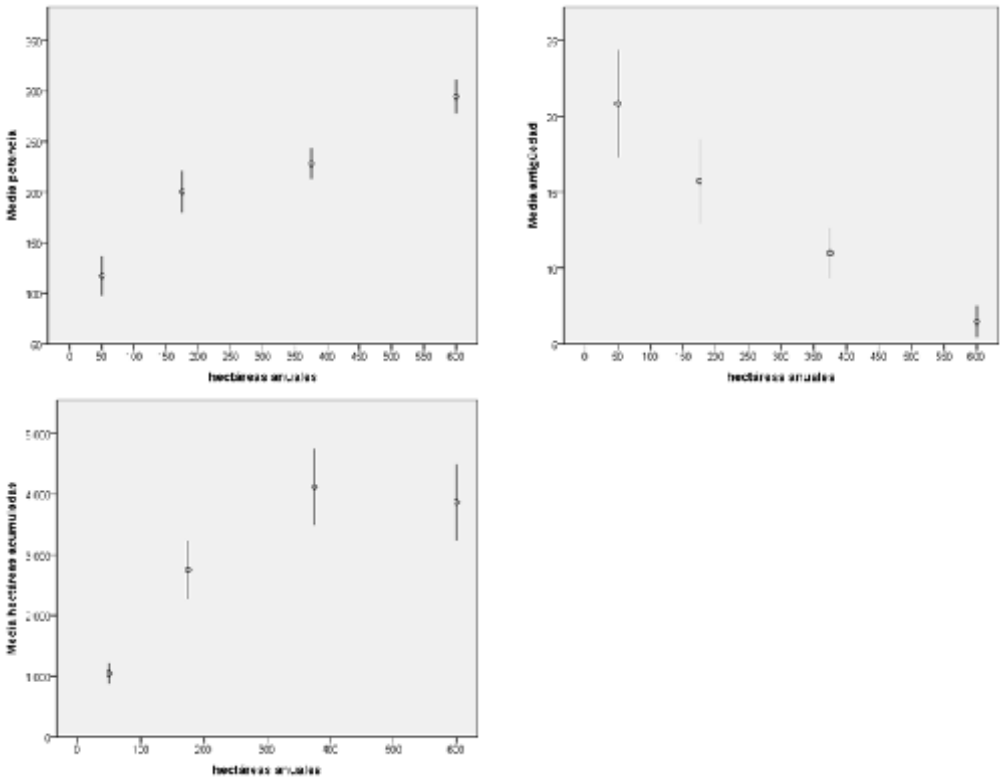


Figura 3. Relación entre las variables hectáreas anuales, potencia, antigüedad y hectáreas acumuladas. Se muestran los valores medios y las desviaciones estándar.

3.2. Relación entre variables e incendio

A partir de las tablas de contingencia de cada variable con respecto al incendio, se obtuvo que la antigüedad (χ^2=0,673), la potencia (χ^2=0,723) y las hectáreas anuales (χ^2=0,766) no mostraron una relación estadísticamente significativa con los incendios. Ahora bien, para la variable hectáreas acumuladas se obtuvo un χ^2=0,055, muy próximo al nivel de significación (0,05). En la tabla de contingencia se observan porcentajes de incendio muy similares para las máquinas que han trabajado hasta 6000 ha, pero, una vez superado este umbral, el porcentaje de incendio sería elevado (60%).

Al ser las hectáreas totales acumuladas la única variable que guarda relación con el riesgo de incendio se procedió a un análisis más detallado de posibles relaciones de esta variable con el resto de las variables. No se detectó una relación significativa con el uso de picador (χ^2=0,282), pero sí con la variable potencia (χ^2=0,012), aparte de con las variables antigüedad (χ^2=0,000) y hectáreas anuales (χ^2=0,000) de las que depende. En la Figura 4 se muestran las relaciones entre las tres variables. El perfil de las máquinas con más de 6000 ha acumuladas y que presentarían una mayor probabilidad de incendio correspondería a máquinas con una potencia media de 254 CV, una antigüedad media de 17 años y que trabajan una media de 492 ha/año.

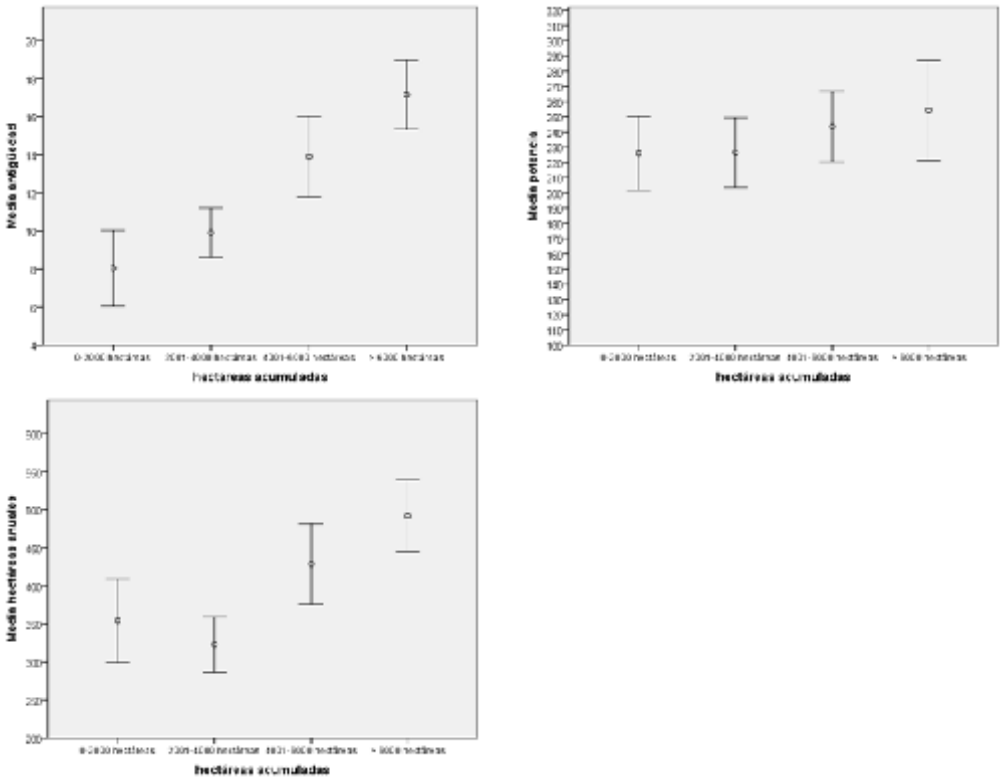


Figura 4. Relación entre las variables hectáreas acumuladas y hectáreas anuales, potencia y antigüedad. Se muestran valores medios y desviaciones estándar.

3.3. Determinación de las zonas de origen de incendios

En base a la tabla de contingencia en que se analizó la relación entre la zona de origen del incendio y el uso del picador, se obtuvo un valor de χ^2=0,159, por lo que el uso del picador no favoreció al origen del incendio en ninguna zona concreta de la máquina.

En la Tabla 1 se muestran las zonas de origen de incendio según los datos de la encuesta realizada en este estudio, y los facilitados por una compañía de seguros (actualizados a 2017). En ambos casos se observa que la zona donde más incendios se originan es en la zona del motor (~32%). No obstante, según los datos de la aseguradora, la segunda causa más importante de incendio serían las eléctricas (26%), frente al 10% estimado a partir de la encuesta. Según los datos recopilados en la encuesta, la segunda zona donde más incendios se han originado sería la barra de corte (31%), que sólo representa un 11% de los incendios según la aseguradora. Rodamientos, correas y otras zonas de la máquina (frenos, alternador, picador, etc.) presentaron porcentajes similares en la encuesta y en la base de datos de la aseguradora. Si se comparan estos datos con la bibliografía [2,5-7], los resultados son coincidentes en cuanto a que la zona del motor es la mayor causa de incendio, y en que los rodamientos y correas también representan un porcentaje importante de los incendios.

Tabla 1. Comparativa de zonas de origen de incendio en cosechadoras.

Zona	Encuesta	Compañía aseguradora	Quick [2]	Shutske, et al. [5],[6]	Shutske, *et al.* [5],[6]
Barra de corte	30,77%	11,11%	6,49%	-	3%
Causas eléctricas	8,79%	25,93%	12,99%	34%	14%
Zona del motor	31,87%	33,33%	45,45%	40%	33%
Otras zonas	10,99%	7,41%	12,97%	8%	28%
Rodamientos y correas	17,58%	22,22%	22,10%	18%	22%

3.4. Monitorización in situ de cosechadoras

En la Tabla 2 se muestran datos de las temperaturas registradas en las tres máquinas monitorizadas en campo. Es destacable que, para la máquina 1, se alcanzan temperaturas medias próximas a 200 °C en el colector de escape, que puntualmente alcanzaron los 305 °C. En la máquina 2 y la máquina 3 se alcanzaron temperaturas máximas de 154 °C y 159 °C en el filtro de partículas y en el tubo de escape, respectivamente. Esto corrobora que la zona del motor (colector de escape) sería una zona clave, en la que se pueden alcanzar temperaturas superiores a la temperatura de ignición del residuo del cultivo [3].

Tabla 2. Temperaturas registradas durante la campaña 2018 (15/06/2018-16/07/2018) en las tres cosechadoras monitorizas en campo.

Máquina	Zonas	N	$T_{máx}$ (°C)	T_{media} (°C)	Desviación típica
Máquina 1	Caja de cambios	2448	105,7	52,2	11,3
	Colector de escape	2448	305,4	190,2	42,3
	Filtro de urea	2448	142,1	97,3	19,2
	Salida transmisión del motor	2448	89,1	69,1	11,4
Máquina 2	Caja de cambios	1418	97,1	52,5	9,9
	Bloque motor	1418	69,2	56,2	5,2
	Filtro de partículas	1418	154,2	109,7	16,2
	Salida transmisión del motor	1418	95,1	81,1	8,6
Máquina 3	Salida transmisión del motor	1121	87,7	69,4	11,7
	Bloque motor	1121	87,9	77,6	9,7
	Tubo de escape	608	159,9	118,2	27,3

En la Figura 5 se observa la evolución de la temperatura del colector de escape de la máquina 1 frente a la temperatura de ignición de la paja. Esta temperatura dependerá del espesor de la muestra, así como de su granulometría, correspondiendo un valor de 250 °C a un espesor de 50 mm [3]. Se puede apreciar que dicho umbral se supera de forma puntual (concretamente, un 3.51% del tiempo de trabajo), generando un elevado riesgo de ignición del residuo y, por consiguiente, de incendio.

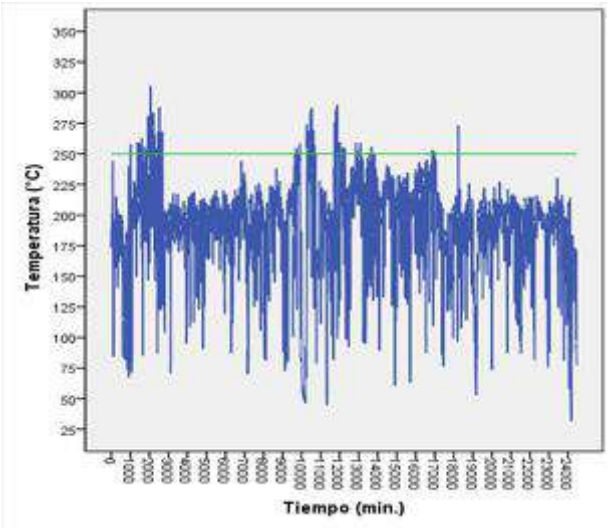


Figura 5. Evolución de la temperatura del colector de escape de la máquina 1 (azul) *vs.* temperatura de ignición (verde) [3].

Los ensayos realizados para barra de corte, segunda causa de incendio más importante según datos de la encuesta realizada, han permitido comparar (Figura 5) la evolución de temperatura para una cuchilla funcionando en condiciones normales y una cuchilla en rozamiento. Se observa que a los 10-15 min de iniciar el movimiento del corte, la cuchilla en rozamiento alcanza los 428 °C, frente a los 52 °C de temperatura máxima que se alcanzan en la cuchilla funcionando en condiciones normales. En la Figura 5, se muestra también una imagen de la cámara térmica, en la que aprecia claramente la diferencia de temperaturas entre la cuchilla con rozamiento y las demás cuchillas trabajando en condiciones normales. Un mal mantenimiento, en este caso de la barra de corte, hace que se alcancen temperaturas anormales, además de la posibilidad de generar chispas, que en presencia de residuo agrícola puede originar fácilmente un incendio.

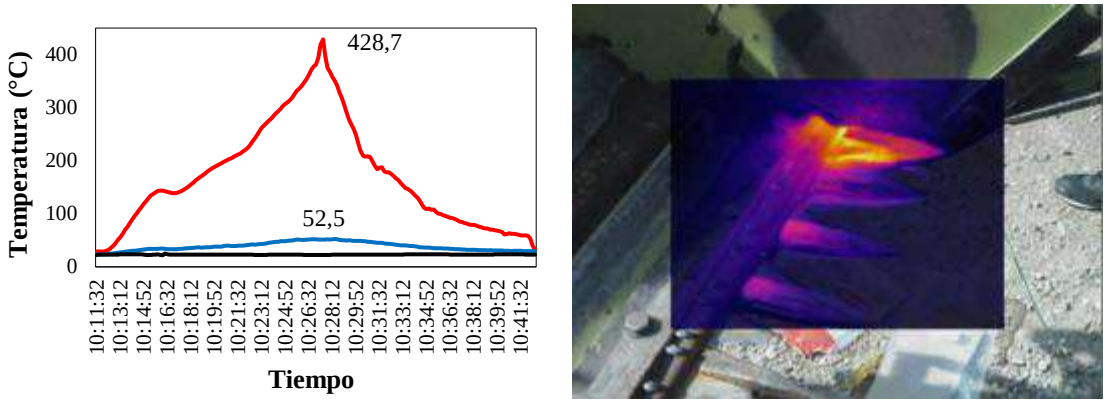


Figura 6. *Izquierda*: Evolución de la temperatura en barra de corte para una cuchilla en buen estado (azul) y para una cuchilla en rozamiento (rojo). La temperatura ambiente se muestra en color negro. *Derecha*: imagen termográfica de cuchilla en rozamiento.

Finalmente, en relación con los rodamientos, correas y otras zonas de la máquina, en la Figura 6 se muestra un rodamiento de cosechadora, pudiéndose apreciar fácilmente que le faltan algunas bolas. Estas bolas, a una elevada temperatura, pueden alcanzar la superficie del cultivo, siendo otro posible origen de incendios. Al igual que en la barra de corte, un adecuado mantenimiento sería fundamental para evitarlo.



Figura 7. Rodamiento desgastado de una cosechadora.

4. Conclusiones

Con respecto a las características técnicas de la máquina, sólo las hectáreas acumuladas (hectáreas totales cosechadas en la vida útil) presentan relación estadísticamente significativa con los incendios, siendo a partir de las 6000 ha acumuladas cuando el riesgo de incendio aumenta considerablemente. El perfil de máquinas con mayor riesgo, en base a los datos de la encuesta, correspondería a máquinas con más de 6000 ha acumuladas, potencia media de 254 CV, antigüedad de 17 años y 492 ha trabajadas al año. En cuanto a las zonas de mayor riesgo dentro de la cosechadora, un 32% de los incendios tuvieron su origen en la zona del motor, frente a un 31% en la barra de corte y un 18% en los rodamientos y correas. El uso del picador no tendría una influencia significativa. En pruebas realizadas *in situ* sobre las tres zonas clave mencionadas, se han detectado temperaturas de hasta 300 °C en la zona del motor, más concretamente en el colector de escape. En la barra de corte, una cuchilla trabajando en condiciones de rozamiento alcanzó temperaturas superiores a los 400 °C. Dichas temperaturas, junto con la acumulación de residuo agrícola, serían las responsables del origen de los incendios. Se pone, pues, de manifiesto que el mantenimiento de la maquinaria (barra de corte, rodamientos, etc.) sería uno de los factores clave para reducir el riesgo de incendios originados por máquinas cosechadoras de cereal.

Agradecimientos

Los autores agradecen su colaboración en este trabajo a ASAJA Huesca, AGPME-ITAGA, AGRACON, ANSEMAT, Sociedad Cooperativa del Campo Santa Leticia, servicios agrícolas JACA-LARRAZ, servicios agrícolas CANAL DE BERDÚN y al taller COGASAL.

Referencias

1. Bragachini, M.A.; Mendez, A.A.; Peiretti, J.; Santa Juliana, D.M.; Velez, J.P.; Sanchez, F.R.; Villarroel, D.D.; Scaramuzza, F.M.; Pognante, J.; Gallarino, A. *Incendios de cosechadoras y rastrojos en Argentina y su impacto económico, ambiental y social*; INTA: Argentina, 2013; p 15.
2. Quick, G.R. *An investigation into combine harvester fires*; Grains Research and Development Corporation: Australia, 2010; p 20.
3. Fernandez-Anez, N.; Garcia-Torrent, J. Influence of particle size and density on the hot surface ignition of solid fuel layers. *Fire Technol.* **2018**, *55*, 175-191.
4. Cardil Forradellas, A.; Salis, M.; Spano, D.; Delogu, G.; Molina Terrén, D. Large wildland fires and extreme temperatures in Sardinia (Italy). *Iforest-Biogeosciences Forestry* **2014**, *7*, 162-169.
5. Shutske, J.; Field, W.E. In *An Integrated Loss Control Strategy for Grain Combine Fires*, 1988 International Winter Meeting of the American Society of Agricultural Engineers, Chicago, IL, USA, 1988; American Society of Agricultural Engineers: Chicago, IL, USA, p 17.
6. Shutske, J.M.; Field, W.E.; Gaultney, L.D.; Parsons, S.D. Agricultural machinery fire losses: a preventative approach. *Appl. Eng. Agric.* **1990**, *6*, 575-581.
7. White, B.; Giumelli, J. *RRR - Owner survey: Harvester fires*; Kondinin Group: Australia, 2006.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Tres años de ensayos de poda mecánica y manual en limonero 'Fino 95'

B. Martin-Gorriz[1], A. Torregrosa[2], C. Martínez Barba[1]

[1] Universidad Politécnica de Cartagena. Dpto. Ingeniería Agronómica. Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena (Spain). E-Mail: b.martin@upct.es
[2] Universitat Politècnica de València. Dpto. Ingeniería Rural y Agroalimentaria. Valencia (Spain). Camino de Vera s/n. 46022 Valencia. E-mail: torregro@dmta.upv.es

Resumen: La poda manual de limoneros en el sureste de España supone aproximadamente el 39% del total de los costes de mano de obra del cultivo. La poda mecánica se puede integrar en una estrategia de gestión del cultivo para reducir los costes de poda; sin embargo no es una técnica que está ampliamente aceptada entre los agricultores, entre otros motivos, por la falta de estudios rigurosos con variedades y formas de cultivo que justifiquen sus posibles ventajas. En este trabajo se exponen los resultados de una experiencia de tres años para evaluar el potencial de la poda mecánica combinada con poda manual en limoneros 'Fino 95'. Los parámetros analizados han sido producción, calibre, calidad de la fruta, características de la biomasa podada y productividad de la labor. Se han realizado cinco tipos de tratamientos de poda: (1) poda manual (control) y cuatro intensidades de poda mecánica que tienen en común la poda de faldas y copa; y en las que la intensidad de poda mecánica se incrementó a medida que la intensidad de la poda manual se reducía; (2) poda mecánica de faldas y copa con repaso manual, (3) poda mecánica de faldas, copa y un lado del árbol; y poda manual del otro lado del árbol, (4) poda mecánica de faldas, copa y un lado del árbol, y (5) poda mecánica de faldas, copa y los dos lados del árbol. Estos tratamientos se han repetido durante tres años con alternancia de tipo de poda en el mismo bloque creando cinco tratamientos plurianuales. La principal conclusión del trabajo es que el tratamiento plurianual que alternó anualmente poda mecánica y manual, o bien el tratamiento de solo poda mecánica los tres años obtuvieron la mayor producción comercial acumulada. Por otro lado, los tratamientos con poda manual y mecánica el mismo año han obtenido la menor producción comercial acumulada.

Palabras clave: Citrus, Manejo de cultivos, Mecanización, Limón, Citrus sinensis.

1. Introducción

La poda más la eliminación de restos de poda consumen del orden la tercera parte de la mano de obra utilizada en el cultivo de los cítricos en España (excluida la recolección), con unas 95 horas anuales por ha [1], por lo tanto, es una tarea que interesa mecanizar para reducir los costes del cultivo. El triturado mecánico de los restos de poda ha permitido reducir los costes de eliminación de los restos, pero aún falta mucho camino por recorrer en la poda.

La poda mecánica no selectiva comenzó a realizarse en cítricos de forma experimental en los años 50 en USA, demostrándose que la poda mecánica complementada con poda manual podía reducir los costes en un 30-50% sin afectar a la producción ni a la calidad [2].

En España se realizaron los primeros ensayos en los años 70 - 80 [3, 4, 5]. En los ensayos de Zaragoza y Alonso [4, 5] se comparó la no-poda con poda manual, poda mecánica y poda

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3288

mecánica complementada con poda manual, tras un año de poda, el siguiente se dejaban todos los árboles sin podar, el experimento se desarrolló durante 4 años y en dos variedades 'Washington navel' y 'Salustiana'. Observaron que el año en que se realizaba la poda, la producción de los tratamientos podados disminuía respecto al tratamiento de no poda, pero el año siguiente, en que se dejaban todos los árboles sin podar, las producciones se igualaban. En el promedio de los dos bienios, se observó que en la variedad 'W. navel' en todos los tratamientos de poda, la producción fue inferior a la de los árboles sin podar (14%) sin diferencias apreciables entre los tratamientos de poda, mientras que en la variedad 'Salustiana', no hubo diferencias entre los árboles no podados o podados a mano, pero sí las hubo respecto a los podados mecánicamente, que tuvieron una reducción de producción del 17% respecto a los primeros, sin observarse diferencias entre los podados mecánicamente con repaso o sin él. El tamaño de los frutos fue inversamente proporcional a la producción, pero no se observaron diferencias en contenidos en azúcares, acidez o índice de madurez entre los tratamientos de poda.

En otros países mediterráneos como Italia o Turquía, también se han realizado experimentos de poda mecánica con resultados similares [6, 7, 8, 9].

Está comprobado que el año en que se practica la poda mecánica, se reduce la producción, pero si se analiza el efecto de la poda a lo largo de varios años, este efecto adverso se diluye porque el árbol compensa en los años sin poda, la producción perdida en los años de poda mecánica, seguramente debido a la acumulación de reservas y a una mejor iluminación [4, 8, 10, 11, 12, 13, 14].

Algunos autores, como Kallsen [13] comparan diversas intensidades de poda, corte cenital (topping) mecánico a varias alturas, así como varias intensidades de poda manual, con la no-poda, observando que en todos los casos, a mayor intensidad de poda, mayor reducción de la producción, con independencia del tipo de poda aplicado.

En el mismo sentido, Joubert et al. [15] en Sudáfrica observan el efecto de una prepoda severa y ligera combinadas con repaso manual en naranjos (cv. 'Valencia' y cv. 'Navel') y pomelos que habían crecido demasiado, solapándose en exceso. Tras tres años de experiencias comprobaron que todos los sistemas de poda ensayados daban una mayor producción que el control sin podar, pero la mejor combinación fue la de prepoda de los laterales con una inclinación de 10-20° combinada con una poda selectiva (manual) 2 a 3 veces al año. La prepoda formando un plano inclinado, además de favorecer la penetración de la luz a la parte baja del árbol, favorece que la producción se concentre en la zona baja que es más fácil de alcanzar en la recolección manual.

En la citricultura valenciana, se le da mucha importancia a las "faldas" de los árboles porque es una zona muy productiva, sin embargo, ensayos realizados de recorte de las mismas (skirting) con prepodadoras, han mostrado que la producción total del árbol no disminuye, y en cambio se facilita la recolección mecánica y se reducen los problemas de contagios por hongos del suelo, además de afectar al microclima del árbol [11, 16, 17].

Similares resultados encontraron Santarosa et al. [18], quienes utilizaron la poda combinada con el aclareo para regular el tamaño y vecería de naranjos. Según Sauls [11] la vecería se puede controlar con la poda mecánica realizando la misma tras un año de baja producción, que se espera sea la antesala de un año muy productivo.

La poda mecánica permite controlar las dimensiones de los árboles, lo que facilita la realización de otras labores, como los tratamientos fitosanitarios y la recolección tanto manual como mecánica [19].

Actualmente, la poda mecánica, utilizada bien sola o bien combinada con poda manual, se emplea de manera habitual en algunas explotaciones españolas, pero es una técnica que no está ampliamente aceptada entre los agricultores, entre otros motivos, por la falta de estudios con variedades y formas de cultivo más próximas a las suyas que le permitan valorar con certeza sus posibles ventajas. En experiencias realizadas en el periodo 2009-2012, por investigadores de la

UPCT y UPV [20] se evaluó el potencial de la poda mecánica combinada con poda manual en mandarinos 'Fortune', obteniendo como principal conclusión que la alternancia entre poda mecánica y manual es recomendable; en cambio, el tratamiento continuado de poda mecánica durante dos años seguidos reduce sustancialmente la producción. Como continuación del trabajo anteriormente citado en 2016 se inició una experiencia de cuatro años para evaluar el potencial de la poda mecánica combinada con poda manual en limoneros 'Fino 95'. A continuación se exponen los resultados de los tres primeros años de ensayos.

2. Materiales y métodos

2.1 Parcela y cultivo

Los ensayos se han realizado en una parcela de limoneros (*Citrus limon L. Burm F.*) de la variedad 'Fino' injertados sobre *Citrus macrophylla* de la finca El Cañarico, ubicada en Alhama de Murcia (Murcia). El terreno es una ladera con orientación N, presentando una pendiente transversal descendente S-N del 6-11 % y una pendiente longitudinal (E-O) que no se cuantificó por ser mínima y variable a lo largo de las calles. Los árboles estaban plantados en mesetas casi triangulares, con alturas comprendidas entre los 0.75-1 m de altura, siendo más pronunciada la altura en la cara Norte que en la Sur, dada la dirección transversal de la pendiente. El marco era de 7,5 x 6 m, 222 árboles/ha. El cultivo disponía de una fila de goteros ubicada en la cima de los caballones. El terreno era bastante pedregoso.

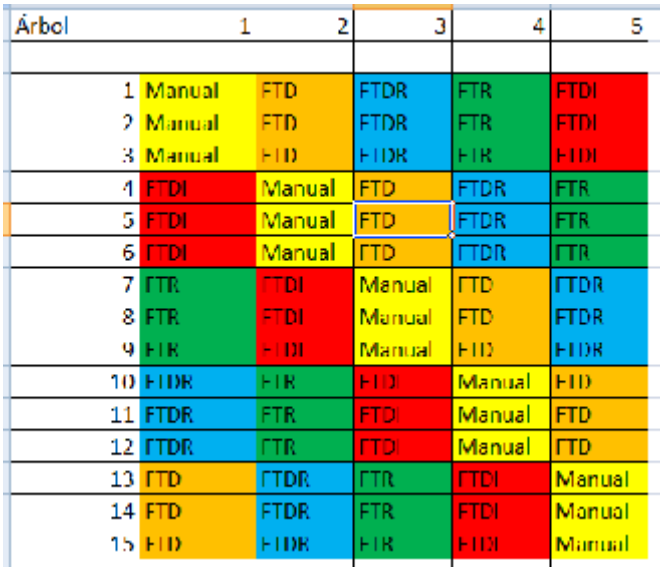
2.2. Equipos empleados

La poda manual se realizó con serruchos y tijeras de una mano, todos ellos de accionamiento manual. Los podadores eran una cuadrilla especializada que realiza habitualmente este trabajo en la finca.

La poda mecánica se realizó con una prepodadora de discos de la marca 'Industrias David' (www.industriasdavid.com), que constaba de cinco discos de corte montados linealmente sobre un brazo articulado. El tractor utilizado fue un Kubota M8540 Narrow de 63,7 kW de potencia. Con esta podadora mecánica no se pudieron cortar las faldas, ya que el último disco no es articulado, por lo que las faldas se recortaron con un cortasetos manual de la marca STIHL HS-82 R 60 cm.

2.3. Diseño de experimentos

En la Fig. 1 se muestra la distribución de los ensayos en campo en el primer año. Se realizaron 5 repeticiones por tratamiento (poda controlada de 75 árboles y medición de la producción y calibres de un árbol de cada tres de los que forman la repetición, en total 25 árboles), distribuyendo los tratamientos al azar en el campo.



Árbol	1	2	3	4	5
1	Manual	FTD	FTDR	FTR	FTDI
2	Manual	FTD	FTDR	FTR	FTDI
3	Manual	FTD	FTDR	FTR	FTDI
4	FTDI	Manual	FTD	FTDR	FTR
5	FTDI	Manual	FTD	FTDR	FTR
6	FTDI	Manual	FTD	FTDR	FTR
7	FTR	FTDI	Manual	FTD	FTDR
8	FTR	FTDI	Manual	FTD	FTDR
9	FTR	FTDI	Manual	FTD	FTDR
10	FTDR	FTR	FTD	Manual	FTD
11	FTDR	FTR	FTDI	Manual	FTD
12	FTDR	FTR	FTDI	Manual	FTD
13	FTD	FTDR	FTR	FTDI	Manual
14	FTD	FTDR	FTR	FTDI	Manual
15	FTD	FTDR	FTR	FTDI	Manual

Figura 1. Distribución de los ensayos del primer año.

Los tratamientos planteados para los cuatro años de ensayos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Tratamientos planteados para cuatro años de ensayos.

Tratamiento plurianual	**Tratamiento anual**				**Observaciones**
	Año 1	**Año 2**	**Año 3**	**Año 4**	
1	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual
2	FTDI	Manual	FTDI	Manual	Totalmente mecanizado, alternado con manual
3	FTR	FTR	FTR	FTR	Manual, pero con faldas y topping mecánicos
4	FTDR	FTIR	FTDR	FTIR	Mecánico por un lado y repaso por el otro, alternando los años
5	FTD	Manual	FTI	Manual	Variante del tratamiento 2 con poda mecánica por un solo lado

Leyenda: Manual = control; F = faldas; T = topping; D= lado derecho (Sur); I = lado izquierdo (Norte); R = repaso manual.

La unidad experimental fue el árbol, pero se eligieron 3 árboles sucesivos para cada tratamiento, con lo que la producción y los calibres se controlan en el árbol central de cada tríada, pues los árboles extremos se pueden ver afectados por las condiciones de borde.

Las variables medidas en el momento de la poda fueron: (1) capacidad de trabajo de las máquinas y podadores; (2) biomasa cortada; (3) diámetro de las ramas cortadas a nivel del corte; (4) ancho de las calles antes y después de la poda; (5) altura de los árboles antes y después de la poda; (6) altura de las faldas antes y después de la poda; y (6) estado fenológico del cultivo. Las variables medidas en el momento de la recolección fueron: (1) producción de los árboles experimentales (peso de todos los limones del árbol y (2) calibres (por muestreo, 60 limones/árbol experimental).

El 'repaso' consistió en la poda manual del 1/2 árbol cuyo lateral no había sido prepodado. Por lo tanto, los tratamientos con repaso, consistieron en poda mecánica de 1/2 árbol, sin repaso alguno y poda manual del otro 1/2 árbol. En el caso de los árboles con las dos caras prepodadas, el repaso consistió en podar manualmente el árbol entero.

La poda mecánica de los laterales consistió en el pase de la prepodadora en posición casi vertical recortando una pequeña cantidad de las ramas que invadían la calle.

El topping se realizó colocando la barra de corte en posición ligeramente ascendente desde la calle hacia la fila de los árboles.

La poda se realizó el primer año el 10-18 de marzo de 2016, el segundo años el 15-17 de marzo de 2017 y el tercer año el 16 de febrero y 6 de marzo de 2018.

El tratamiento estadístico de los datos se ha realizado con el software Statgraphics Centurion XVII (http://www.statgraphics.com/) empleando principalmente Análisis de la varianza (ANOVA) y comparación de medias.

3. Resultados y discusión

3.1. Tiempo de trabajo

La tabla 2 muestra la capacidad de trabajo (h/ha) por tratamiento para los tres años de ensayo. Se observa que la capacidad de trabajo del tratamiento 1 (poda manual control los tres años) varia sustancialmente de un año al siguiente a pesar de haberla realizado la misma cuadrilla de operarios los tres años. El tratamiento 2 tiene una reducción de tiempo considerable en los años de poda mecánica (año 1 y 3); siendo el tratamiento 5, con solo poda mecánica, el de mayor reducción de tiempo respecto al control.

Tabla 2. Tiempo de trabajo (h/ha) por tratamiento para los tres años de ensayo.

Tratamiento	**Tratamiento anual**	**Tiempo de trabajo (h/ha)**		
plurianual	**Año 1-año 2-año 3**	**2016**	**2017**	**2018**
1	Mctr-Mctr-Mctr	107	56	75
2	FTDI-M-FTDI	7	109	7
3	FTR-FTR-FTR	100	77	47
4	FTDR-FTIR-FTDR	64	79	45
5	FTD-FTI-FTD	5	5	5

En la tabla 3 se muestra el coste anual y acumulado de la poda por tratamiento y porcentaje respecto al tratamiento control (trat. 1). Los costes han sido calculados con los precios pagados en la zona para estas tareas (8 €/h para la poda a mano y 35 €/h para la poda con propodadora y tractor). EL coste de los tratamientos en los que se hizo poda mecánica y repaso manual el mismo año (trat. 3 y 4) no supone ningún ahorro económico. Sin embargo, el coste acumulado del tratamiento 2 fue del 71% respecto al tratamiento control (trat. 1) y el del tratamiento 5 del 29%.

Tabla 3. Coste anual y acumulado de la poda por tratamiento y porcentaje respecto al tratamiento control (trat. 1).

Tratamiento	**Tratamiento anual**	**Coste anual**			**Coste**	**Porcentaje**
plurianual	**Año 1-año 2-año 3**	**2016**	**2017**	**2018**	**Acumulado**	**(%)**
1	Mctr-Mctr-Mctr	858	444	600	1902	100
2	FTDI-M-FTDI	244	868	244	1356	71
3	FTR-FTR-FTR	892	714	469	2075	109
4	FTDR-FTIR-FTDR	657	748	499	1903	100
5	FTD-FTI-FTD	183	183	183	549	29

3.2. Biomasa podada

La Fig. 2 muestra la biomasa podada por tratamiento durante los tres años del ensayo. En los tratamientos en los que se realiza poda a mano se elimina mayor cantidad de biomasa que en los tratamientos de poda mecánica. Con la poda a mano se eliminan ramas de mayor calibre (datos no mostrados) que con la poda mecánica en que solo se eliminan las ramas exteriores.

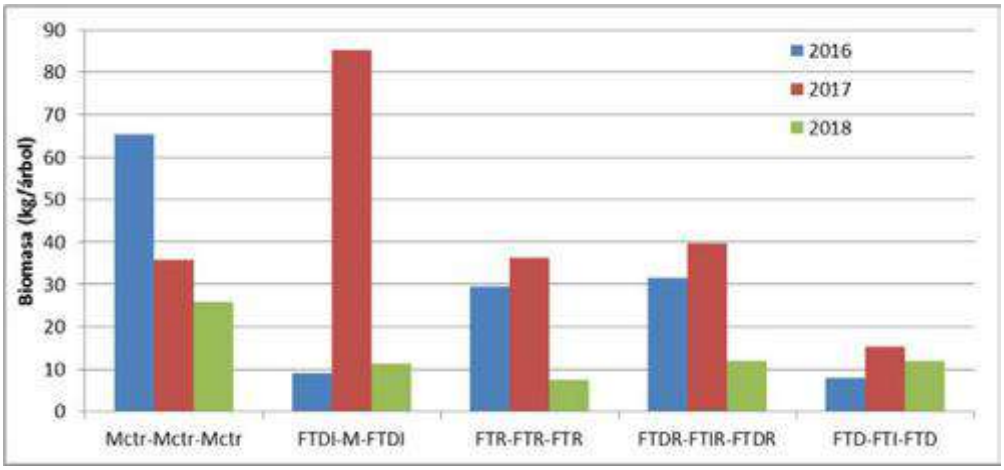


Figura 2. Biomasa podada por tratamiento durante los tres años.

La Fig. 3 muestra la biomasa acumulada durante los tres años en cada tratamiento de poda. La mayor cantidad de biomasa se elimina en el tratamiento control (Mctr), al realizar poda manual los tres años, así como en el FTDI-M-FTDI, al haber realizado el segundo años poda manual (Fig. 2). Se observa que existen diferencias significativas entre tratamientos excepto en los que se hizo repaso manual [FT(D/I)R] y FTR.

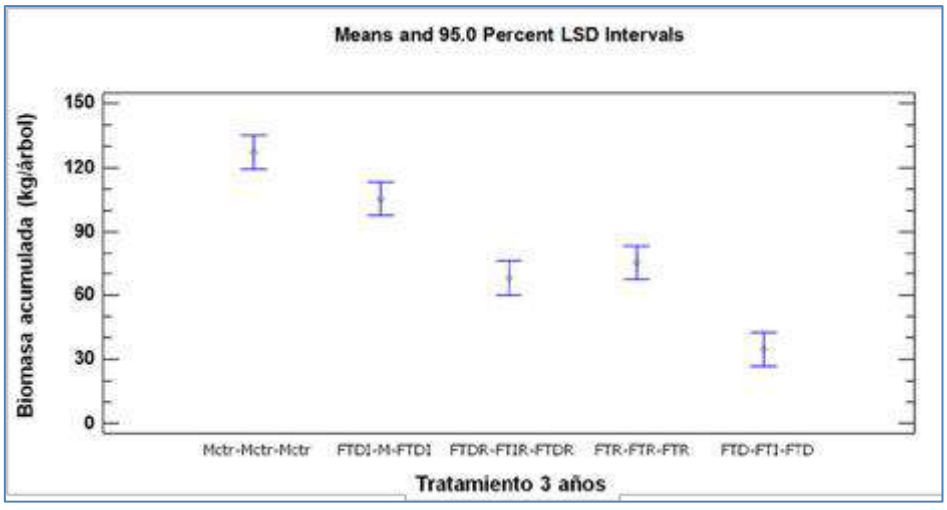


Figura 3. Análisis de medias para intervalos de confianza 95% LSD para valores medios acumulados de biomasa podada en tres años.

3.3. Producción y calibre de los frutos

3.3.1. Producción

La Fig. 4 muestra la producción anual por tratamiento durante los tres años. Se observa un aumento de la producción en todos los tratamientos durante los tres años de ensayo; siendo mayor en el último año, en la mayor parte de tratamientos.

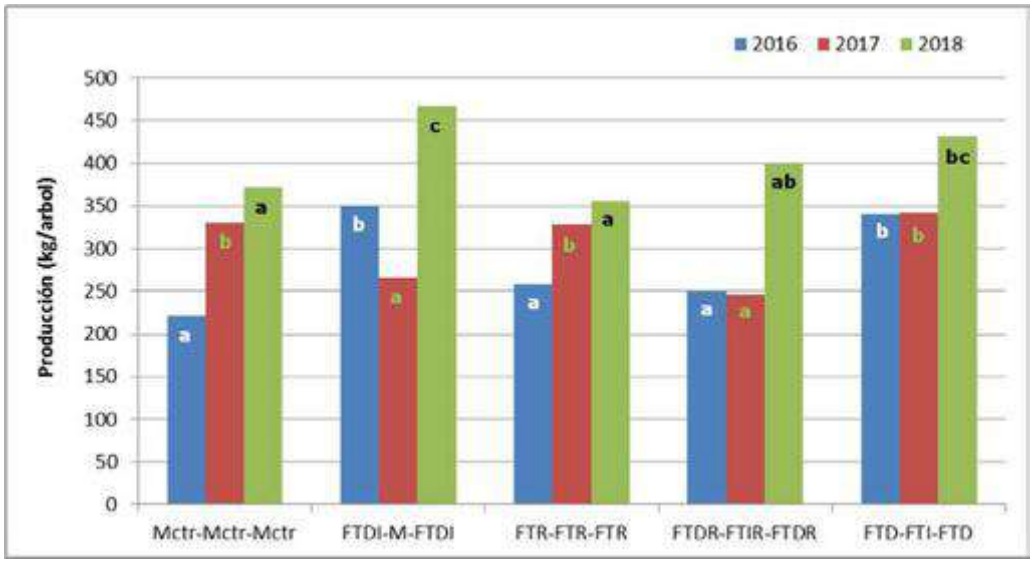


Figura 4. Producción anual por tratamiento durante los tres años. Columnas con letras diferentes en el mismo año muestran diferencias significativas entre tratamientos según test de Fisher (LSD) al 95.0%.

La Fig. 5 muestra la producción media acumulada durante los tres años de ensayos por tratamiento. El análisis de varianza de producción acumulada en función del tratamiento de poda, muestra que hay diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Cuando se aplica el test LSD se observa que en los tratamientos en los que hubo poda mecánica durante los tres años (FTD-FTI-FTD) o bien alternancia entre poda mecánica y manual (FTDI-M-FTDI) la producción media acumulada fue mayor. Los tratamientos con mayor intensidad de poda; ya sea poda manual (Mctr) o poda mecánica con repaso a mano (FTDR, FTR), muestran una producción significativamente menor.

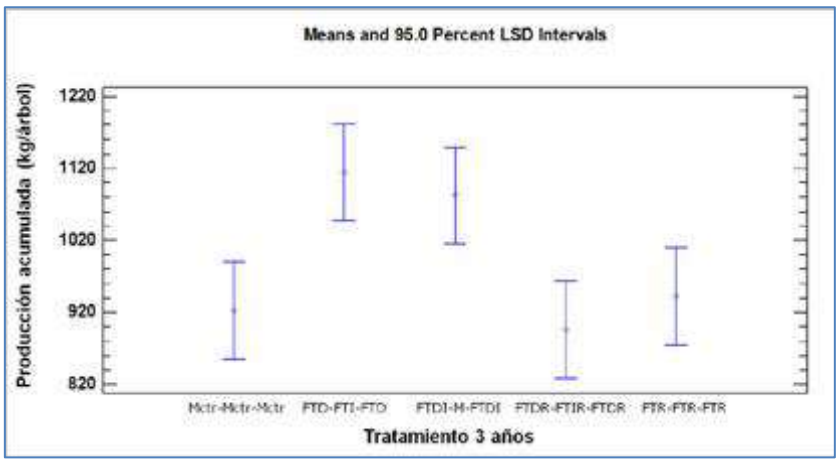


Figura 5. Análisis de medias para intervalos de confianza 95% LSD para la producción acumulada de tres años por tratamiento.

3.3.2. Calibres

La Fig. 6 muestra el calibre medio anual por tratamiento y año. En general el calibre medio de la fruta en todos los tratamientos se ha reducido respecto a 2016. Por otra parte, se observa que existe relación entre la reducción del calibre y el aumento de la producción a lo largo de los tres años de ensayo (Fig. 4 y Fig. 6). El análisis estadístico de regresión entre producción y calibre muestra una correlación para todos los tratamientos durante los tres años del 57% con una R^2 de 32%.

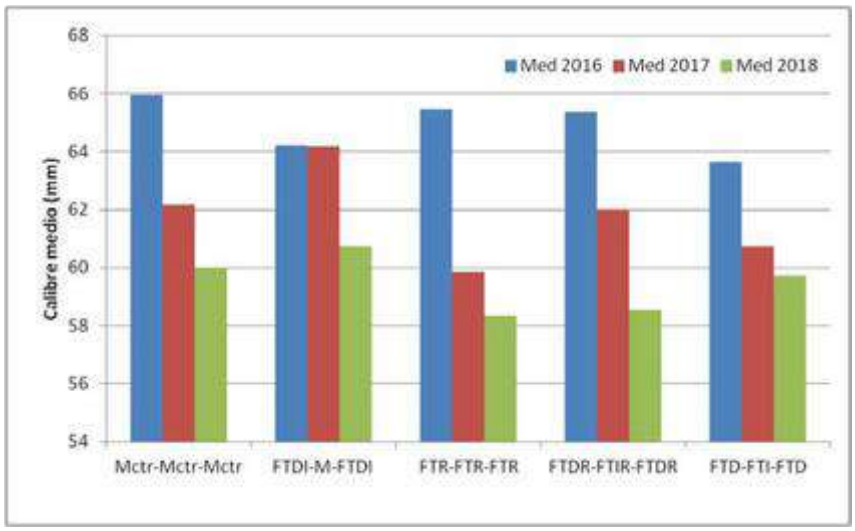


Figura 6. Calibre medio anual por tratamiento y año.

La Fig. 7 muestra el calibre medio por tratamiento de los tres años. El calibre medio del tratamiento FTDI-M-TFDI fue similar al tratamiento control (Mctr). El calibre medio fue inferior en los tratamientos en los que se realizó poda mecánica y manual el mismo año.

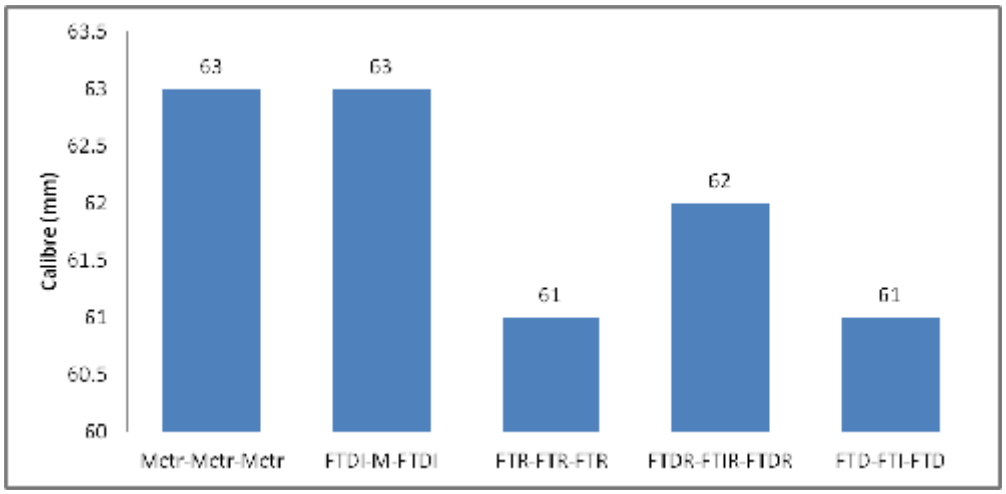


Figura 7. Calibre promedio de los tres años, por tratamiento.

La Fig. 8 muestra el porcentaje anual de frutos de calibre comercial (mayor de 58 mm). El calibre comercial, al igual que el calibre medio, también ha disminuido respecto a 2016. La mayor disminución en el calibre se ha producido en el tercer año; que coincide con el mayor aumento de producción (Fig. 4). Una posible causa ha podido ser que en 2018 la fecha de

recolección se ha retrasado dos meses respecto a la fecha de recolección del año anterior a causa de los bajos precios del limón en este último año. Las fechas de recolección han sido el 21 de diciembre de 2016, 4 de diciembre de 2017 y 5 de febrero de 2019.

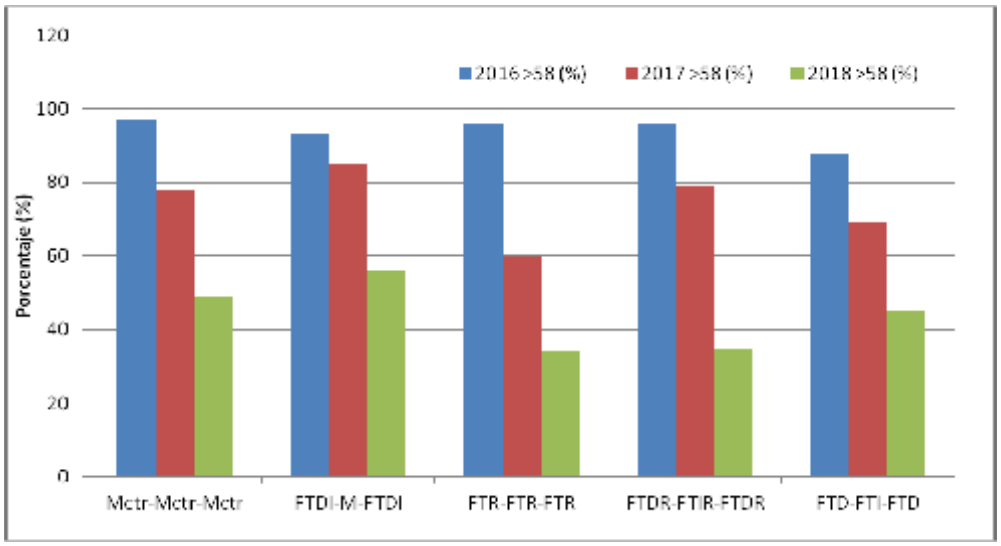


Figura 8. Porcentaje de frutos de calibre comercial por tratamiento y año.

La Fig. 9 muestra la producción comercial acumulada, es decir de calibre superior a 58 mm, por tratamiento. Se observa que los tratamientos con repaso de poda manual (FTR y FTDR) son los de menor producción comercial acumulada de los tres años, sin embargo los tratamientos podados solo mecánicamente y alterna mecánica y manual cada año (FTD-FTI-FTD y FTDI-M-FTDI) son los de mayor producción comercial acumulada de los tres años. El tratamiento de poda a mano (Mctr) tiene una producción intermedia.

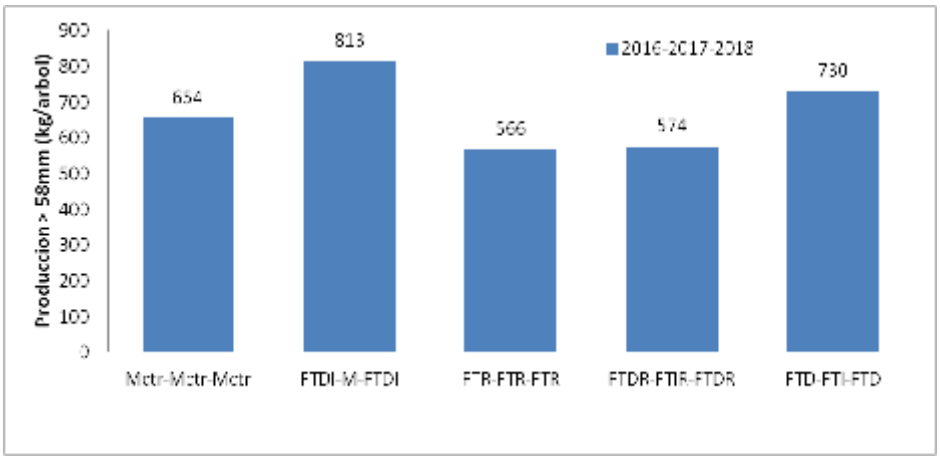


Figura 9. Producción comercial acumulada de los tres años (kg/árbol) por tratamiento.

4. Conclusiones

Las principales conclusiones del trabajo después de tres años de ensayo son:

- Los tratamientos plurianuales sin poda manual han obtenido mayor producción, sin afectar significativamente al calibre.

- Los tratamientos plurianuales con poda manual y mecánica el mismo año han obtenido calibres medios inferiores y menor porcentaje de calibres comerciales.
- El tratamiento FTDI-M-FTDI se considera una alternativa interesante a la poda manual (control) al haber obtenido mayor producción con calibre medio similar y menor coste.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado mediante el proyecto RTA2014-00025-C05-02 del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA) y mediante fondos FEDER.

Referencias

1. Juste F., Martín B., Fabado F., Moltó E. 2000. Estudio sobre la reducción de los costes de producción de cítricos mediante la mecanización de las prácticas de cultivo. Comunidad Valenciana Agraria 12: 23-29.
2. Moore P.W. 1958. Mechanical pruning for citrus. California Agriculture 11: 7-13.
3. Ortiz-Cañavate J. 1979. Mechanical pruning of citrus. Anales del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Tecnología Agraria 5: 155-167.
4. Zaragoza S., Alonso E. 1980. La poda mecanizada de los agrios en España. Anales del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Serie: Producción Vegetal 12: 157-180.
5. Zaragoza S., Alonso E. 1981. Citrus pruning in Spain. Proc. Int. Soc. Citriculture 1: 172-175.
6. Giametta G., Zimbalatti G. 1992. Three-years experiments of citrus fruit mechanical pruning. Proc. Int. Soc. Citriculture 2: 693-696.
7. Spina P., Giuffrida A., Melita E. 1984. Comparative trials of citrus mechanical and aided pruning. Proc. Int. Soc. Citriculture 1: 106-109.
8. Yildirim B., Yesiloglu T., Incesu M., Kamiloglu M., Ozguven F., Tuzcu O., Aka Y. 2010. The effects of mechanical pruning on fruit yield and quality in 'Star Ruby' grapefruit. Journal of Food, Agriculture & Environment 8 (2): 834-838.
9. Raciti G., Spina P., Scuderi A., Intrigliolo F. 1982. Tre anni di potatura meccanica degli agrumi in Italia. Frutticultura 44: 35-46.
10. Rouse B., Parsons L., Wheaton T.A. 2006. Hedging, topping and skirting trees in the citrus canker era. Citrus Industry 12:1-2.
11. Sauls J.W. 2008. Citrus pruning. Texas Citrus and Subtropical fruits. http://aggie-horticulture.tamu.edu/citrus/pruning/L2308.htm (Acceso 14 de marzo de 2018).
12. Mendonça V., Ramos J.D., Neto S.E.A., Rufini J.C.M. 2008. Production of 'Poncan' tangerine tree after pruning recovery. Ciencia e Agrotecnologia 32 (1): 103-109.
13. Kallsen C.E. 2005. Topping and manual pruning effects on the production of commercially valuable fruit in a midseason Navel Orange variety. HorTecnology 15 (2): 335-341.
14. Fallahi E. Kilby M. 1997. Rootstock and pruning influence on yield and fruit quality of 'Lisbon' lemon. Fruit Varieties Journal 51(4): 242-246.
15. Joubert F.J., Plessis M.H., Stassen P.J.C. 2000. Pruning strategies to alleviate overcrowding in higher density citrus orchards. Journal Applied Horticulture 2(1): 1-5.
16. El-Zeftawi B.M. 1976. Response of "Navel" orange trees to skirting. Scientia Horticulturae 5 (1): 59-63.
17. Morales P., Davies F.S. 2000. Pruning and Skirting Affect Canopy Microclimate, Yields and Fruit Quality of 'Orlando' Tangelo. HortScience 35(1):30-35.
18. Santarosa E., Koller O.C., Petry H.B., Casamali B. 2010. Frequência e intensidade de poda em pomar jovem de laranjeiras 'Valência' sob manejo orgânico. Ciência Rural Santa Maria 40 (10): 2081-2085.
19. Boswell S.B., Ede L.L., McCarty C.D. 1977. Effect of training young lemon trees for limb-shaker mechanical harvest on yield and tree trunk growth. HortScience 12 (4): 352-353.
20. Martin-Gorriz B., Porras Castillo I., Torregrosa A. 2014. Effect of mechanical pruning on the yield and quality of 'Fortune' mandarins. Spanish Journal of Agricultural Research 12(4): 952-959.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Validación de CitrusVol para el ajuste de volúmenes de caldo en tratamientos contra araña roja en cítricos

A. Fonte[1], C. Garcerá[1], E. Moltó[1], A. Tena[2] y P. Chueca[1]

[1] Centro de Agroingeniería, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA); chueca_pat@gva.es
[2] Centro de Protección Vegetal y Biotecnología, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA)

Resumen: Para optimizar la aplicación de fitosanitarios, el IVIA ha desarrollado una herramienta de recomendación de volumen de caldo para las aplicaciones mediante turboatomizadores en cítricos: CitrusVol. Esta herramienta permite ajustar el volumen de caldo a las características del cultivo, al tipo de plaga o enfermedad y al tipo de producto fitosanitario. El objetivo de este trabajo fue validar CitrusVol para el control de la araña roja, *Tetranychus urticae* Koch, en clementinos, dado que es una de las principales plagas del cultivo. Para ello, se compararon los tratamientos fitosanitarios siguiendo las recomendaciones de CitrusVol con los tratamientos realizados de manera convencional por la explotación. Se evaluó, por un lado, la distribución del caldo en la copa estimando el porcentaje de recubrimiento. Por otro lado, se determinó la eficacia de los tratamientos, para lo que se realizaron muestreos previos y posteriores a los tratamientos fitosanitarios y se determinó el porcentaje de hojas sintomáticas ocupadas por araña. Los resultados mostraron que con el empleo de CitrusVol se consiguió una reducción media del volumen de caldo de 33,5 %, lo que implicó una reducción del recubrimiento con el volumen ajustado respecto al convencional. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en el porcentaje de hojas sintomáticas ocupadas por araña roja en función del volumen de caldo aplicado. Esto permite concluir que la eficacia fue la misma y que el volumen recomendado por CitrusVol es adecuado para el control de esta plaga en clementinos.

Palabras clave: *Tetranychus urticae*, clementino, recubrimiento, turboatomizador

1. Introducción

A pesar de los notables avances en el control biológico de plagas y enfermedades, la aplicación de productos fitosanitarios (PPP) sigue siendo el método más común para proteger los cítricos. Los equipos habitualmente empleados en estas aplicaciones son pulverizadores hidráulicos asistidos por aire, comúnmente conocidos como turboatomizadores. En estos equipos más del 50 % del caldo pulverizado se puede perder al suelo o la atmósfera como resultado de la deriva, evaporación, escorrentía y/o lavado de los productos [1].

Con el fin de mejorar la eficiencia de estas aplicaciones, se está trabajando en la racionalización de las mismas ajustando adecuadamente la cantidad de producto según las necesidades reales y las condiciones específicas de la aplicación (vegetación a cubrir, plaga a controlar, pesticidas usados y maquinaria). De esta manera se trata de evitar la práctica común de hoy en día de aplicar grandes cantidades de producto para garantizar resultados, sin tener en cuenta que esto normalmente conlleva una liberación excesiva de productos que permanecen en los alimentos y contaminan el medio ambiente, y que también aumenta los costes. En este

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3422

sentido el IVIA ha desarrollado para cítricos "CitrusVol", una herramienta informática de soporte de decisión al técnico o agricultor para calcular el volumen de caldo de la aplicación con turboatomizador ajustado a las características de la vegetación objetivo (volumen de copa, marco de plantación, densidad foliar y nivel de poda), al tipo de plaga o enfermedad, y al tipo de producto fitosanitario [2]. Esta herramienta se basa en datos científicos obtenidos anteriormente con respecto al depósito mínimo requerido para lograr la máxima eficacia, la eficiencia de la aplicación con turboatomizadores en parcelas de cítricos y la caracterización del cultivo [1,3-6]. Esta herramienta está disponible gratuitamente en la página web de Gestión Integrada de Plagas de cítricos del IVIA (http://gipcitricos.ivia.es/) y en la aplicación para iOS y Android "Gipcitricos IVIA".

La araña roja, *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae), es el ácaro que más impacto económico tiene en los cultivos citrícolas de España, siendo los clementinos particularmente sensibles a su ataque. Al alimentarse del contenido de las células epidérmicas de los tejidos vegetales, ocasiona manchas cloróticas en las hojas y decoloraciones y cicatrices en los frutos, depreciándolos comercialmente. Si el ataque es fuerte, puede provocar un debilitamiento generalizado del árbol ocasionando una merma en su producción y crecimiento.

El objetivo de este trabajo fue validar la herramienta CitrusVol para los tratamientos contra araña roja en clementinos. Para ello se comparó la eficacia de las aplicaciones basadas en CitrusVol con las aplicaciones realizadas de forma habitual por los productores.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño experimental

El experimento se llevó a cabo en una parcela comercial de mandarinos de la variedad "Clemenules" ubicada en Chiva (Valencia; 39°26'32"N, 0°33'23"O). La parcela tenía un marco de plantación de 6 × 3 m, con las filas dispuestas en orientación N-S.

La parcela se dividió en dos bloques de tamaño similar, en uno se realizaron los tratamientos contra araña roja con el volumen de caldo recomendado por CitrusVol (denominado Volumen ajustado, V_A), y en otro con el volumen empleado habitualmente por los técnicos de la explotación agrícola (Volumen convencional, V_C), durante 2 campañas: 2016 y 2017. Se evaluó un total de dos tratamientos contra araña roja en 2016 y 3 tratamientos en 2017.

Las variables respuesta fueron: 1) la distribución del caldo en la copa del árbol (porcentaje de recubrimiento) y 2) la eficacia de control de la plaga (porcentaje de hojas sintomáticas ocupadas por araña roja a los 7, 14 y 21 días del tratamiento).

2.2. Caracterización de la vegetación

Al inicio de la temporada de tratamientos de cada campaña, después de la poda, se estimó el tamaño de la vegetación de la parcela. Para ello, se eligieron al azar 10 árboles representativos y se midió la altura de copa, y el diámetro del árbol a lo largo de la fila y a través de la fila (Figura 1). Con estos datos se calculó el volumen de vegetación considerando la copa del árbol como un elipsoide (Tabla 1).

Tabla 1. Tamaño de los árboles de la parcela.

Año	Dimensiones de la copa* (m)	Volumen de copa** (m3)
2016	2,51 × 4,33 × 3,08	17,53
2017	2,60 × 4,03 × 3,05	16,73

* Altura × diámetro a través de la fila × diámetro a lo largo de la fila

** Considerando la copa como un elipsoide

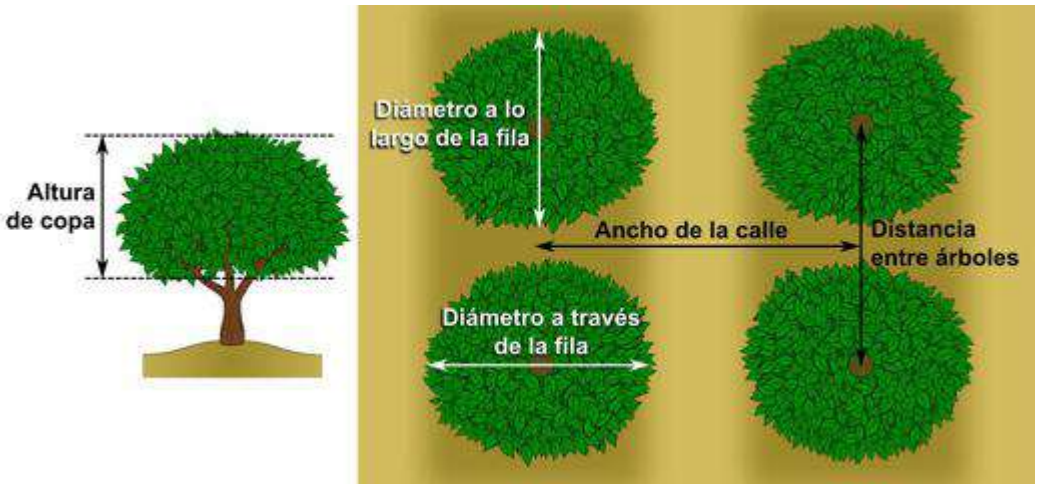


Figura 1. Medidas de marco de plantación y tamaño de copa.

2.3. Descripción de los tratamientos

Las aplicaciones se realizaron con un pulverizador hidráulico asistido por aire (mod. Ilemo-Hardi Arrow XF 90. Ilemo Hardi S.A.U., Lleida, España) de 1500 l de capacidad y 38 boquillas, arrastrado por un tractor Landini REX 110 F (Landini Argo Tractors S.p.A., Fabbrico, Italia) de 102 CV. Al inicio de cada temporada de tratamientos el equipo se calibró.

V_A se basó en la recomendación de CitrusVol, seleccionando los siguientes parámetros:

- **Densidad foliar:** Media.
- **Poda:** Normal.
- **Plaga/enfermedad:** Tetraníquidos (araña roja, ácaro rojo…).
- **Productos:** Abamectina.

Con esto y las medidas de marco de plantación y tamaño de los árboles, el volumen recomendado por la calculadora (V_A) fue de 3270 l/ha en 2016 y de 3120 l/ha en 2017, lo que implicó una reducción del 29-36 % respecto a V_C (Tabla 2).

Tabla 2. Volumen de caldo y productos fitosanitarios usados en los tratamientos.

Fecha	Volumen de caldo (l/ha)		Reducción de volumen de caldo (%)	Producto fitosanitario	Materia activa	Concentración de producto fitosanitario (%)
	VC	VA				
27/07/2016	4905,07	3254,93	33,64	Cal-Ex	Abamectina	0,100
				Movento 150 O-Teq	Espirotetramato	0,040
				Envidor	Espirodiclofeno	0,023
11/10/2016	4905,07	3254,93	33,64	Cal-Ex	Abamectina	0,100
07/06/2017	4899,00	3487,20	28,82	Dursban 48	Clorpirifos	0,267
				Stygma	Abamectina	0,100
24/07/2017	4899,00	3152,91	35,64	Abasi EC	Abamectina	0,100
				Envidor	Espirodiclofeno	0,023
08/09/2017	4899,00	3152,91	35,64	Reldan E	Metil-clorpirifos	0,400
				Dauparex	Abamectina	0,100
				Envidor	Espirodiclofeno	0,023

VC: Volumen convencional; VA: Volumen ajustado.

Las condiciones operativas se mantuvieron iguales en los tratamientos con V_A y con V_C y fueron: presión de trabajo a 8 bar, velocidad de avance a 1,32 km/h, régimen de motor y de toma de fuerza de 1800 y 490 rpm, respectivamente, y marcha del ventilador II (caudal de aire de 55342,15 m^3/h en 2016 y 74894,13 m^3/h en 2017).

Para reducir el volumen de caldo en los tratamientos con V_A se utilizaron boquillas de menor caudal y se cerraron las boquillas necesarias para ajustar la nube de pulverización a la vegetación con el fin de reducir la deriva y las pérdidas al suelo. Así, los tratamientos con V_C se aplicaron con las 38 boquillas abiertas, mientras que los tratamientos con V_A se aplicaron con 30 boquillas. La orientación de las boquillas fue la misma para ambos tratamientos.

Para determinar el momento óptimo del tratamiento se realizaron muestreos semanales de seguimiento de las poblaciones de araña roja entre junio y septiembre, siguiendo el protocolo de la guía de Gestión Integrada de Plagas de Cítricos [7].

2.4. Distribución del caldo en la copa del árbol

La distribución del caldo en la copa se evaluó mediante el porcentaje de recubrimiento obtenido en diferentes partes de la vegetación. Esta evaluación se realizó en una aplicación de cada campaña, el 27 de mayo de 2016 y el 7 de junio de 2017.

Para ello, previo a la pulverización, se situaron 72 papeles hidrosensibles de 76 × 26 mm (TeeJet Spraying Systems Co. Wheaton, Illinois, EEUU) por árbol, en 3 árboles por bloque. Los papeles se distribuyeron en 18 zonas de la copa, resultado de dividirla en 3 alturas (alto, medio y bajo), 2 profundidades (interior y exterior) y 3 anchuras (Figura 2). En cada zona se situaron aleatoriamente dos papeles hidrosensibles en el envés de las hojas y dos en el haz.

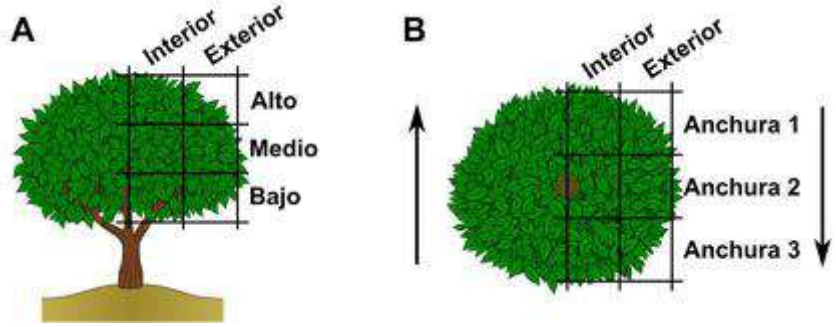


Figura 2. Cuadrantes de la copa. A) vista lateral y B) vista superior de un árbol. Las flechas indican el sentido de avance del turboatomizador respecto a las zonas evaluadas.

Una vez realizada la aplicación, se dejó pasar un tiempo para que se secaran los papeles hidrosensibles, y se recogieron. En laboratorio, los papeles hidrosensibles se digitalizaron con una cámara fotográfica Canon EOS 700D (Canon Inc., Tokyo, Japón) bajo unas condiciones de luz fijas y se analizaron mediante el software de análisis de imagen Food-Color Inspector [8], determinando el porcentaje de recubrimiento.

2.5. Evaluación de la eficacia de control de araña roja

Para determinar la eficacia de los tratamientos se realizaron muestreos previos y muestreos posteriores al tratamiento (a los 7, 14 y 21 días), en ambos bloques de la parcela. Para ello, se inspeccionaron 2 hojas sintomáticas por árbol, una del exterior de la copa y otra del interior, en 40 árboles distribuidos al azar en cada bloque, en 20 de ellos se muestrearon hojas de la cara este y en 20 de la cara oeste, y se determinó el porcentaje de hojas sintomáticas ocupadas (≥ 2 arañas rojas adultas). Para el muestreo se descartaron aquellos árboles del contorno de la parcela y de las filas de separación entre bloques de tratamiento.

2.6. Análisis de datos

En cada momento de aplicación evaluado, las diferencias entre volúmenes en el recubrimiento en cada zona de la copa (combinación de altura × profundidad × cara de la hoja) se analizaron mediante un análisis de la varianza (ANOVA) simple. Se comprobó que se cumpliesen los supuestos de homocedasticidad (test de Levene) y de normalidad.

El porcentaje de hojas sintomáticas ocupadas por araña roja con cada volumen aplicado, en cada muestreo realizado, se comparó con un test de chi-cuadrado.

3. Resultados y discusión

3.1. Recubrimiento

En promedio, en el tratamiento del 27 de mayo de 2016 con el V_A se consiguió un 63,16 % de recubrimiento y con el V_C un 75,18 %, y en el tratamiento del 7 de junio de 2017 un 47,53 % con el V_A y un 63,18 % con el V_C. Promediando ambos tratamientos, se recubrió un 55,10 % con el V_A y un 69,26 % con el V_C. En la mayoría de las zonas de la copa, se consiguieron porcentajes de recubrimiento más altos con el V_C que con el V_A, aunque las diferencias sólo fueron significativas en la zona Bajo-Exterior-Envés ($F = 7,77$; g.l. = 1, 6; $P = 0,0494$) del tratamiento del 27 de mayo de 2016, y en las zonas Alto-Exterior-Envés ($F = 11,44$; g.l. = 1, 6; $P = 0,0277$) y Bajo-Interior-Haz ($F = 10,39$; g.l. = 1, 6; $P = 0,0322$) del tratamiento del 7 de junio de 2017 (Figura 3).

En general, en el exterior de la copa el recubrimiento fue más alto que en el interior y la zona media y baja de la copa de los árboles se mojó más que la parte alta, para ambos volúmenes de aplicación.

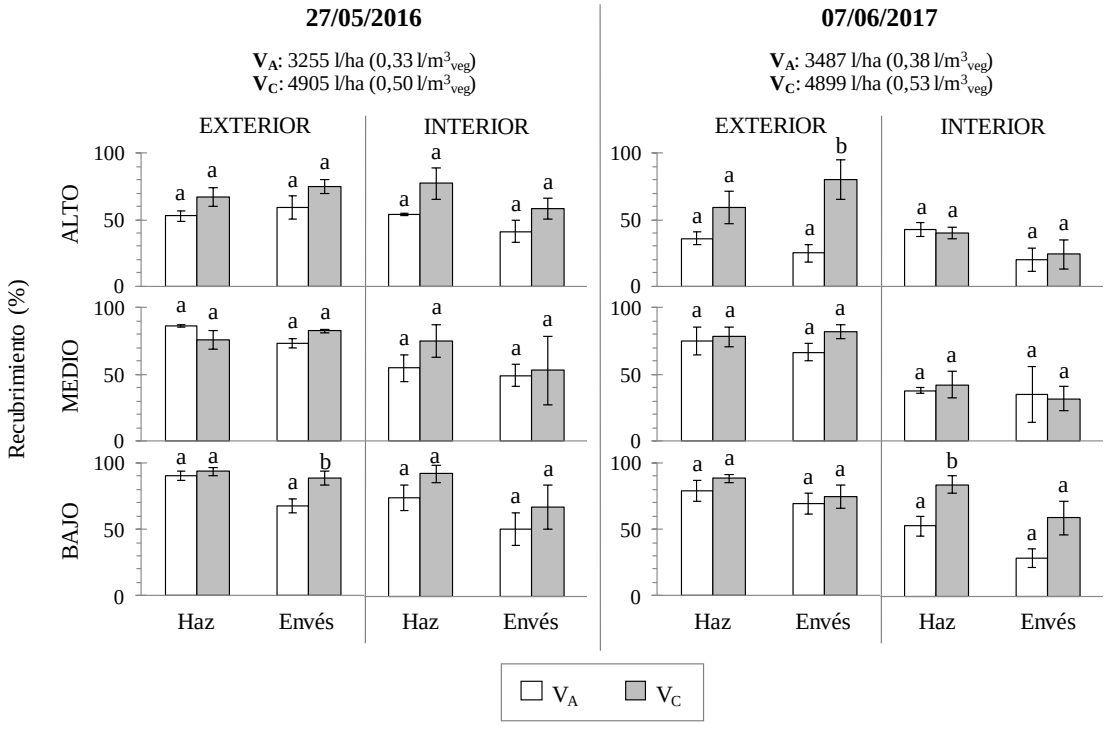


Figura 3. Recubrimiento (%; media ± error estándar) con volumen ajustado (V_A) y volumen convencional (V_C) a diferentes alturas (alto, medio y bajo), profundidades (interior y exterior) de la copa y caras de la hoja (haz y envés). Se indica el volumen de caldo en l/ha y l/m³ vegetación. Letras diferentes sobre las barras dentro de cada combinación de altura × profundidad × cara de la hoja indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

3.2. Porcentaje de hojas sintomáticas ocupadas por araña roja

Se observó que, independientemente del volumen aplicado, en el interior de la copa hubo más porcentaje de hojas sintomáticas ocupadas que en el exterior. En cuanto a la evolución temporal de la infestación se observó que a los 7 días del tratamiento el nivel de araña roja se redujo, mientras que a los 14 días comenzó a subir. Sin embargo, a los 21 días todavía continuaba en un nivel bajo. Destaca que no hubo diferencias significativas en el control de araña debidas a las diferencias de volumen aplicado (Figura 4).

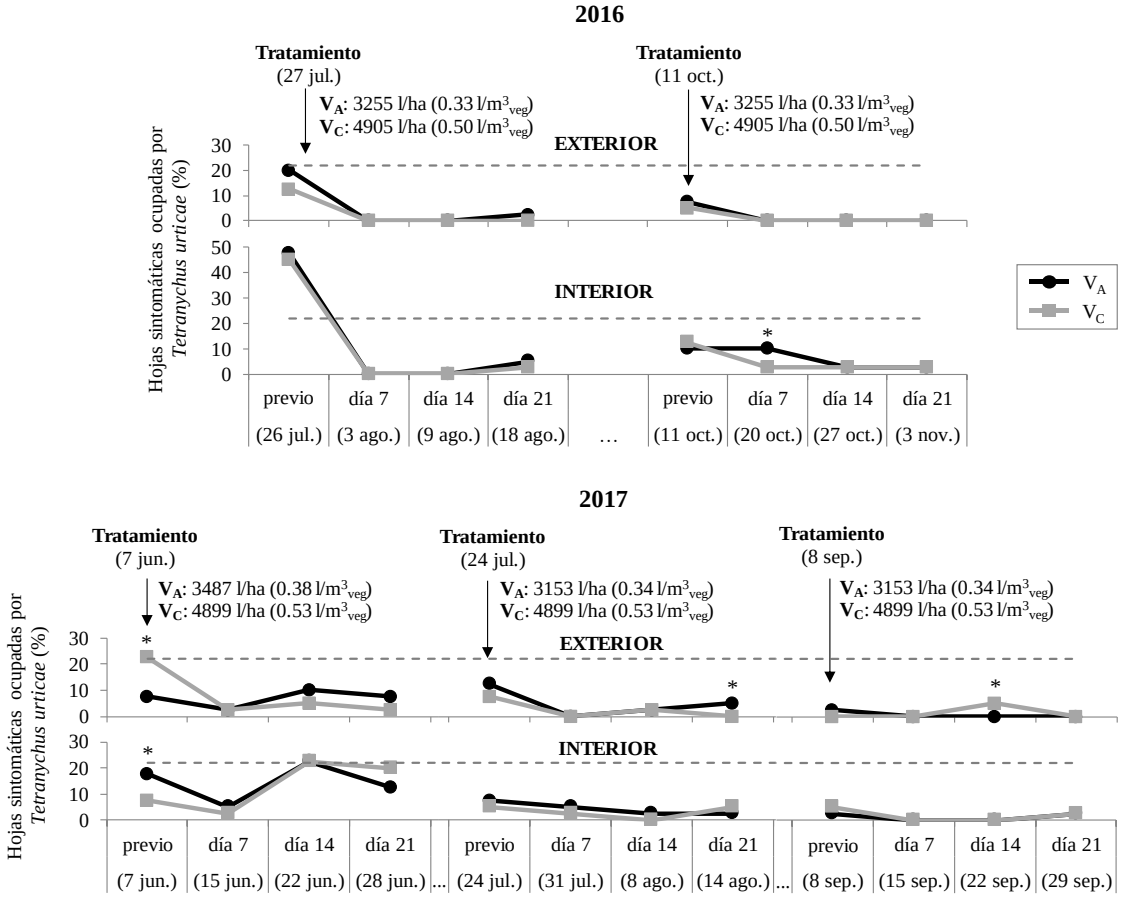


Figura 4. Hojas sintomáticas ocupadas por *Tetranychus urticae* (%; promedio), según la situación de la hoja en la copa del árbol (exterior e interior), previamente y después de los tratamientos (a los 7, 14 y 21 días) con volumen ajustado (V_A) y volumen convencional (V_C). Se indica el volumen de caldo en l/ha y l/m³ vegetación. La línea de puntos indica el umbral de tratamiento: 22 % de hojas sintomáticas ocupadas. El asterisco (*) indica diferencias significativas con el test de chi-cuadrado (nivel de significación: $\alpha = 0{,}05$).

4. Conclusiones

Los resultados mostraron que con el empleo de CitrusVol se consiguió una reducción media del volumen de caldo de 33,5 %, lo que supuso una reducción del recubrimiento de la copa (69,3 % frente a 55,1 %). La herramienta recomendó un volumen inferior al empleado por el productor debido a que se ajusta al tamaño y densidad real de la vegetación objetivo, adecuando el volumen de aplicación a la cantidad de vegetación que se pretende proteger. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en el porcentaje de hojas sintomáticas ocupadas por araña roja en función del volumen de caldo aplicado, lo que indica que el volumen recomendado por la herramienta consiguió un recubrimiento suficiente para controlar la plaga, y que el incremento conseguido con el tratamiento aplicado de forma convencional es

innecesario y excesivo. Esto permite concluir que CitrusVol es una herramienta adecuada para la recomendación de volúmenes en el control de *Tetranychus urticae* en clementinos en las condiciones ensayadas.

5. Agradecimientos

Agradecemos a Revacitrus S. L. la cesión de la parcela experimental y su colaboración. Este trabajo ha sido financiado por el IVIA y el instrumento financiero LIFE de la Unión Europea a través del proyecto LIFE PERFECT (LIFE17/ENV/ES/000205).

Referencias

1. Garcerá C., Moltó E. & Chueca P. Spray pesticide applications in Mediterranean citrus orchards: canopy deposition and off-target losses. Science of the Total Environment 2017, 599-600, 1344-1362.
2. Garcerá C., Fonte A., Moltó E. & Chueca P. Sustainable use of pesticide applications in citrus: a support tool for volume rate adjustment. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017, 14(7), 715. doi: 10.3390/ijerph14070715.
3. Garcerá C. Racionalización de las aplicaciones de productos fitosanitarios para el control de *Aonidiella aurantii Maskell* (Hemiptera: Diaspididae) en cítricos. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, València, España, Julio 2013.
4. Garcerá C., Moltó E. & Chueca P. Factors influencing the efficacy of two organophosphate insecticides in controlling California red scale, *Aonidiella aurantii* (Maskell). A basis for reducing spray application volume in Mediterranean conditions. Pest Management Science. 2014, 70, 28–38.
5. Garcerá C., Moltó E. & Chueca P. Effect of spray volume of two organophosphate pesticides on coverage and mortality of *Aonidiella aurantii* Maskell. Crop Protection. 2011, 30, 693–697.
6. Garcerá C., Moltó E., Zarzo M. & Chueca P. Modelling the spray deposition and efficacy of two mineral oil-based products for the control of California red scale, *Aonidiella aurantii* (Maskell). Crop Protection. 2012, 31, 78–84.
7. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gestión Integrada de Plagas de Cítricos. Centro de Publicaciones del MAGRAMA, Madrid, España. 2014. ISBN: 978-84-491-1411-3. 159 pp.
8. Albert F., Aleixos N., Blasco J., & Cubero, S. Food Color Inspector. 2013. Accesible desde http://www.cofilab.com/registered-software/ [10/05/2019].

Área temática:

Proyectos, medio ambiente y territorio



X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Análisis de las diferencias en la elección de valor económico de árboles urbanos de Madrid cuando se muestran al natural y en fotografía

C. García-Ventura[1], A. Bermejo[2], C. González-García[2], M. A. Grande-Ortiz[2], E. Ayuga-Téllez[1], A. Sánchez de Medina-Garrido[1]

[1] Buildings, Infrastructures and Projects for Rural and Environmental Engineering (BIPREE), Universidad Politécnica de Madrid; esperanza.ayuga@upm.es; claudia.gventura@upm.es; alvaro.sanchezdemedina@upm.es

[2] Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental, ETSI de Montes, Universidad Politécnica de Madrid; alfonso.bersanz@gmail.com; m.angeles.grande@upm.es; concepcion.gonzalez@upm.es

Resumen: Conocer el valor económico de un bien siempre ha sido un paso importante para poder mejorar su gestión. La Comunidad de Madrid legisló la aplicación de la primera versión de la Norma Granada como método de valoración del arbolado ornamental de su territorio. Sin embargo, los árboles de la ciudad de Madrid no cuentan con esta tasación. En los estudios de valoración de bienes socio-ambientales con participación pública, como arbolado o paisajes, se utiliza en numerosas ocasiones la fotografía del bien que se va a valorar. En el caso del arbolado, donde su valor está muy relacionado con el tamaño del árbol y con muchas características que se aprecian a la vista del ejemplar, es importante verificar la validez de las fotografías como medio para obtener las valoraciones del público. En este trabajo se va a realizar una comparación entre las tasaciones elegidas por los mismos ciudadanos al ver el árbol al natural y al verlo en fotografía. Los métodos de tasación que se han utilizado son: el método americano, Council of Tree Landscape Appraisers (CTLA), la Norma Granada y el método Burnley. Se emplearon 10 ejemplares de 10 especies diferentes y se realizaron 10 encuestas por pie. En total 100 encuestas por cada especie de árbol, que hacen un total de 1000 encuestas realizadas. Las encuestas fueron realizadas de manera aleatoria e individual. Cada persona encuestada eligió uno de los tres valores que se le mostraron, tanto al ver el ejemplar en fotografía como al verlo al natural. El 83,9% de las 1000 encuestas dieron como resultado la misma elección de valor viendo el ejemplar "in situ" y viéndolo en fotografía.

Palabras clave: tasación, verde urbano, encuesta de opinión,

1. Introducción

La ciudad de Madrid ofrece un patrimonio verde de gran extensión y diversidad dotada de más de 1,5 millones de árboles [1] que constituyen un auténtico patrimonio vegetal.

Cuando no se conoce el valor monetario de los recursos naturales las actuaciones y normas que se ocupan de problemas ambientales pueden resultar insuficientes. Saber el valor de un bien siempre permite mejorar su gestión. Los métodos de valoración del arbolado urbano aportan una referencia económica o monetaria del beneficio que éste ofrece al ciudadano. También deben reflejar factores como el valor del suelo en el que se ubican, importancia histórica, calidad, beneficios sociales y medioambientales, y los costes de mantenimiento que conllevan.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3378

Por tanto, la valoración tiene que ser una de las bases que se deben emplear para la toma de decisiones en su gestión. En otras palabras, hay que considerar la valoración como un instrumento para la administración y para la propia sociedad.

En 1991 la Comunidad de Madrid implantó en la normativa al respecto la aplicación de la versión de la Norma Granada, vigente en aquel momento, como método de valoración del arbolado ornamental en todo su territorio. Sin embargo, los árboles de la ciudad de Madrid son bienes que, actualmente, no cuentan con la tasación municipal que permita a los usuarios conocer el valor económico de los ejemplares. Sólo en el caso de alguna infracción que requiera la tasación del bien, o de solicitud de permisos de intervención, se tasa el ejemplar con dicha Norma. Recientemente se ha publicado una valoración mediante el modelo i-Tree que estima globalmente el valor del bosque urbano de Madrid, incluyendo el Monte del Pardo y Soto de Viñuelas [2].

La valoración del arbolado urbano no se caracteriza por ser precisa, ya que depende del objetivo de la valoración y del nivel de experiencia del evaluador [3]. En la mayoría de los "métodos comúnmente utilizados", el valor se define monetariamente con base en la percepción que el "experto" tiene del árbol, que para estos propósitos, la valoración pasa por establecer un criterio mensurable y objetivo, considerando aspectos o variables tales como si se encuentra solo o en grupo, el deterioro físico, especie y variedad, tamaño, edad, estado y ubicación, entre otras variables, que pueden llegar a intervenir [4].

En los estudios de valoración de bienes socio-ambientales con participación pública, como arbolado o paisajes, se utiliza en numerosas ocasiones la fotografía del bien que se va a valorar [5, 6, 7 y 8]. En el caso del arbolado, donde su valor está muy relacionado con el tamaño del árbol y con muchas características que se aprecian a la vista del ejemplar, el número de estudios a través de fotografías es menor [8].

Así, se han realizado estudios de paisaje [9] en Devon (UK) y Asturias (España), comparando las opiniones de visitas a los espacios "in situ" con las fotografías de los mismos sitios, encontrando un alto grado de consenso en ambas evaluaciones en una población de 100 encuestados. Anteriormente, [10] ya se había analizado esta comparación entre fotografías y visitas personales para comparar las evaluaciones sobre la belleza de los paisajes, observando que las evaluaciones promediadas fueron muy similares. La escasez de estos estudios hace que sea importante para futuros trabajos verificar la validez de las fotografías como medio para obtener las valoraciones del público, ya que esto proporcionará un ahorro significativo a la hora de realizar las encuestas a los ciudadanos.

Así, el objetivo de este trabajo es precisamente comparar tasaciones de arbolado urbano por parte de los ciudadanos, en su visualización "in situ" y con fotografía digital.

2. Materiales y métodos

2.1. Lugar y ejemplares empleados

Madrid es una ciudad con 3.221.824 de personas censadas y que ofrece un patrimonio verde de excepcional extensión y diversidad (más de 6.200 hectáreas), que suponen casi 20 m^2 de parques y zonas verdes públicas por habitante de la ciudad. En la realización del inventario del arbolado urbano realizado en 2016 aparecen todos los árboles de jardines y pequeñas zonas verdes, así como los clasificados como parques históricos, singulares o forestales y, también, el arbolado viario de todas las calles que componen el plano de la ciudad de Madrid. Más del 55% de sus calles están arboladas con casi 241.000 ejemplares de 210 especies distintas.

Se ha determinado que las 10 especies de árboles más abundantes dentro del arbolado urbano de Madrid, según los datos cuantitativos del inventario de 2016 son: Acer negundo, Aesculus hippocastanum, Cupressus sempervirens, Pinus halepensis, Pinus pinea, Platanus x

hybrida, Populus alba var. bolleana, Prunus cerasifera var. pissardii, Robinia pseudoacacia y Ulmus pumila.

Los ejemplares escogidos para la toma de datos de campo se seleccionaron de manera aleatoria en diferentes zonas de la ciudad de Madrid. Los individuos presentaban un porte adecuado, estaban situadas en lugares de fácil acceso y medianamente concurridos, ya que las encuestas debían ser realizadas en el mismo lugar donde estaba situado el árbol. Además, como debían realizarse fotografías de todos los ejemplares, se eligieron relativamente aislados (siempre que fuese posible) para evitar factores ajenos en la fotografía que pudieran influenciar de una forma u otra a la valoración.

Las localizaciones de los ejemplares fueron: el Parque de El Retiro en el centro, el Parque del Oeste, el Parque del Templo de Debod, Parque Norte, Parque de la Ventilla, Jardines del Canal de Isabel II, Barrio de El Pardo y Barrio de Montecarmelo, todos ellos en la zona norte de Madrid, Plaza de Tirso de Molina, Plaza de Las Descalzas, Calle Desengaño y Calle Carbonero y Solen para la zona centro.

2.2. Fotos y métodos de valoración

A cada ejemplar se le tomaron varias fotografías con cámara digital, en la época en que todos los ejemplares mostraban abundancia de hojas, con luz similar y con un encuadre que mostraba el ejemplar a completo. De ellas se seleccionó una para la encuesta, que a juicio de dos expertos en la realización de valoraciones mediante fotografía, eran las más apropiadas.

Los métodos de valoración empleados para tasar los ejemplares se describen con detalle en el trabajo de [11] y [8], reduciéndose a los tres más representativos, siendo analizados en recientes trabajos con resultados similares en [12]:

- Método Norteamericano (CTLA). Define el valor base como expresión del precio unitario de vivero según la sección del tronco.
- Método Burnley (Burnley). Utiliza como variable principal el tamaño del árbol como el volumen de un cono invertido, considerando para ello la altura y la superficie de copa.
- Norma Granada (NG). Este método utiliza la medida de la circunferencia del tronco (a 1m del suelo).

Todos ellos multiplican los valores base por coeficientes correctores que incluyen factores como el estado sanitario, la especie o la localización.

Los métodos empleados requieren medir en los 100 ejemplares las siguientes variables:

Diámetro normal (d): en cm, medido sobre el tronco, con corteza, a una altura de 1,30 m sobre el nivel del suelo mediante forcípula o cinta π en los casos en los que el diámetro era tal que se superaba la escala del instrumento anterior. De esta medición se obtuvo posteriormente el perímetro o circunferencia normal.

Altura total (h): distancia entre la base del árbol y el extremo superior de la copa sobre el eje del mismo. Medido con clinómetro Suunto ó Vertex.

La variable superficie de copa (sc) se midió a posteriori en los individuos de la muestra, considerada como el ancho de la copa, la proyección de su superficie sobre el suelo en m^2. Además, como la mayoría de las copas proyectan formas irregulares, se tomaron dos medidas, la de mayor longitud y su perpendicular [13], [14] con una cinta métrica y un clinómetro Suunto para comprobar la verticalidad de la posición tomada para la medición.

Las variables calculadas a partir de las variables medidas fueron:

La superficie de la copa como el área del romboide que forman las dos mediciones

Perímetro o circunferencia normal (p): en cm, a partir del diámetro

Área de la circunferencia normal (a_c): en cm^2, como la superficie de la intersección del fuste con un plano perpendicular al tronco, tomada a una altura de 1,30 m sobre el nivel del suelo. Aunque las secciones son irregulares, se asemeja a una elipse u otras figuras, para facilitar los cálculos se ha supuesto que la sección es circular. Se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$ac = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Edad (t): en años, como el número de años transcurridos desde la germinación de la semilla (desde la brotación de estacas para especies de reproducción vegetativa) hasta el momento en que se realiza la determinación. Los inventarios de arbolado de las ciudades no reflejan la edad del árbol, a pesar de que sería sencillo incluir esta variable en los registros mediante el año de plantación del ejemplar y la edad indicada por el vivero. Sólo se recoge la clasificación de los ejemplares en joven maduro o viejo, por lo que es preciso estimarla.

En este caso, se empleó la ecuación del modelo de regresión lineal, obtenida con datos del arbolado de Santiago del Estero [15], debido a la imposibilidad de encontrar datos registrados de edad para ningún ejemplar.

t =0,701774p+0,368309h-0,0295051sc

2.3. Realización de la encuesta

De cada árbol muestreado se realizaron 10 encuestas a personas elegidas al azar. Con las encuestas buscamos caracterizar la población en grupos social-demográficos, como puede verse más adelante.

Después de las preguntas personales: sexo, edad, profesión, estado laboral actual y experiencia forestal, se preguntó por la preferencia en los valores económicos para cada individuo

Se preguntó cuál se ajustaba más, según su impresión, al valor real del árbol mediante una fotografía presentada en un iPad mini 4. La persona podía aumentar el tamaño de la fotografía para poder visualizarla mejor. Una vez respondían a la pregunta, les presentaba el individuo "in situ", donde volvían a responder a la pregunta de cuál era en su opinión el valor económico del árbol.

Para poder realizar ambas preguntas a las mismas personas, se ha tenido en cuenta que la realización de la encuesta fuese en un lugar próximo al ejemplar muestreado.

Para cada árbol se anotó el valor económico obtenido mediante las fórmulas de cada método, y siempre se ordenaron de la siguiente forma:

Opción 1: Método americano o CTLA

Opción 2: Norma Granada

Opción 3: Método Burnley

En ningún momento a las personas encuestadas se les dijo el nombre de los métodos de valoración, simplemente se les pidió que eligieran uno de los 3 valores económicos.

2.4. Análisis estadístico

Se analizan los datos desde el punto de vista descriptivo, con test de la Chi-cuadrado para detectar independencia de las variables y test de la t para proporciones. En todas las pruebas de hipótesis se ha utilizado un nivel de significación del 5%.

Se utilizó el programa Statgraphics Centurión XVII.

3. Resultados

3.1. Características de los encuestados

El porcentaje de mujeres es de un 51% frente a un 49% de hombres. La distribución de la muestra en función de los rangos de edad que la mayor frecuencia se encuentra en personas

entre 41 y 65 años, seguido muy de cerca por el rango de edad de los 26 a los 40 años, como se muestra en la figura 1.

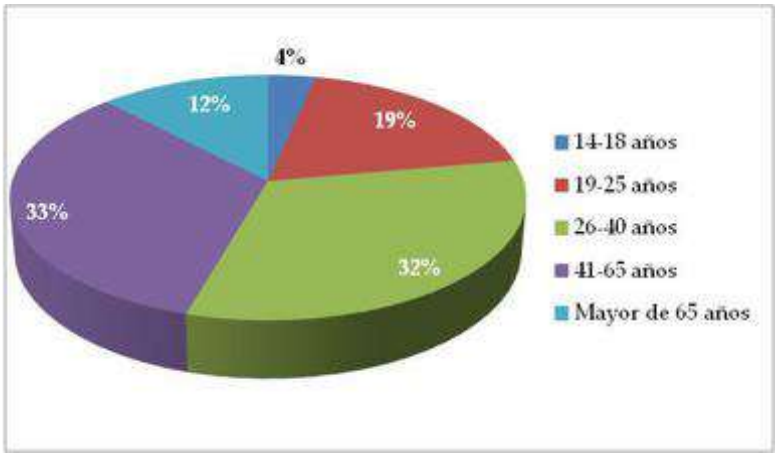


Figura 1. Distribución de la edad de los encuestados.

En función del nivel de estudios: La distribución de los encuestados en relación al nivel de estudios señala que el 64,2% de los encuestados dispone de estudios superiores y el 13,4% tiene un nivel de estudios primarios.

En cuanto a la situación laboral en la que se encuentran, se puede indicar que el mayor porcentaje corresponde a personas que se encuentran trabajando y su distribución se muestra en la figura 2.

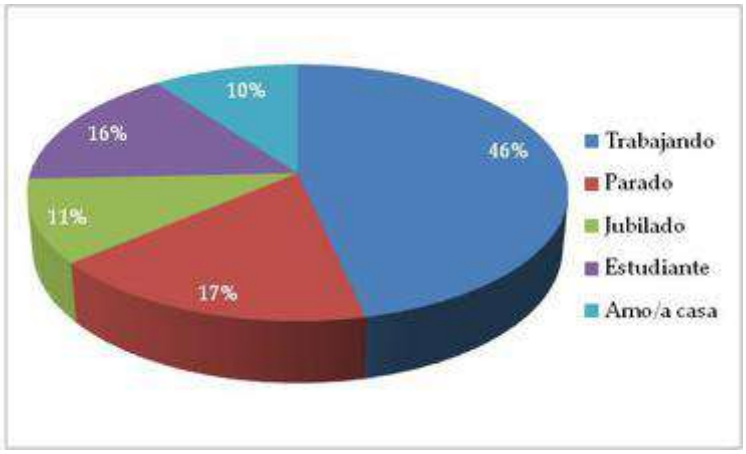


Figura 2. Distribución de la situación laboral de los encuestados.

Ninguno de los encuestados se dedica o está relacionado con una profesión forestal. Este dato es importante, ya que no se buscan valoraciones de personas con experiencia en la tasación del árbol.

3.2. Valores de los ejemplares

Se muestra a continuación el resumen descriptivo de los ejemplares (tabla 1) y los valores económicos obtenidos con los tres métodos (tabla 2), con los valores de la media, desviación estándar (DS), coeficiente de variación (CV), máximo y mínimo valor.

Tabla 1. Resumen estadístico de las medidas de los ejemplares

Variable	*Media*	*DS*	*CV*	*Mínimo*	*Máximo*
Diámetro (cm)	32,32	12,85	39,78%	11,46	118,47
Perímetro (cm)	101,47	40,36	39,79%	36,0	372,0
Altura (m)	15,44	5,94	38,50%	5,5	41,7
Sup.copa (m^2)	67,18	44,52	66,27%	6,7	384,41
Edad ajustada	76,03	29,77	39,16%	27,0	270,0

Se observa una variabilidad similar de todas las medidas, exceptuando la superficie de copa, con CV el doble que el resto. Los ejemplares varían de 27 a 270 años de edad, con una edad media estimada de 76 años. La altura media es de 15 metros y el diámetro normal de 32 cm.

Tabla 2. Resumen estadístico de valores económicos en euros

Variable	*Media*	*DS*	*CV*	*Mínimo*	*Máximo*
CTLA	516,99	577,18	111,64%	99	4829
NG	3279,3	3889,64	118,61%	290	23325
Burnley	2350,4	2914,21	123,99%	264	24929

Se observa una variabilidad similar en los tres métodos, siendo el CTLA el método que proporciona menores valores económicos de estos ejemplares, con la NG como método de mayor valor de tasación.

3.3. Resultado de la encuesta

Los resultados de la encuesta muestran que el método más seleccionado es el Burnley, seguido de la NG (figura 3)

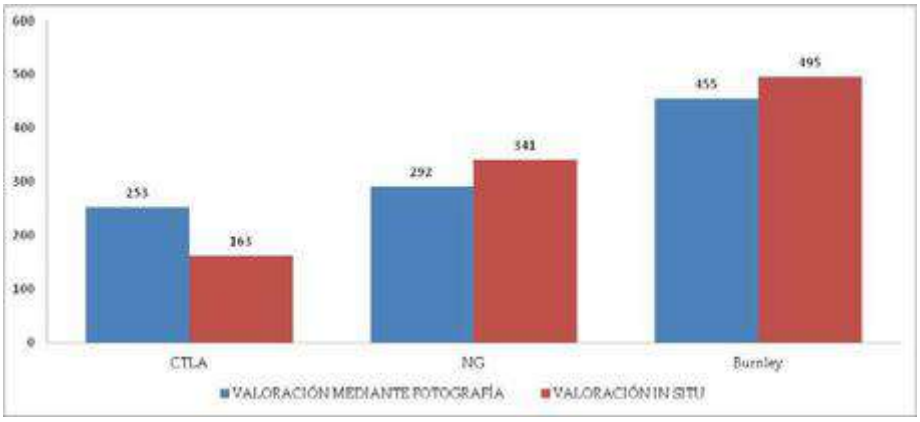


Figura 3. Comparación de valores escogidos con fotografía y al natural

Para homogeneizar los resultados se codificaron los resultados, que toman valores: -1 si el valor elegido con la fotografía superó el valor elegido "in situ", 0 cuando se eligió el mismo valor, 1 si el valor elegido "in situ" superó el valor elegido con la fotografía. Los resultados en porcentaje de respuestas se muestran en la figura 4.

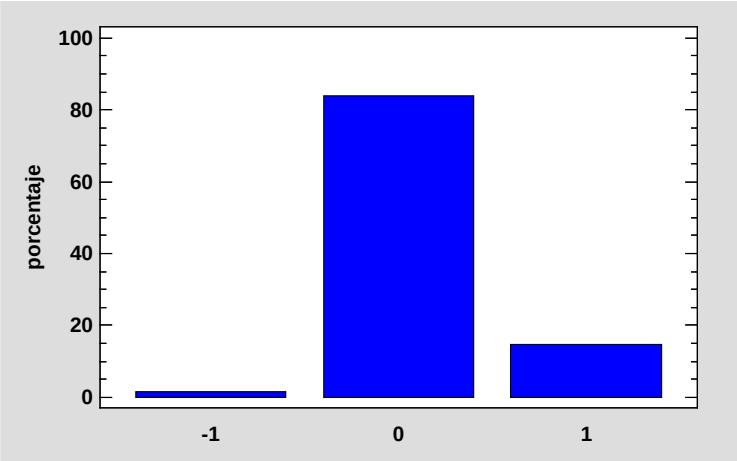


Figura 4. Porcentaje de encuestados según la diferencia de valoración realizada

El 83,8% de las selecciones de valor coincidieron en fotografía y al natural. El 14,7% de las elecciones "in situ" fue de valores más altos que el elegido por fotografía. Sólo un 1,5% corresponde a una elección de valores inferior al natural que en fotografía.

Considerando los tres valores de la diferencia codificada igualmente probables (valor elegido al azar) se realiza un test para proporciones con un 95% de confianza. La hipótesis nula es que la proporción de personas que eligieron un valor del árbol "in situ" superior al elegido con la fotografía (valor 1) es superior al 33,3%. El resultado del test es que se rechaza la hipótesis nula con p-valor igual a 0.

Consideramos también la hipótesis de que el valor elegido "in situ" es igual al elegido con la fotografía en un porcentaje de casos superior al elegido al azar, es decir mayor del 33,3%. El resultado del test es que se puede admitir que la proporción es superior al 33,3% con un 95% de confianza (p=1).

Por otro lado, analizando los resultados por especie de la tabla 3 muestran que las especies con mayor número de elecciones de valor superiores en los ejemplares "in situ" son el *Aesculus hippocastanum,* el *Platanus* x *hybrida,* seguido por *Populus alba bolleana.*

La prueba Chi-Cuadrado de independencia permite comprobar que existen diferencias significativas entre la elección por especie (p=0).

Tabla 3. Frecuencia de las diferencias según la especie

Especie	-1	0	1
Acer negundo	10	79	11
Aesculus hippocastanum	0	68	32
Cupressus sempervirens	0	94	6
Pinus halepensis	0	92	0
Pinus pinea	1	89	0
Platanus x *hybrida*	4	69	27
Populus alba boll.	0	80	20
Prunus cerasifera	0	90	10
Robinia pseudoacacia	0	82	18
Ulmus pumila	0	95	5
Total por Columna	15	838	147

En el caso más extremo se puede contabilizar un total de 32 ejemplares de *Aesculus hippocastanum* con valores de 1 de los 100 evaluados. Y para ejemplares de *Platanus* x *hybrida*, 4 individuos con valores -1 y 27 con valores 1.

Para estas dos especies, no se rechaza la hipótesis nula de que la proporción de casos en que el valor elegido "in situ" es superior al elegido con la fotografía es superior al 33,3% con un 95% de confianza (p = 0,1079 para el *P. hybrida* y p = 0,4372 para el *A. hippocastanum*).

Analizando estos casos se observa que corresponden la mayoría a dos ejemplares de *P. hybrida* y a otros dos de *A. hippocastanum* pero no se ha encontrado características especiales en estos ejemplares, salvo uno de los plátanos que es un ejemplar de más de unos 200 años de edad.

Los test de la Chi-cuadrado para contrastar la hipótesis de independencia de los resultados de diferencias en la elección de valor frente a las características sociales de los encuestados no permiten rechazar la hipótesis nula con nivel de confianza del 95% (p=0,4 para el sexo; p=0,9 para la edad; p=0,3 para el nivel de estudios; p=0,8 para la ocupación).

4. Conclusiones

Considerando el conjunto de especies analizadas se puede concluir que las personas eligen el mismo valor económico viendo los árboles urbanos tanto "in situ" como en fotografía.

Las especies P. hybrida y A. hippocastanum pueden considerarse diferentes, al menos para cuatro de los ejemplares evaluados, que se han valorado mejor "in situ" que en fotografía por la mayoría de los encuestados. En estas especies sería conveniente aumentar el número de ejemplares y de encuestados para ver si se confirma la diferencia detectada en ellos.

Por último se puede concluir que ni el sexo, la edad, el nivel de estudios o la ocupación parecen influir en las diferencias en cuanto a elección de valor.

Referencias

1. Plan de Infraestructura Verde y Biodiversidad (2017)
2. https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Medio-ambiente/Parques-y-jardines/Plan-de-Infraestructura-Verde-y-Biodiversidad/?vgnextfmt=default&vgnextoid=5fdec0f221714610VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnextchannel=2ba279ed268fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD
3. Acceso 13/Mayo/2019
4. Morcillo-San Juan, A., Bautista Carrascosa, N., Borrajo Millán, J. M. (2019). Valor del bosque urbano de Madrid. Revista PARJAP 92: 24-31.
5. Ponce-Donoso, M., Vallejos-Barra, O., Daniluk- Mosquera, G. (2012). Comparación de fórmulas chilenas e internacionales para valorar el arbolado urbano. Revista Bosque 33: 69-81.
6. Caballer V. (1999). Valoración de árboles frutales, forestales medioambientales y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
7. Cañas, I., Ayuga, E., Ayuga, F. (2009) A contribution to the assessment of scenic quality of landscapes based on preferences expressed by the public. Land Use Policy 26 (2009) 1173–1181.
8. Notaro, S., de Salvo, M. (2010). Estimating the economic benefits of the landscape function of ornamental trees in a sub-Mediterranean area. Urban Forestry and Urban Greening 9(2): 71-81.
9. Wang, R., Zhao, J. (2017). Demographic groups differences in visual preference for vegetated
10. landscapes in urban green space. Sustainable Cities and Society, 28, 350–357.
11. DOI: 10.1016/j.scs.2016.10.010.
12. García-Ventura, C., Sánchez-Medina, Á., Grande-Ortíz, M., González-García, C., & Ayuga-Téllez, E. (2018). Comparison of the Economic Value of Urban Trees through Surveys with Photographs in Two Seasons. Forests, 9(3), 132
13. Harding S.P., Burch S.E., Wemelsfelder F. (2017). The Assessment of Landscape Expressivity: A Free Choice Profiling Approach. PLoS ONE 12(1): e0169507. doi:10.1371/journal.pone.0169507.
14. Hull, R. B., & Stewart, W. P. (1992). Validity of photo-based scenic beauty judgments. Journal of Environmental Psychology, 12(2), 101–114.

15. Grande-Ortiz, M.A., Ayuga-Téllez, E., Contato-Carol, M.L. (2012). Methods of Tree Appraisal: A Review of Their Features and Application Possibilities. Arboriculture & Urban Forestry 2012. 38(4): 130–140.
16. García-Ventura, C. (2013). Comparación de métodos de valoración de arbolado urbano y su aplicación al Arboreto de la ETSI de Montes (Madrid). Proyecto Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
17. Thren M. 1993. Dasometría. Serie técnica Forestal. Vol. 1. Santiago del Estero, Argentina. Proyecto GTZ/UNSE, Facultad de Cs. Forestales, UNSE. 250 p.
18. Diéguez Aranda, U., Barrio Anta, M., Castedo Dorado, F., Ruiz Gonzalez, A.M., Alvarez Taboada, M.F., Alvarez Gonzalez, J.G., Rojo Alboreca, A., (2003). Dendrometría. Coedición Fundación Conde del Valle Salazar, Ediciones Mundi Prensa. 327 pp.
19. Sánchez-Medina, A., Ayuga-Téllez, E., Contato-Carol, L., Grande-Ortiz, M.A., Gonzalez-Garcia, C. (2017). Selection of Tree-Size Variables for Appraisal Methods for Urban Trees According to Their Collinearity. Arboriculture & Urban Forestry 43 (3).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Análisis en tiempo real del funcionamiento de la cadena de alimentación de las máquinas deshuesadoras de aceitunas mediante diagnosis por visión artificial y redes neuronales

Manuel de Jódar Lázaro [1], Antonio Madueño Luna [2], Alberto Lucas Pascual[3], Antonio Ruiz Canales[4], José Miguel Molina Martínez[5], José Miguel Madueño Luna[6], Meritxell Justicia Segovia[7], Montserrat Baena Sánchez[8].

[1] Doctorando Universidad Politécnica de Cartagena.
[2] Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos (Universidad de Sevilla), Ctra. de Utrera, Km.1, 41013 Sevilla; amadueno@us.es.
[3] Doctorando Universidad Politécnica de Cartagena.
[4] Engineering Department, University Miguel Hernández of Elche, 03312 Orihuela, Spain
[5] Food Engineering and Agricultural Equipment Department, Technical University of Cartagena, 30203 Cartagena, Spain
[6] Dpto. Ingeniería Grafica, Universidad de Sevilla.
[7] Diputación Provincial, Servicio Agricultura, Jaen.
[8] Agencia de Gestión Agraria y Pesquera de Andalucía, A.G.A.P.A.

Resumen: Las máquinas deshuesadoras de aceitunas se caracterizan porque su funcionamiento óptimo está vinculado a un buen ajuste: Selección de un plato de alimentación adecuado a la variedad de aceituna y su calibre, de las características geométricas de la cadena de alimentación, etc. El primero de estos elementos fija la entrada óptima de aceitunas en la cadena de alimentación impidiendo que queden cangilones vacíos o se llenen con más de una aceituna. El segundo elemento fija la correcta posición de la aceituna para ser deshuesada, evitando que esta sea deshuesada por un eje que no sea el principal. El trabajo propuesto analiza en tiempo real la correcta ubicación de las aceitunas en los cangilones de la cadena de alimentación, para ello se utiliza: 1.-Un sistema de visión artificial con disparo externo capaz de extraer una foto de cada cangilón que pase frente a una cámara. 2.-Una red neuronal clasificadora basada en un chip físico, de manera que adecuadamente entrenada, permita clasificar el cangilón en cuatro posibles estados: vacío, normal, con aceituna mal posicionada en "barco" y caso anómalo (dos aceitunas en un mismo cangilón, aceituna rota o aceituna mal posicionada no en barco). El trabajo muestra el uso de dos chips físicos con redes neuronales para la clasificación: a)Intel Curie b) NeuroMem CM1. El uso de los chips físicos Intel Curie y sobretodo Neuromem CM1K por su mayor capacidad y escalabilidad, ha sido satisfactorio y por tanto se comprueba un gran potencial para la clasificación. Se ha comprobado que la velocidad de transmisión de la información por puerto serie es suficiente para las velocidades habituales de las máquinas deshuesadoras, en torno a 1.800 aceitunas/min. Para poder realizar las pruebas se ha desarrollado una interfaz mediante la aplicación QT en lenguaje C++ que permite poder configurar de manera sencilla las imágenes a procesar y las condiciones de contorno para la detección de los fallos indicados.

Palabras clave: Redes Neuronales Artificiales, Máquinas Deshuesadoras, Aceitunas de Mesa, Red Neuronal Física, Visión Artificial, Chip Intel Curie.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3423

1. Introducción

Hasta el año 1970, el deshuesado y relleno de las aceitunas de mesa se hacía manualmente [1]. El progresivo encarecimiento de esta mano de obra creó la necesidad de mecanizar ambos procesos desarrollándose la mayor parte de la tecnología necesaria por empresas de Madrid y Sevilla.

Las primeras máquinas deshuesadoras con una producción de 220 frutos por minuto, supuso en su día un importante avance implantándose rápidamente en España y en otros países por la reducción que supuso de los costes de producción.

La primera máquina deshuesadora-rellenadora, fue desarrollada por la empresa sevillana SADRYM en colaboración con el Instituto de la Grasa, patente registrada [2], implantándose rápidamente en el sector, ya que resolvía la mecanización del relleno de aceitunas con pimiento. Este hecho permitió un gran desarrollo de la exportación de este tipo de producto, que tiene muy buena aceptación en Estados Unidos, Canadá y otros países de Europa, donde la demanda era superior a la propia capacidad productiva.

En 1975 aparecen las primeras máquinas deshuesadoras del tipo continuo [3], cuyos modelos mejorados en la actualidad permiten producciones de hasta 2.500 aceitunas/minuto, equivalente a 350 Kg/h de fruto, incorporando variadores electrónicos de frecuencia, que permiten ajustar la velocidad de la máquina a las propias condiciones del fruto, mejorando la calidad del producto final deshuesado.

En la actualidad existen en el mercado máquinas deshuesadoras/rodajadoras/rellenadoras (DRR), para todo tipo de calibres, es decir, desde el tamaño 400 al 80 (el tamaño se calcula como la cantidad de aceitunas que entran en 1 kilogramo), permitiendo deshuesar la misma máquina distintas variedades de aceitunas, e introducir en su interior no sólo pimiento o anchoa sino también otros "delicatessen" (almendra, atún, limón, ajos, cebollas, salmón, etc.). Además, se han registrado invenciones que consiguen mejoras sustanciales en varios puntos del proceso, como es la posibilidad de la optimización del rendimiento y la detección de fallos en remoto [4].

Se sabe que otras empresas del sector, actualmente trabajan con procesos más avanzados. Además de las máquinas bases del proceso del deshuesado, disponen de enfriadores para refrigerar la aceituna y así mejorar su resistencia al deshuesado. Este sistema se utiliza para todos los tipos de aceitunas principalmente a la aceituna Manzanilla Sevillana, ya que la aceituna Hojiblanca (especialmente), o Gordal (en menor proporción), ofrecen de por sí una resistencia buena para el deshuesado en condiciones ambientales.

El presente trabajo tiene como objetivo valorar la implementación un clasificador de aceitunas para máquinas DRR empleando chips neuromórficos, y ensayo de la velocidad de transmisión por puerto serie para uso en tiempo real.

2. Materiales y métodos

2.1. Red neuronal en Matlab

Se va a utilizar la aplicación Neural Network de Matlab [5] para entrenar una red neuronal profunda para la clasificación de imágenes captadas mediante una cámara, una vez entrenada, la red será capaz de distinguir los fallos más comunes en el proceso de deshuesado de la aceituna, como barcos y cangilones vacíos.

Una vez construida y entrenada, este tipo de red neuronal para aprendizaje profundo (en muestro caso será de dos capas), podremos analizar el efecto de la resolución de las imágenes sobre la capacidad de clasificación de la red. Concretamente, nos centraremos en dos resoluciones 11x11 píxeles y 16x16 píxeles que nos permitirán conocer que opciones tenemos a la hora de usar dos chips físicos disponibles en la actualidad en el mercado Intel Curie [6] y CM1K [7].

A continuación, se testará el sistema para su uso en tiempo real, para ello se va a usar el puerto serie como sistema de comunicación entre el PC y los chipsets indicados. Se comprobará que se envía correctamente la información desde el algoritmo en Matlab, es decir los 121 bytes de la imagen a procesar y los correspondientes 128 bytes para el chip CM1k. Para llevar a cabo este proceso la imagen original se convertirá a escala de grises primero y luego a vector, variable que será enviada por el puerto serie para su clasificación en la red neuronal.

2.2. Hardware empleado para la captura de imágenes

El sistema de visión artificial consta de una cámara industrial modelo UI-1220SE-C USB, [8] para la captura de imágenes. El disparo de la cámara se sincroniza con el movimiento de la máquina DRR y el disparo de la iluminación (un conjunto de diodos led de potencia), mediante un sensor magnético (ver figura 1), que detecta el paso de cada cangilón de la cadena de alimentación.



Figura 1. Sensor magnético para la detección del paso del cangilón en la cadena.

Las imágenes obtenidas son grabadas en el disco duro de un PC para su posterior análisis en diferido, estas imágenes serán recortadas para obtener la zona de interés (en inglés ROI: region of interest) y generar imágenes de un tamaño de 11x11 píxeles y 16x16 píxeles. En la figura 2 se muestra un diagrama de bloques de la aplicación.

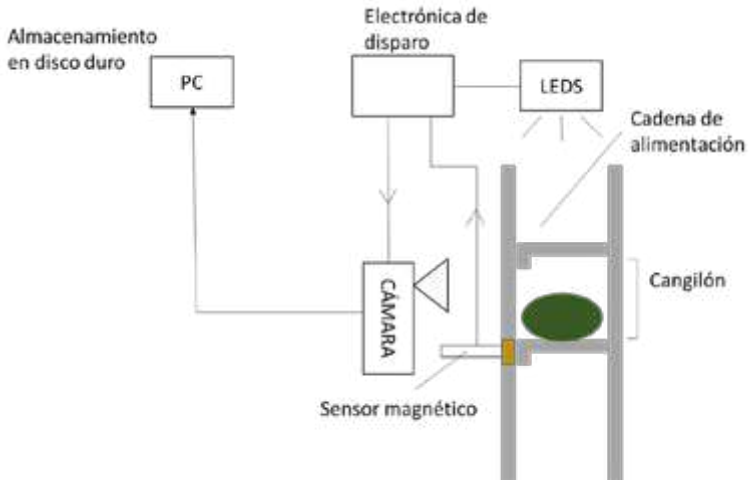


Figura 2. Sistema implementado en diagrama de bloques.

En la figura 3 se muestra el sistema implementado sobre una de estas máquinas DRR (para calibres pequeños de aceitunas, tipo manzanilla y hojiblanca), de una fábrica de aceitunas de mesa sevillana.

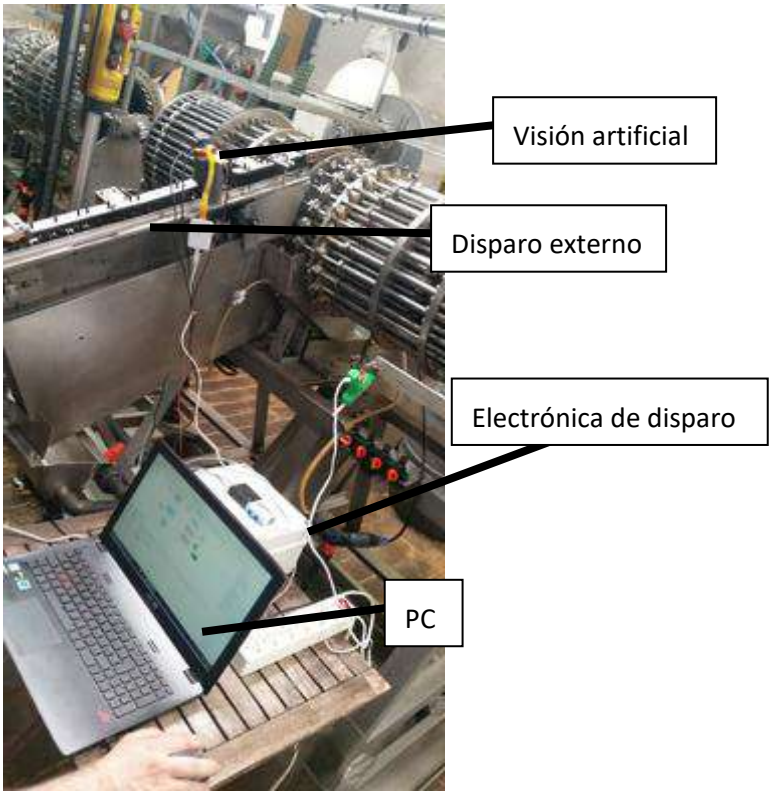


Figura 3. Sistema implementado en una máquina de deshuesado real.

2.3. Chips neuronales empleados

Se han empleado dos chips neuromórficos, el Intel Curie de un Arduino-Genuino 101, que incluye un módulo de redes neuronales artificiales (128 neuronas con vector de entrada de 128 bytes). Este módulo es un caso a escala del chip CogniMem CM1K, este segundo chip está dotado con 1024 neuronas y una longitud de vector de entrada de 256 bytes, para su uso se ha empleado una tarjeta BrainCard que lo incorpora. Ambos emplean para la clasificación funciones de base radial (RBF) o técnicas KNN (vecino más cercano).

Las imágenes de 121 pixeles (11x11) serán procesadas con el Intel Curie del Arduino 101 y las imágenes de 256 pixeles (16x16) con el CM1K.

2.4. Comunicación con los chips neuromórficos

La tarjeta BrainCard emplea para comunicarse un protocolo SPI y tiene el formato de un shield de Arduino a nivel 3.3 V por lo que es compatible con un Arduino DUE o un 101. Por su parte el chip INTEL CURIE es el núcleo del Arduino 101 e incorpora su propia implementación de un bus USB x apareciendo desde un P.C. como un puerto serie virtual de alta velocidad sin una velocidad de transmisión definida.

Si se emplea como elemento de comunicación para la BrainCard un Arduino DUE caben dos posibilidades: emplear el puerto de comunicaciones estándar basado en un ATMEGA16U2 (hasta 115200 baudios) o el puerto nativo de características similares al descrito para el Arduino 101.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados obtenidos con la red neuronal programada en Matlab

Mediante Matlab se han probado dos configuraciones, una con imágenes en niveles de gris de 1 byte de profundidad, escaladas con ROI de 11x11 pixeles y otras en niveles de gris de 1 byte escaladas con ROI de 16x16 pixeles. Para el entrenamiento se ha usado un set de 9 imágenes de cangilón vacío, 11 de aceitunas en "barco" y 10 de aceitunas normales, no se ha tenido presente la presencia de casos anómalos, ya que el objeto de la prueba era tener seguridad en que el clasificado de estas imágenes de baja resolución era factible con una red neuronal.

La estructura de la red neuronal con autoencoder se ha entrenado con 45 iteraciones, los resultados obtenidos, aparecen en la figura 4.



Figura 4. Matriz de resultados obtenidos con Matlab.

Como se aprecia, la red neuronal ha llevado a cabo un clasificado correcto (error<4%), con imágenes de 16x16 pixeles (las que procesa el chip CM1K). Se han repetido los ensayos con imágenes de resolución 11x11 y el resultado también ha sido satisfactorio (error <5%), lo que significa que también es posible clasificar con las imágenes (11x11 pixeles), que procesa el chip Intel Curie.

3.2. Resultados obtenidos con el uso de chips neuromórficos

Para las pruebas con chips neuromórficos se ha usado para el entrenamiento de la red neuronal un set de 20 imágenes de cangilón vacío, 20 con aceitunas en "barco" y 20 aceitunas en posición normal. Para el test de la red neuronal una vez entrenada se ha empelado un set de 10.000 imágenes obtenidas en una prueba con la máquina DRR trabajando con aceitunas hojiblancas durante su funcionamiento normal en la fábrica. De este conjunto se extraen aleatoriamente muestras de 1000 imágenes para realizar el clasificado. El ensayo se ha repetido 100 veces.

En la tabla 1 se muestra el resultado promedio de las 100 repeticiones para el caso del Chip Intel Curie de 128 neuronas.

Tabla 1. Resultados promedio de 100 repeticiones obtenidos con el Chip Intel Curie

Parámetro	Totales	Barcos	Vacios	Normales
Muestras realizadas	1000	70	88	842
Correctos	888	63	89	737
Fallos	25	0	1	24
Anómalos	88	7	0	81
% Fallos	3	0	1	3

Como se observa la red neuronal detecta un 97% de casos correctamente (3% de fallos), existe un porcentaje de casos de aceitunas anómalas que salen de la clasificación indicada de fallos comunes, estos casos pueden ser aceitunas dobles, partidas, o un grado de inclinación cercano al denominado "barco" sin serlo, este porcentaje de casos anómalos o bizarros es del 8,8%.

El número de neuronas empleadas ha sido 4, se emplea por tanto una neurona para cada caso, aceituna normal, cangilón vacío, aceituna barco, y el comentada aceituna anómala, la propia red al identificar un número significativo de casos sin poder clasificarlo por no haberse entrenado con ese tipo de casos emplea una neurona para identificarlos.

En el caso de chip Neuromem CM1K el resultado es similar con una tasa de eficacia del 98% (2% de fallos) tal y como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados promedio de 100 repeticiones obtenidos con el Chip CM1K

Parámetro	Totales	Barcos	Vacios	Normales
Muestras realizadas	1000	75	85	840
Correctos	887	65	85	737
Fallos	20	3	0	17
Anómalos	93	7	0	86
% Fallos	2%	4%	0%	2%

3.3. Tiempos de respuesta

Una vez comprobado que la red neuronal trabaja adecuadamente para ambos chipsets se procede a la comprobación en tiempo de respuesta ante un desafío (123=1+121+1 y 258=1+256+1 bytes). En la tabla 3 se muestra el resultado del envío desde Matlab de dichos desafíos con tres empaquetamientos de bytes enviados: 1, 123 y 258. En todos los casos se emplea la conexión USB virtual del 101 o DUE.

Tabla 3. Resultados de los tiempos de respuesta mediante puerto serie para ambos chipsets.

Bytes enviados en cada transmisión	Tiempo de respuesta (seg)	Frecuencia (Hz)
1	0,8	1,25
123	0,012	83,3
258	0,028	35,7

El envío individual de bytes es inoperativo ya que exige activar y desactivar para cada byte transmitido el protocolo de comunicación. En el caso de bloques 258 bytes la velocidad supera las 2100 aceitunas procesadas por minuto, lo cual es aceptable en la mayoría de las máquinas deshuesadoras.

4. Conclusiones

Se ha conseguido entrenar por primera vez y de manera exitosa una red de neuronales artificiales implementadas en Chips físicos para la clasificación de imágenes de la aceituna que circulan por las líneas de alimentación de las máquinas deshuesadoras de este fruto.

El uso de los chips físicos Intel Curie y sobretodo Neuromem CM1K por su mayor capacidad y escalabilidad, ha sido satisfactorio y, por tanto, se comprueba un gran potencial para la clasificación.

La clasificación sólo ha necesitado una neurona para cada caso, en total 4 (Normal, Barco, Vacío y Anómalo).

Se constata que una resolución mínima de 11x11 pixeles ya es apta para el propósito buscado. En estas condiciones un chip como el Intel Curie sería suficiente.

Se ha ensayado de manera satisfactoria las velocidades de recepción y envío de la información en tiempo real, resultando velocidades de clasificación de más de 35 frames/s o equivalente a más de 2.100 aceitunas por minuto.

Para poder llegar a las velocidades indicadas se ha comprobado que se deben enviar los vectores de imágenes en bloque, de manera que se envíen los 123 bytes y los 258 bytes en una sola instrucción, de lo contrario el envío de byte a byte genera un cuello de botella en la transferencia y los tiempos de ejecución impiden alcanzar las velocidades requeridas.

Referencias

1. Santos Siles, F.J. (1999) "Las nuevas tecnologías aplicadas al sector de la aceituna manzanilla fina". Grasas y Aceites, 50-2, 131-140.
2. Ser González, Clemente del.1987. Método para deshuesar y deshuesar-rellenar aceitunas dispositivo para su puesta en práctica y producto obtenido con el mismo número de publicación: ES2000150 A6…. Autor D. Título del trabajo. Nombre de la revista. Año, volumen, rango de páginas (página inicial – página final).
3. Fernández-Cano, Sebastián. 2012. PFC Mejora de las líneas de deshuesado de una envasadora de aceitunas escuela técnica superior de ingeniería (ICAI).
4. Madueño luna Antonio, López Lineros Miriam, Madueño Luna, José Miguel.2013. Procedimiento basado en un sensor de sincronismo para la detección de fallos de funcionamiento en máquinas deshuesadoras/rodajadoras de aceituna y de relleno, cuantificación y optimización del rendimiento, señalización, monitorización y control remoto. Patente de invención, Propiedad industrial.
5. The MathWorks, Inc. Redes neuronales.1994-2017. http://es.mathworks.com/discovery/redes-neuronales.html.
6. Arduino, 2017. https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoard101
7. General Visions, 2016. http://www.general-vision.com/hardware/cm1k/
8. IDS Imaging Development Systems GmbH, 2016. https://es.ids-imaging.com/store/ui-1220se.html
9. FT232R USB UART IC Datasheethttps://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Caracterización del viñedo mediante análisis de datos LIDAR aerotransportado

J. Santamaría-Peña[1], F. Sanz-Adán[2], M.E. Palacios-Ruiz[3], M.C. Ortega-Saenz[4]

[1] Departamento de Ingeniería Mecánica-Universidad de La Rioja; jacinto.santamaria@unirioja.es
[2] Departamento de Ingeniería Mecánica-Universidad de La Rioja; felix.sanz@unirioja.es
[3] Consejería de Fomento y Política Territorial-Gobierno de La Rioja; epalacios@larioja.org
[4] Consejería de Agricultura-Sección de Viñedo-Gobierno de La Rioja; mcortega@larioja.org

Resumen: La utilización de datos LIDAR aerotransportado para el análisis territorial es una herramienta de uso creciente en los últimos años. En este trabajo pretendemos demostrar que el tratamiento de estas nubes de millones de puntos con programas específicos y algoritmos orientados es una buena solución para el estudio y caracterización de los viñedos en zonas típicamente agrícolas. El mercado nos ofrece gran cantidad de soluciones software para el análisis, tratamiento y visualización de los datos LIDAR. Nosotros proponemos la utilización combinada de varios tipos de software, integrado o no en sistemas de información geográfica. Conocer los parámetros y variables de cálculo de cada uno de los procesos o algoritmos del software utilizado resulta fundamental para dar seguridad y precisión a los resultados obtenidos. En este trabajo se describen sencillos procesos para, a partir de ficheros LIDAR de mediana resolución, extraer información precisa del viñedo, tanto el emparrado como el formado en vaso. Y se dejan fijados los pasos para acometer otro tipo de estudios similares. Aunque la comunicación se centra en la utilización de información de los datos LIDAR aerotransportados, los procesos descritos son igualmente aplicables a otro tipo de información LIDAR disponible, como pueden ser los escaneos terrestres laser 3D o las nubes de puntos obtenidas desde drones.

Palabras clave: viñedo; LIDAR aerotransportado; software LIDAR; LIDAR-GIS.

1. Introducción

En este trabajo trataremos de demostrar que el material LIDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) con origen en vuelos fotogramétricos y disponible hoy en día en grandes bases de datos públicas, es un elemento esencial para cualquier estudio territorial y básico para la posible caracterización agrícola de un entorno rural determinado. Aspectos como la detección de masas de viñedo en el entorno agrario, su posible digitalización automática, la determinación del volumen de copa, su altura máxima, su conformación geométrica, detección de áreas con déficit de desarrollo vegetal, clasificación varietal, distribución espacial de la vegetación, etc., son de suficiente entidad como para investigar sobre la viabilidad y predisposición de dichos datos LIDAR para conseguir este propósito.

Y para ello utilizaremos herramientas de tres ámbitos bien diferenciados, todas ellas orientadas a la gestión territorial de la información:

- Por un lado, tenemos los sistemas de información geográfica (SIG), que gestionan elementos georreferenciados y los analizan desde el punto de vista del dato y desde su geolocalización, obteniendo nueva información con valor añadido. En este estudio

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3468

utilizaremos como Sistema de Información Geográfica de referencia el software QGIS versión 3.6.2-Noosa, aplicación profesional, software libre y de código abierto (*FOSS*) licenciado bajo GNU (*General Public License*).

- Por otro lado, disponemos de software específico de visualización y tratamiento básico de los datos LIDAR para realizar primeras aproximaciones, filtrado de puntos y visualización tridimensional. En nuestro caso, utilizaremos el software FUGROVIEWER™ (*Fugro N.V.*).
- Por último, disponemos de software más específico para explotar toda la información que nos ofrecen los datos LIDAR y obtener otros productos aparentemente ocultos pero que son de gran trascendencia para caracterizar cualquier entorno vitícola, como son, los Modelos Digitales de Superficie (MDS), los Modelos Digitales del Terreno (MDT), los modelos digitales de alturas sobre el suelo, entre otros. Como novedad, para abarcar este aspecto, lo haremos compaginando y comparando dos herramientas aparente divergentes como son:
    - las herramientas LASTools® de Rapidlasso GmbH integradas en el software QGIS.
    - el software de tratamiento de nubes de puntos de orientación arquitectónica-industrial CloudCompare, software libre de procesamiento de nubes de puntos 3D que ofrece procesos semiautomáticos ya programados que van a ser muy útiles para nuestro propósito de estudio. Utilizaremos la versión 2.10.2 Zephyrus

Los datos LIDAR almacenan información de la posición tridimensional X,Y,Z de cada uno de los rebotes sobre todos los objetos dispuestos sobre el terreno y también sobre el propio terreno. Y además guardan información sobre intensidad de la señal, número de rebote, valores R-G-B, tiempo GPS, ángulo, dirección de escaneo y, tras postproceso, la clasificación de cada punto (suelo, vegetación, masa de agua, edificio, ...) [1]. Esta información es precisamente la que queremos explotar y orientarla al objetivo de caracterización del viñedo en terrenos agrícolas.

2. Materiales y métodos

Para realizar este estudio vamos a centrarnos en la hoja 512-4712 del vuelo LIDAR de 2016 realizado por el Gobierno de la Rioja y el Instituto Geográfico Nacional. Se trata de un entorno de 2km x 2km en el municipio de Haro en el que convergen elementos típicamente agrícolas (viñedos abundantes con distinta conformación, plantaciones frutales dispersas, parcelas de cultivo y sin cultivo, árboles dispersos, …), con otros más urbanizados (infraestructuras viarias de primero, segundo y tercer orden, tendidos eléctricos, zona industrial, zona urbana, …). El vuelo se realizó en el mes de septiembre, ósea cuando el viñedo estaba en plena vegetación, tal vez en recesión, ya que la maduración de la uva ya estaba bastante avanzada.

La captura LIDAR se hizo con una densidad media de 2 puntos/m2, a la vez que se tomaron imágenes fotográficas en RGB e infrarrojo. La razón de incluir la información del infrarrojo se basa en la idoneidad de su uso para la futura discriminación entre vegetación y edificios y su correcta clasificación en ficheros LAS. La precisión horizontal del material obtenido de estima en valores de RMSE ≤ 20 cm y la vertical en valores de RMSE ≤ 0.15 cm. La imagen fotogramétrica obtenida tanto para RGB como para infrarrojo, es de 0,50 m/pixel.



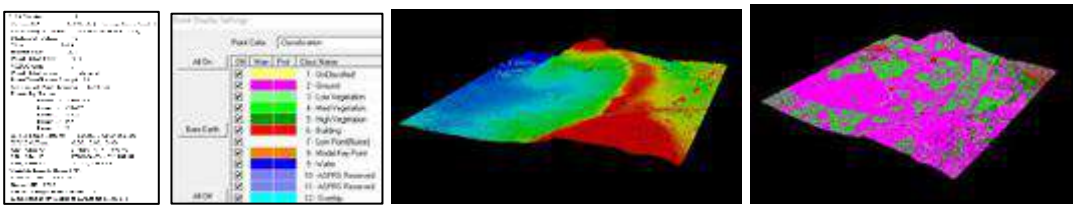
a) b) c) d)

Figura 1. Zona de estudio 2Km x 2 Km: a) imagen en falso color-septiembre2016; b) imagen RGB-septiembre2016-0,5m/p; c) hoja LIDAR 512-4712 ; d) plano topográfico.

El fichero LIDAR "pnoa_2016_rio_512-4712_cla-001-irc.laz" está comprimido y conserva todos los campos de información típicos de los ficheros LAS definidos por la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) [2]. A este respecto, y teniendo en cuenta el objeto principal de este estudio, sería conveniente destacar la clasificación establecida para la vegetación. Según la ASPRS (2008), por defecto se clasifican tres rangos de vegetación: low vegetation (0.5 m <height<= 2.0 m), medium vegetation (2.0 <height<= 5.0 m), high vegetation (5.0 <height). Sin embargo, en estos ficheros LAZ los rangos de altura de vegetación han sido clasificados de forma diferente: low vegetation (0m <height<= 0.5 m), medium vegetation (0.5 <height<= 3.0 m), high vegetation (3.0 <height), de acuerdo a los protocolos establecidos por el Insituto Geográfico Nacional. Este aspecto es muy interesante para nuestro estudio, ya que el viñedo (su masa vegetal) se halla claramente en el entrono 0,5 m y 2,0 metros, abarcando los distintos sistemas de formación en la zona de denominación de origen Rioja.

2.1. Procesos previos.

Comenzamos por analizar el material de partida, ósea, el fichero LAZ con la nube de puntos LIDAR clasificados. Para ello, la mejor solución es el software FUGROVIEWER (ver Figura 2).

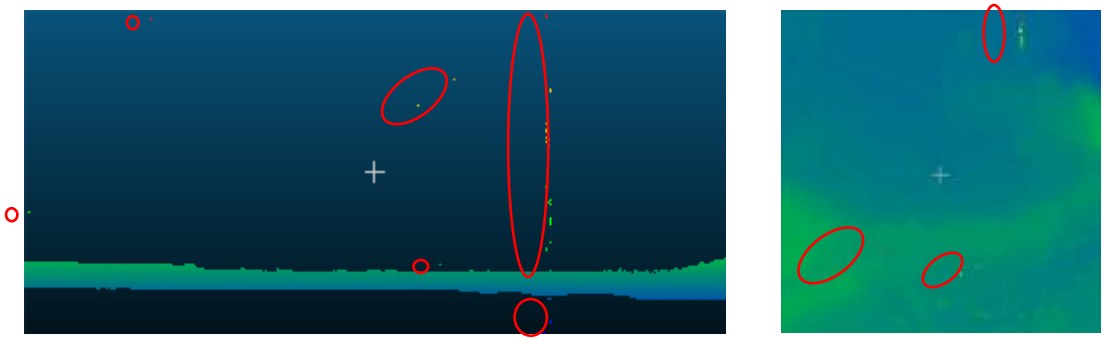


a) b) c) d)

Figura 2. Análisis preliminar de fichero LAZ: a) información; b) clasificación; c) visualización 3D por alturas; d) visualización 3D por clases.

Se trata de un fichero con 11.660.724 millones de puntos LIDAR, la mayoría (96,7 %) como primeros retornos y cuyo rango de cotas va desde los 331 m hasta los 1.264 m. Esta primera información ya nos hace ver que la nueve de puntos tiene bastante "ruido" ya que el rango de cotas real de la zona no es tan amplio como nos indica el programa. Por tanto, lo primero es hacer una limpieza previa del fichero LIDAR.

Para la visualización y limpieza de dicho ruido, utilizaremos el software CloudCompare, apoyándose en una simple visualización de vistas ortogonales de planta y alzado, agrandando el tamaño del punto, del modo que se aprecia en la Figura 3 siguiente.



a) b)

Figura 3. Detección de ruido y puntos erróneos: a) vista en alzado; b) vista en planta.

Por un simple proceso de segmentación manual, en el entorno de CloudCompare, procedemos a la eliminación de dicho ruido y errores groseros. El resultado es el que se muestra en la Figura 4, que deja un total de 11.660.682 puntos (7.137.332-suelo; 446.598-vegetación baja; 1.021.988-vegetación media; 228.493-vegetación alta; 102.088-edificios). Si bien es cierto que tan solo se han eliminado 42 puntos, son suficientes para reducir el rango de cotas de los 933 m iniciales a los 113 m finales y eso puede ser muy importante a la hora de desarrollar procesos de cálculo en los que intervengan las alturas (ver Figura 4).



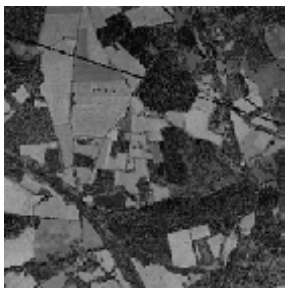
Figura 4. Vista en alzado de nube de puntos tras proceso de limpieza.

2.2. Procesos avanzados.

2.2.1. Detección de ruido

Una vez ya tenemos la nube de puntos limpia de puntos groseros, podríamos aplicar alguno de los algoritmos de eliminación de ruido disponibles en las herramientas LASTools o propios de CloudCompare. Para ello, previamente pediremos información del fichero en el entorno de QGIS y usando LASinfo, de lo que resulta que existen 2.517 puntos clasificados como ruido, que podríamos eliminar. Debemos tener en cuenta que estos puntos tal vez sean reales y pertenezcan a elementos elevados sobre el terreno que podrían interesarnos, como pueden ser los cables de los tendidos eléctricos, en los que los impactos son escasos y alejados del suelo.

En LASTools esta función puede llevarse a cabo con la herramienta LASnoise y en CloudCompare con el plugin SOR (Statistical Outlier Removal). Optamos por este último por su sencillez y rápida ejecución. En él, tan solo hay que definir el número de puntos a considerar para calcular la distancia media de cada punto a su vecino y el factor el factor multiplicador de la desviación estándar, según la expresión: $Distancia\ máxima = distancia\ media + Factor \times desviación\ estandar$. Tomaremos un valor de 10 puntos y un factor de 2, siendo el resultado el siguiente:



a)



b)

Imagen a): 11.660.682 puntos

Imagen b): 11.386.218 puntos

Figura 4. Efecto de la eliminación del ruido: a) imagen original; b) imagen tras eliminación del ruido.

Se observa cómo la línea recta que atraviesa la imagen de Este a Oeste, y que corresponde con un tendido eléctrico (ver Figura 1-d), ha sido eliminada. El proceso ha eliminado 274.464 puntos (2,35 %), pero tiene el inconveniente de que no sabemos exactamente en qué zonas se han eliminado los puntos, ni sobre qué tipología de puntos ha actuado en mayor medida (vegetación alta, puntos de mayor altura, …) y la importancia que esto pueda tener en procesos posteriores. Por ello, se opta por seguir con los procesos de tratamiento de la nube de puntos sin aplicar la eliminación de ruido.

2.2.2. Normalización de la nube de puntos

Un elemento importante a considerar para localizar las plantaciones de viñedo en nuestra zona de estudio es la altura de la masa vegetal respecto del suelo. Para ello, debemos calcular la altura respecto del suelo de cada punto de la nube clasificado como vegetación. Y esto lo podemos hacer con dos herramientas: una desde QGIS-LASTools usando la utilidad LASheight y otra desde CloudCompare usando un proceso que comienza por detectar los puntos suelo y termina por calcular la distancia de los puntos a una malla creada con dichos puntos suelo.

Desde LASTools en QGIS: se somete a la función LASheight el fichero segmentado por CloudCompare, sustituyendo las cotas originales de los puntos por la altura sobre el suelo y se pide información a la función LASinfo sobre los datos de dicho fichero. El resultado es el que se muestra en la Figura 5.

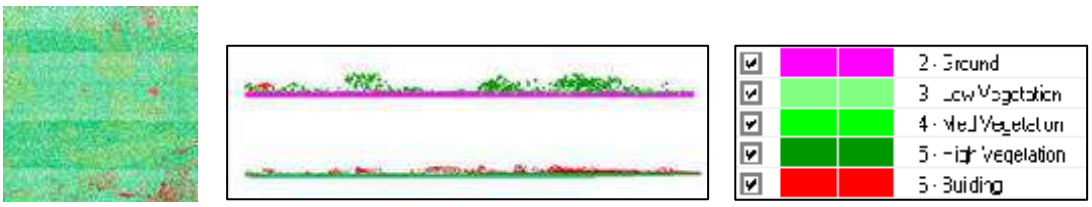
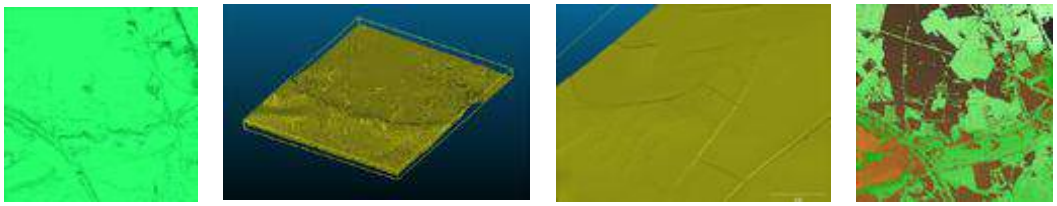


Figura 5. Clasificación por alturas sobre el suelo [*LASTools en QGIS]* de vegetación y edificios.

El resultado del análisis muestra que la altura media de los puntos de la nube sobre el suelo es de 0,516 m, con una densidad media de 2,82 p/m^2 y un espaciado medio de 0,60 m. Se detectan puntos a -20,84 m por debajo del suelo y a +57,17 m por encima, lo cual significa que persiste ruido en la nube de cierta importancia. La mayoría de los puntos (42,5 %) se hallan en el rango de – 0,5 m a +0,5 m; los puntos entre +0,5 m y +2,5 m, rango más representativo del cultivo de viña, representan el 12,8 % de los puntos totales.

Desde CloudCompare, vamos a realizar este proceso de normalización a través del plugin CSF-filter [3], que extrae de forma automática y separa los puntos-suelo (9.354.564 puntos) y los puntos-no-suelo (2.306.118 puntos) y crea una malla 3D con los primeros, para posteriormente

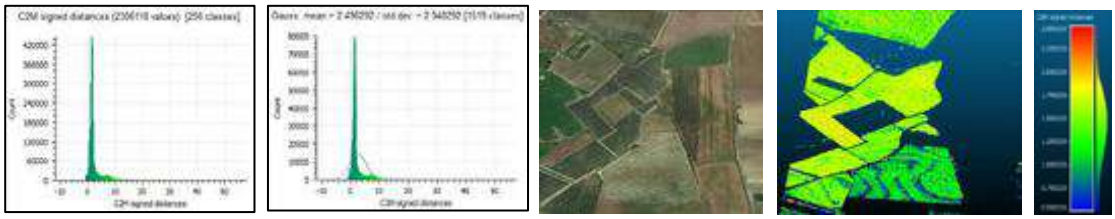
calcular la distancia de dichos puntos-no-suelo a la malla. Es un proceso bastante automatizado, cuyos resultados son los que aparecen reflejados en la Figura 6.



a) b) c) d)

Figura 6. Puntos suelo y no-suelo (CloudCompare-CSF): a) malla renderizada suelo; b) modelo mallado 3D suelo; c) detalle del modelo mallado; d) no-suelo sobre malla-suelo.

Una vez discriminados los puntos suelo y los puntos no-suelo, y generada la malla, procedemos a calcular las distancias de todos los puntos no-suelo sobre la malla, generando un modelo normalizado y extrayendo los puntos que se hallan entre 0,5 m y 2,5 m del suelo (1.680.385 puntos), tal como se aprecia en la Figura 7.

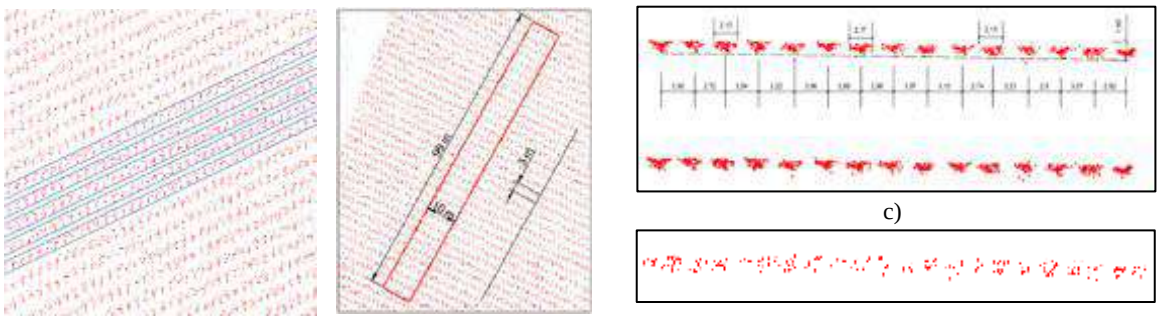


a) b) c) d)

Figura 7. Alturas de puntos sobre el suelo (CloudCompare-C2M): a) histograma de alturas; b) modelo estadístico distribución Gauss; c) viñedos en zona de estudio; d) puntos a 0,5m – 2,5m.

Del estudio realizado con CloudCompare se deduce que la altura media de los puntos no-suelo sobre el terreno es de 2,49 m con una desviación típica de 2,95 m, existiendo un amplio rango de alturas desde los -11,84 m hasta los +57,85 m. Y se observa la alta precisión en la localización de las parcelas de viñedo, perfectamente aisladas del entorno suelo que las rodea. Los recintos de color verdoso-amarillento son viñas emparradas con alturas de puntos entre 1 y 2 metros. Los recintos azulados-verdosos son viñas jóvenes emparradas o viñas en vaso, que contienen puntos entre 0,2 m y 1,0 m.

Aprovechando la potencialidad de visualización de FUGROVIEWER, observamos con más detalle las zonas localizadas como viñedo y podemos hacer mediciones sobre ellas:



a) b) c) d)

Figura 8. Mediciones sobre el viñedo: a) línea de viñedo emparrado; b) muestra para sección transversal; c) sección transversal y medidas en viñedo emparrado; d) sección transversal de viñedo en vaso.

3. Resultados y discusión

Del análisis realizado, podemos destacar la ventaja de la utilización combinada de varios programas de tratamiento de datos LIDAR aerotransportado, usando en cada proceso aquella herramienta que mejor se adapte al material y a los objetivos propuestos.

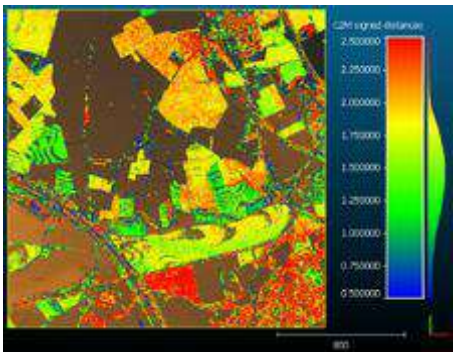


Figura 8. Modelizado del viñedo.

Las herramientas de LASTools integradas en QGIS, son importantes porque sin salir del entorno de técnicas de geoproceso típicas de un sistema de información geográfica, tenemos la posibilidad de analizar y extraer información de los ficheros LAS/LAZ, con multitud de parámetros para afinar los resultados [4,5]. Es cierto que ni el propio LASTools ni QGIS, tienen potentes herramientas de visualización y el único visor disponible con cierta versatilidad es LASview. Esta carencia la solventamos con el uso de otros programas que han desarrollado un interface gráfico mucho más potente.

Es en este ámbito de la visualización 2D y 3D de la información LIDAR en donde destaca FUGROVIEWER, con un interface amigable y sencillas herramientas de edición. En este estudio ha sido utilizado básicamente para la visualización de nubes de puntos filtradas procedentes de QGIS, para la exportación de puntos filtrados y para la interpretación de las secciones transversales de parcelas de viñedo.

En relación al software CloudCompare, destacar su idoneidad para el objetivo de esta comunicación. Si bien es un programa que surgió para detectar errores de escaneo y solapamiento de nubes de puntos en entornos industriales y/o arquitectónicos, ha demostrado disponer de potentes herramientas de uso genérico para multitud de procesos de análisis territorial. Y en particular, la detección de cultivos como el viñedo, se adapta perfectamente a alguno de sus procesos de análisis de datos LIDAR.

4. Conclusiones

Del trabajo desarrollado, podemos extraer las siguientes conclusiones:

- La caracterización del viñedo dentro de una zona típicamente vitícola puede realizarse analizando la información suministrada por los datos LIDAR aerotransportados.
- Las soluciones software a utilizar para cada propósito no suelen ser únicas, sino más bien una combinación de herramientas de diversos programas que, bien gestionadas, permiten extraer el máximo de información de las nubes de puntos.
- Desde ficheros LIDAR que contienen millones de puntos, somos capaces de caracterizar parcelas concretas y viñedos concretos, discriminando la información de nos interesa y rechazando el resto, y todo ello, con interface amigables que exigen eso sí un adecuado control de parámetros de ajuste.
- Las herramientas freeware y de código abierto se adaptan bien a los objetivos básicos de análisis territorial que se emprenden comúnmente, y la asociación de QGIS-LASTools-

FUGROVIEWER-CloudCompare, actualmente se muestra como una excelente combinación para el análisis del viñedo en una zona vitícola de La Rioja.

5. Agradecimientos

Al Instituto Geográfico Nacional de España y al Gobierno de La Rioja, por poner a disposición del público en general este tipo de materiales con información LIDAR de alta precisión.

Referencias

1. HALL, Andrew. Remote sensing applications in viticulture: recent advances and new opportunities. En Proceedings of the 11th International Terroir Congress. 2016. p. 358-363.
2. KHOSRAVIPOUR, Anahita, et al. Generating pit-free canopy height models from airborne lidar. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2014, vol. 80, no 9, p. 863-872.
3. Zhang W, Qi J, Wan P, Wang H, Xie D, Wang X, Yan G. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. Remote Sensing. 2016; 8(6):501.
4. MOSQUERA GUILCAPI, Blanca Carlota. Cartografía de actividades extractivas a partir de datos LíDAR. 2017. Tesis de Maestría. Universitat Politècnica de Catalunya.
5. VERCHER, Gil; BERNARDO, José. Estudio de abandono de parcelas agrícolas mediante datos LIDAR. 2019. Tesis Doctoral.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Comportamiento de variedades de vid resistentes a enfermedades fúngicas en la comarca del Somontano

José Casanova-Gascón[1,*], Carla Ferrer-Martín[1], Antonio Bernad-Eustaquio[1], Andrea Elbaile-Mur[1], José M. Ayuso-Rodríguez[2], Sergio Torres-Sánchez[2], Adrián Jarne-Casasús[2], Pablo Martín-Ramos[1]

[1] Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca; jcasan@unizar.es.
[2] Viñas del Vero S.A., Carretera Nacional 123 (km 3,7), 22300 Barbastro, Huesca.

Resumen: La vid es altamente susceptible a numerosas enfermedades de origen fúngico, cuya incidencia y severidad está aumentando como consecuencia del Cambio Climático. Para combatirlas, se ha venido recurriendo al uso de ingentes cantidades de fitosanitarios, los cuales conllevan importantes costes económicos y medioambientales y, en muchos casos, generan resistencias rápidamente. Según datos de Eurostat, la aplicación de fitosanitarios por hectárea y año en viticultura es la más alta de las utilizadas en producción agraria. Las nuevas variedades de vid resistentes a enfermedades fúngicas (denominadas PIWI) constituyen una de las líneas de investigación más activas sobre material vegetal en viticultura, y una solución viable para dar respuesta a las exigencias de la Directiva europea 2009/128/CE. En el presente trabajo se ha realizado un seguimiento de la evolución e impacto de las tres enfermedades principales (mildiu, oídio y botritis) en parcelas de la D.O. Somontano, comparando plantas PIWI (*sauvignon kretos*, *souvignier gris* y *muscaris*) con variedades convencionales como *sauvignon blanc* en condiciones reales de cultivo durante tres campañas (2016-2018). Se han estudiado los principales caracteres ampelográficos de cada variedad, y se ha realizado un seguimiento semanal en campo del desarrollo de cada enfermedad, relacionándolo con las variables climáticas. Independientemente de las condiciones climáticas (una de las campañas fue lluviosa, y las otras dos correspondieron a años secos, con diferencias en la distribución de las lluvias), las tres variedades PIWI apenas han presentado afección, demostrando una alta resistencia para mildiu y oídio, e incluso para podredumbre gris. En base a los resultados de producción, pese a la juventud de la plantación, se ha observado el excelente potencial de la variedad *sauvignon kretos*. No obstante, en relación con los análisis de calidad del vino obtenido en microvinificaciones a partir de estos híbridos en la segunda y la tercera campaña, el de la variedad *muscaris* es el que parece presentar mejores propiedades organolépticas. Desde un punto de vista medio-ambiental, además de contribuir a la sostenibilidad de las bodegas, estas variedades resistentes pueden dar respuesta a la demanda de aquellos consumidores que quieren productos *residuo-cero* o de los partidarios de productos ecológicos ajustados a la normativa europea.

Palabras clave: *Plasmopara viticola, Uncinula necator, Botrytis cinerea*, *Vitis* spp., resistencia, PIWI

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3347

1. Introducción

La vid (*Vitis vinífera* L.) es altamente susceptible a numerosas enfermedades de origen fúngico, principalmente oídio (*Uncinula necator*), mildiu (*Plasmopara vitícola*) y podredumbre gris (*Botrytis cinerea*) [1]. La presión de estas enfermedades está obligando a recurrir al uso de enormes cantidades de fitosanitarios, que comportan importantes costes económicos y medioambientales y en muchos casos generan resistencias rápidamente. Según datos de Eurostat, la aplicación de fitosanitarios por hectárea y año en viticultura es la más alta de toda la producción agraria [2], pues en algunos casos el número de aplicaciones por campaña es superior a 12 [3], llegando a 16 aplicaciones en momentos de elevadas presiones de enfermedad.

La Directiva europea 2009/128/CE establece en su artículo 14 las bases para la utilización de pesticidas de modo sostenible, destacando como aspecto fundamental la reducción de su uso, particularmente el cobre en viticultura [3]. En la legislación española se hace referencia al uso sostenible de los productos fitosanitarios en el RD 1311/2012. Una de las estrategias más prometedoras pasa por un tratamiento de prevención basado en el desarrollo de variedades resistentes a hongos [3].

La selección asistida con marcadores, combinada con retrocruzamientos con múltiples variedades de *V. vinífera*, ha permitido el desarrollo de variedades de uva resistentes a hongos con dos genes de resistencia y un porcentaje significativo (más del 85%) de *V. vinifera* en su pedigrí: las conocidas como "PIWI" (del alemán *Pilzwiderstandsfähig*, "resistente a enfermedades fúngicas"), y que a día de hoy son aceptadas como *V. vinifera* en los catálogos europeos [4]. En el Reglamento (UE) 1308/2013 se recoge la utilización de estas variedades PIWI para la elaboración de vinos, siempre y cuando estén previamente inscritas en el Registro de variedades del país pertinente.

La resistencia de estas variedades varía con la genética del cultivar y la localización [5]. Por tanto, la mayoría de los cultivares de variedades resistentes muestra cierta susceptibilidad a diferentes patógenos, incluidos oídio, mildiu, botritis, pudrición negra y antracnosis. Estas enfermedades son controladas generalmente con fungicidas a base de azufre [3,6] o con formulaciones basadas en cobre, pero con un número de aplicaciones mucho menor que en variedades tradicionales [7]. En un estudio realizado en 6 países europeos, que incluyó 183 variedades PIWI, se obtuvo como resultado una reducción del número de tratamientos fungicidas entre un 73% y un 82% para grados de presión de la enfermedad bajo y medio, respectivamente [3]. Un resultado similar fue también obtenido en un estudio en el que participaban 65 viñedos alemanes bajo manejo ecológico, cuyos productores informaron que pulverizaban las variedades resistentes a hongos unas 3,8 veces de promedio por campaña [8].

Se espera que las PIWI supongan un ahorro de costes muy importante en el control anual de las enfermedades: en Francia, se ha estimado que la producción con variedades resistentes podría llegar a disminuir a la mitad los costes de producción [9]; y en California se ha previsto que la utilización de variedades resistentes a oídio podría suponer un ahorro de hasta 48 millones de dólares por año en la producción de uva de mesa, pasas y vino [10].

Respecto al rendimiento, las variedades resistentes generalmente son más vigorosas y muestran mayor productividad [3,11-13].

Pese a las ventajas preconizadas, las variedades resistentes a hongos se encuentran prácticamente ausentes del mercado vitivinícola de la mayoría de los países productores por la injustificada desconfianza tanto sobre su utilización [8] como sobre la calidad enológica del vino. Esta surgió a cuenta del hecho de que las PIWI portan genes no-*V. vinifera* (incluso a niveles bajos), que llevó a la presunción de que podían dan lugar a vinos de menor calidad [10]. Actualmente, existen estudios que demuestran que la calidad de los vinos procedentes de variedades resistentes a hongos es generalmente equivalente a los producidos a partir de *V. vinifera* [3,7].

En España, los únicos campos de ensayo experimentales con PIWI, además del de Viñas del Vero –en el que se ha realizado el presente trabajo–, son uno existente en Olite y otro en el Valle

de Baztán en Navarra [14]. Todos ellos fueron plantados en 2015, y no se han hecho públicos datos de producción y/o uso de fitosanitarios.

En la presente comunicación se recogen los resultados para tres variedades PIWI (*sauvignon kretos*, *souvignier gris* y *muscaris*) durante las campañas 2016-2018, en un estudio pionero en nuestro país.

2. Material y métodos

2.1. Localización

El viñedo experimental se localiza en una parcela propiedad de Viñas del Vero S.A., en el término municipal de Barbastro, partida 'Las Almunietas'. Las coordenadas UTM de la parcela son: X =261706, Y=4652417, huso 31.

Respecto a la edafología, en Badía, *et al.* [15], se recoge un estudio detallado del suelo de la zona de 'Las Almunietas', concretamente el que hace referencia a 'Torre Fierro'. Esta zona está formada por gipsisoles, suelos desarrollados sobre margas yesíferas que presentan una acumulación secundaria de yeso en formas pulverulenta y/o lenticular a cierta profundidad. Son suelos de texturas francas, pedregosidad escasa, capacidad de retención de agua disponible moderada y capacidad de intercambio catiónico baja.

2.2. Material vegetal

El material vegetal que conforma el estudio son tres variedades PIWI blancas y una variedad control (*sauvignon blanc*). La primera variedad PIWI, *sauvignon kretos* (C.v. 76-026), fue obtenida por el Instituto de Genómica Aplicada de Udine (Italia), del cruce *sauvignon blanc* × 20/3, y registrada en 2015 en el Registro Nazionale delle Varietà di Vite [16]. La segunda variedad PIWI fue *souvignier gris* (C.v. FR 392-83), se obtuvo por el Staatliches Weinbauinstitut Freiburg (Alemania) en 1983, por cruce de *cabernet sauvignon* (*sauvignon blanc* × *cabernet franc*) con *bronner* (*merzling* × *Gm 6494* (*zarya severa* × *st. laurent*)). Registrada en la German Federal Office of Varietal Registration (Bundessortenamt) en 2008 [17] y en Francia en el "Catalogue des variétés de vigne" [18]. La tercera variedad PIWI, *muscaris* (C.v. FR 493-87) se obtuvo en 1987 también por el Staatliches Weinbauinstitut Freiburg del cruce de *solaris* × *muscat*, y no se conocen datos de registro [19]. Las plantas del estudio están certificadas por el vivero Vivai Cooperativi Rauscedo (Rauscedo, Italia) en el caso de *sauvignon kretos*, y por el vivero Pepinières Viticoles Mercier (Vix, Francia) para las otras dos variedades. Se han empleado 224 cepas de variedades PIWI: 69 de *sauvignon kretos*, 76 de *souvignier gris* y 79 de *muscaris*, todas ellas plantadas durante el mes de abril de 2015 en forma de planta injerto, sobre patrón SO4. Para propósitos de comparación, se ha utilizado como variedad testigo y tratada (183 plantas) *sauvignon blanc* (clon 376), injertado en SO4.

2.3. Diseño experimental y técnicas culturales

Las variedades a estudiar se distribuyeron en dos parcelas contiguas, con filas de plantas testigo ubicadas a ambos lados de las resistentes y seguidamente las filas de *sauvignon blanc* tratadas. Las cepas están plantadas en doble fila de unos 40 m, con marco de plantación de 2,8 × 0,9 m (densidad de plantación de 3968 plantas/ha), utilizando un sistema de formación con estructura de soporte y vegetación libre dirigida a mano (sistema Cortina), con una altura de formación de 1,4 m.

Las plantas fueron sometidas a unas condiciones exigentes respecto a rendimiento, forzando algunos aspectos de manejo (riego, hierba, *canopy*) para evaluar realmente la resistencia de los cultivares experimentales.

El riego se realizó con mangueras de goteo integrado cada 75 cm y con un caudal de 4 L/h. Las mangueras están elevadas 50 cm sobre el suelo.

Todas las plantas (tanto de las variedades resistentes como testigo y tratadas) tuvieron que ser tratadas frente a la erinosis en la campaña 2016, por estar muy afectadas (al ser plantas jóvenes el efecto del ataque es mayor). Por lo demás, en las PIWI y en las filas testigo no se han aplicado tratamientos para plagas o enfermedades. Respecto a los fungicidas aplicados en las líneas tratadas, para mildiu se ha tratado con un fungicida preventivo (hidróxido cúprico) y uno sistémico (metalaxil + mancozeb); y para oídio con miclobutanil como fungicida preventivo, y con varios fungicidas sistémicos (bupirimato, tebuconazol y proquinazid).

2.4. Recogida de datos

El seguimiento climático se realizó mediante placas *"Moisture meter datalogger"* de Hobby Boards [20], con sensores de humedad en hoja y temperatura, situadas en la parcela de estudio, complementando las medidas con datos climáticos de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR).

Se realizó un seguimiento semanal en campo de todas las variedades desde marzo hasta septiembre para las tres campañas. Se han monitorizado los estados fenológicos conforme a las siguientes escalas: Código Eichhorn-Lorenz [21], Estados fenológicos de la vid [22] y la Codificación BBCH de los estadios fenológicos de desarrollo de la vid [23]. Se ha realizado también un seguimiento de los principales caracteres ampelográficos tomando 10 elementos de referencia y utilizando para ello la lista de descriptores de la Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV) para variedades de vid y especies *Vitis* [24]. Los descriptores utilizados han sido para hoja joven, hoja adulta, flor, racimo, baya, producción y enfermedad. La caracterización ampelográfica para la variedad *sauvignon blanc* se realizó sobre las líneas testigo.

Para la monitorización de enfermedades, cada semana se observó una muestra de 55 órganos elegidos al azar en cada bloque, y en su momento, 25 racimos. Para la evaluación de los parámetros relativos a la presencia y ataque de dichas enfermedades, se ha seguido la propuesta marcada por la Organización Europea y Mediterránea de Protección Vegetal (EPPO) en 2009. En ésta se establece una escala en base al porcentaje de área del órgano afectada por la enfermedad [25]. Para calcular el grado de ataque se ha utilizado la fórmula de Townsend-Heuberger, y para la evaluación de la eficacia del tratamiento (relación entre el grado de ataque en las cepas testigo frente a las tratadas), la fórmula de Abbott [26].

La vendimia se realizó de forma manual. En la campaña 2017 se realizó en una única fecha para las tres variedades (22 de agosto), mientras que en la campaña 2018 se repartió en dos fechas: 22 de agosto para *muscaris* y 3 de septiembre para *sauvignon kretos* y *souvignier gris*.

Para la evaluación del equilibrio de la planta entre producción y desarrollo se ha empleado el índice de Ravaz [27], en base a datos de peso de la cosecha y de peso de la madera de poda.

2.5. Vinificación

Se procesaron 200 kg de uva por variedad. Se realizó un prensado sin despalillar, con adición de enzima pectolítica (Pectazina, 3 g/100 kg) y metabisulfito potásico (30 ppm de SO_2), con un posterior desfangado de 24 h en frío. Tras el trasiego, se realizó el aporte de levaduras (*Saccharomyces bayanus* a 20 g/hL), y se procedió al seguimiento y control de la fermentación alcohólica, terminando esta al cabo de 13 días (*muscaris*), 20 días (*sauvignon kretos*) y 16 días (*souvignier gris*). Tras un trasiego final y sulfitado (metabisulfito, 4,5 g/hL), se procedió al análisis de los vinos terminados.

3. Resultados y discusión

3.1. Datos climáticos

Las temperaturas y precipitaciones medias mensuales para el periodo de estudio (marzo-septiembre) en las tres campañas se recogen en la Tabla 1. Las campañas 2016 y 2017 correspondieron a años secos (243,6 y 294,3 mm, respectivamente), si bien el 2016 presentó una distribución de lluvias más irregular; la campaña 2018 tuvo precipitaciones por encima de la media (499 mm).

Tabla 1. *Arriba*: temperaturas medias mensuales (°C); *abajo*: precipitaciones medias mensuales (mm) para las tres campañas.

Campaña	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
2016	9,3	12,5	16,1	21,6	24,9	24,0	21,4
2017	11,8	13,5	18,2	23,7	24,8	24,3	18,7
2018	8,9	13,4	17,1	22,0	25,6	25,2	22,2
Campaña	**Marzo**	**Abril**	**Mayo**	**Junio**	**Julio**	**Agosto**	**Septiembre**
2016	69,2	93,0	33,0	13,6	11,8	1,0	22,0
2017	109,4	34,0	45,4	47,8	23,3	7,0	27,4
2018	60,7	117,0	142,6	28,4	13,0	101,9	35,4

3.2. Fenología y ampelografía

Los resultados obtenidos en campo se ajustaron a lo establecido en las fichas varietales para la mayor parte de descriptores en las tres campañas. Las pequeñas diferencias detectadas, sobre todo en la campaña 2016, deben ser atribuidas a expresión de juvenilidad. En general, se observa que estas variedades tienen un comportamiento similar a las cultivadas en la D.O. Somontano y no presentaron problemas de adaptación.

3.3. Monitorización de enfermedades

3.3.1. Oídio

En la campaña 2016, y en concreto el 5 de julio, se observaron ataques muy leves en hoja en las variedades testigo y tratadas (en las resistentes no se produjo ataque). El ataque en racimo apareció la semana del 19 de julio (Figura 1*a*) y resultó significativo en las variedades testigo, en las que se alcanzó aproximadamente un 20% de ataque (en las variedades resistentes no se apreció racimo alguno afectado).

En la campaña 2017 no hubo ataque de oídio en las PIWI, pero sí en las variedades testigo y tratadas, tanto en hoja (Figura 1*b*) como en racimo (Figura 1*c*).

En la campaña 2018 no se detectó ataque en hojas de testigos, tratadas o PIWI, pero sí en racimos (Figura 1*d*). En *sauvignon kretos* se registró un bajo grado de ataque (un total de 13 anotaciones, todas con intensidad de ataque <25%) del 26 de julio al 16 de agosto; en *souvignier gris* el grado de ataque fue aún menor (6 anotaciones, todas con intensidad de ataque <25%) del 3 al 16 de agosto; y en *muscaris* fue más alto, con 20 anotaciones con intensidad de ataque <25% (del 3 al 16 de agosto) y sólo una en el rango de intensidad de ataque del 25-50% en la última medida (16 de agosto). Comparativamente, los grados de ataque en plantas testigo y tratadas fueron notablemente más altos.

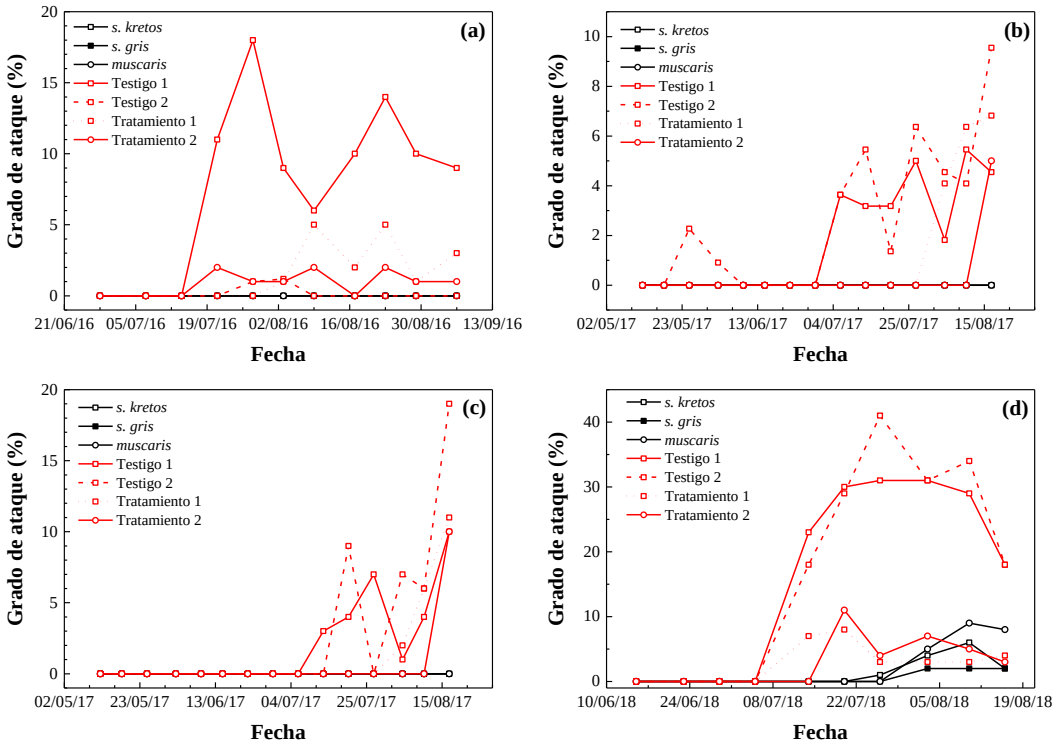


Figura 1. Evolución temporal del grado de ataque de oídio en: **(a)** campaña 2016 en racimo; **(b)** campaña 2017 en hoja; **(c)** campaña 2017 en racimo; y **(d)** campaña 2018 en racimo.

3.3.2. Mildiu

En la campaña 2016 se detectaron daños en hoja en todas las cepas. Las variedades resistentes presentaron un bajo grado de ataque, siendo las cepas testigo y tratadas las más afectadas. En cuanto a los daños en racimo, sólo se detectaron para las cepas testigo y tratadas: del 28 de junio al 12 de julio se observaron racimos totalmente destruidos antes de alcanzar el tamaño de baya guisante, seguido de otro ataque que afectó a racimos de mayor tamaño, en los cuales, con el paso de las semanas, se observó el desecamiento de los granos.

En la campaña 2017 no se detectaron daños en ninguna de las variedades PIWI, ni en las viñas tratadas ni en la variedad testigo 2. Anecdóticamente, se detectaron intensidades de ataque leves (<25%) en hoja para la variedad testigo 1 en la recogida de datos del 13 de julio (3 de 55 muestras, 5.77%). En racimo no se detectaron daños.

En el año 2018 sí se detectó ataque, tanto en hoja como en racimo. En cuanto al ataque en hoja, en *sauvignon kretos* se detectaron 22 casos, con intensidad de ataque <25%, entre el 15 de junio y el 5 de julio; en *souvignier gris* se detectaron un total de 17 casos, todos con intensidad de ataque <25%, entre el mismo periodo; y en *muscaris* se detectaron un total de 15 casos, con intensidad de ataque <25%, también entre el 15 de junio y el 5 de julio. En cuanto a los daños en racimo, en *sauvignon kretos* se detectó un único caso, con intensidad de ataque <25%, el 5 de julio; en *souvignier gris* se detectaron un total de 7 casos, todos con intensidad de ataque <25%, entre el 15 de junio y el 5 de julio; y en *muscaris* se detectaron dos casos, con intensidad de ataque <25%, entre el 29 de junio y el 5 de julio. Los daños en plantas testigo y tratadas fueron más altos, llegando a un 60% de grado de ataque.

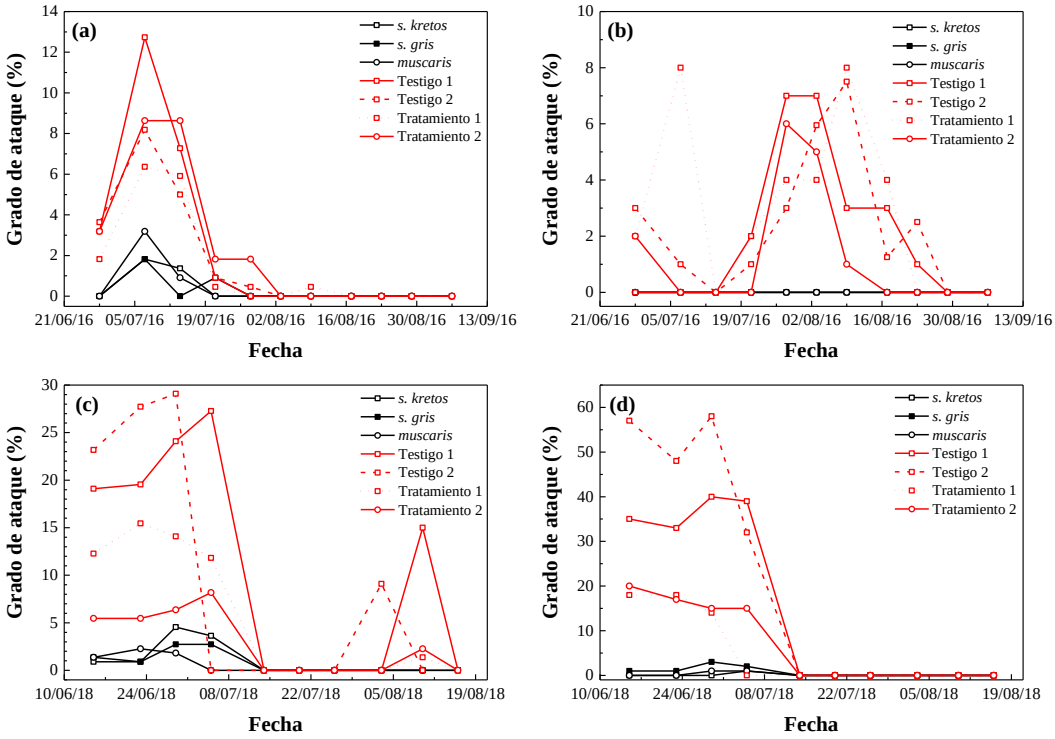


Figura 2. Evolución temporal del grado de ataque de mildiu en las campañas 2016 (*arriba*) y 2018 (*abajo*), en hoja (*izquierda*) y en racimo (*derecha*).

3.3.3. Podredumbre gris

En la campaña 2016 (Figura 3*a*) se detectaron ataques a finales del mes de agosto en las cepas testigo y tratadas, sin detectarse ningún síntoma en las PIWI. Los racimos que presentaron daño fue en su mayoría con un 25-50% de intensidad de ataque. De forma similar, en la campaña 2017 (Figura 3*b*) no hubo ataque en las variedades PIWI. En las cepas testigo y tratadas se detectaron daños puntuales en racimo el 10 y el 17 de agosto (con intensidad de ataque de hasta el 50%), que afectaron a un porcentaje inferior al 4% de los racimos muestreados. En la campaña 2018 (no mostrada) no se detectaron daños por podredumbre gris en ningún caso (ni en plantas testigo, ni en tratadas, ni en las PIWI).

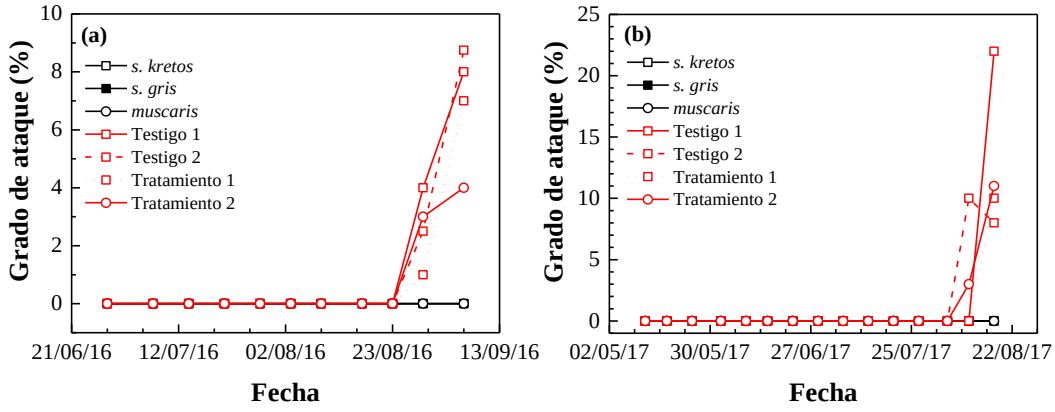


Figura 3. Evolución temporal del grado de ataque de podredumbre gris en las campañas 2016 **(a)** y 2017 **(b)**.

3.4. Eficacias de tratamiento

En la campaña 2016, las eficacias de tratamiento frente a mildiu fueron muy bajas (18%) en hoja y algo superiores en racimo (47%); en el caso del oídio, se observaron eficacias medias de tratamiento superiores al 50%, tanto en hoja como en racimo. En la campaña 2017, las eficacias de tratamiento contra oídio fueron superiores al 60% en hoja (alcanzándose un 93% en la parcela 2). En la campaña 2018, la eficacia media de tratamiento frente a mildiu fue próxima a un 65%, tanto en hoja como en racimo; y la eficacia media contra oídio en racimo fue de hasta un 82%.

3.5. Producción e índices de Ravaz

En base a los datos de producción y de poda, en la Tabla 2 se recogen los índices de Ravaz calculados. Los valores recomendados son 5-7 si se quiere evitar desequilibrios en el viñedo, si bien otros autores plantean un rango más amplio (5-12), en función del cultivar, carga, dosis de riego y sistemas de conducción [28,29]. Valores muy altos, por encima de 10, nos indican que la viña ha producido mucha uva para su vigor, es decir, que presenta un desajunte por exceso de producción o defecto de vigor. Por el contrario, valores por debajo de 3 nos indicarían un vigor excesivo del viñedo, es decir, una baja productividad para esas condiciones de fertilidad. Por tanto, se deduce que para las dos campañas con datos de producción (2017 y 2018), se produjeron desequilibrios importantes para *souvignier gris* en 2017 y *muscaris* en 2018, si bien pueden justificarse por la juventud de la plantación.

Tabla 2. Datos de producción y poda, e índices de Ravaz calculados.

Variedad	Campaña 2017			Campaña 2018		
	Producción (kg/cepa)	**Peso poda (kg/cepa)**	**Índice de Ravaz**	**Producción (kg/cepa)**	**Peso poda (kg/cepa)**	**Índice de Ravaz**
sauvignon kretos	3,50	0,86	4,05	3,27	0,80	4,10
souvignier gris	2,03	0,15	13,67	2,27	0,49	4,62
muscaris	1,48	0,17	8,62	2,01	0,12	16,41

3.6. Valores iniciales de los mostos

Los resultados de las analíticas realizadas a los mostos a la entrada a la bodega (22/08/2017 para las tres PIWI; 22/08/2018 para *muscaris*, 03/09/2018 para *sauvignon kretos* y *souvignier gris*) se recogen en la Tabla 3. El pH y grado alcohólico probable se encuentra en los datos medios de otras variedades cultivadas en el territorio, aunque la variedad *muscaris* alcanza un grado alcohólico muy alto y una acidez total demasiado baja. La variedad *souvignier gris* es la única que manifiesta deficiencias en el nitrógeno fácilmente asimilable, lo que plantearía problemas en la fermentación, si no se corrige.

Tabla 3. Valores iniciales de los mostos en las campañas 2017 y 2018 para las tres variedades PIWI.

Variable	*sauvignon kretos*		*souvignier gris*		*muscaris*	
	2017	**2018**	**2017**	**2018**	**2017**	**2018**
Acidez total (g/L)	6,61	6,1	6,08	5,5	3,79	3,9
pH	3,14	3,16	3,35	3,38	3,15	3,71
Grado alcohólico probable	12,9	13,66	14,3	14,96	16,2	15,60
NFA	223	100	190	84	165	224

NFA: nitrógeno fácilmente asimilable

3.7. Resultados de la vinificación

Los vinos obtenidos se sometieron a un análisis sensorial en el Laboratorio de análisis del aroma y enología (LAAE) de Zaragoza. El vino resultante de la variedad *muscaris* –con descriptores de almendra amarga, fruto seco, terpénico en alta intensidad– fue el que recibió una mejor acogida en ambos años. El de *sauvignon kretos* puede llegar a tener una aceptación similar al de la variedad estándar (*sauvingnon blanc*) con solo modular la acidez y algunas notas desagradables, objetivo alcanzable tras realizar pruebas de vinificación con distintos estados de maduración. En cuanto al vino de la variedad *souvignier gris*, los resultados no fueron concluyentes: si bien el vino de la campaña 2017 tuvo una aceptación muy baja, su aceptación en la cata realizada para la microvinificación de la campaña 2018 fue buena. En los tres casos se destacó una gran intensidad aromática de los vinos, con aromas poco relacionados con alimentos.

4. Conclusiones

De la comparación de los resultados obtenidos para cada una de las enfermedades y variedades con las fichas varietales de éstas, se ha podido concluir de forma general que las tres variedades PIWI ensayadas muestran resistencia alta para mildiu, oídio e incluso para podredumbre gris (para la que se establecía un nivel medio de resistencia en las fichas varietales). La variedad *sauvignon kretos* ha exhibido un rendimiento de cepa superior al control, mientras que *souvignier gris* y *muscaris* presentaron rendimientos menores. No obstante, la variedad *muscaris* puede ser la más interesante cara a producción a escala piloto, por su buen perfil organoléptico. Estas variedades plantean una alternativa de producción en entornos sometidos a presión fúngica y pueden ocupar el nicho de mercado de consumidores que valoran la reducción de fitosanitarios en la viticultura.

Referencias

1. Galet, P. *Précis De Pathologie Viticole*. 3 ed.; Imprimerie JF Impression: Montpellier, France, 1999; p 296.
2. Piwi-International. **2016**, *2616*.
3. Rousseau, J.; Chanfreau, S.; Bontemps, É. *Les Cépages Résistants and Maladies Cryptogamiques*. Groupe ICV: Bordeaux, France, 2013; p 228.
4. Sivcev, B.; Sivcev, I.; Rankovic-Vasic, Z. Natural process and use of natural matters in organic viticulture. *Journal of Agricultural Sciences, Belgrade* **2010**, *55*, 195-215.
5. Pavloušek, P.; Kumšta, M.; Mateiciucová, P. Adaptation of New Resistant Grapevine Varieties to the Terroir in the Czech Republic. In *X Congrès Internationaux des Terroirs Vitivinicoles*, Society of International Terroir Experts in vitiviniculture: Tokaj-Eger, Hungary, 2014; pp 1-5.
6. Siegfried, W.; Temperli, T. Piwi-Reben im vergleich—ein zwischenbericht. *Schweiz. Z. Obst Weinbau* **2008**, *17*, 6-9.
7. Van der Meer, M.; Weibel, F.; Levite, D.; Häseli, A.; Vombach, D. Acceptation des vins de cépages résistants par les consommateurs. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture* **2010**, *42*, 147-150.
8. Becker, A. Piwis in der Praxis. *Schweiz. Z. Obst Weinbau* **2013**, *3*, 4-7.
9. Galbrun, C. Etude Inra - Comment réduire ses coûts de production de 50%. https://www.reussir.fr/vigne/comment-reduire-ses-couts-de-production-de-50
10. Fuller, K.B.; Alston, J.M.; Sambucci, O.S. The value of powdery mildew resistance in grapes: Evidence from California. *Wine Economics and Policy* **2014**, *3*, 90-107.
11. Reynolds, A.G.; Vanden Heuvel, J.E. Influence of Grapevine Training Systems on Vine Growth and Fruit Composition: A Review. *American Journal of Enology and Viticulture* **2009**, *60*, 251-268.
12. Barthe, C. Impact de la charge fruitière sur la maturité et la qualité du raisin chez le Seyval blanc et le Vandal-Cliche, deux cépages hybrides cultivés au Québec. Université Laval, Québec, Canada, 2015.
13. Sun, Q.; Sacks, G.; Lerch, S.; Vanden Heuvel, J.E. Impact of Shoot Thinning and Harvest Date on Yield Components, Fruit Composition, and Wine Quality of Marechal Foch. *American Journal of Enology and Viticulture* **2011**, *62*, 32-41.

14. Lissarrague, J.R.; Baeza, P.; Peiro, E.; Ayuso, J.M.; Cibriain, F.; Blanco, J.A.; Villalba, P. Híbridos resistentes a mildiu-oidio: la apuesta por la sostenibilidad y el respeto medioambiental de VCR. *Olint* 2016, pp 6-14.
15. Badía, D.; Cuchí, J.; Martí, C.; Casanova, J. *Los suelos de los viñedos en la D.O. Somontano*. Prensas Universitarias de Zaragoza: Zaragoza, Spain, 2006; Vol. 8, p 199.
16. Morgante, M.; Testolin, R. Nuovi vitigni resistenti alle malattie. In *Quaderni Tecnici VCR*, Rauscedo, V.C., Ed. Italia, 2016; Vol. 15, p 40.
17. Pritchard, D. Souvignier gris (originally known as Fr. 392-83). http://www.winegrowers.info/varieties/Vine_varieties/Souvignier%20gris.htm
18. Bonnet, P.; Lacombe, T. Le catalogue des vignes cultivées en France. http://plantgrape.plantnet-project.org/es/nouvelles
19. Pritchard, D. Muscaris (originally known as Fr. 493-87). http://www.winegrowers.info/varieties/Vine_varieties/Muscaris.htm
20. Vickery, E. Hobby boards moisture meter datalogger. Instruction manual and technical specifications. Hobbyboards, Ed. EEUU, 2012; p 14.
21. Eichhorn, K.W.; Lorenz, D. *Phaenologische Entwicklungsstadien der Rebe: Anwendungstermine d. Pflanzenschutzmittel ; Sonderdr. aus "Der deutsche Weinbau"*. BASF: 1978.
22. Baillod, M.; Baggiolini, M. Les stades repères de la vignee. *Revue suisse de Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **1993**, *25*, 7-9.
23. Lorenz, D.; Eichhorn, K.; Bleiholder, H.; Klose, R.; Meier, U.; Weber, E. Phenological growth stages of the grapevine (Vitis vinifera L. ssp. vinifera)-Codes and descriptions according to the extended BBCH scale. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **1995**, *1*, 100-103.
24. OIV. Lista de descriptores OIV para variedades de vid y especies *vitis*. 2º ed.; vin, O.I.d.l.v.e.d., Ed. Paris, 2001; p 179.
25. Townsend, G.R.; Heuberger, J.W. Methods for estimating losses caused by diseases in fungicide experiments. *The Plant Disease Reporter* **1943**, *24*, 340-343.
26. Abbott, W.S. Abbott's formula. *Journal of Econonomic Entomology* **1925**, *18*, 267-268.
27. Vasconcelos, M.C.; Castagnoli, S. Leaf Canopy Structure and Vine Performance. *American Journal of Enology and Viticulture* **2000**, *51*, 390-396.
28. Smart, R.; Robinson, M. *Sunlight into wine: a handbook for winegrape canopy management*. Winetitles: Adelaide, Australia, 1991; p 88.
29. Matthews, M.A. *Terroir and other myths of winegrowing*. University of California Press: Oakland, California, 2015; p xii, 308 pages.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Desarrollo de prototipo de membrana para la captación de gas amoniaco en la atmósfera de granjas

María Soto-Herranz[1], Mercedes Sánchez-Báscones[1], Diego Conde-Cid[1] Juan Manuel Antolín[1]

[1] E.T.S.I.A. Universidad de Valladolid, Avenida de Madrid, 44. Palencia, 34004, España; m.sotoh16@gmail.com

Resumen: El sector agroganadero es responsable de multitud de gases emitidos a la atmósfera, como el amoniaco, producido en la descomposición de la urea y el ácido úrico contenidos en las excretas. Este gas sigue rebasando su techo de emisión de 365,0 Gg año tras año. Entre otros problemas, el NH_3 es capaz de formar aerosoles, que afectan al sistema respiratorio de las personas. Por ello, es importante reducir su concentración en el aire. Este trabajo, plantea la reducción de la concentración de NH_3 en la atmósfera de una granja de porcino mediante una tecnología de membranas hidrófobas de ePTFE. Se compara con la reducción obtenida a escala de laboratorio. A lo largo de 77 días de funcionamiento continuo en granja, se ha alcanzado una recuperación máxima de NH_3 de 7730,03 mg/L. En laboratorio, trabajando en discontinuo, se alcanza un máximo de emisión en 63 días, con un valor de recuperación de 3905,83 mg/L. El dispositivo propuesto funciona adecuadamente retirando NH_3 del aire y recuperándolo en forma de sal de amonio. La conductividad eléctrica (CE) ha demostrado ser un parámetro útil para la medida indirecta de la concentración de amonio en solución ácida.

Palabras clave: recuperación de amoniaco, purín porcino, membrana e-PTFE, membrana permeable al gas, sulfato de amonio.

1. Introducción

La Unión Europea mediante la Directiva de Techos 2001/81/CE (EU, 2001) [1], fija unos límites máximos para las emisiones de gases a todos Estados miembros a partir de 2010 con el objetivo de atenuar la contaminación atmosférica. En este sentido, se ha realizado una revisión del protocolo de Gotemburgo de 2012 y de la Directiva de Techos, implantando unos niveles límite para los años 2020 y 2030. En el caso del amoniaco, se han alcanzado valores de 378,7 y 375,3 Gg en 2005 y 2012 respectivamente, con una previsión para 2020 de 396,3, siendo el techo establecido por la UE de 365,0 Gg para 2020 y de 393,7 Gg para 2030. El sector agroganadero es uno de los mayores contribuyentes a las emisiones de amoniaco (NH3) [2] debido a la mala gestión de los residuos. En España, según el Inventario Nacional de Emisiones (1990-2015), las actividades agrícolas fueron responsables del 96% de las emisiones de amoniaco [3]. La Directiva 2016/2284/ UE [4] exige a España reducir un 3% el techo de emisión de amoniaco para 2020-2029 y un 16% para el año 2030. El problema del amoniaco radica en que puede dar lugar a la formación de partículas (PM 2.5) que atacan al sistema cardiovascular de las personas [5], acidifican suelos, contaminan con nitratos las aguas subterráneas y superficiales [6] y causan eutrofización [7].

Así mismo, en el ámbito agrícola interesa conservar y recuperar el N debido al alto coste de los fertilizantes comerciales nitrogenados [8]. Por ello, es imprescindible la aplicación de las Mejores Técnicas Disponibles con objeto de reducir las emisiones de amoniaco a la atmósfera, al

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3428

mismo tiempo que contribuyan a recuperar el N de los residuos ganaderos por medio de la gestión del estiércol, estrategias de alimentación del ganado y sistemas de estabulación.

Entre las diversas técnicas empleadas para capturar el amoniaco, la aplicación de membranas permeables a los gases (GPM) se ha convertido en una de las más óptimas, ya que permite alcanzar ese doble objetivo planteado sin necesidad de añadir aditivos [9] y empleando poca energía [10]. Especialmente, se utilizan membranas de politetrafluoroetileno expandido (ePTFE), debido a que poseen una menor resistencia de transferencia, hidrofobicidad, resistencia orgánica y estabilidad química con soluciones ácidas [11, 12].Este tipo de tecnología ha sido ampliamente utilizada en el tratamiento directo de la fase líquida de purines [8, 13, 14] mientras que, los estudios sobre su aplicación para el tratamiento de amoniaco en fase gaseosa han sido muy escasos [15, 16] quedando aún mucho por abordar. El sistema consiste en el flujo de gas amoniaco por difusión a través de la membrana, que al reaccionar con los protones libres del ácido sulfúrico que circula por su interior, forma iones de amonio no volátiles que se conservan en forma de sal de amonio líquida, la cual puede emplearse como fertilizante. El ácido sulfúrico se usa generalmente para capturar amoníaco debido a su coste más bajo entre los ácidos inorgánicos. Sin embargo, el proceso también es efectivo utilizando otros ácidos inorgánicos (nítricos, fosfóricos), ácidos orgánicos (cítricos, lácticos) y sus precursores [17]. En este sentido, el objetivo que se persigue con este trabajo es recuperar el amoniaco presente en la atmósfera de una granja de porcino a escala de granja y laboratorio mediante el uso de la tecnología de membranas permeables a los gases.

2. Materiales y métodos

2.1. Composición del prototipo de captura de amoniaco a escala piloto y experimental

El prototipo a escala piloto consiste en un contenedor metálico (3211 mm longitud x 1115 mm alto x 734 mm ancho) rectangular y cerrado. En su interior, se disponen 32 paneles metálicos (750 mm alto x 495 mm ancho x 50 mm de grosor) de forma vertical. Sobre cada uno de ellos, se sitúan aproximadamente 16 m de membrana tubular de ePTFE hidrófoba microporosa permeable al gas, en cuyo interior se atrapa el amoniaco. Teniendo en cuenta que se usaron aproximadamente 512 metros de membrana, con un diámetro externo de 4 mm, el área superficial total estimada en uso fue de 6,434 m^2. El dispositivo cuenta con un depósito que contiene 150 litros de ácido sulfúrico 1N, el cual se recircula por el interior de las membranas, reaccionando con el amoníaco para formar sulfato amónico. El dispositivo de granja estuvo en funcionamiento durante 77 días de forma continua en el interior de la nave donde se encontraban los animales y, al renovarse continuamente las excretas, provocaban una variación en la concentración de nitrógeno en el purín y, por tanto, en la cantidad de amoníaco emitido.

En las experiencias de laboratorio se empleó un recipiente herméticamente cerrado de dimensiones 40 x 25 x 15 cm, en cuyo interior se depositó 1 L de purín porcino como solución emisora. En este caso, se empleó 1 m lineal del mismo tipo de membrana de ePTFE utilizada en granja, con una superficie útil de 125,66 cm^2. El depósito de ácido sulfúrico 1N era de 1 litro de capacidad. El experimento de laboratorio tuvo una duración de 77 días en el que el purín no se renovó y, por tanto, todo el nitrógeno captado procedía del que inicialmente contenía.

2.2 Caracterización inicial del purín porcino.

Antes de iniciar los experimentos de granja y laboratorio, se tomó una muestra *in situ* de purín porcino en la nave de madres de gestación vieja de la explotación de San Pedro de Cansoles en Guardo (Palencia), donde iba a evaluarse el funcionamiento del prototipo piloto. Se trasportó a laboratorio en nevera portátil, manteniendo la muestra a 4°C. Se realizó un análisis completo de la muestra de purín (Tabla 1).

Tabla 1. Caracterización química del purín porcino de la nave de madres de gestación vieja.

H (%)	84,78 ± 0,30
MO (%)	63,51 ± 0,78
C/N	8,70
pH	8,17 ± 0,02
CE (mS/cm)	1154,83 ± 5,91
NT (mg/L)	6446,82 ± 202,85
N-NH_4 (mg/L)	2524,85 ± 147,01
P_2O_5 (mg/L)	8674,79 ± 243,47
K (mg/kg)	51984,41 ± 13614,85
Na (mg/kg)	9567,49 ± 3853,05
Ca (mg/kg)	9958,19 ± 162,94
Mg (mg/kg)	7464,34 ± 165,79
Cu (mg/kg)	124,28 ± 5,23
Fe (mg/kg)	962,76 ± 36,63
Mn (mg/kg)	212,57 ± 6,91
Zn (mg/kg)	369,73 ± 11,20
Cr (mg/kg)	4,42 ± 0,75
Ni (mg/kg)	8,10 ± 0,33
Pb (mg/kg)	1,60 ± 0,05

*Se representan los valores medios y desviaciones estándar obtenidos a partir de tres réplicas.

2.3.Metodología de trabajo

La toma de muestra de la solución secuestraste ácida, se realizó diariamente en ambos prototipos. Se analizan temperatura (°C), pH, CE y concentración de nitrógeno total TN ($mg \cdot L^{-1}$). Además, se toman medidas puntuales de gas NH_3 ($mg \cdot L^{-1}$) en la atmósfera de la granja con el equipo portátil Drager x-am 7000.

El pH y la temperatura se realizaron con un medidor de pH Crison GLP22 (Crison Instruments S.A., Barcelona, España). La conductividad eléctrica se determinó mediante un conductivímetro portátil. El análisis de nitrógeno total (TN) se realizó siguiendo el método Kjeldahl, mediante-destilación directa (Unidad de destilación de vapor automática UDK 140, Velp scientifica) y captura del destilado en tampón borato y posterior valoración con HCl 0,2 N [18].

En las excretas ganaderas en general y en el purín de porcino en particular (fuente emisora), el nitrógeno se encuentra en equilibrio en sus formas NH_3 y NH_4^+. El desplazamiento de ese equilibrio dependerá de factores como el pH y la temperatura. En lo que respecta a la solución secuestrante ácida (H_2SO_4 1N), su capacidad de captación de amoníaco es máxima a pH inferior a 2 [8]. Por ello, se mantuvo un control diario de pH de la solución ácida, manteniéndolo por debajo de 2 [8, 9, 10], añadiendo ácido sulfúrico al 95-98% en los casos en que fuera necesario.

3. Resultados y discusión

Evolución de la captura de amoniaco (N-NH_3) en experiencias de laboratorio y granja.

Con fin de dimensionar los parámetros de trabajo en granja, se realizaron pruebas previas en laboratorio con un volumen determinado de purín de porcino con 6200 mg/L de TN inicial. A escala de laboratorio, empleando un caudal de 20 L/d y trabajando en discontinuo, se obtuvo un máximo de recuperación de 3905,83 mg/L el día 63, estabilizándose hasta el día 77 (Figura 1). La

absorción por superficie de membrana calculada para los 77 días de funcionamiento fue de 3,649 $g \cdot m^2 \cdot d^{-1}$.

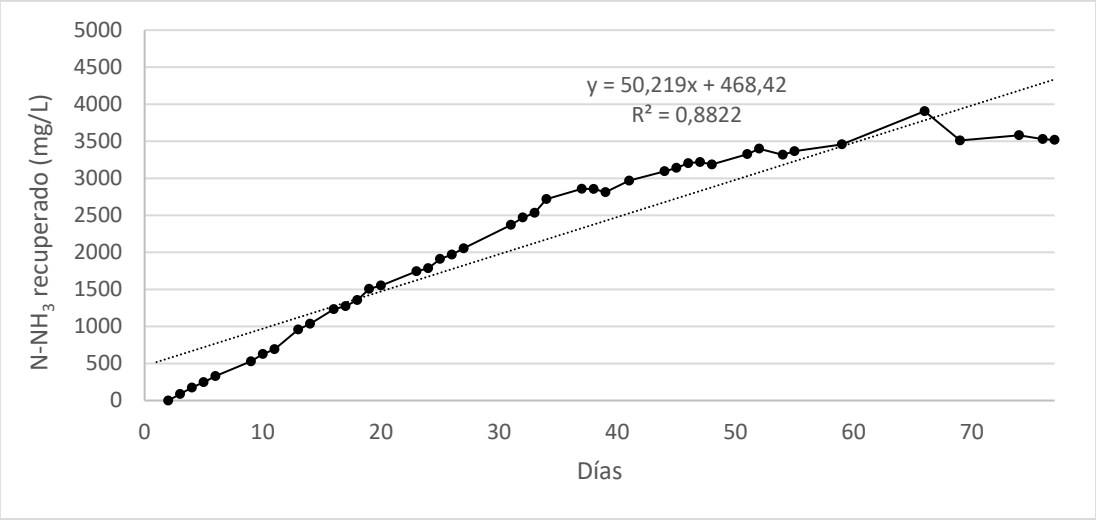


Figura 1. Evolución de la recuperación de N-NH_3 durante 77 días de funcionamiento en experiencias de laboratorio.

Asimismo, se realizó otro experimento a escala de laboratorio en el que se sustituyó el purín porcino de concentración de TN inicial de 6200 mg/L, por solución sintética (NH_4Cl, $NaHCO_3$ y allythiourea) con una concentración de TN inicial de 15000 mg/L como fuente emisora de amoniaco (datos no mostrados). En ese caso, se alcanzaron valores de recuperación de amoniaco de 12926 mg/L, recuperando el 99.2% de lo emitido. Esto parece indicar que, una mayor concentración de la solución emisora, contribuye a una mayor volatilización de NH_3, alcanzado valores de recuperación muy elevados, lo que podría demostrar que, la concentración de amoniaco en la atmósfera es un factor limitante en la recuperación. Resultados similares encontraron Rothrock et al. (2013) [19] a escala piloto empleando tratamientos con cal para favorecer la volatilización de amoniaco en cama de aves de corral.

En la granja se empleó un caudal de 38,9 L/d. La concentración de N-NH_3 total recuperada al final del período de 77 días fue de 7730,03 mg/L (Figura 2), siendo la concentración de N-NH3 promedio en atmósfera de 20 mg/L (ppm). La absorción por superficie de membrana calculada para ese periodo fue de 0,016 $g \cdot m^2 \cdot d^{-1}$. Entre las obligaciones empresariales, se exige el cumplimiento de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales [20]. En ella se indica que uno de los riesgos más peligrosos presentes en el ambiente de trabajo es la contaminación ambiental por productos químicos. En el sector porcino, se determinan como contaminantes, gases como el metano, el amoníaco y el sulfuro de hidrógeno. En el caso del amoniaco, el valor límite de exposición durante una jornada laboral de 8 h es de 20 ppm. Por ello, a nivel de granja, la atmósfera no debería presentar altas concentraciones de amoniaco y, por consiguiente, la recuperación de NH_3 mediante está técnica de membranas se vería condicionada.

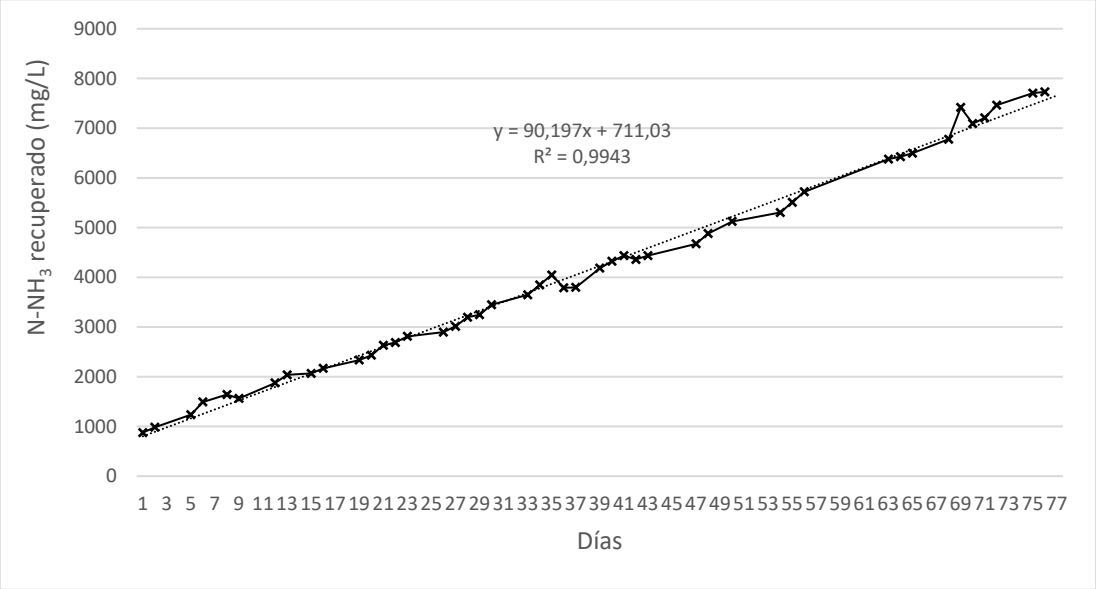


Figura 2. Evolución de la recuperación de N-NH_3 (mg/L) durante 77 días de funcionamiento del prototipo en granja.

3.1. Evolución de la conductividad eléctrica (CE) de la solución ácida en experiencias de laboratorio y granja.

Las figuras 3 y 4 representan los valores de conductividad eléctrica (CE) en solución ácida de experiencias de laboratorio y granja, respectivamente durante 77 días de funcionamiento. Se observa que los valores de conductividad eléctrica en ambos casos, disminuyen con el tiempo de funcionamiento.

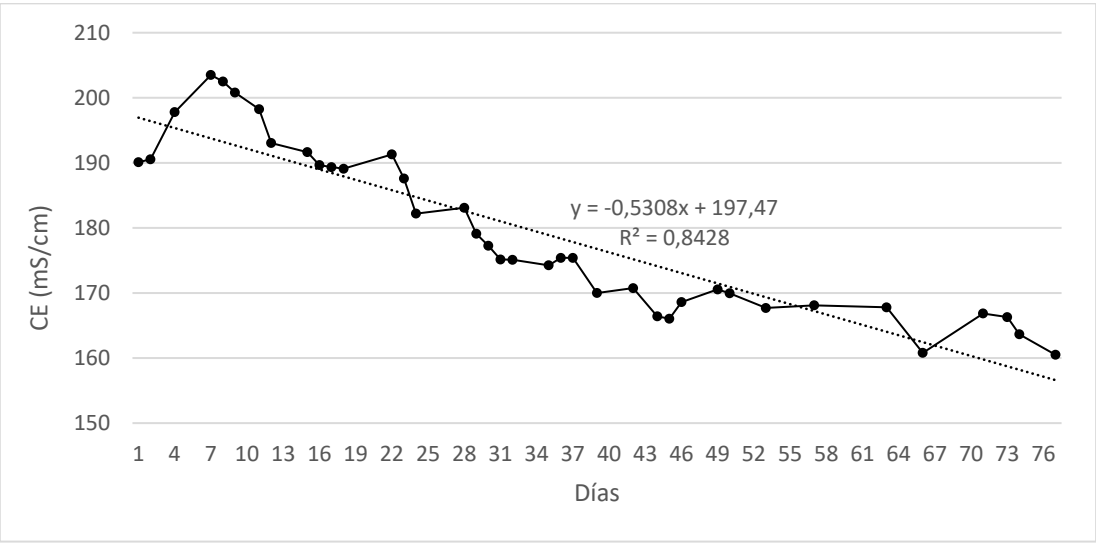


Figura 3. Evolución de la conductividad eléctrica (mS/cm) de la solución ácida durante 77 días de funcionamiento en laboratorio.

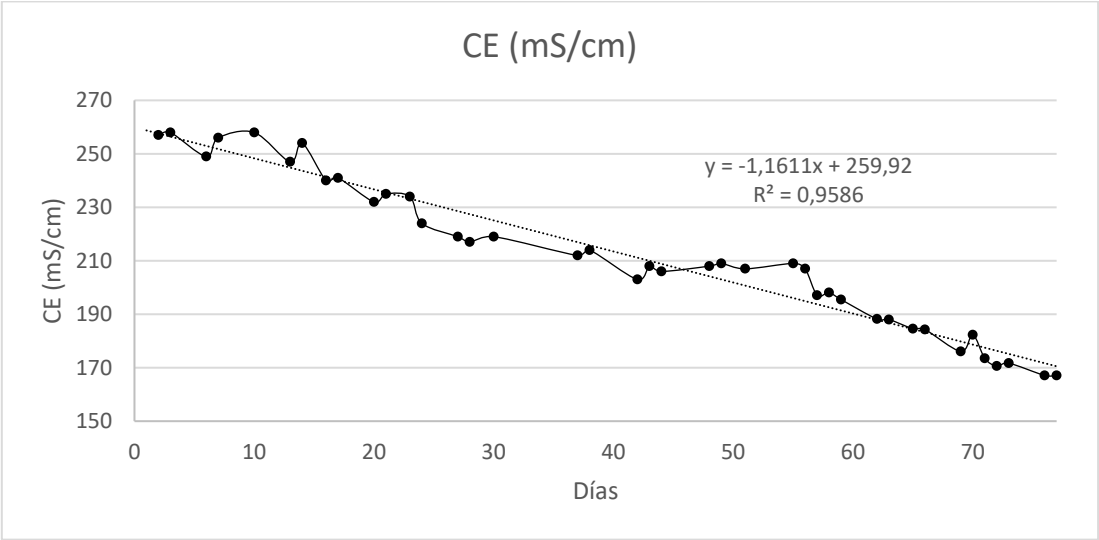


Figura 4. Evolución de la conductividad eléctrica (mS/cm) de la solución ácida durante 77 días de funcionamiento del prototipo en granja.

La conductividad eléctrica (CE) presenta una evolución inversa a la recuperación de amoniaco (N-NH_3). Se confirma al presentar valores de correlación r= - 0.94 y r = - 0.98 en experiencias de laboratorio y granja, respectivamente (Tabla 2). Esto indica una fuerte correlación negativa entre las variables "recuperación de N-NH_3" y "conductividad eléctrica". De este modo, se podría decir que, a medida que se captura amoniaco, se produce un incremento del contenido de sales de amonio no volátiles en solución ácida, responsables de la disminución de la conductividad eléctrica. Shcherbakov et al. (2009) [21] observaron que la asociación intermolecular influía en la CE del sistema amoniaco-agua, disminuyendo al aumentar la concentración de amoníaco en solución.

Tabla 2. Correlación entre las variables CE (mS/cm) y recuperación de N-NH_3 (mg/L).

	Experiencia granja		Experiencia laboratorio	
	CE (mS/cm)	N-NH_3 (mg/L)	CE (mS/cm)	N-NH_3 (mg/L)
CE (mS/cm)	1		1	
N-NH_3 (mg/L)	-0,977	1	-0,942	1

*Valores cercanos a r= 1 ó r= -1 indican fuerte correlación entre variables. Valores negativos indican correlación negativa entre variables y valores positivos, correlación positiva.

Asimismo, esta fuerte correlación entre la concentración de ión amonio en la solución ácida y la conductividad eléctrica, indica que la conductividad, podría emplearse como parámetro de fácil medida in situ para el seguimiento de la recuperación de amoníaco por la solución ácida, frente al método tradicional de análisis de amoníaco que precisa de un laboratorio para su realización.

4. Conclusiones

La tecnología de membrana semipermeable al gas es una técnica eficaz para retirar el amoniaco del aire de las granjas. La concentración de amoniaco en la atmósfera parece ser un factor determinante para la captura de dicho gas.

La evolución de la conductividad eléctrica (CE) en solución ácida durante el funcionamiento del prototipo de captura de amoniaco en atmósfera, se podría emplear in situ como medida rápida y fiable de la cantidad de amonio recuperado en solución ácida.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación de la Unión Europea en el marco del "Ammonia Trapping" (LIFE15-ENV / ES / 000284) "Desarrollo de dispositivos de membrana para reducir las emisiones de amoniaco generadas por el estiércol en granjas avícolas y porcinas". La mención de nombres comerciales o productos comerciales en este artículo tiene el único propósito de proporcionar información específica y no implica recomendación ni aprobación por parte de los autores.

Referencias

1. EU, European Parlament (2001). Directive (CE) 2001/81 of the European parliament and of the coincil of 23 October 2001 on national ceilings for the emission of atmospheric pollutants.
2. Beusen, A., Bouwman, A., Heuberger, P., Van Drecht, G., Van Der Hoek, K. Bottom-up uncertainty estimates of global ammonia emissions from global agricultural production systems. Atmos. Environ. 2008, 42, 6067-6077. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.044.
3. MAPAMA, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Inventario de emisiones de España emisiones de contaminantes en el marco de la directiva de techos nacionales de emisión serie 1990-2015. MAPAMA. 2017, Madrid, Spain. http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/documentoresumeninventariotechosespana-serie1990-2015_tcm30-378885.pdf
4. EU, European Union. (2016). Directive (EU) 2016/2284 of the European parliament and of the council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants, amending Directive 2003/35/EC and repealing Directive 2001/81/EC.
5. Erisman, J. W., Bleeker, A., Hensen, A., Vermeulen, A. Agricultural air quality in Europe and the future perspectives. Atmos. Environ. 2008, 42, 3209-3217.
6. Sutton, M. A., Oenema, O., Erisman, J.W., Leip, A., van Grinsven, H., Winiwarter W. Too much of a good thing?. Nature. 2011, 472, 159-161.
7. Bouwman, A.F., Van Vuuren, D.P., Derwent, R.G., Posch, M. A global analysis of acidification and eutrophication of terrestrial ecosystems. Water, Air and Soil Pollution. 2002, 141, 349–382.
8. Vanotti, M. B., and Szogi, A. A. Use of Gas-Permeable Membranes for the Removal and Recovery of Ammonia from High Strength Livestock Wastewater. Proceedings of the Water Environment Federation, 2011(1), 659–667.
9. Nelson, N.O., Mikkelsen, R.L., Hesterberg, D.L. (2000). Struvite formation to remove phosphorus from anaerobic swine lagoon effluent. In: Moore, J.A. (Ed.), Proc. 8 th Int. Symp. Animal, Agric., and Food Processing Wastes, ASAE, St. Joseph, Mich., pp. 18–26.
10. Zarebska, A., Romero-Nieto, D., Christensen, K. V., Fjerbæk Søtoft, L., Norddahl, B. Ammonium fertilizers production from manure: A critical review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2015, 45:14, 1469–1521. https://doi.org/10.1080/10643389.2014.955630.
11. Guo, Y.; Chen, J.; Hao, X.; Zhang, J.; Feng, X.; Zhang, H. A novel process for preparing expanded Polytetrafluoroethylene (ePTFE) micro-porous membrane through ePTFE/ePTFE co-stretching technique. J. Mater. Sci. 2007, 42, 2081–2085.
12. Rothrock, M.J.; Szögi, A.A.; Vanotti, M.B. Recovery of ammonia from poultry litter using flat gas permeable membranes. Waste Manage. 2013, 33, 1531–1538.
13. Dube P. J., Vanotti M. B., Szogi A. A., Garcia-González M. C. Enhancing recovery of ammonia from swine manure anaerobic digester effluent using gas-permeable membrane technology. Waste Management. 2016 49, 372-377.
14. García-González, M. C., Vanotti, M. B. Recovery of ammonia from swine manure using gas-permeable membranes: Effect of waste strength and pH. *Waste Management*. 2015, 38, 455-461.

15. Rothrock M. J., Szögi A. A., Vanotti M. B. Recovery of ammonia from poultry litter using gas permeable membranes. *Trans. ASABE*. 2010, 53, 1267–1275.
16. Majd, A. M. S., Mukhtar, S. Ammonia Recovery Enhancement Using a Tubular Gas - Permeable Membrane System in Laboratory and Field-Scale Studies. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2013, 56:1951-1958. doi: 10.13031/trans.56.10261.
17. Szogi, A.A.; Vanotti, M.B.; Rothrock, M.J. Gaseous ammonia removal system. US Patent 8,906,332 B2, 9 December 2014.
18. APHA, AWWA, WEF. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. Washington, D.C. American Public Health Association.
19. Rothrock M. J., Szögi A. A., Vanotti M. B. Recovery of ammonia from poultry litter using flat gas permeable membranes. *Waste Management.* 2013, 33 (6): 1531-1538.
20. Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales. BOE nº 269 10- 11-1995.
21. Shcherbakov, V. V., Artemkina, Yu. M., Ponomareva, T. N., Kirillov, A. D. Electrical conductivity of the ammonia-water system. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2009, 54 (2): 1531-8613.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Dimensión social del paisaje como herramienta para la gestión de espacios naturales en entornos agrícolas

Minerva Cordoves-Sánchez[1], Arturo Vallejos-Romero[2], Salvador Hernández-Navarro[3]

[1] Doctorado en Ciencias Agroalimentarias y Medioambiente, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile. Avda. Francisco Salazar 01145, Temuco, Chile; mcordoves@gmail.com
[2] Departamento en Ciencias Sociales y Núcleo Científico y Tecnológico en Ciencias Sociales, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile. Avda. Francisco Salazar 01145; arturo.vallejos@ufrontera.cl
[3] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (ETSIIAA), Avda. Madrid 50, 34004-Palencia, España; salvador.hernandez@uva.es

Resumen: Los ecosistemas de humedal proveen importantes servicios ecosistémicos (SE). Sin embargo, la creciente presión a la que están sometidos ha provocado una continua disminución en su extensión, siendo la intensificación agrícola la principal amenaza, cuyos impactos negativos son consecuencia directa de la acción humana, con efectos directos sobre la misma sociedad, que se hace más perceptible a los peligros, entendiendo los riesgos como el daño futuro que se deriva de decisiones presentes. En consecuencia, la forma en que el paisaje es gobernado puede ser determinante en la capacidad de suministro de SE clave y la estabilidad de los ecosistemas asociados a las actividades productivas. En este contexto problemático, la presente investigación busca analizar la percepción social del riesgo en función de los servicios ecosistémicos valorados por la sociedad, en el paisaje español de Campiñas de la Lampreana y Villafáfila. Se aplicaron entrevistas y grupos focales, en combinación con una estrategia de mapeo participativo, para el entendimiento de la influencia de los cambios en la provisión de servicios ecosistémicos sobre los riesgos percibidos en un paisaje agrícola.

Palabras clave: servicios ecosistémicos; percepción del riesgo; humedales.

1. Introducción

El paisaje suministra un amplio rango de funciones que son o pueden ser valorados por las personas por motivos económicos, socioculturales o ecológicos [1]. De hecho, el paisaje puede ser concebido como un sistema físico que surge de la interacción entre los sistemas socioeconómicos y naturales, y que provee servicios cuyos beneficios son aprovechados por el ser humano. Esta definición, al centrarse en el vínculo entre el ser humano y su entorno es fundamental para el abordaje de la sustentabilidad [2]. Dicho vínculo además, ha dado forma históricamente al paisaje en el que habitan las personas a partir de las actividades que se desarrollan en este [3].

En la medida que varía la intensidad de dicho vinculo, varía no solo la estructura y función del paisaje, sino el valor que los individuos, grupos sociales y comunidades asignan a este [4,5]. Desde el marco de trabajo de los servicios ecosistémicos (SE) es posible identificar y ponderar los valores ecológicos y sociales de los ecosistemas. Los beneficios intangibles que estos proveen tienen implicaciones sobre las formas de vida de las personas, por lo que los arreglos políticos y

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3696

socioeconómicos juegan un rol importante en la explicación de cómo las personas perciben los beneficios que obtienen de su interacción con los ecosistemas [6].

Dado que el paisaje es espacialmente heterogéneo, la provisión de servicios ecosistémicos varía en función de cómo esté configurado el paisaje [2]. Dicha configuración está estrechamente vinculada con las decisiones que se tomen en torno a estos paisajes, particularmente en paisajes dominados por una matriz agrícola. Esta dinámica ha provocado la transformación de distintas regiones a nivel mundial, como respuesta a la creciente demanda por alimentos, fibra y combustible, manifestándose en extensos paisajes homogéneos [7–9]. En este proceso, la agricultura moderna ha provocado la simplificación del paisaje debido a la eliminación de elementos naturales y seminaturales no productivos, provocando desbalances en la provisión de SE al favorecerse, a partir de las decisiones que se toman en el paisaje, la provisión de un SE en particular y provocar la alteración de procesos ecológicos clave que eventualmente producen un efecto de retorno, perjudicando la provisión del SE favorecido inicialmente [10]. Esta misma situación se reproduce en torno a los riesgos percibidos, ya que los riesgos, producto de la propia dinámica social, son el resultado de las alteraciones provocadas sobre los ecosistemas, afectando en algún momento a quienes los producen o se benefician de ellos [11]. Desde una perspectiva sociológica, el riesgo puede ser concebido como un producto de la sociedad, entendido como el daño futuro que se deriva de decisiones presentes. Como tal, este puede ser construido, interpretado y seleccionado por los actores, normas y estructuras sociales [12,13], donde su abordaje y manejo está directamente asociado a los sistemas sociales [14].

Estos sistemas sociales han sido modelados por procesos históricos como la revolución industrial, la cual abre paso a la denominada primera modernidad, que describe la contraposición entre la naturaleza y la sociedad [12]. Este contexto social permite explicar las decisiones de preferir un SE por encima de otro, favoreciendo los beneficios a corto plazo que estos proveen, como ocurre con la producción de alimentos, que en sociedades modernas ha producido una transformación hacia la especialización regional en unos pocos cultivos y la uniformidad temporal causada por el acortamiento de los periodos no productivos de la tierra, así como la sincronización de las tareas agrícolas en los diferentes campos que conforman el paisaje agrícola [15].

La dinámica descrita ha afectado procesos críticos que regulan el funcionamiento de los sistemas terrestres [16], con implicancias directas o indirectas sobre el bienestar humano. Así, producto de la modernidad, la sociedad comienza a sufrir, de forma inadvertida, los efectos colaterales de estos avances científico-tecnológicos, exponiendo a toda la población a diferentes riesgos. Lo anterior lleva a caracterizar a la sociedad actual como una "sociedad del riesgo", en la que conforme el conocimiento es difundido, la sociedad y la naturaleza dejan de ser opuestos y se hacen más perceptibles a los peligro y riesgos [12,13].

En el contexto delineado, la forma en que son percibidos los cambios ambientales puede entenderse como una construcción social, por lo que cambios inesperados en la provisión de SE podrían actuar como factor amplificador de los riesgos percibidos por la sociedad [17], y la importancia percibida de un solo promotor de cambio dependería de la perspectiva de cada actor y de la escala de tiempo en la que se evalúe [18]. A nivel comunitario, la forma en que dichas variaciones en la percepción sean tratadas determinará el tipo de respuesta frente a los cambios [19].

Por lo tanto, al crecer la demanda de alimentos a nivel mundial, aumentan las presiones para su producción. Esto provoca un incremento en la intensificación y expansión de la tierra cultivada, con el objetivo de mejorar los rendimientos, que en economías industrializadas supone una alta demanda de agua, fertilizantes, pesticidas y procesos de concentración parcelaria, a pesar de que cada vez se hace más evidente el límite en el incremento de los rendimientos [20].

Estas presiones tienen un efecto directo negativo sobre los ecosistemas en general, particularmente sobre ecosistemas de humedal, en los que se ha reconocido a la intensificación

agrícola como una de las principales amenazas sobre estos ecosistemas [21], como consecuencia del drenaje de sus aguas para la expansión de la tierra agrícola, la contaminación, producto del uso de agroquímicos, así como otros usos insostenibles [22]

Estos ecosistemas, denominados también como "riñones de la naturaleza [23], proveen importantes SE que contribuyen al bienestar humano. Sin embargo, la creciente presión a la que están sometidos ha provocado una continua disminución en su calidad y extensión [21].

En ambientes mediterráneos, los humedales representan ecosistemas de enorme importancia en el mantenimiento y control de la calidad ambiental y la biodiversidad en territorios semiáridos [24]. España es el país europeo con mayor diversidad de humedales y, aunque protegidos bajo figuras de protección, muchos humedales al estar enmarcados dentro de una matriz agrícola en el paisaje, enfrentan presiones que pueden implicar la desecación del complejo palustre, como ha ocurrido en la Laguna de La Nava, humedal de interior más importante de la península ibérica, y que debido a la fuerte presión agrícola desde el siglo XV, en 1968 se desecó completamente para favorecer a la agricultura intensiva y mecanizada [25]. De los dos únicos humedales Ramsar en la Comunidad Autónoma Castilla y León, la Laguna de La Nava depende de la actividad humana para su mantenimiento, mientras que Lagunas de Villafáfila se mantiene como un ecosistema regulado naturalmente, y por ende sometido a los efectos del cambio climático. Bajo este escenario, la incertidumbre que rodea la estabilidad de los ecosistemas de humedal es muy alta, dificultando la sustentabilidad de los sistemas agrícolas [26].

Con base en lo planteado anteriormente surge la interrogante ¿Cómo influye la pérdida de servicios ecosistémicos sobre la percepción de riesgos en un paisaje agrícola con fragmentos de humedal?

Investigaciones en esta materia han hecho un abordaje principalmente desde el paradigma psicométrico, haciendo especial énfasis en las variables cognitivas [27–29], lo cual puede explicarse por la característica de este paradigma de aplicar metodologías cuantitativas, permitiendo fácilmente su integración con las metodologías aplicadas en disciplinas como las ciencias naturales, típicamente cuantitativas. La forma en que los riesgos hacia un paisaje específico son percibidos individualmente, es central para determinar las actitudes hacia este, y subsecuentemente su comportamiento. Por ejemplo, percepciones divergentes pueden derivar en conflictos sobre las estrategias de manejo.

De esta forma, la percepción del riesgo puede ser descrita como un factor de importancia para explicar la relación entre la sociedad y el paisaje, y entender las decisiones que se derivan de dicha relación, para así desarrollar las capacidades necesarias para maximizar las propiedades funcionales del paisaje, que permite que los servicios ecosistémicos alcancen un clímax al favorecer la interacción entre los distintos procesos ecológicos que aseguran la provisión de servicios ecosistémicos.

En este sentido, como una primera aproximación al entendimiento de la influencia de los cambios en la provisión de servicios ecosistémicos sobre los riesgos percibidos en un paisaje agrícola, se plantea un estudio exploratorio para analizar la percepción social del riesgo en función de los servicios ecosistémicos valorados por la sociedad en el paisaje Lagunas de Villafáfila. Para ello, 1) se determinaron los servicios ecosistémicos valorados socialmente en el paisaje Lagunas de Villafáfila; y 2) se identificaron los riesgos percibidos en torno al paisaje Lagunas de Villafáfila.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

El presente estudio se desarrolló en Castilla y León, mayor Comunidad Autónoma de España en términos de superficie con 94.226 km2 [30]. En esta región se localiza la comarca natural de Tierra de Campos, que se sitúa principalmente en las Campiñas de la Meseta Norte. A partir de la caracterización del Atlas de los Paisajes de España [31], el área de estudio se delimitó a la unidad de paisaje correspondiente a Campiñas de la Lampreana y Villafáfila, enmarcada dentro del subtipo de paisaje denominado Campiñas del Norte del Duero, en el cual se localiza el humedal Lagunas de Villafáfila.

Lagunas de Villafáfila es un área cuya actividad agrícola data del imperio romano. Esta característica hace de éste un paisaje con alto grado de simplificación. En cuanto al contexto cultural, este paisaje corresponde a una región con registros arqueológicos ya desde el Neolítico [32], donde no existen pueblos originarios, pues se han asentado múltiples pueblos y culturas, que con el paso del tiempo ha desarrollado un contexto cultural fuertemente asociada a la actividad agrícola, característica que define desde el siglo V a la denominada comarca Tierra de Campos, en la que se enmarcan las Lagunas de Villafáfila.

2.2. Instrumentos para la recolección de información

Mapeo participativo: Para explorar como localizan perceptualmente las personas los riesgos y los servicios ecosistémico, se propone la aplicación de una estrategia de mapeo participativo, en el que los participantes localicen los servicios de paisaje y los riesgos percibidos, esta estrategia permite explorar la relación visual entre ambos, al identificar la posible asociación de riesgos y servicios de paisaje.

Dicha técnica frecuentemente representa los distintos entendimientos sociales y culturales del paisaje, y se ha extendido con múltiples variantes y aplicaciones, no sólo en la gestión de recursos naturales sino su utilidad para representar especialmente el valor social de los servicios ecosistémicos. Esta técnica de mapeo ofrece la posibilidad de aplicar un paradigma de valoración de los servicios ecosistémicos basado en el lugar contrario al paradigma basado en la economía [33].

Dado que las personas tienen una relación compleja con el paisaje, capturarlo no es una tarea fácil empleando mapas de características tradicionales [34]. Dada esta complejidad, los datos sociales relativos al tipo y ubicación de los diferentes servicios ecosistémicos percibidos así como la localización de los riesgos percibidos en el paisaje, fue colectada empleando la plataforma libre Map-Me PPGIS [35]; como un medio para colectar información geográfica del público usando una interfase estilo aerógrafo [36]. Que cuando los datos están asociados a complejos fenómenos sociales, esta estrategia de mapeo ofrece la ventaja de generar una serie de puntos en lugar de puntos individuales, de precisión irreal, permitiendo así registrar información de un lugar de manera más flexible, sin reducir la información a un espacio definido [35,36].

Entrevistas y grupos focales: Para la descripción de los riesgos percibidos e identificación de los servicios ecosistémicos, se propuso la elaboración y aplicación de entrevistas semiestructuradas y grupos focales como instrumento para la recolección de información primaria. Este tipo de instrumentos permite indagar en un sentido más profundo la importancia del paisaje para las personas, qué características tiene, que beneficios perciben del paisaje, y cuáles son los riesgos y amenazas percibidas.

2.3. Selección de actores

Para los grupos focales y las entrevistas, se incorporaron actores asociados al sector productivo incluyendo agricultores y ganaderos (principales actividades que se desarrollan en el paisaje). Otro grupo de actores locales incluyó aquellos cuyas actividades (no vinculadas al sector productivo o toma de decisión) estuviese vinculada al paisaje por desarrollar actividades culturales, ambientales, o por pertenecer a asociaciones de cazadores, dueños de predio, entre otros. Para involucrarlos en el estudio se contactaron algunos actores clave vía electrónica, estos a su vez, refirieron a otros actores potenciales para participar en los grupos focales.

Se conformaron dos grupos focales y una entrevista semiestructurada, para una participación total de ocho personas, formando un grupo homogéneo en cuanto al género (todos hombres), y heterogéneos en cuanto a las actividades que desarrollan en el paisaje, pudiendo ofrecer visiones contrastantes de los beneficios y riesgos percibidos.

Para el caso del mapeo participativo, se contó con el apoyo de los participantes previamente contactados para los grupos focales, quienes vía electrónica difundieron el enlace creado en la plataforma Map-Me PPGIS, a distintas personas asociadas al paisaje. A partir de dicho enlace un total de 70 personas ingresaron datos demográficos, de las cuales, solo 11 respondieron las preguntas formuladas sobre servicios ecosistémicos y riesgos percibidos, y 8 participantes ingresaron datos en el mapa empleando la herramienta de Map-Me, por lo que la participación con esta herramienta fue limitada, compuesta por tres mujeres ubicadas dentro de los rangos de etarios de entre 26-36 y 36-55 años, y ocho hombres con representantes de los distintos grupos etarios, siendo mayoritaria la participación de hombres de entre 26-36 años de edad.

2.4. Análisis de la información

Análisis temático: La información fue analizada, con el apoyo del paquete RQDA en R, para el análisis de datos cualitativos, a partir de una estrategia cualitativa de categorización, combinando el enfoque inductivo y el enfoque a priori para la definición de los temas [37]. Con base en guiones previamente elaborados, el instrumento se construyó a partir de tres temas preestablecidos: el primer tema está orientado a la percepción del paisaje, considerando indicadores asociados a la cercanía de las personas con el paisaje y el posicionamiento del individuo con respecto al paisaje. El segundo tema se centrará en identificar los servicios ecosistémicos reconocidos y valorados por las personas.

Un tercer tema considerado en los grupos focales se orientó a la identificación de las perturbaciones percibidas sobre el paisaje y sus consecuencias sobre los distintos actores clave, identificando, además, el grado de amenaza percibido sobre el paisaje, el individuo y la sociedad.

La información recopilada de los grupos focales se transcribió para obtener el detalle de lo expuesto por los distintos actores. A partir de las transcripciones se realizó la búsqueda de las menciones asociadas a los temas preestablecidos.

Para identificar la relevancia de los servicios ecosistémicos, así como los impactos o riesgos más relevantes, se consideró el número de menciones que hacen los distintos actores, bajo la premisa de que cuanto mayor mención se le hace a una temática, más importante es esta para cada actor.

Mapeo participativo: A partir de las bases de datos recopiladas de la plataforma Map-Me, estos son descargados para su visualización con el apoyo del ArcGIS 10.3. Empleando la herramienta de densidad de puntos, se construirán mapas para visualizar las zonas en el paisaje que, de acuerdo con los participantes, son los más relevantes.

Así mismo, las respuestas de las preguntas formuladas en conjunto con el mapeo fueron descargadas, para examinar los servicios ecosistémicos y riesgos percibidos. Estas respuestas fueron analizadas en conjunto con los resultados de las entrevistas, de forma complementaria, permitiendo identificar coincidencias en las respuestas dadas por los distintos participantes.

3. Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos reflejan una clara valoración de los servicios ecosistémicos presentes en el paisaje y se puede hacer una vinculación con los riesgos percibidos, ya que, el humedal es valorado por su importancia para una comunidad deprimida económicamente, cuyas demandas sociales han derivado en un creciente despoblamiento.

Entendiendo que, el mapeo de servicios ecosistémicos ofrece la oportunidad de mejorar los procesos de gestión ambiental y apoyar una toma de decisiones mejor informada, lo que reduce la probabilidad de problemas o conflictos locales y sus consecuencias sobre el ambiente [38], la presente investigación hace una primera aproximación de los principales servicios ecosistémicos del paisaje, y donde se concentran las áreas de mayor relevancia para distintos grupos de actor, lo que da indicios sobre posibles puntos de coincidencia que puedan ser considerados para mejorar los procesos de gestión.

Las distintas visiones encontradas en el paisaje, evidencian la complejidad del paisaje, el cual más que la combinación de ecosistemas, es un concepto que describe la interacción entre los procesos y estructuras de los ecosistemas y el ser humano [39].

Algunas limitaciones de este trabajo están relacionadas con la muestra, la cual fue muy pequeña, aunque heterogénea en cuanto a la diversidad de actividades con que los participantes se relacionan con el paisaje. En consecuencia, aunque los patrones empíricos descritos son de interés, no es posible generar conclusiones generales basadas exclusivamente en los datos del mapeo participativo. La poca participación en el mapeo participativo se debe en parte al limitado acceso a equipos computacionales que les permitiera a los actores a participar y generar mapas.

3.1. Servicios ecosistémicos percibidos

A partir del análisis temático desarrollado de las entrevistas y grupos focales, se encontró que los servicios ecosistémicos culturales son altamente valorados, especialmente el turismo, actividad que es vista como "motor de desarrollo de la zona" (GF1). Esta predominancia surge de un reconocimiento de la importancia de los elementos naturales presentes en el paisaje, particularmente las especies de ave, un importante atractivo turístico de la zona, y por lo tanto un servicio ecosistémico de tipo cultural, identificados a partir del entendimiento de lo que las personas quieren o disfrutan del paisaje. En términos generales, el paisaje es visto como proveedor de servicios culturales que contribuyen al bienestar tanto físico como mental, valorado por su historia y vida silvestre. Entre los actores vinculados a la gestión del paisaje, la importancia de la biodiversidad es destacada por su valor intrínseco y no tanto por el valor económico que supone como atractivo turístico (Figura 1, b).

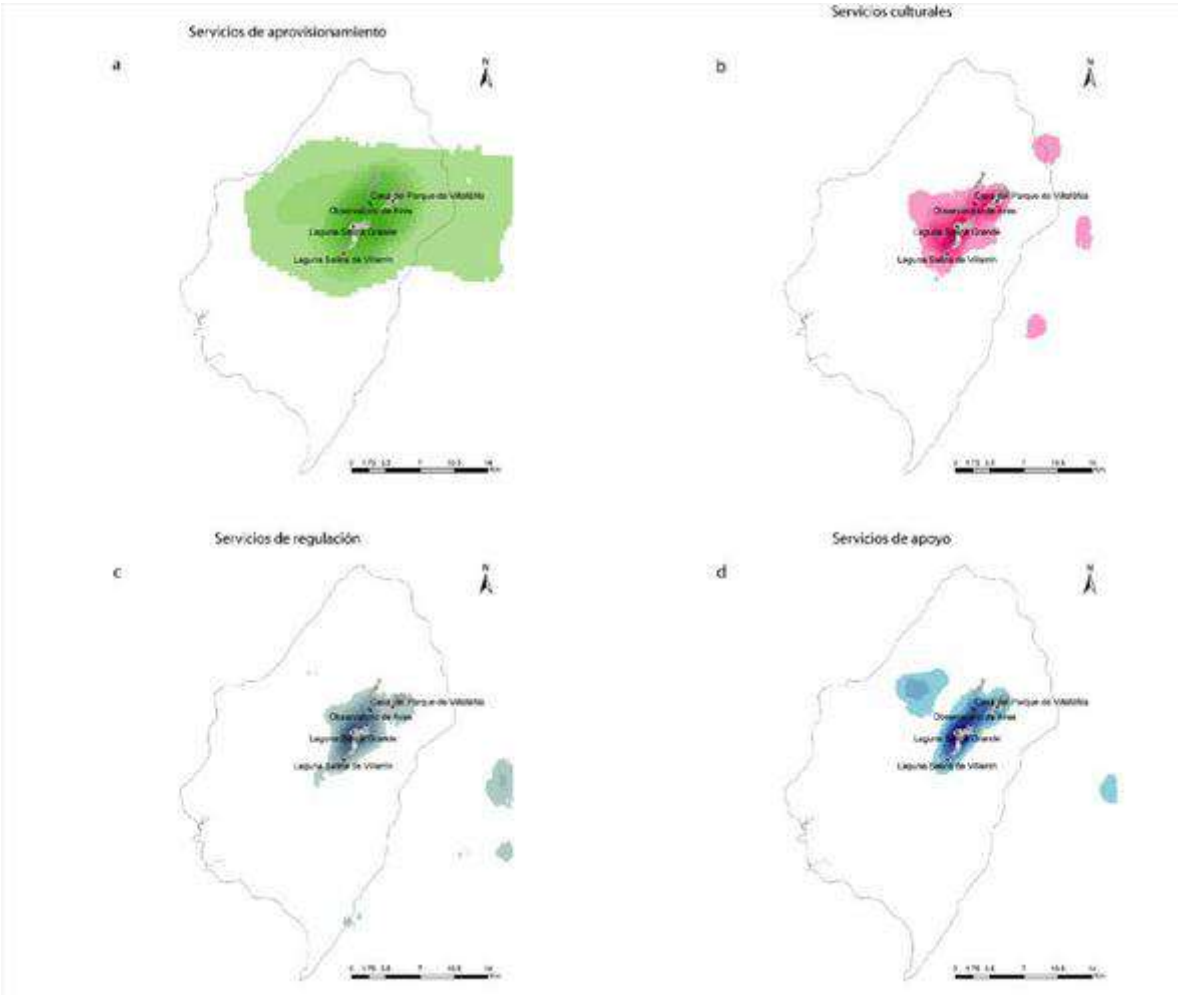


Figura 1. Densidad de puntos de los servicios ecosistémicos valorados por los participantes en el paisaje Campiñas de la Lampreana y Villafáfila. A partir de los resultados obtenidos del mapeo participativo.

Los servicios de aprovisionamiento, identificados como aquellos que las personas necesitan del paisaje (Figura 1, a), destaca la provisión de alimentos y el suministro de agua. En este aspecto, la situación económica destaca la importancia de la laguna y sus características como una necesidad para el desarrollo económico de la zona a partir del turismo, haciendo que la valoración de este servicio cultural también esté asociado a los beneficios económicos que proveería a la zona, reflejando importantes carencias de la población, la cual se siente desasistida y particularmente aquellas dedicadas al sector productivo (agricultura y ganadería), quienes describen sentirse presionadas económicamente, provocando una disminución en su calidad de vida.

Así mismo, iniciativas individuales que buscan fortalecer el turismo local, se ven minimizadas por quienes gestionan el paisaje a nivel local, nacional e incluso de la Unión Europea, limitando así el desarrollo de ese turismo que es visto como una oportunidad, frente al empobrecimiento de la región.

Para entender lo que las personas entienden por servicios de regulación (Figura 1, c), se les consultó sobre aquellos elementos en el paisaje que mantienen el correcto funcionamiento del ambiente que lo rodea, siendo la laguna y sus inmediaciones lo más destacado por las personas. Aspecto que se ve ampliado al consultar sobre los espacios vitales para plantas y animales en el paisaje, consultado para identificar los servicios ecosistémicos de apoyo y en el que las personas

mencionan los linderos de las tierras de cultivo. La densidad de puntos correspondiente a este tipo de servicios ecosistémicos se concentró en los alrededores de la laguna (Figura 1, d).

Cabe destacar que algunas de las personas que participaron en el mapeo, señalaron que parte de sus actividades diarias se desarrollan en municipios como Palencia y Valladolid, y por lo tanto se observa que la densidad de puntos correspondiente a las actividades diarias desarrolladas por las personas se localizó en dos puntos principales, uno fuera de la unidad de paisaje considerada para el presente estudio (Palencia), y otro en el área de estudio. Para efectos del presente trabajo, y considerando que la mayor densidad de puntos se concentró dentro de la unidad de paisaje Campiñas de Villafáfila y Lampreana, solo se consideró aquello señalado en relación con la unidad de paisaje que el interés de la presente investigación.

3.2. Riesgos percibidos

En lo que se refiere a los riesgos percibidos se identificaron 3 tipos riesgos dominante: ambiental, económico y político institucional (Tabla 1).

Se identificó que las presiones sobre el agricultor y el ganadero como una de las preocupaciones más relevantes, particularmente entre los actores de la sociedad civil (vinculadas al sector productivo), el poco incentivo económico para el desarrollo de este tipo de actividades es señalado como una causa del empobrecimiento de quienes se dedican a estas actividades, y que eventualmente abandonan el territorio en busca de oportunidades, particularmente la población más joven.

Al vincular el riesgo con el paisaje, las personas hacen referencia a temas relacionados con el uso de fitosanitarios y su impacto sobre la biodiversidad, particularmente en el caso de los actores asociados a la gestión del paisaje, quienes ven con preocupación el uso de pesticidas, si bien este tema también es mencionado por actores de la sociedad civil. A partir de las entrevistas desarrolladas se pudo identificar que los riesgos percibidos en torno a los impactos sobre la laguna y la biodiversidad, tiene una connotación económica para los actores de la sociedad civil, debido a que ven mermada su calidad de vida debido a la precaria situación que experimentan en el desarrollo de sus actividades, por lo que ven en el turismo una alternativa económica efectiva en respuesta a la situación negativa percibida.

De igual forma, siendo el turismo una respuesta a los riesgos socioeconómicos percibidos, las personas ven problemática la gestión de la laguna, en la que el funcionamiento del centro turístico es cada vez más limitado, lo cual para las personas es percibido como una amenaza al ver perjudicada su calidad de vida, lo que genera una percepción de que la gestión de la laguna es inadecuada, percibiendo además poco interés a las iniciativas individuales dirigidas a mejorar la visibilidad turística de la zona.

Tabla 1. Principales tipos de riesgos percibidos por los actores que participaron en los grupos focales.

Tipo de riesgo	Amenaza percibida	Enunciado
Ambiental	Pérdida de biodiversidad	"En la última época se cuenta con los dedos de una mano los éxitos reproductores de la reserva, en cuanto a aves acuáticas, se pone el ojo siempre en la avutarda" (GF1) "La parte de los humedales con donde estaban los gansos, las grandes concentraciones de estos, se está perdiendo por Cambio Climático fundamentalmente" (GF2)
	Deterioro de la calidad ambiental	"El mayor problema, que existe ahora mismo para las aves esteparias, que son las que tenemos aquí, es el uso de fitosanitarios" (GF1) "…el tema del herbicida, te lo restringen todo mucho más, no puedes tirar el producto en la época que quieres, o hay determinados productos que no puedes echar y claro pues tu te tienes que amoldar a lo que dicen" (GF2) "Hace veinte años ya se hablaba de temas de cambio climático, pero, en la actualidad es muy evidente" (GF1)
Sociocultural	Despoblamiento	"lo que nos perjudica ahora, yo lo que percibo es que se está yendo la gente joven" (GF1) "¿Cómo no se va a despoblar todo?, todo esto es una cadena aquí, de que vives, de 4 negocios" (GF2)
Económico	Presiones a las actividades productivas desarrolladas en el paisaje	"la zona agriara a los cabecillas no les interesa y se la están cargando y se la tienen ya bien cargada. Yo soy uno de los que esta quitando las vacas, he quitado esta semana 17 y van a marchar todos a freir moras. Cuando se acabe todo el ganado aquí el pariente irá detrás y le voy diciendo a uno por uno, se están quitando ganaderías todos los días" (GF2)
	Desequilibrios en los precios	"tienen el precio de hace muchos años y si lo demás está subiendo de este modo. Es decir, hace 40 años valía el trigo lo que vale ahora y le el gasoil vale el doble" (GF2) "te sube el gasoil, te suben los piensos, te suben la maquinaria, y tu no sabes en cuanto vas ahora a vender el producto tuyo ni cuando vas a cobrar casi, ni cuándo" (GF2)
Político-institucional	Desestimulo al turismo local	"el tema también de papeleos, los permisos, te ponen muchas trabas" (GF2)
	Gestión inadecuada del paisaje	"todos los espacios protegidos que tienen un Plan de Ordenación de los Recursos Naturales, que tienen bastantes limitaciones a lo que viene siendo la vida rural, pues, son, quizá su consciencia es más de: yo la declaración de este espacio natural me ha supuesto limitaciones, más que beneficios" (GF1) "muchas veces el desconocimiento, el rendimiento, el presupuesto" (GF1)
	Injusticia y desigualdad	"están ayudando y yo no lo veo muy bien, y ha salido ahora más dinero para eso, el tema ecológico, que estará bien y toda la cuestión pero es que están, van a favorecer a la gente que en teoría siembra y se olvida del campo" (GF2) "Si aquí evidentemente no va a haber trabajo para todo el mundo, pero bueno, pero el que no tenga trabajo, que no le den 400 euros o 500 porque sí" (GF2)

4. Conclusiones

Como una primera aproximación al estudio de la dimensión social en el paisaje, se identificaron dos aspectos de relevancia, que pueden ser considerados para profundizar en el tema y crear así políticas más efectivas, y es por una parte la valoración que tienen las personas que habitan o hacen uso del paisaje, pudiendo detectarse un vínculo de las personas con el paisaje que los hace valorar distintos elementos naturales en el paisaje, el valor asignado a estos elementos hace que distintos actores, particularmente de la sociedad civil destaquen la importancia del turismo como potenciador de desarrollo en la zona, y es visto así como una respuesta a los principales riesgos percibidos, que tienen que ver con las presiones sobre las actividades agrícolas y ganaderas que tienen lugar en el paisaje, y que está provocando el despoblamiento acelerado de la región de acuerdo con los actores entrevistados.

Así mismo, al asociar los riesgos con el paisaje se evidencia la preocupación por el deterioro de la laguna, que provoca la pérdida de la biodiversidad, y siendo esta valorada por la población, impactos sobre esta genera una preocupación tanto desde un punto de vista biocéntrico, por la importancia inherente de la naturaleza hasta una preocupación ´más bien antropocéntrica, por la importancia económica que supone una buena calidad del humedal y un estado saludable de la biodiversidad para asegurar así el establecimiento del turismo como una respuesta al empobrecimiento local, que está provocando el despoblamiento.

Se recomienda hacer un estudio que aborde con mayor profundidad los servicios ecosistémicos en el paisaje, que considere la integración de variables biofísicas, socioeconómicas, y cognitivas de los actores involucrados, que ofrezcan un mejor entendimiento de las dinámicas que tienen lugar en el paisaje para así construir políticas de gestión ambiental que integren de forma adecuada la dimensión social y económica, necesaria para la adecuada gestión a largo plazo del paisaje.

Referencias

1. Plieninger, T.; Kizos, T.; Bieling, C.; Dû-Blayo, L. Le; Budniok, M.A.; Bürgi, M.; Crumley, C.L.; Girod, G.; Howard, P.; Kolen, J.; et al. Exploring ecosystem-change and society through a landscape lens: Recent progress in european landscape research. *Ecol. Soc.* **2015**, *20*.
2. *Landscape Ecology for Sustainable Environment and Culture*; Fu, B., Jones, K.B., Eds.; Springer Netherlands: Dordrecht, 2013; ISBN 978-94-007-6529-0.
3. Liu, J.; Liu, M.; Zhu, J. Landscape pattern change and driving forces analysis in Shenyang and Benxi connection area, China. *Proc. - 4th Int. Congr. Image Signal Process. CISP 2011* **2011**, *4*, 1928–1930.
4. Kati, V.; Jari, N. Bottom-up thinking-Identifying socio-cultural values of ecosystem services in local blue-green infrastructure planning in Helsinki, Finland. *Land use policy* **2016**, *50*, 537–547.
5. Renn, O. Concepts of risk: An interdisciplinary review Part 2: Integrative approaches. *Gaia* **2008**, *17*, 196–204.
6. Chan, K.M.A.; Satterfield, T.; Goldstein, J. Rethinking ecosystem services to better address and navigate cultural values. *Ecol. Econ.* **2012**, *74*, 8–18.
7. Foley, J.A. Global Consequences of Land Use. *Science (80-.).* **2005**, *309*, 570–574.
8. Goldevwjk, K.K. Estimating global land use change over the past 300 years: The HYDE Database. *Global Biogeochem. Cycles* **2001**, *15*, 417–433.
9. Monfreda, C.; Ramankutty, N.; Hertel, T. Global Agricultural Land Use Data for Climate Change Analysis Global Agricultural Land Use Data for Climate Change Analysis by Chad Monfreda , Navin Ramankutty and Thomas Hertel Economic Analysis of Land Use in Global Climate Change Policy Editors : Tom H. **2008**, 1990–2010.
10. Termorshuizen, J.W.; Opdam, P. Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development. *Landsc. Ecol.* **2009**, *24*, 1037–1052.
11. Beck, U. *La sociedad del riesgo mundial: en busca de la seguridad perdida*; Ediciones Paidós, 2008;
12. Beck, U. *La Sociedad del Riesgo*; 1998; ISBN 8449304067.

13. Galindo, J. The concept of risk in the theories of Ulrich Beck and Niklas Luhmann Introducción. *Acta Sociológica* **2015**, *67*, 141–164.
14. Wong, C.M.L.; Lockie, S. Sociology, risk and the environment: a material-semiotic approach. *J. Risk Res.* **2018**, *21*, 1077–1092.
15. José-María, L.; Armengot, L.; Blanco-Moreno, J.M.; Bassa, M.; Sans, F.X. Effects of agricultural intensification on plant diversity in Mediterranean dryland cereal fields. *J. Appl. Ecol.* **2010**, *47*, 832–840.
16. Steffen, W.; Richardson, K.; Rockstrom, J.; Cornell, S.E.; Fetzer, I.; Bennett, E.M.; Biggs, R.; Carpenter, S.R.; de Vries, W.; de Wit, C.A.; et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science (80-.).* **2015**, *347*, 1259855–1259855.
17. Bennett, E.M.; Peterson, G.D.; Gordon, L.J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecol. Lett.* **2009**, *12*, 1394–1404.
18. Schroter, D. Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe. *Science (80-.).* **2005**, *310*, 1333–1337.
19. Ensor, J.E.; Abernethy, K.E.; Hoddy, E.T.; Aswani, S.; Albert, S.; Vaccaro, I.; Benedict, J.J.; Beare, D.J. Variation in perception of environmental change in nine Solomon Islands communities: implications for securing fairness in community-based adaptation. *Reg. Environ. Chang.* **2018**, *18*, 1131–1143.
20. Kates, R.W.; Parris, T.M. Long-term trends and a sustainability transition. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **2003**, *100*, 8062–8067.
21. Ramsar Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas: una recopilación de análisis recientes. *Nota Inf. Ramsar 7* **2015**, 20.
22. Ramsar Convention on Wetlands *Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and their Services ti People*; Gland, Suiza, 2018;
23. Mitsch, W.J.; Gosselink, J.G. *Wetlands*; 5th ed.; Wiley, 2015; ISBN 9781119019794.
24. López Sáez, J.A.; Abel Schaad, D.; Iriarte, E.; Alba Sánchez, F.; Pérez Díaz, S.; Guerra Doce, E.; Delibes de Castro, G.; Abarquero Moras, F.J. Una perspectiva paleoambiental de la explotación de la sal en las Lagunas de Villafáfila (Tierra de Campos, Zamora). *Cuaternario y Geomorfol.* **2017**, *31*, 73.
25. Valladares, L.F.; Garrido, J.; Herrero, B. The annual cycle of the community of aquatic Coleoptera (Adephaga and Polyphaga) in a rehabilitated wetland pond : the Laguna de La Nava (Palencia, Spain). *Ann. Limnol. - Int. J. Limnol.* **1994**, *30*, 209–220.
26. Montalba, R.; García, M.; Altieri, M.; Fonseca, F.; Vieli, L. Utilización del Índice Holístico de Riesgo (IHR) como medida de resiliencia socioecológica a condiciones de escasez de recursos hídricos. Aplicación en comunidades campesinas e indígenas de la Araucanía, Chile. *Agroecología* **2013**, *8*, 63–70.
27. Vignola, R.; Koellner, T.; Scholz, R.W.; McDaniels, T.L. Decision-making by farmers regarding ecosystem services: Factors affecting soil conservation efforts in Costa Rica. *Land use policy* **2010**, *27*, 1132–1142.
28. Klain, S.C.; Satterfield, T.; Sinner, J.; Ellis, J.I.; Chan, K.M.A. Bird Killer, Industrial Intruder or Clean Energy? Perceiving Risks to Ecosystem Services Due to an Offshore Wind Farm. *Ecol. Econ.* **2018**, *143*, 111–129.
29. Blennow, K.; Persson, J.; Wallin, A.; Vareman, N.; Persson, E. Understanding risk in forest ecosystem services: Implications for effective risk management, communication and planning. *Forestry* **2014**, *87*, 219–228.
30. del Blanco, V.; Nafría, D. Mapa de cultivos y superficies naturales de Castilla y León. *Inst. Tecnológico Agrar. Castilla y León* **2014**.
31. Mata Olmo, R.; Sanz Herraiz, C.; others Atlas de los paisajes de España. *Madrid, Minist. Medio Ambient.* **2003**.
32. Odriozola, C.P.; Martínez-Blanes, J.M. Cerámica para la producción de sal en Villafáfila: Estudio tecnofuncional a la luz de los análisis de pasta. *Arqueol. la Sal en las Lagunas Villafáfila Investig. sobre los cocederos prehistóricos* **2012**, 435–465.
33. Brown, G. The relationship between social values for ecosystem services and global land cover: An empirical analysis. *Ecosyst. Serv.* **2013**, *5*, 58–68.
34. Pérez-Ramírez, I.; García-Llorente, M.; Benito, A.; Castro, A.J. Exploring sense of place across cultivated lands through public participatory mapping. *Landsc. Ecol.* **2019**, *9*.

35. Huck, J.J.; Whyatt, J.D.; Coulton, P. Spraycan: A PPGIS for capturing imprecise notions of place. *Appl. Geogr.* **2014**, *55*, 229–237.
36. Huck, J.J.; Whyatt, J.D.; Dixon, J.; Sturgeon, B.; Davies, G.; Jarman, N.; Bryan, D.; Huck, J.J.; Whyatt, J.D.; Dixon, J.; et al. Exploring Segregation and Sharing in Belfast: A PGIS Approach. *Ann. Am. Assoc. Geogr.* **2019**, *109*, 223–241.
37. Ryan, G.W.; Bernard, H.R. Techniques to Identify Themes. *Field methods* **2003**, *15*, 85–109.
38. Cordoves-Sánchez, M.; Vallejos-Romero, A. Mapeo del valor social en el marco de los servicios ecosistémicos. *Investig. Bibl.* **2019**. (Artículo aceptado)
39. Oskar Englund; Göran Berndes; Christel Cederberg How to analyse ecosystem services in landscapes—A systematic review. *Ecol. Indic.* **2017**, *73*, 492–504.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Estudio de la actividad antifúngica *in vitro* de materiales compuestos basados en complejos de inclusión de polifenoles contra *Phytophthora cinnamomi*

Petruta Mihaela Matei[1], Laura Buzón-Durán[2], Eduardo Pérez-Lebeña[2], Jesús Martín-Gil[2], Beatrice Michaela Iacomi[1], M. Carmen Ramos-Sánchez[3], Pablo Martín-Ramos[4,*]

[1] Department of Bioengineering of Horticultural and Viticultural Systems, University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine of Bucharest, Bulevardul Mărăști 59, București 011464, Rumania; petruta.matei@horticultura-bucuresti.ro (P.M.M.); b.iacomi@yahoo.fr (B.M.I.)
[2] Departamento de Ingeniería Agroforestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, Avenida de Madrid 44, 34004 Palencia, España; laura.buzon.duran@gmail.com (L.B.-D.); eplebena@gmail.com (E.P.-L); mgil@iaf.uva.es (J.M.-G.)
[3] Servicio de Microbiología y Parasitología, Hospital Universitario Rio Hortega, SACYL, Calle Dulzaina, 2, 47012 Valladolid, España; mramoss@saludcastillayleon.es
[4] Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca, España; pmr@unizar.es

Resumen: El hongo *Phytophthora cinnamomi* es responsable de la podredumbre radical en una amplia gama de hospedantes, produciendo grandes pérdidas económicas y ecológicas a nivel mundial. En el caso de España, es responsable de enfermedades como la 'seca' de la encina y el alcornoque, o la 'tinta' del castaño. En este estudio se han investigado diferentes compuestos de inclusión de polifenoles-esteviósido dispersados en una solución hidroalcohólica de oligómeros de quitosano, con aplicación como complejos naturales bioactivos para reemplazar a los fungicidas sistémicos convencionales. Los polifenoles ensayados *in vitro* han sido curcumina, ácido ferúlico, ácido gálico y silimarina. Se han ensayado tres concentraciones (125, 250 y 500 $\mu g \cdot mL^{-1}$), con y sin nanopartículas de plata (AgNPs), y se han encontrado diferencias notables en la inhibición del crecimiento del micelio, con valores de CE_{50} y CE_{90} que han oscilado entre 171 y 373,6 $\mu g \cdot mL^{-1}$, y entre 446,2 y 963,7 $\mu g \cdot mL^{-1}$, respectivamente, observándose un rendimiento superior de los preparados a base de ácido ferúlico con AgNPs y de silimarina sin nAg. Los resultados obtenidos ponen en evidencia que la adición de AgNPs, pese a su actividad antimicrobiana, no siempre da lugar a sinergismos. En el caso de *P. cinnamomi*, se ha encontrado un comportamiento antagonístico inesperado para dos de los polifenoles (curcumina y silimarina), un comportamiento aditivo para el ácido ferúlico y un comportamiento sinergístico para el ácido gálico. Los preparados referidos pueden ser prometedores para aplicaciones de protección de cultivos y masas forestales contra *P. cinnamomi*.

Palabras clave: antifúngico; nanoplata; podredumbre radical; polifenoles; sinergismo

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3453

1. Introducción

Phytophthora cinnamomi es un oomiceto que vive en el suelo nutriéndose gracias a materia en descomposición y que produce una fitopatología (micosis) que afecta a cientos de huéspedes, una condición llamada "podredumbre de la raíz" o "muerte regresiva". Este patógeno es una de las especies más invasivas del mundo y afecta a una variedad de familias de plantas: coníferas, pastos, helechos, plantas ornamentales y cultivos alimentarios como la piña o el aguacate [1]. Su expansión ha sido atribuida al fenómeno del Cambio Climático [2]. Entre los síntomas de infección por *P. cinnamomi* figuran: marchitamiento, disminución del tamaño del fruto, muerte de brotes jóvenes, clorosis de las hojas y cancros del tallo [3].

En el caso de España, *P. cinnamomi* es responsable de enfermedades como la 'seca' de la encina y el alcornoque, o la 'tinta' del castaño [4].

Actualmente, no existe un tratamiento que erradique la muerte regresiva por *P. cinnamomi*, incluyendo la inyección al tallo de fosfitos (que son elicitores que actúan de manera indirecta como fungicidas) [5] o la pulverización foliar con metalaxyl+mancozeb (fungicidas con actividad por contacto y sistémica).

Como alternativa a estos agentes convencionales de tratamiento existe la posibilidad de utilizar complejos naturales bioactivos ricos en polifenoles. En este estudio se han investigado diferentes compuestos de inclusión de polifenoles-esteviósido dispersados en una solución hidroalcohólica de oligómeros de quitosano. Los polifenoles ensayados *in vitro* han sido curcumina, ácido ferúlico, ácido gálico y silimarina, a diferentes concentraciones, con y sin nanopartículas de plata (AgNPs).

2. Material y métodos

2.1. Reactivos

La curcumina (CAS 458-37-7), el ácido ferúlico (CAS 1135-24-6), el ácido gálico (CAS 149-91-7) y la silimarina (MDL MFCD01776359) se adquirieron de Sigma-Aldrich (Darmstadt, Alemania). El esteviósido (CAS 57817-89-7) se adquirió de Wako (Osaka, Japón). Hangzhou Simit Chemical Technology Co. Ltd. (Hangzhou, China) suministró el quitosano de peso molecular medio (MMWC). Todos los reactivos se utilizaron sin purificación adicional.

Los oligómeros de quitosano se prepararon a partir del MMWC de acuerdo con el procedimiento propuesto por Sun*, et al.* [6]: primero se solubilizaron 10 g de MMWC en 500 mL de ácido acético (1%) con agitación constante a 60 °C y, una vez disueltos, se obtuvieron oligómeros de quitosano (con MW <2 kDa) por degradación oxidativa con H_2O_2 (0,3 $mol \cdot L^{-1}$).

2.2. Preparación y caracterización de los compuestos de inclusión de polifenoles y composites bioactivos

Los procedimientos para la preparación de compuestos de inclusión de polifenoles, mediante separación en un sistema bifásico acuoso asistida por microondas, y para la preparación de los compuestos con oligómeros de quitosano en solución hidroalcohólica fueron los mismos que los referidos previamente en Matei*, et al.* [7], asegurando así la comparabilidad de los resultados.

Para el medio basado en oligómeros de quitosano dispersos en solución hidroalcohólica, se agregaron 10 mg de oligómeros de quitosano de 2 kDa, 60 mg de esteviósido y 10 mg de uno de los polifenoles (curcumina, ácido férulico, ácido gálico o silimarina) a 40 mL de solución hidroalcohólica (1:1 v/v de agua destilada y etanol). Las mezclas se sometieron a irradiación con microondas (a 80 °C; rampa de calentamiento: 5 $°C \cdot min^{-1}$) y a agitación durante 20 minutos en un horno microondas Ethos-One (Milestone, Sorisole, BG, Italia). Los productos resultantes se aislaron por centrifugación (2500 rpm) y se almacenaron a 4 °C.

Los composites se caracterizaron mediante espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier, microscopía electrónica de barrido y microscopía electrónica de transmisión, con resultados de caracterización coherentes con los descritos en la patente P201731489 [8].

2.3. Aislado fúngico y condiciones de crecimiento

El aislado MYC43 de *Phytophthora cinnamomi* fue suministrado por el Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura—Instituto del Corcho, Madera y Carbón Vegetal, España. El aislado se mantuvo en tubos con medio patata-dextrosa-agar (PDA), suministrados por Merck Millipore (Darmstadt, Alemania), almacenados a 4 °C. Se realizaron nuevos subcultivos para obtener el inóculo para las pruebas de sensibilidad *in vitro* transfiriendo tapones de hifas a placas de Petri con PDA como medio.

2.4. Pruebas in vitro de inhibición del crecimiento micelial

La actividad biológica de los materiales compuestos se determinó mediante el método de dilución en agar: se incorporaron alícuotas de las soluciones madre de los diversos tratamientos en el medio de PDA para obtener concentraciones finales de 125, 250 y 500 μg·mL^{-1}. Los discos miceliales de patógeno (8 mm de diámetro), retirados de los márgenes de un cultivo de 7 días, se transfirieron luego a las placas de PDA, empleando placas que contenían solo el medio de PDA como control. Se realizaron tres réplicas por tratamiento.

La inhibición del crecimiento micelial (o la eficacia del compuesto analizado) para cada tratamiento y concentración después de 7 días de incubación, en la oscuridad, se calculó de acuerdo con la fórmula: $((d_c - d_t)/d_c) \times 100$, donde d_c corresponde al diámetro promedio de la colonia de hongos en el control y d_t al diámetro promedio de la colonia de hongos tratada con el compuesto ensayado [9].

Los resultados se expresaron también como concentraciones efectivas CE_{50} y CE_{90} (es decir, aquellas concentraciones que redujeron el crecimiento del micelio en un 50% y un 90%, respectivamente), que se determinaron mediante la regresión de los valores de inhibición del crecimiento radial (%) frente a los valores $\log_{10}$ de las concentraciones de los compuestos antifúngicos.

2.5. Análisis estadístico

Los datos de los resultados obtenidos en este documento y de los informados en un estudio previo con AgNPs [7] se sometieron a análisis de varianza (ANOVA). Para la comparación *post hoc* de las medias se utilizó el test de Tukey con un nivel de probabilidad de 0,05 ($p < 0,05$). Todos los análisis se realizaron con el software IBM SPSS Statistics v.25.

3. Resultados y discusión

La bioactividad de los distintos tratamientos se estudió *in vitro* controlando el crecimiento radial del micelio (Figura 1).

Los resultados de crecimiento radial del micelio se muestran en la Figura 2, comparando los tratamientos sin AgNPs con los tratamientos con AgNPs recogidos en la referencia [7]. El aumento de la concentración de los complejos de inclusión de 125 μg·mL^{-1} a 500 μg·mL^{-1} condujo a una reducción del crecimiento micelial en todos los casos.

Se puede observar que la adición de AgNPs sólo mejoró de forma notable la actividad de los compuestos a base de ácido gálico. Para los compuestos a base de ácido ferúlico, la mejora fue estadísticamente significativa sólo en la dosis más baja; y para los compuestos basados en curcumina o silimarina, la adición de AgNPs llevó a un peor comportamiento (especialmente evidente para el compuesto con silimarina a la concentración más alta de 500 μg·mL^{-1}).

Los resultados del ANOVA factorial (Tabla 1) indicaron efectos de interacción unidireccionales, bidireccionales y triples estadísticamente significativos. En la Tabla 2 se muestra una clasificación de los tratamientos, con y sin AgNPs, según el test de Tukey.

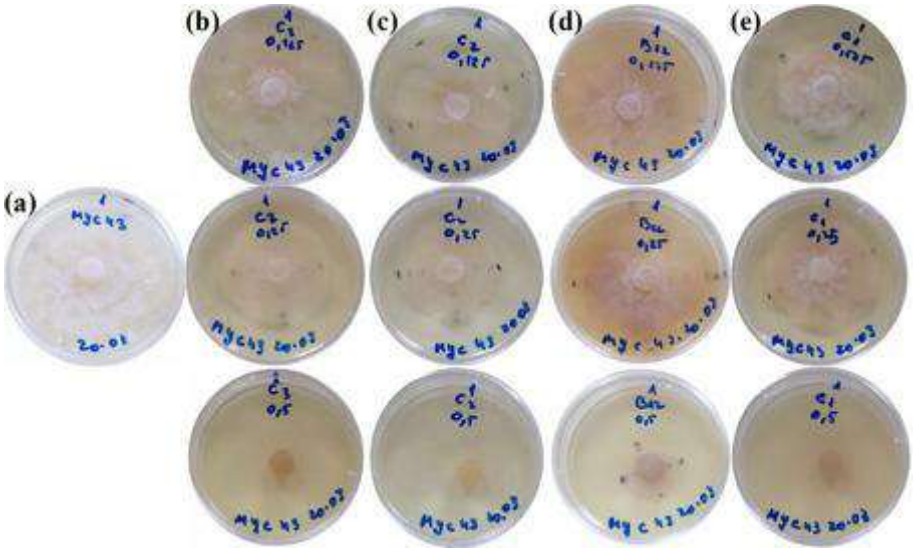


Figura 1. Ejemplo de test de sensibilidad. Crecimiento radial del micelio para **(a)** el control, y tratamientos con **(b)** curcumina, **(c)** ácido ferúlico, **(d)** ácido gálico y **(e)** silimarina. *De arriba abajo*: concentraciones de 125 μg·mL^{-1}, 250 μg·mL^{-1} y 500 μg·mL^{-1}. Sólo se muestra una repetición por tratamiento.

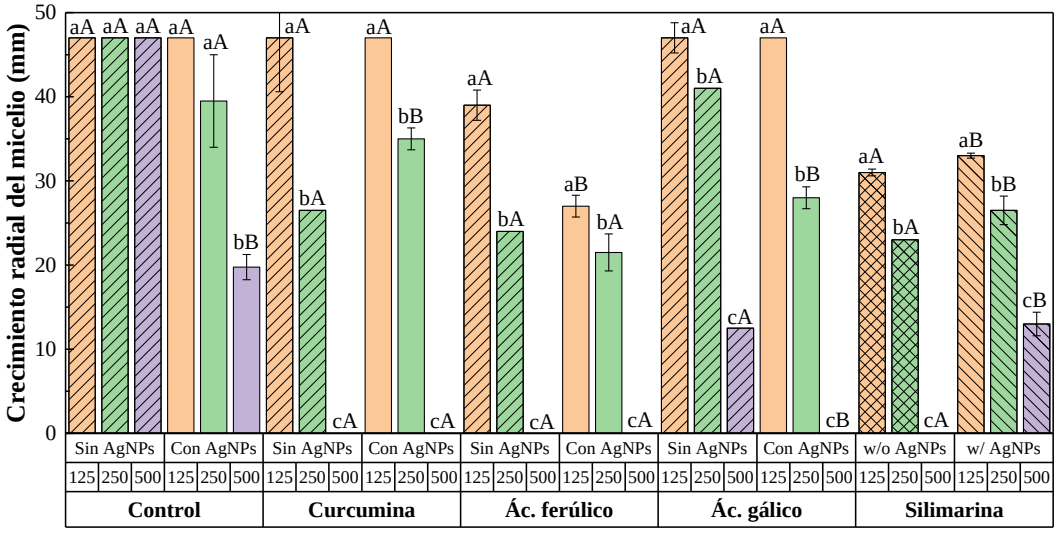


Figura 2. Valores de crecimiento radial de *P. cinnamomi* en presencia de los composites, consistentes en complejos de inclusión de polifenoles sin y con nanopartículas de plata (AgNPs), a diferentes concentraciones (expresadas en μg·mL^{-1}). Para cada tratamiento, las concentraciones etiquetadas con la misma letra minúscula no son estadísticamente diferentes según el test de Tukey (p < 0,05). Para los tratamientos con el mismo polifenol y la misma dosis, las letras mayúsculas diferentes indican que la ausencia/presencia de AgNPs dió lugar a diferencias significativas según el test de Tukey (p < 0,05). Todos los valores presentados son valores medios de tres repeticiones. Las barras de error representan las desviaciones estándar de tres repeticiones.

Tabla 1. Test de efectos entre sujetos.

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Tratamiento	4	5647,375	1411,844	446,080	< 0,0001
Dosis	2	16053,013	8026,506	2536,021	< 0,0001
AgNPs	1	228,006	228,006	72,040	< 0,0001
Tratamiento*Dosis	8	2103,425	262,928	83,074	< 0,0001
Tratamiento*AgNPs	4	1013,275	253,319	80,038	< 0,0001
Dosis*AgNPs	2	52,962	26,481	8,367	0,001
Tratamiento*Dosis*AgNPs	8	1003,475	125,434	39,632	< 0,0001

GL: grados de libertad

Tabla 2. Categorías en función de los valores de crecimiento radial del micelio para cada combinación de polifenol*dosis*AgNPs, con un intervalo de confianza del 95%, según el test de Tukey.

Categoría	Grupos									
Ác. ferúlico*500*con AgNPs	A									
Curcumina*500*sin AgNPs	A									
Curcumina*500*con AgNPs	A									
Ác. ferúlico*500*sin AgNPs	A									
Ác. gálico*500*con AgNPs	A									
Silimarina*500*sin AgNPs	A									
Ác. gálico*500*sin AgNPs		B								
Silimarina*500*con AgNPs		B								
Control*500*con AgNPs			C							
Ác. ferúlico*250*con AgNPs			C	D						
Silimarina*250*sin AgNPs			C	D	E					
Ác. ferúlico*250*sin AgNPs			C	D	E					
Silimarina*250*con AgNPs				D	E	F				
Curcumina*250*sin AgNPs				D	E	F				
Ác. ferúlico*125*con AgNPs				D	E	F				
Ác. gálico*250*con AgNPs					E	F	G			
Silimarina*125*sin AgNPs						F	G	H		
Silimarina*125*con AgNPs							G	H		
Curcumina*250*con AgNPs								H	I	
Ác. ferúlico*125*sin AgNPs									I	J
Control*250*con AgNPs									I	J
Ác. gálico*250*sin AgNPs										J
Control*250*sin AgNPs										K
Control*125*con AgNPs										K
Control*125*sin AgNPs										K
Curcumina*125*con AgNPs										K
Curcumina*125*sin AgNPs										K
Ác. gálico*125*con AgNPs										K
Ác. gálico*125*sin AgNPs										K
Control*500*sin AgNPs										K

Valor crítico *d* de Tukey: 5,566

Los resultados del test de sensibilidad también pueden expresarse en términos de indicadores de concentración efectiva CE_{50} y CE_{90}. La sensibilidad de los aislados claramente varió en función de la ausencia/presencia de AgNPs en los composites y dependiendo del compuesto fenólico empleado. La adición de AgNPs apenas modificó los valores de CE_{90} para curcumina y

ácido ferúlico (los dos polifenoles con mejor actividad antifúngica), pero mejoró notablemente los de los composites de ácido gálico (en un 34% y 112% para CE_{50} y CE_{90}, respectivamente).

Tabla 3. Concentraciones efectivas que inhibieron el crecimiento micelial en un 50% y un 90% (CE_{50} y CE_{90}, respectivamente).

Tratamiento	CE_{50} (μg·mL^{-1})		CE_{90} (μg·mL^{-1})	
	Sin AgNPs	Con AgNPs	Sin AgNPs	Con AgNPs
Control	--	458,4	--	1192,8
Curcumina	257,5	279,9	448,3	487,4
Ác. ferúlico	228,7	171,6	446,2	450,4
Ác. gálico	373,6	261,3	795,3	455,6
Silimarina	195,5	261,8	453,1	963,7

Con respecto al impacto de la elección del polifenol, para los tratamientos sin AgNPs, tanto en base a la Tabla 2 como a los valores de CE_{50}, la eficacia seguiría la secuencia: silimarina > ácido ferúlico > curcumina > ácido gálico. En base a los valores de CE_{90}, las sensibilidades de *P. cinnamomi* a la curcumina, el ácido ferúlico y la silimarina serían similares, y el ácido gálico sería la opción menos deseable.

De acuerdo con el método de Wadley [10] para la cuantificación del nivel de interacción, se obtuvo un factor de sinergia FS=1,7 para el ácido gálico, indicativo de una interacción sinérgica con las AgNPs; para el ácido ferúlico FS=1,0, indicativo de un comportamiento aditivo entre los dos productos antifúngicos; y para silimarina y curcumina se obtuvieron valores de FS de 0,5 y 0,9, respectivamente, indicativos de un comportamiento antagónico con la nanoplata.

Aunque poco frecuentes en la literatura, es preciso aclarar que, por ejemplo, se han referido casos de comportamiento antagónico de las AgNPs con amoxicilina frente a *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina (SARM) [11]. Estos autores, en ensayos con 7 organismos y 19 antibióticos, completaron 96 tests, encontrando 5 combinaciones con comportamiento sinérgico, 89 con comportamiento aditivo y 2 con comportamiento antagonístico.

4. Conclusiones

Los ensayos realizados han conducido a diferencias notables en la inhibición del crecimiento del micelio de *P. cinnamomi,* observándose un rendimiento superior de los preparados a base de ácido ferúlico con AgNPs y de silimarina sin nAg (evidenciando, así, que la adición de AgNPs, pese a su actividad antimicrobiana, no siempre da lugar a sinergismos).

Los principales hallazgos han sido: un comportamiento antagonístico inesperado para dos de los polifenoles (curcumina y silimarina), un comportamiento aditivo para el ácido ferúlico y un comportamiento sinergístico para el ácido gálico.

La conclusión alcanzada es que los preparados referidos pueden ser prometedores para las aplicaciones de protección de cultivos y masas forestales contra *P. cinnamomi*.

5. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada a través del proyecto VA258P18 de la Junta de Castilla y León y el proyecto UZ2019-TEC-07 de la Universidad de Zaragoza.

Referencias

1. Ramírez Gil, J.G. Incidencia, diagnóstico, comportamiento y alternativas de manejo de la marchitez del aguacate con énfasis en *Phytophthora cinnamomi* Rands. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2013.
2. Bergot, M.; Cloppet, E.; Perarnaud, V.; Deque, M.; Marcais, B.; Desprez-Loustau, M.-L. Simulation of potential range expansion of oak disease caused by *Phytophthora cinnamomi* under climate change. *Global Change Biol.* **2004**, *10*, 1539-1552.
3. Lowe, S.; Browne, M.; Boudjelas, S.; De Poorter, M. *100 of the world's worst invasive alien species: a selection from the global invasive species database*. Invasive Species Specialist Group Auckland: Auckland, NZ, 2004; p 12.
4. Sánchez, M.; Caetano, P.; Romero, M.; Navarro, R.; Trapero, A. *Phytophthora* root rot as the main factor of oak decline in southern Spain. In *Progress in research on Phytophthora diseases of forest trees*, Brasier, C.; Jung, T.; Oßwald, W., Eds. Forest Research: Farnham, Surrey, UK, 2004; pp 149-154.
5. Jackson, T.J.; Burgess, T.; Colquhoun, I.; Hardy, G.E.S. Action of the fungicide phosphite on *Eucalyptus marginata* inoculated with *Phytophthora cinnamomi*. *Plant Pathol.* **2000**, *49*, 147-154.
6. Sun, T.; Zhou, D.; Xie, J.; Mao, F. Preparation of chitosan oligomers and their antioxidant activity. *Eur. Food Res. Technol.* **2007**, *225*, 451-456.
7. Matei, P.; Martín-Gil, J.; Michaela Iacomi, B.; Pérez-Lebeña, E.; Barrio-Arredondo, M.; Martín-Ramos, P. Silver nanoparticles and polyphenol inclusion compounds composites for *Phytophthora cinnamomi* mycelial growth inhibition. *Antibiotics* **2018**, *7*.
8. Martín-Gil, J.; Matei Petruta, M.; Pérez Lebeña, E. P201731489, Complejo de inclusión para mejorar la biodisponibilidad de compuestos biológicamente activos no hidrosolubles. 28th December 2017, 2017.
9. Şesan, T.E.; Enache, E.; Iacomi, B.M.; Oprea, M.; Oancea, F.; Iacomi, C. *In vitro* antifungal activity of some plant extracts against *Fusarium oxysporum* in blackcurrant (*Ribes nigrum* L.). *Acta Sci. Pol. Hortorum* **2017**, *16*, 167-176.
10. Wadley, F.M. *The evidence required to show synergistic action of insecticides and a short cut in analysis*; U.S. Government Printing Office: Washington DC, USA, 1945.
11. De Souza, A.; Mehta, D.; Leavitt, R. Bactericidal activity of combinations of Silver-Water Dispersion with 19 antibiotics against seven microbial strains. *Curr. Sci.* **2006**, *91*, 1825–1851.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Estudio de un proceso de compostaje de estiércol de conejo mediante técnicas espectroscópicas y análisis de ácidos húmicos y fúlvicos

María Soto-Herranz[1], Mercedes Sánchez-Báscones[1], Juan Manuel Antolín-Rodríguez[1], Diego Conde-Cid[1]

[1] E.T.S.I.A. Universidad de Valladolid, Avenida de Madrid, 44. Palencia, 34004, España; m.sotoh16@gmail.com

Resumen: El crecimiento de la población humana ha provocado un aumento de la demanda de productos agroganaderos, fomentándose prácticas agrícolas y ganaderas intensivas. El incremento de la producción, ha conllevado un aumento del volumen de residuos ganaderos, lo que implica la necesidad de medidas para gestionarlos adecuadamente. Un método de manejo del estiércol y enmienda del suelo de bajo costo es el compostaje, que permite poder emplear el compost como abono en sustitución a fertilizantes químicos. En este trabajo se realiza un estudio del proceso de humificación de la materia orgánica durante el compostaje de residuos de conejo en pila dinámica, mediante técnicas espectroscópicas. Las mezclas consistieron en estiércol cunícola (3160 kg) y distintos tipos de materiales estructurantes. La composición de las pilas, fue: pila 1 [estiércol + 200 kg cama (viruta + orina + pelo)], pila 2 [estiércol + 52 kg paja cebada], pila 3 [estiércol + 52 kg paja cebada]. Los análisis mediante espectroscopía FTIR y UV-Vis, revelaron una transformación de compuestos sencillos a complejos y resistentes, propios de la formación de humus. Esto concuerda con los resultados obtenidos por el análisis de ácidos húmicos y fúlvicos, que reflejaron un predominio de compuestos de cadena alifática al inicio del proceso, así como de compuestos aromáticos hacia el final.

Palabras clave: estiércol cunícola, FTIR, UV-VIS, E4/E6

1. Introducción

El rápido crecimiento de la población conlleva un incremento de la práctica de la agricultura intensiva y la cría de animales. Esto supone una elevada producción de estiércol, que induce un grave problema de gestión de residuos. Por ello, es importante adoptar medidas de manejo efectivas para este tipo de desechos. Un método de manejo del estiércol y enmienda del suelo de bajo costo lo constituye, entre otros, el compostaje. Sin embargo, si el estiércol no se trata adecuadamente, puede liberar patógenos, metales pesados y elementos eutróficos como N y P, poniendo en riesgo la salud humana y el medio ambiente [1].

El compostaje es un proceso que consiste en conseguir un producto más estable (sustancias húmicas) por medio de transformaciones de la materia orgánica bajo condiciones termofílicas producidas por la actividad biológica [2]. Esto se conoce como proceso de humificación. Las sustancias húmicas asocian moléculas pequeñas y otros polímeros heterogéneos a través de interacciones hidrofóbicas como las fuerzas de van der Waals, π-π y CH-π y/o enlaces de hidrógeno [3]. La lignina y sus productos de degradación, incluidos los fenoles y las quinonas, son los principales precursores en la formación de HS por polimerización y condensación con compuestos como proteínas, aminoácidos y ácidos nucleicos [4]. Las sustancias húmicas se

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3430

componen de ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas. Su formación dependerá de factores como: el tipo de materia prima, los aditivos del compost, la actividad microbiana, la temperatura, el pH, el contenido de humedad de la relación C/N, el contenido de oxígeno y el tamaño de las partículas [5, 6].

El producto final del compostaje aerobio debiera poder emplearse como fertilizante orgánico y enmienda del suelo [7]. Además, las sustancias húmicas son útiles como pesticidas naturales porque pueden suprimir algunos fitopatógenos transmitidos por el suelo y minimizar la toxicidad de los productos químicos [8]. Estos beneficios se atribuyen a varios grupos funcionales presentes en los ácidos húmicos: carboxílico, fenólico, hidroxílico y quinonilo [9].

La calidad agronómica del compost, depende fundamentalmente de la estabilidad y grado de madurez de la materia orgánica, por lo que su estudio es imprescindible antes de su aplicación. Un compost inmaduro podría afectar a la germinación de las semillas, reducir el crecimiento de las plantas y dañar los cultivos [1, 10]. Entre los parámetros indicadores del grado de estabilidad del compost, están: carbono soluble en agua (CSA), la relación C/ N, el grado de humificación de la materia orgánica, la concentración de lignina y la respiración microbiana [11].

En este trabajo se presenta un estudio del proceso de humificación de compost cunícola mediante dos técnicas espectroscópicas, FTIR y UV-Vis, así como mediante el análisis de sustancias húmicas. Entre los diferentes parámetros derivados de las mediciones UV-Vis, se determinó la relación E4/E6 [12].

2. Materiales y métodos

2.1. Configuración de las pilas de compostaje

En el presente experimento se muestra el proceso de compostaje de estiércol procedente de una explotación cunícola con diferentes tipos de materiales estructurantes. Se establecieron tres pilas dinámicas con aireación natural: pila 1: 3160 kg estiércol + 200 kg cama (viruta + orina + pelo), pila 2: 3160 kg estiércol + 52 kg paja cebada, pila 3: 3160 kg estiércol + 52 kg paja cebada.

Se tomó una muestra semanal durante la fase activa del proceso de compostaje que duró diez semanas y una muestra mensual durante la fase de maduración, que se desarrolló a lo largo cinco meses.

Además de los parámetros básicos de seguimiento del proceso (temperatura, humedad, pH, CE, C/N, etc.) no mostrados en este trabajo, se estudiaron las transformaciones que sufría la materia orgánica durante el tiempo de compostaje mediante métodos espectroscópicos como: infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), espectrofotometría de absorción UV-Vis y análisis de sustancias húmicas.

2.2. Caracterización de muestras de estiércol cunícola a lo largo de distintos estadíos del proceso de compostaje mediante FTIR y UV-VIS

2.2.1. Análisis del proceso de compostaje mediante espectrofotometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

Los espectros FTIR del compost cunícola en 3 etapas del proceso se obtuvieron en un rango de longitudes de onda de entre 400 a 4000 cm^{-1} empleando un espectrómetro de infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR) Nicolet iS50 ThermoScientific (Waltham, MA, EE. UU.). Las muestras de compost se secaron en estufa durante 3 días a 105°C y, se molieron con molino de cuchillas y de bolas. Se pesaron 2,4 mg del material y se mezclaron con 100 mg de KBr para posteriormente prensarlo y obtenerlo en forma de pastilla (Hsu y Lo, 1999). Los espectros FTIR se consiguieron tras someter cada muestra a 64 exploraciones, recogiendo los principales picos mediante el software OMNIC (Nicolet Instruments Corp.).

2.2.2. Análisis del proceso de compostaje mediante espectrofotometría ultravioleta visible (UV-VIS).

El carbono soluble en agua se obtuvo agitando durante 2 h una mezcla de 1 g de muestra de compost cunícola (0 d, 49 d y 214 d) fresca con 10 ml de agua desionizada (1:10 p/v). Los extractos se centrifugaron a 10000 rpm durante 15 min y se filtraron con un filtro de 0,45 μm (Whatman, nº3). De los extractos filtrados se tomaron alícuotas de 20 μl y se mezclaron con 180 μl de agua desionizada. A continuación, se realizaron medidas de absorbancia a 465 y 665 nm con un espectrofotómetro UV-Vis (Shimazdu UV-2450). Se calculó la relación de absorbancias E4/E6 (465 y 665 nm).

2.3. Evolución del proceso de humificación mediante el análisis de ácidos húmicos y fúlvicos. Relación de humificación (RI), tasa de humificación (RH) e índice de polimerización (PI).

Para el análisis de ácidos húmicos y fúlvicos, se pesaron 3 g de muestra fresca del inicio (0 d) del proceso de compostaje, proceso activo (49 d) y final de la etapa de maduración (214 d). Se mezcló con 60 ml de pirofosfato de sodio ($Na_4P_2O_7 \cdot 10\ H_2O$) y se agitó durante 4 h. A continuación, se centrifugaron a 10000 r.p.m durante 15 min y se filtraron (Wharman, nº3). Los extractos filtrados se dividieron en dos partes iguales. En una de ellas, se añadieron gotas de H_2SO_4 al 96-98% hasta pH<2 y se retiró el precipitado. Todas las muestras se preservaron en nevera a 4°C hasta su medición. Se realizaron medidas de carbono orgánico total y de carbono de ácidos fúlvicos mediante un analizador de Carbono Orgánico Total (Shimadzu, modelo TOC 5000 182). La diferencia entre ambos, se consideró como el carbono de ácidos húmicos.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización de muestras de estiércol cunícola a lo largo de distintos estadíos del proceso de compostaje mediante FTIR y UV-VIS.

3.1.1. Análisis del proceso de compostaje mediante espectrofotometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

La espectroscopia infrarroja se emplea como método de caracterización de sustancias orgánicas formadas durante el proceso de humificación. Permite explorar las características y actividad de la materia orgánica mediante el estudio de los grupos funcionales presentes en las muestras.

Los espectros FTIR de compost cunícola de tres pilas de compostaje a lo largo de diferentes fases del proceso de compostaje, se muestran en la figura 1. Los espectros FTIR muestran diferencias en el proceso de compostaje, siendo similar entre pilas.

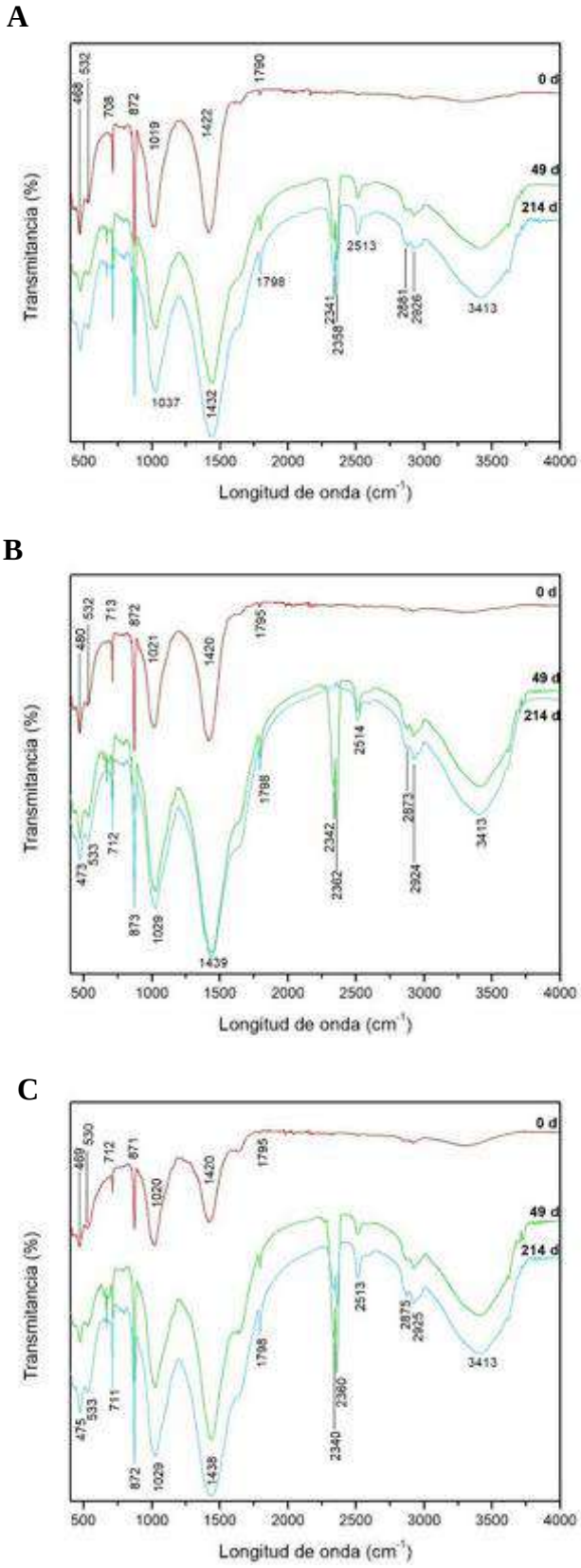


Figura 1. Espectro FTIR del proceso de compostaje de residuos cunícolas en la pila 1 (A), pila 2 (B) y pila 3 (C). Modo de medición por transmitancia. Se representan los espectros infrarrojos de los días 0, 49 (proceso activo) y 214 (maduración).

Al comienzo del proceso en cada pila se observó el predominio de las bandas en torno a 1420 cm^{-1} ($\nu_{C=C}$ insaturados y aromáticos), que durante el proceso incrementan su intensidad reflejando el progreso del proceso de humificación. Otras bandas observadas durante todo el proceso en todas las pilas (1020, 872 y 712 cm^{-1}), responden a la presencia de SiO_2 y carbonato cálcico. Al haberse realizado el compostaje sobre el suelo en pila abierta, es razonable encontrar este tipo de bandas.

A partir del día 49, comienzan a observarse diferencias entre espectros. Aparecen nuevos picos en torno a 3413, 2925, 2875 y 1795 cm^{-1} y se produce un crecimiento en la intensidad de la banda de 1420 cm^{-1}.

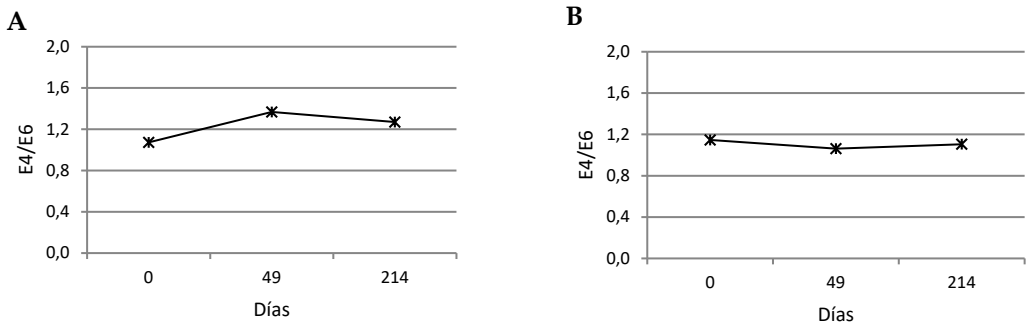
La banda ancha a 3413 cm^{-1} puede atribuirse a vibraciones de tensión de grupos hidroxilos (-OH) con alta interacción con enlaces de hidrógeno. Las bandas comprendidas a 2925 y 2875 cm^{-1}, se corresponden a ν_{C-H} de grupos alifáticos ($-CH_2$ y $-CH_3$) [13]. Las diferencias de intensidad de algunas bandas se vinculan a la desaparición de los componentes que se degradan más fácilmente, como al aumento de derivados de lignina que participan en el proceso de humificación [14]. El pico en torno a 1795 cm^{-1} se atribuye a la vibración de tensión de alquenos (C=C) de grupos carboxílicos en ácidos y cetonas. El aumento de intensidad de la banda 1420 cm^{-1}, indica una mejora de los carbonos aromáticos en relación a los alifáticos, lo que podría estar relacionado con la estabilidad y la madurez de compost y su transformación en sustrato altamente humificado [15, 16].

La aparición de nuevos picos y el aumento de intensidad de otros, podría indicar un mayor grado de descomposición a lo largo del proceso de compostaje. En las etapas iniciales se destruye la materia orgánica fácilmente biodegradable como polisacáridos, cadenas alifáticas, alcoholes y proteínas. Mientras que, en las etapas finales de maduración, tienden a abundar compuestos estables como las estructuras aromáticas [17].

3.1.2. Análisis del proceso de compostaje mediante espectrofotometría ultravioleta visible (UV-VIS).

Una medida simple para la caracterización de las sustancias húmicas consiste en el estudio del índice E4/E6, basado en la estimación del grado de aromaticidad de los compuestos orgánicos.

La relación de absorbancia E4/E6 de las sustancias húmicas se representa en la Figura 2. Es un parámetro útil para estimar el grado de humificación del compost [18] y se emplea como índice del nivel de agregación de partículas o macromoléculas [12]. Además, se considera como un índice inverso al peso molecular y a la aromaticidad [19] mientras que se correlaciona positivamente con el número de grupos de ácido carboxílico [12].



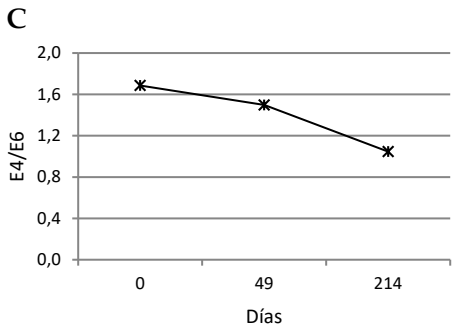


Figura 2. Variación de absortividad (E4/E6) correspondiente a 465 y 665 nm frente a días de proceso de compostaje en tres pilas de compostaje. La pila 1 (A) compuesta de 790 kg estiércol cunicola + 9 kg paja cebada + 200 kg viruta; pilas 2 (B) y 3 (C) compuestas de 790 kg estiércol cunicola + 52 kg paja cebada.

En general, se observa que los valores de E4/E6 alcanzados el día 214 son similares o más bajos que al inicio (0 d) y a la mitad del proceso de compostaje (49 d).

Durante la fase activa del proceso de compostaje, los valores de la relación E4/E6 son más altos, lo que se asocia a la presencia de moléculas orgánicas de menor tamaño o a la presencia abundante de estructuras alifáticas y contenido de grupos funcionales, que implican un menor grado de condensación del núcleo aromático del humus [12]. Valores bajos alcanzados en las últimas etapas del proceso están de acuerdo con las observaciones de otros autores [20]. Se ha alcanzado un grado de madurez y estabilidad favorables, debido probablemente a la mineralización de los carbohidratos y las quinonas, así como a la oxidación de compuestos fenólicos.

3.2. Evolución del proceso de humificación mediante el análisis de ácidos húmicos y fúlvicos. Relación de humificación (RI), tasa de humificación (RH) e índice de polimerización (PI).

El estudio de las fracciones húmicas del compost constituye un criterio importante para establecer el grado de evolución de la materia orgánica.

En la figura 3 se representa la evolución de los ácidos húmicos y fúlvicos en extractos de compost a lo largo del proceso de compostaje. El porcentaje de carbono total extraíble (C Tot) disminuyó durante el compostaje debido a la mineralización, siendo más evidente en la pila 3. El porcentaje de ácidos húmicos (HA) aumentó durante el proceso de compostaje, mientras que la fracción de ácidos fúlvicos (FA) disminuyó. En los primeros estadios del proceso de compostaje, abundan compuestos de cadena alifática sobre los compuestos aromáticos. En cambio, a medida que avanza la humificación, se favorece la polimerización y, por tanto, abundan más los compuestos aromáticos. Esta evolución indica que el compost fresco inicial que está presente al inicio del proceso, contiene niveles bajos de HA y niveles más altos de FA en comparación con el compost maduro [21]. Esta misma tendencia está de acuerdo con los resultados obtenidos por algunos autores en compostaje de excretas animales [22].

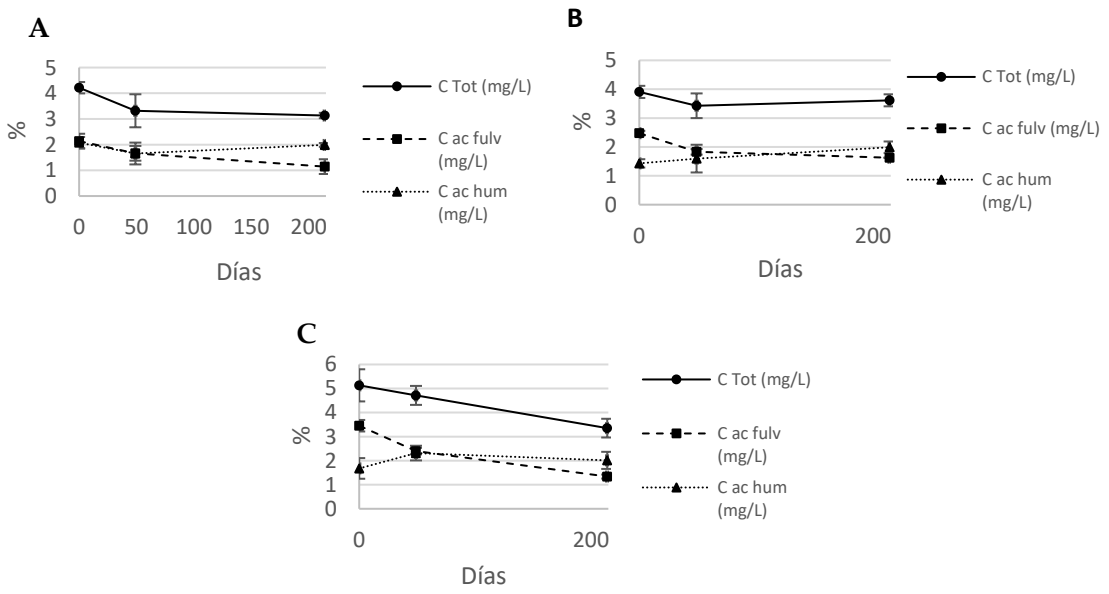


Figura 3. Evolución del porcentaje de carbono total extraíble (CTot), ácidos fúlvicos (C acfulv) y húmicos (C achum) durante el proceso de compostaje en cada una de las pilas (pila 1: A, pila 2: B y pila 3: C).

Para evaluar el progreso de la humificación de la materia orgánica durante el compostaje, se calcularon varios indicadores como: índice de humificación (HI), tasa de humificación (HR), porcentaje de ácidos húmicos (PHA) y el grado de polimerización (DP), representados en la Tabla 1. Sin embargo, la composición de la materia prima empleada como enmienda podría afectar a la temperatura y degradación de la materia orgánica y, por tanto, a la formación de sustancias húmicas por lo que sería un factor clave en el progreso de la humificación (tasa de humificación y proporción de HA y FA).

Tabla 1. Relaciones de humificación para cada una de las pilas de compostaje.

	PILA 1				**PILA 2**				**PILA 3**			
Día	HR	HI	PHA	PI	HR	HI	PHA	PI	HR	HI	PHA	PI
0	1,28	1,82	0,49	0,97	1,33	3,17	0,37	0,58	1,19	2,10	0,32	0,48
49	1,40	2,47	0,49	0,98	1,35	2,46	0,46	0,88	1,25	1,71	0,49	0,97
214	1,64	2,60	0,63	1,74	1,41	2,14	0,55	1,22	1,54	2,70	0,60	1,50

En general, para todos los índices calculados, los valores se incrementaron con el tiempo de compostaje, a excepción del HI en la pila 2, donde disminuyeron los valores al final del proceso respecto de los valores iniciales. En la pila 2, hubo problemas para alcanzar una temperatura óptima para favorecer la descomposición de la materia orgánica, pudiendo ser un factor influyente en el proceso de polimerización y formación de ácidos húmicos (HA). Jouraiphy et al. (2005) también observaron un aumento de todos los índices a medida que avanzaba el tiempo de compostaje de una mezcla de lodos de aguas residuales y residuos verdes.

El incremento de HI a lo largo del proceso de compostaje, se podría relacionar con la pérdida de carbono orgánico total durante ese tiempo. El aumento del índice PHA, indica que el proceso de compostaje estuvo marcado por una alta disponibilidad de ácidos húmicos en detrimento de los fúlvicos. Y, el aumento del grado de polimerización durante el proceso refleja la formación de moléculas complejas a partir de otras más simples [23]. Autores como [24] sugirieron que una

relación CHA/CFA mayor de 1.6 indica un buen grado de madurez alcanzado por la materia orgánica.

4. Conclusiones

Este trabajo demuestra que es factible el uso de cualquiera de estas tres técnicas (FTIR, UV-Vis o análisis de ácidos húmicos y fúlvicos) para realizar el seguimiento de un proceso de compostaje. En etapas iniciales del proceso de compostaje, se produce una predominancia de compuestos de cadena corta y bajo peso molecular, fáciles de degradar. En cambio, a medida que avanza el tiempo, la actividad bacteriana desencadena procesos de mineralización y polimerización, favoreciendo la presencia de estructuras de cadena larga, más estables.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación de la Unión Europea en el marco del "Ammonia Trapping" (LIFE15-ENV / ES / 000284) "Desarrollo de dispositivos de membrana para reducir las emisiones de amoniaco generadas por el estiércol en granjas avícolas y porcinas". La mención de nombres comerciales o productos comerciales en este artículo tiene el único propósito de proporcionar información específica y no implica recomendación ni aprobación por parte de los autores.

Referencias

1. Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., De Bertoldi, M. Evaluating toxicity of immature compost maturity. *Biocycle*. 1981, 22, 54–57.
2. Iyengar, S.R., Bhave, P. P. In-vessel composting of house hold wastes. *Waste Management*. 2006, 26, 1070–1080.
3. Piccolo, A. The supramolecular structure of humicsubstances. A novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. *Adv. Agron*. 2002, 75, 57–134.
4. Sánchez–Monedero, M.A., Roig, A., Cegarra, J., Bernal, M.P. Relationships between water-soluble carbohydrate and phenol fractions and the humification indices of different organic wastes during composting. *BioresourceTechnology*. 1999, 70 (2): 193-201.
5. Petric, I., Helić, A., Avdić, E.A. Evolution of process parameters and determination of kinetics for co-composting of organic fraction of municipal solid waste with poultry manure. *Bioresour. Technol*. 2012, 117, 107–116.
6. Epstein, E. 1997. The Science of Composting. CRC Press, Boca Raton, FL.
7. Jurado, M.M., Suárez-Estrella, F., López, M.J., Vargas-García, M.C., López-González, J.A., Moreno, J. Enhanced turn over of organic matter fractions by microbial stimulation during lignocellulosic waste composting. *Bioresour. Technol*. 2015, 186, 15–24.
8. Hoitink, H.A.J., Fahy, P.C. Basis for the control of soil-borne plant pathogens with composts. *Annu. Rev. Phytopathol*. 1986, 24, 93–114
9. Stevenson, F.J., 1994. Humic Substances Chemistry: Genesis, Composition and Reactions, 2nd ed. Wiley, New York.
10. Cooperband, L.R., Stone, A.G., Fryda, M.R., Ravet, J.L. Relating compost measures of stability and maturity to plant growth. *Compost Sci. Util*. 2003, 11, 113–124.
11. Bernal, M.P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M.A. Cegarra, J. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*. 1998, 63 (1): 91-99.
12. Chen, Y., N. Senesi, and M. Schnitzer. Information Provided on Humic Substances by E4/E6 Ratios. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 1977, 41:352-358.
13. El Fels, L., Zamama, M., El Asli, A., Hafidi., M. Assessment of biotransformation of organic matter during co-composting of sewage sludge-lignocelullosic waste by chemical, FTIR analyses, and phytotoxicity tests. International Biodeterioration & Biodegradation. 2014, 87: 128-137.

14. Asses, N., Farhat, A., Cherif, S., Hamdi, M.,Bouallagui, H. Comparative study of sewage sludge co-composting with olive mill wastes or green residues: Process monitoring and agriculture value of the resulting composts. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018, 114: 25-35.
15. Jouraiphy, A., Amir, S., El Gharous, M., Revel, J-C.,Hafidi, M. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste. *International Biodeterioration & Biodegradation.* 2005, (56): 2,101-108.
16. Jouraiphy, A., Amir, S., Winterton, P., El Gharous, M., Revel, J-C., Hafidi, M. Structural study of the fulvic fraction during composting of activated sludge–plant matter: Elemental analysis, FTIR and 13C NMR. *Bioresource Technology*. 2008, (99): 5, 1066-1072.
17. Hsu, J-H., Lo, S-L. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manur. *Environmental Pollution*. 1999, 104(2): 189-196.
18. Senesi, N. Composted materials as organic fertilizers. *Sci. Total Env*. 1989, 81/82, 521–542.
19. Lguirati A., G. AitBaddi, A. El Mousadik, V. Gilard, J.-C. Revel., Hafidi. M. Analysis of humic acids from aerated and non-aerated urban landfill composts. *International Biodeterioration and* Biodegradation. 2005, 56: 8 - 16.
20. Sellami, F., Hachicha, S., Chtourou, M., Medhioub, K., Ammar, E. Maturity assessment of composted olive mill wastes using UV spectra and humification parameters. *Bioresource Technology*. 2008, 99(15): 6900-6907.
21. Chefetz, B., P. G. Hatcher, Y. Hadar., Chen. Y. Chemical and Biological Characterization of Organic Matter during Composting of Municipal Solid Waste. *J. Environ. Qual*. 1996, 25: 776-785. doi:10.2134/jeq1996.00472425002500040018x
22. Ko, Han J., Kim, Ki Y., Kim, Hyeon T., Kim,Chi N., Umeda, M. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure. *Waste Management*. 2008, (28): 5, 813-820.
23. Kulikowska, D., Sindrewicz, S. Effect of barley straw and coniferous bark on humification process during sewage sludge composting. *Waste Management*. 2018, (79), 207-213.
24. Iglesias-Jiménez, E., Pérez-García, V. Determination of maturity indices for city refuse composts. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 1992, (38): 4, 331-343.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Estudio de valorización de la jara pringosa en los municipios de la Sierra Norte Madrileña

P. V. Mauri Ablanque[1], C. Cano Shaw[1], J. Plaza[2]

[1] IMIDRA. Departamento de Investigación Agroambiental. IMIDRA. Finca El Encin. A-2. Km 38,200. 28800 Alcalá de Henares (Madrid); pedro.mauri@madrid.org
[2] Técnico colaborador; joseplaza2512@gmail.com

Resumen: El proyecto nació por el interés de los municipios implicados, en crear empleo en zonas rurales desfavorecidas, aprovechando los recursos naturales. Y dado el actual desarrollo del sector de la biomasa de origen forestal, y el interés en los productos de origen natural, para la industria química, farmaceútica, cosmética, de biocidas, y de bebidas y alimentos. Este estudio pretende sentar las bases para un futuro desarrollo de productos derivados de la jara pringosa, con posibilidad para otras plantas aromáticas y medicinales (PAM). Se ha recopilado información sobre la caracterización de la masa vegetal, la naturaleza del terreno (fisiografía, litología, patrimonio arqueológico, naturaleza jurídica, zonas de protección ambiental, etc.), se han identificado las zonas aptas para su aprovechamiento mecanizado. Dentro de los posibles productos que se pueden obtener de la jara pringosa, el estudio se ha centrado en la obtención de aceite esencial, obtenido de forma ecológica, mediante arrastre de vapor, y el extracto etanólico de la oleorresina.

Palabras clave: Cistus ladanifer L, aceite esencial, extracto etanólico.

1. Introducción

La "jara pringosa" o "jara negra", es la principal especie vegetal que ha colonizado los antiguos cultivos en la zona noreste de la Sierra de Madrid, dando origen a extensas masas de matorral monoespecífico. De forma casi simultánea a la despoblación rural, y el abandono de los campos de labranza, se han realizado las actuales repoblaciones de *Pinus* sp en los montes aledaños. La mayor parte de éstas, se han rodeado por formaciones arbustivas de jara negra, un matorral de alta inflamabilidad, que pone en riesgo, las inversiones realizadas y los beneficios económicos de los montes de plantación (repoblaciones). Así, surge la necesidad de gestionar dichas extensiones de jara negra, hecho que en la actualidad se limita a realizar franjas cortafuegos y perímetros de seguridad de repoblaciones, carreteras y vías de paso, mediante el uso de desbrozadoras que dejan los residuos vegetales a modo de mulch, en la misma zona de trabajo. En este contexto histórico, natural, y sociológico de despoblación y falta de empleo en la Sierra, se plantea la iniciativa por parte de los municipios de la Sierra Este de Madrid, y del IMIDRA (Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural Agrario y Alimentario), de aprovechar de forma sostenible y respetuosa con el medioambiente, las grandes superficies de matorral de jara pringosa, a la vez que se salvaguardan los montes de plantación.

Se han realizado multitud de estudios a partir de la jara pringosa, en relación a la obtención de productos de interés farmacológico [1][2][3], productos antioxidantes con posibilidad de uso en la industria cosmética y de los alimentos [4], como fuente de fitoquímicos [5], o biorefinería [6], en la obtención de bioetanol [7][8], de bio-oil [9], como biomasa [10], se ha estudiado su efecto herbicida [11], como añadido en pienso para conejos [12], para proteger la degradación de la

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3364

proteína en el rumen de ovejas [13], contra patologías fúngicas en agricultura [14], todos ellos a partir de *Cistus ladanifer* L.

Nuestro estudio se ha centrado en el aprovechamiento del "ládano" o "labdanum", una oleorresina que segrega la planta de forma natural, a partir de tricomas alojados en cavidades, en el envés de las hojas [15]. Aprovechamiento realizado mediante la obtención de aceite esencial por arrastre de vapor, debido a que es un proceso sencillo, relativamente de bajo costo, versátil y con posibilidad de desarrollo en pequeños municipios, además de ser compatible con un sello ecológico.

Existen antecedentes históricos del uso tradicional de la jara negra en España, para el aprovechamiento del "ládano", éste se ha obtenido por distintos procedimientos, algunos aún en uso [16][17]. En la actualidad son empresas ligadas al sector de la perfumería, la cosmética, la aromaterápia, y otros sectores, las que demandan los productos de esta planta.

2. Materiales y métodos

La caracterización de la zona de estudio, se ha realizado utilizando el software de tratamiento de imágenes gvSIG, y la cartografía digital disponible en el Instituto Geografico Nacional (IGN), el geoportal de la infraestructura de datos espaciales de la Comunidad de Madrid (IDEM), el "Mapa de combustible forestal de Madrid", elaborado en 2015, por la Dirección General de Protección Ciudadana de la Comunidad de Madrid, segundo Mapa Forestal Español (MFE 1997-2006) y los mapas facilitados por la "Dirección general del catastro".

En función del estudio de la zona, se han seleccionado las áreas más apropiadas para su aprovechamiento mecánico. De estas zonas se ha recogido el material vegetal (jaras de 2-4 años o los crecimientos de 1-2 años de jaras de más de 4 años), por medios manuales (hoces de mano), y enviado al laboratorio para su hidrodestilación mediante Clevenger y caracterización cromatográfica por CG-FID y CG-MS. Análisis de rendimiento de oleorresina en extracto etanólico, cantidad de polifenoles totales por el Método Folín-Ciocalteu (n.º 14025 AOAC) a partir de un extracto etanólico y la capacidad antioxidante mediante ensayo DPPH (2,2-Difenil-1-picrilhidrazil), con 20mg de muestra y 2ml DPPH 0,1mM.

En el plan de aprovechamiento, se va estudiar, el rendimiento de la extracción manual del material vegetal. Los rendimientos y la capacidad de extracción mecanizada con vehículo automotriz 8x8 y 300 HP de potencia, con cabezal para recolección de matorral formado por un triturador de martillos, con sistema neumático de transporte del material, a la tolva posterior de 24m^3, de descarga hidraúlica. Ésta máquina puede trabajar con pendientes superiores al 35%, permite el ajuste de la velocidad del desbrozador de martillos y del sistema neumático de carga (velocidad del ventilador).

Las pruebas mensuales de rendimiento, se realizan mediante el corte manual de la jara, apilado y transporte para su destilación en alambique de acero inoxidable de 130 litros mediante arrastre de vapor. De forma puntual se ha realizado un picado del material 1-3cm de longitud y su destilación en alambique de 130l para analizar la calidad del producto obtenido. Simulando el efecto de picado que realizaría la máquina cosechadora.

3. Resultados y discusión

La jara pringosa (*Cistus ladanifer* subsp *ladanifer* L) ocupa una extensión total de 8305ha en los municipios en estudio (Puentes Viejas, Berzosa del Lozoya, Robledillo de La Jara, Cervera de Buitrago, El Atazar, Puebla de La Sierra, Patones, Torremocha de El Jarama y El Berrueco), lo que supone un 30% sobre una superficie total de 27316ha. Su distribución actual no es aleatoria, sino que la planta se ha establecido en los antiguos cultivos de cereal en secano, huertas y eriales (monte desarbolado, MFE), que empezaron a abandonarse a comienzos de los años 70 (ortofoto vuelo interministerial entre los años 1973-1986). No ha podido colonizar zonas rocosas de alta

montaña (ortofoto del Plan Nacional de Ortofotos Aéreas año 1997 y siguientes), dehesas con aprovechamiento ganadero, p.e la Dehesa de Berzosa del Lozoya, Robledillo de La Jara, El Berrueco, etc, perímetro de núcleos urbanos, y repoblaciones de *Pinus* sp (montes de plantación, MFE) realizadas éstas últimas en los años 50 del siglo pasado. (Tabla 1 y Figura 1).

Tabla 1. Distribución de la superficie de jara en la zona de estudio.

Municipio	Término municipal (ha)	Superficie de jara (ha)	Porcentaje de jara (%)
Puentes Viejas	5853	290	5
Berzosa del Lozoya	1462	754	52
Robledillo de La Jara	2100	1332	63
Cervera de Buitrago	1153	507	44
El Atazar	2841	1871	66
El Berrueco	2840	772	27
Puebla de La Sierra	5671	1382	24
Patones	3503	1312	37
Torremocha del Jarama	1890	83	4
TOTAL	27316	8305	30,4

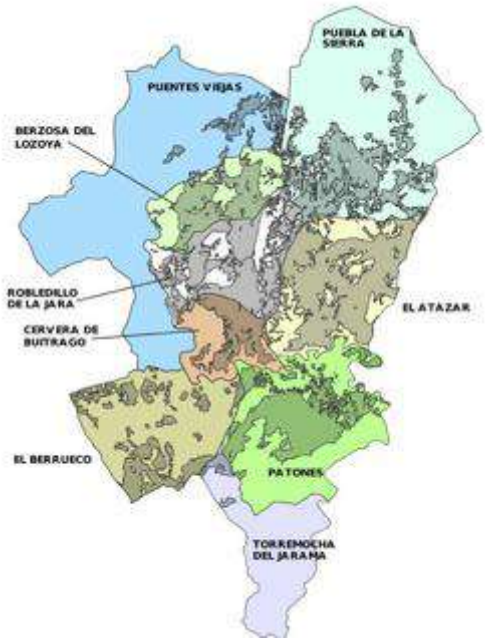


Figura 1. Distribución espacial de la jara pringosa en los municipios en estudio.

El territorio es claramente montañoso, con una pendiente media del 26%, con medias máximas en Puebla de la Sierra del 41% y mínimas del 15% en Torremocha del Jarama. La distribución de la especie en función de la pendiente, es un dato muy importante, debido a que limita el uso de maquinaria, y aumenta el riesgo de erosión del terreno (Figura 2, Tabla 3). Según el Mapa de Estados Erosivos (MAPAMA), el 43% de la superficie de jara (4947ha) se encuentra dentro del nivel de erosión 3 (12-25 T/ha-año), siendo el máximo nivel de 6 (>200 T/ha-año), y 2450ha en el nivel de erosión 1 (0 – 5 T/ha-año) (tabla 2).

Tabla 2. Superficie de terreno afectada y superficie de jaral en cada nivel de erosión, en el territorio de los 9 municipios.

Nivel de erosión	Tasa de erosión (T/ha-año)	Superficie afectada (ha)	Superficie de jara afectada (ha)
1	0 - 5	12205	2450 (20%)
3	12 - 25	11438	4947 (61%)
4	25 - 50	291	0
5	50 - 100	2139	754 (9%)
8	> 200	1243	0
TOTAL		27316	8151 (100%)

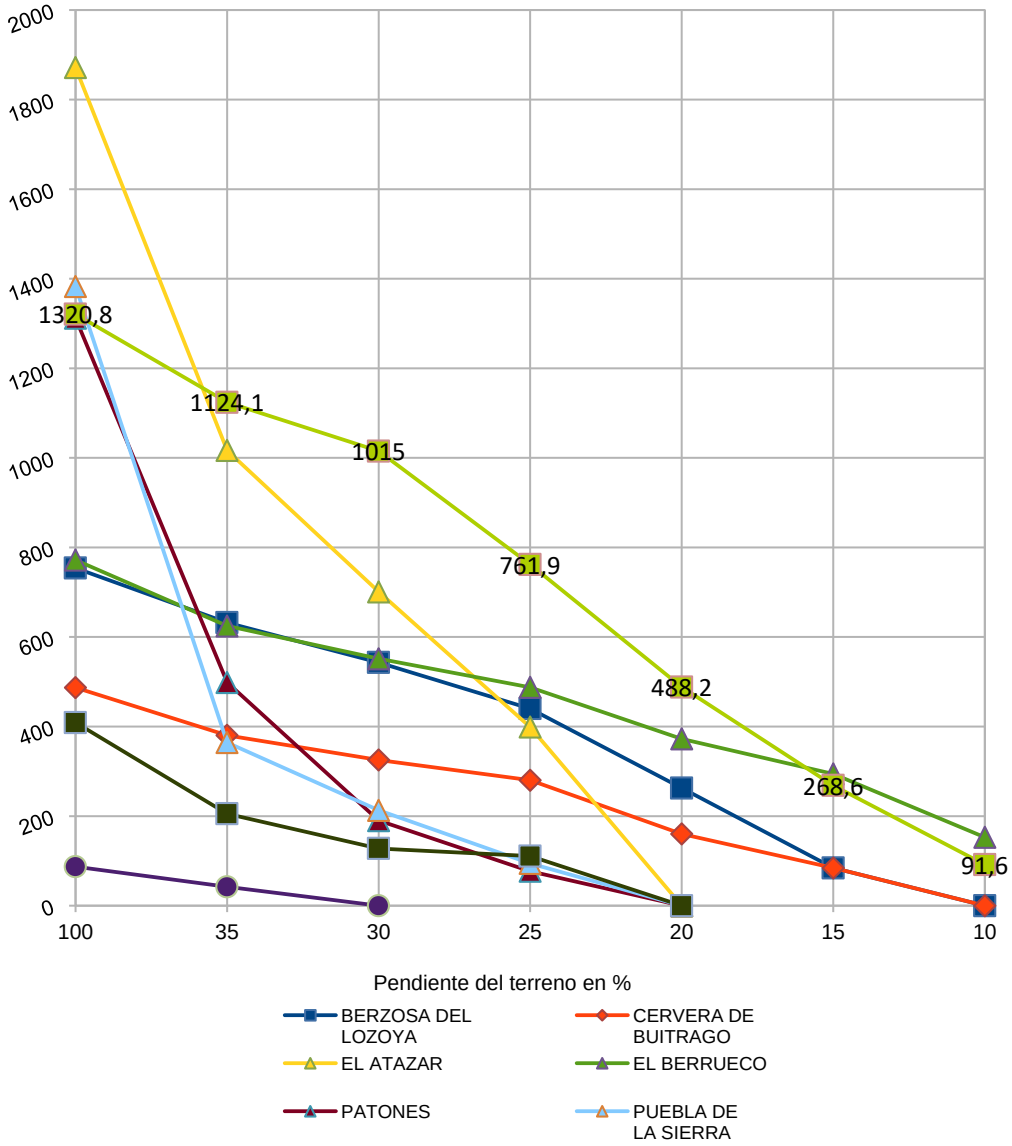


Figura 2. Superficie de jara en función de la pendiente del terreno.

Tabla 3. Superficie total de *Cistus ladanifer* subsp *ladanifer* L. en función de la pendiente.

Superficie de jara (en ha)							
Municipios	**Pendiente (en %)**						
	100	**35**	**30**	**25**	**20**	**15**	**10**
El Atazar	1871	1016	700	399	0	0	0
Puebla de la Sierra	1382	364	212	94	0	0	0
Robledillo de La Jara	1320	1124	1015	761	488	268	91
Patones	1312	498	190	77	0	0	0
El Berrueco	771	624	551	487	372	294	152
Berzosa del Lozoya	754	632	543	440	262	84	0
Cervera de Buitrago	487	380	325	280	160	84	0
Puentes Viejas	408	205	127	110	0	0	0
Torremocha del Jarama	87	42	0	0	0	0	0
TOTAL	8396	4888	3666	2651	1283	731	244

Según la tabla 3 en Robledillo de La Jara, 1015 ha de jara pringosa, se sitúan en pendiente inferior al 30%.

La naturaleza jurídica de la propiedad, es otro elemento, que condiciona el aprovechamiento del recurso. En general la mayor parte de los terrenos ocupados por la jara, son pequeños minifundios de menos de 0,5ha, de carácter privado. Este hecho dificulta en gran medida el aprovechamiento del terreno (Tablas 4, 5, 6 y Figura 3).

Tabla 4. Superficie de jara pringosa – naturaleza de la propiedad del terreno

Municipios	**Superficie de jara (en ha)**	**Jara en terrenos privados (en ha)**	**Jara en terrenos públicos (en ha)**
El Atazar	2112	810	1302
Puebla de la Sierra	1382	200	1178
Robledillo de La Jara	1320	718	602
Patones	1312	1048	263
El Berrueco	771	718	53
Berzosa del Lozoya	753	531	222
Cervera de Buitrago	487	349	137
Puentes Viejas	409	95	314
Torremocha del Jarama	86	38	48

Tabla 5. Caracterización de las parcelas privadas y públicas en los distintos municipios 2017

Municipio	Superficie parcelas privadas (en ha)			Municipio	Superficie parcelas públicas (en ha)		
	Media	**Máx**	**Mín**		**Media**	**Máx**	**Min**
El Atazar	0,26	44,9	< 0,001	El Atazar	5,76	418,6	0,002
Puebla	0,15	8,8	< 0,001	Puebla	14,9	548,3	0,0024
Robledillo	0,22	113,6	0,0015	Robledillo	3,34	261,7	0,0042
Patones	1,0	345,2	< 0,001	Patones	2,34	309,7	0,0015
El Berrueco	0,46	182,7	< 0,001	El Berrueco	1,06	50,7	0,0017
Berzosa	0,26	15,7	0,001	Berzosa	3,5	182	0,0002
Cervera	0,15	387,2	0,003	Cervera	1,14	26,7	0,0094
P.Viejas	0,38	94,4	0,0015	P.Viejas	1,9	54,0	0,0023
Torremocha	1,31	102,9	0,001	Torremocha	0,63	15,9	0,0061

Según la tabla 5, El Atazar posee parcelas privadas de 44,9ha de superficie máxima, e inferiores a 0,001ha, siendo la media del conjunto de parcelas privadas de 0,26 ha (2600m^2).

Tabla 6. Número de parcelas privadas y públicas por municipio 2017

Municipios	Parcelas privadas (nº)	Parcelas públicas (nº)	Municipios	Parcelas privadas (nº)	Parcelas públicas (nº)
El Atazar	3335	299	Berzosa del Lozoya	2444	214
Puebla de la Sierra	4156	332	Cervera de Buitrago	6206	146
Robledillo de la jara	4193	331	Puentes Viejas	9759	447
Patones	2659	328	Torremocha del Jarama	1222	203
El Berrueco	4991	253			



Figura 3. Parcelación privada en el municipio de Berzosa del Lozoya

Cistus ladanifer L. es una planta alógama, con un sistema de incompatibilidad gametofítico, no se reproduce vegetativamente de forma natural, y puede producir hasta 158.000 semillas/planta, con un letargo interno debido a la impermeabilidad de la cubierta de la semilla, lo que garantiza su regeneración de forma continua a lo largo de los años, a partir del banco de semillas [18].

La evolución del territorio a lo largo de los años, aporta mucha información relativa al aprovechamiento del matorral de jara. Ésta, produce sustancias alelopáticas, y autoalelopáticas [19], que podrían condicionar la continuidad de la especie a largo plazo. Consultando las ortofotos del vuelo americano de los años 1956-57, el vuelo interministerial realizado durante los años 70-80, OLISTAT, SIGPAC, y las fotos del Plan Nacional de Ortofotos Aereas (PNOA), realizadas hasta el año 2014, puede apreciarse claramente el crecimiento del matorral desde el año 1956 hasta el 2014.

Se realizan mensualmente análisis físico-químicos. Dichos análisis consisten en la extracción del aceite esencial en laboratorio mediante hidrodestilación en Clevenger, caracterización cromatográfica (CG-MS), se analiza rendimiento en oleorresina, contenido en polifenoles y capacidad antioxidante. (tablas 7 y 8)

Tabla 7. Resultados analítica rendimiento, polifenoles totales y capacidad antioxidante

Fecha análisis	**Rendimiento (extracto etanolico) %**	**Polifenoles totales (% A. gallico)**	**Capacidad antioxidante %**
AGOSTO 2018	11,8	9,57	81,29
OCTUBRE 2018	7,34	9,78	92,50
NOVIEMBRE 2018	11,62	5,03	76,01
DICIEMBRE 2018	10,73	10,11	68,8
ENERO 2019	10,85	10,86	70,35
FEBRERO 2019	16,03	18,31	66,91

Tabla 8. Resultado cromatografías.

Especie química	**Agosto %**	**Septiembre %**	**Noviembre %**
α-pineno	9,66	27,42	51,1
Campheno	0,23		3,1
Verbenene			0,2
Limoneno	0,48	0,96	1,8
γ-terpineno	0,8	1,02	1,4
P-cymeno		0,93	1,6
2,2,6-trimethylciclohexanona	1,46	0,6	1,5
Trans-pinocarveol+ Allo-aromadendreno	7,25+ 1,4	-	-

Especie química	Agosto %	Septiembre %	Noviembre %
Bornyl acetato	2,8	2,26	3,2
Ledol	5,07	3,21	0,8
Viridiflorol	17,44	11,13	2,2
Terpinen-4-ol	2,43	2,67	-
Pinocarvone	2,55	2,75	3,0
Borneol	0,77	-	1,0
3-nonen-2-one	1,42	0,92	
Menthadienol isomero	1,44	-	-
Myrtenol	1,59	1,26	-
RENDIMIENTO	0,15	0,32	-

El rendimiento se ha obtenido en laboratorio mediante hidrodestilación en equipo Clevenger. Solo se han incluido los más importantes cuantitativamente.

4. Conclusiones

La jara es una planta autóctona, con gran capacidad colonizadora (tabla 1), posiblemente a partir del banco de semillas, cuya diseminación han podido facilitar el corzo, o el ganado caprino o vacuno en extensivo. Dando origen a masas bien establecidas con predominio sobre otras especies, llegando a ocupar hasta un 66% de la superficie de un municipio, como ocurre en El Atazar (Tabla 1 y Figura 1).

A pesar de ser una planta que produce sustancias alelopáticas y autotóxicas, no se aprecian en las ortofotos, daños en el matorral a largo plazo, manteniéndose la masa arbustiva, prácticamente desde mediados de los años 70-80 hasta la actualidad.

La mayor parte del matorral, un 61%, se sitúa en zonas con un alto nivel erosivo, nivel 3 (tabla 2). Lo que podría condicionar el aprovechamiento mecanizado de la jara. El trabajo en pendientes inferiores al 20% utilizando maquinaria, solo sería posible en municipios como Robledillo de La Jara, El Berrueco, Berzosa del Lozoya y Cervera de Buitrago (Tabla 3, Figura 2).

En los municipios más adecuados para su aprovechamiento mecanizado, la mayor parte de la jara, se situa en terrenos privados de muy poca superficie, la extensión media de una parcela en Berzosa del Lozoya es de 2600m^2, esta gestión del matorral implicaría el acuerdo de muchos propietarios, y puede dificultar el aprovechamiento del matorral (Tablas 4, 5, 6 y Figura 3).

Las labores de manejo de la jara para evitar incendios forestales, se desarrollan desde el año 2004 (anteriormente de forma menos intensiva). Los trabajos se suceden en las mismas zonas cada 5 – 6 años, lo que evidencia la regeneración del matorral a partir del banco de semillas. Acentuándose dicha regeneración en las zonas de acumulación de triturados, al paso de la maquinaria (ortofotos PNOA).

Como puede observarse de los resultados cromatográficos del aceite esencial obtenido por hidrodestilación, los porcentajes varían en función de la época del año, en la que se realice el análisis. Según estudios realizados con *Cistus ladanifer* L cultivado en Córcega las cantidades de cada elemento analizado, variaban entre distintos individuos, para la misma época del año [20]. Los elementos mayoritarios obtenidos en nuestros análisis, son análogos a los hallados por otros investigadores para *Cistus ladanifer* L. en el Sur de Francia, España y Portugal. Estos son, alfa-pineno, 2,2,6-trimethilciclohexanona, Trans-pinocarveol, viridiflorol, bornyl acetato, ledol, pinocarvone, y terpinen-4-ol [20][21].

Referencias

1. Barros L. et al., Antifungal activity and detailed chemical characterization of Cistus ladanifer phenolic extracts. Industrial Crops and Products 41, 41– 45 (2013).
2. Barrajón-Catalán E. et al., Cistaceae aqueous extracts containing ellagitannins show antioxidant and antimicrobial capacity, and cytotoxic activity against human cancer cells. Food and Chemical Toxicology 48, 2273–2282 (2010).
3. Aziz M. et al., Antidiarrhoeal activity of Cistus ladaniferus aqueous extract. Spatula DD. 1(3): 175-179 (2011).
4. Guimarães R., João Sousa M., C.F.R. Ferreira I., Contribution of essential oils and phenolics to the antioxidant properties of aromatic plants. Industrial Crops and Products 32, 152–156 (2010).
5. Guimarães R. et al., Aromatic plants as a source of important phytochemicals: Vitamins, sugars and fatty acids in Cistus ladanifer, Cupressus lusitanica and Eucalyptus gunnii leaves. Industrial Crops and Products 30 427–430 (2009).
6. Alves-Ferreira J. et al., Hydrothermal Treatments of Cistus ladanifer Industrial Residues Obtained from Essential Oil Distilleries. Waste Biomass Valor (2017).
7. D. Ferro M., et al., Bioethanol production from steam explosion pretreated and alkali extracted Cistus ladanifer (rockrose), Biochem. Eng. J., (2015).
8. Fernandes M. et al. Comparative study on hydrolysis and bioethanol production from cardoon and rockrose pretreated by dilute acid hydrolysis. Industrial Crops & Products 111 633–641 (2018).
9. El Farissi H. et al., Valorisation of a Forest Waste (Cistus Seeds) for the Production of Bio-Oils. Journal of Materials and Environmental Esciences 8 (2), pp. 628-635 (2017).
10. Carrión-Prieto et al., Valorization of Cistus ladanifer and Erica arborea shrubs for fuel: wood and bark thermal characterization. Maderas Ciência y tecnologia 19:443–454 (2017)
11. Verdeguer M., Blázquez M. A., Boira H., Chemical composition and herbicidal activity of the essential oil from a Cistus ladanifer L. population from Spain. Natural Product Research Vol. 26, No. 17, 1602–1609, (2012).
12. Zamora Lozano M. et al., Utilización del Cistus ladaniferus L. en pienso para conejos. Archivos de zootecnia, vol, 33, num. 127, p. 295 (1984).
13. Dentinho M. T. P. et al., The use of a tannin crude extract from Cistus ladanifer L. to protect soya-bean protein from degradation in the rumen. Animal, 1: pp. 645–650 (2007).
14. Karim H. et al. Antifungal properties of organic extracts of eight Cistus L. species against postharvest citrus sour rot. Letters in Applied Microbiology 62, 16--22 (2015) The Society for Applied Microbiology.
15. Gulz P.G, Throsten H, Kurt H., Leaf trichomes in the genus Cistus. Flora, 191 85-104, (1996).
16. Josefa Martín Morgado, Raúl Tapias y Patricia Alesso. Producción de goma bruta de jara (Cistus ladanifer L.) en el suroeste de la península ibérica. IV-Congreso Forestal Español Zaragoza 26-30 septiembre 2005.
17. Becerro de Bengoa Mariña G., Lucini C., Del Monte Maíz M., Aprovechamiento de Cistus ladanifer L. CONAMA Congreso nacional de medioambiente. Universidad Católica de Avila (2014).
18. F. Frazão D. et al. Cistus ladanifer (Cistaceae): a natural resource in Mediterranean-type ecosystems. Planta (2017).
19. Chaves Lobón N., Ferrer de la Cruz I., Alías Gallego J.C., Autotoxicity of Diterpenes Present in Leaves of Cistus ladanifer L., Plants 8, 27; (2019).
20. Mariotti et al., Composition of the Essential Oil of Cistus ladaniferus L. Cultivated in Corsica (France). Flavor and Fragance Journal, vol. 12, 147-151 (1997).
21. G. Mata V., Rodrigues A., Characterization of the Portuguese-Grown Cistus ladanifer Essential Oil. J. Essent. Oil. Res., vol. 17, March/April (2005).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Evaluación de la iluminación fotosintética mediante LEDs en Jardinería Vertical

María Pinelopi Kaltsidi[1], Antonio Franco Salas[2,*], Rafael Fernández Cañero[3], Luis Pérez Urrestarazu[2]

[1] Terapia Urbana S.L. C/ Factores Acc. 12-14 Local 4D, 41015. Sevilla; maria.pk@terapiaurbana.es
[2] Área de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Sevilla. ETSIA Ctra. Utrera km.1, 41013. Sevilla; afranco@us.es, lperez@us.es
[3] Departamento de Ciencias Agroforestales. Universidad de Sevilla. ETSIA Ctra. Utrera km.1, 41013. Sevilla; rafafc@us.es

Resumen: Los Jardines Verticales son un sistema de enverdecimiento de paredes y muros tanto en el exterior como en el interior de edificios. En este último caso se requiere de un sistema de iluminación artificial para asegurar un desarrollo correcto de la vegetación. El objetivo de este trabajo es analizar el efecto de tres luminarias LED comerciales en la iluminación de jardines verticales interiores en términos de calidad visual y correcto desarrollo de las plantas. Las luminarias testadas se diferencian en la potencia y tipo de luz. Los resultados obtenidos muestran que las tres luminarias son aptas en el desarrollo de las plantas, pero la luminaria de luz rojo/azul (tipo C) presentó en general un menor crecimiento en las plantas, menos cobertura del jardín y daba una apariencia poco natural a las plantas debido a la mezcla de rojos y azules. En relación al consumo de agua, fue un 30% superior en el caso de la luminaria de luz blanca de mayor potencia (tipo A) en referencia a las otras dos.

Palabras clave: jardines verticales interiores, calidad visual, plantas ornamentales

1. Introducción

Los Jardines Verticales son un sistema de enverdecimiento de paredes y muros que se está popularizando debido a sus múltiples beneficios sociales y ambientales. Permiten la disposición de plantas en el plano vertical, de modo que se pueden cubrir fachadas, pero también pueden instalarse en el interior de edificios. En este último caso, en la mayoría de las ocasiones se requiere de un sistema de iluminación artificial para asegurar un desarrollo correcto de la vegetación, garantizando a la vez una calidad visual adecuada.

Una iluminación artificial adecuada para el crecimiento de plantas en interiores debe equilibrar la calidad, la intensidad, el fotoperíodo y el ciclo día / noche [1,2]. La calidad de la luz se refiere a la composición espectral de la fuente de luz. Las longitudes de onda que son efectivas para la fotosíntesis de las plantas, denominadas radiación fotosintéticamente activa (PAR), están en la longitud de onda visible (aproximadamente de 400 a 700 nm). Dentro de este rango espectral, las luces azules (pico de absorción a 430 nm) y rojas (pico de absorción a 662 nm) son las más relevantes para la fotosíntesis, ya que representan las principales longitudes de onda absorbidas por el pigmento de clorofila [3]. El control de las cualidades espectrales de la iluminación aplicada mediante combinaciones de varias fuentes de luz con emisiones en distintas longitudes de onda permite un mejor crecimiento [2]. La intensidad de la luz se refiere a la cantidad total de luz que reciben las plantas y disminuye con la distancia a la fuente. Los requisitos de luz para la supervivencia y el crecimiento varían entre las especies [4]. Algunas son

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3414

capaces de crecer con bajas intensidades de luz (especies tolerantes a la sombra que crecen frecuentemente como plantas de interior), mientras que otras requieren irradiaciones más altas y con frecuencia se cultivan al aire libre (o en interiores con fuentes de luz artificial de alta intensidad). El fotoperíodo también es un factor importante para el crecimiento de las plantas, ya que influye en varios procesos de desarrollo, como la floración [5,6].

Las tecnologías de iluminación artificial se han empleado para cultivar plantas con diversos grados de éxito. Las lámparas más comúnmente utilizadas han sido hasta hace poco las lámparas incandescentes, fluorescentes y de descarga de alta intensidad (como haluro metálico o sodio a alta presión). No obstante, en la actualidad se están introduciendo los diodos emisores de luz (LED) gracias a su considerable bajada de precio, que antes resultaba una barrera para su uso.

De este modo, el uso de LEDs como sistema de iluminación para el crecimiento plantas se está expandiendo, aunque esta tecnología aún está evolucionando [7]. Las principales ventajas de las lámparas LED son su larga vida útil, su bajo calor radiante, su capacidad de emitir en una composición espectral controlada y el ajuste de la intensidad de la luz [8]. Los LED emiten en un espectro muy estrecho (20-40 nm) que, si coincide con el rango de absorción máxima de clorofila, aumenta la eficiencia de uso de energía, ya que la mayoría de la luz emitida se usaría para la fotosíntesis. Sin embargo, las luces de crecimiento LED (es decir, que emiten en las regiones azul y roja) no se recomiendan para las plantas ornamentales cuyo propósito es en gran medida estético (como es el caso de los jardines verticales interiores), porque dan a las plantas un aspecto poco natural cuando la luz está encendida. Precisamente este aspecto se corrige con la aparición de luminarias LED comerciales de luz blanca.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el efecto de tres luminarias LED comerciales en la iluminación de jardines verticales interiores en términos de calidad visual y correcto desarrollo de las plantas.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño experimental y descripción de los módulos de jardinería vertical

Los ensayos se realizaron desde mediados de mayo a finales de julio de 2018 (67 días en total) en el Laboratorio de Naturación Urbana de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos (ETSIA) de la Universidad de Sevilla, que se haya en un sótano sin iluminación natural.

Se han testado tres luminarias (ver apartado 2.2.) situadas por encima de cada uno de los módulos de jardín vertical, con una separación de 1 m. Para evitar la influencia del resto de luminarias se dispusieron unas láminas plásticas opacas de 1.5 m de ancho entre unas y otras, de modo que cada lámpara iluminara exclusivamente un módulo de jardín vertical. Se proporcionó un fotoperiodo constante de 12 horas por día durante el transcurso del ensayo.

Para los ensayos se han utilizado tres módulos de jardinería vertical (Fytotextile®, Terapia Urbana S.L.) de 72 cm x 73 cm, compuestos por una cuadrícula de veinticinco bolsillos (5 líneas y 5 columnas) donde se insertan las plantas. Cada módulo Fytotextile® cuenta con un sistema de riego por recirculación con una tubería vertical de PE de 16 mm de diámetro conectada a una bomba de agua compacta sumergida (CompactON 1000 15W, Eheim, Alemania). A su vez, la tubería de PE estaba unida a una de PVC con perforaciones cada 30 mm dispuesta en horizontal en la parte superior de cada módulo, por la cual se realizaba el aporte de agua. Un depósito de agua colocado en la parte inferior de cada módulo recogía el agua sobrante que se utilizaba de nuevo para regar. Se realizaron dos riegos al día de tres minutos cada uno, de forma que los módulos recibieran una cantidad de agua adecuada para que no resultara un factor limitante en el desarrollo de la vegetación.

2.2. Luminarias testadas

Se testaron dos sistemas de iluminación LED comerciales de luz blanca: Aster (Ignia Green) y Carso CMH Superflood (Lledó). Por otro lado, se compararon con una lámpara LED específica para crecimiento de plantas que combinaba LEDs azules y rojos: CF-UTO1 (CF GROW). Las características de las lámparas pueden verse en la tabla 1.

Tabla 1. Características de las luminarias utilizadas

Modelo	Módulo de jardín vertical	Potencia (W)	Tipo luz
Aster	A	40	Blanca
Carso	B	35	Blanca
CF-UTO1	C	100	Azul/roja

2.3. Especies utilizadas

En cada módulo, se utilizaron trece plantas, insertadas en bolsillos alternos (figura 1). La distribución de las plantas se organizó para tener una cobertura satisfactoria y un desarrollo de plantas efectivo. Así, al comienzo del experimento, se plantaron siete unidades de Soleirolia soleirolii (Lágrimas de Ángel) y seis de Spathiphyllum wallisii (Espatifilo). Cada planta tenía un tamaño similar para la comparación de los resultados y se introdujeron en los bolsillos con el sustrato que traían originalmente de vivero.



Figura 1. Disposición de las plantas en los módulos (A, B y C de izquierda a derecha) tras la plantación inicial.

2.4. Medidas realizadas

Para evaluar el desarrollo de las plantas se han tenido en cuenta los siguientes aspectos: número de flores y área foliar (en *S. wallisii*), cobertura foliar, índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI), contenido relativo de clorofila (SPAD) y peso fresco y seco de la parte aérea y de las raíces. El NDVI se obtuvo con un medidor portátil (Trimble GreenSeeker), el área foliar mediante un LI-3100C Area Meter (LI-COR, Inc., Nebraska, Estados Unidos) y el SPAD por medio de un SPAD 502 Plus Chlorophyll Meter (Konica Minolta Optics, Inc., Japón). Para el peso fresco, en cada planta, se separó la parte aérea de la radicular y se realizaron pesadas mediante una báscula de precisión. Posteriormente, las muestras se secaron en un horno a 70 ºC durante 72 horas y se volvieron a pesar para obtener el peso seco.

Además se midió el consumo de agua registrando los aportes de agua cada vez que se rellenaban los depósitos. Igualmente, se monitorizó el pH y la CE del agua en cada uno de los módulos a lo largo del ensayo.

3. Resultados y discusión

El consumo de agua fue similar para los tres módulos, siendo los valores medios 1.36, 1.00 y 1.07 L m^{-2} d^{-1} (para los módulos A, B y C, respectivamente).

En la figura 2 se muestra el estado de cobertura al final del ensayo. Como se puede apreciar, la cobertura es sensiblemente mejor en el módulo B, mostrando el A un grado intermedio y algo más escasa en el C.



Figura 2. Cobertura final en los módulos (A, B y C de izquierda a derecha).

En relación al número de flores del *S. wallisii*, en la figura 3 se muestra la evolución para cada uno de los módulos del número total de flores blancas y verdes. Destaca el módulo B tanto en número de flores blancas como verdes, mostrando el A una peor evolución. Se debe tener en cuenta que el módulo B presentaba inicialmente un nº de flores sustancialmente más elevado. Igualmente se puede destacar que la relación entre flores verdes y blancas es menor en el C, lo cual indica que el tipo de luz podría favorecer que aparecieran más flores blancas que verdes (o que menos flores blancas se tornaran en verdes).

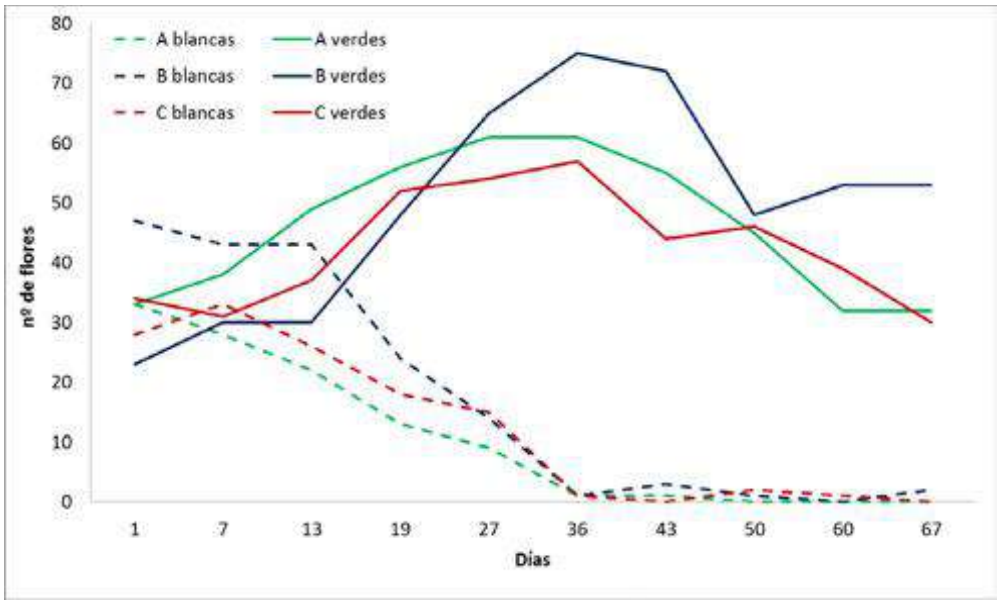


Figura 3. Evolución del número total de flores blancas y verdes en cada módulo.

En la tabla 2 se muestran los valores medios de NDVI, SPAD y área foliar total por planta (estos dos últimos fueron obtenidos únicamente para *S. wallisii*). El módulo B exhibió unos valores ligeramente superiores de NDVI y de contenido de clorofila, siendo menores en el módulo C. Sin embargo el valor medio de área foliar total por planta fue superior en el caso del módulo A.

Tabla 2. Valores medios de NDVI, área foliar y SPAD en cada módulo

Módulo de jardín vertical	NDVI	SPAD	Área foliar (cm^2 $planta^{-1}$)
A	0.76	51.10	1924.5
B	0.77	53.42	1628.7
C	0.68	50.59	1444.5

Los resultados de los valores de peso fresco y seco medios por planta en cada uno de los módulos se muestran en las tablas 3 (para *S. wallisii*) y 4 (para *S. soleirolii*). Se puede apreciar como el desarrollo de la parte aérea de las plantas fue mayor en el módulo A, seguido del módulo B. En el módulo C sin embargo se obtuvo un peso medio por planta bastante inferior, especialmente en el caso de *S. soleirolii*, en el que se registró un peso medio por debajo del 50% en relación a los otros dos módulos. Curiosamente, en *S. soleirolii* el peso de las raíces fue ligeramente superior en C con respecto a los módulos restantes.

Tabla 3. Valores medios por planta de peso fresco y seco (g planta-1) de la parte aérea y radicular de S. wallisii en cada módulo

Módulo de jardín vertical	Peso fresco		Peso seco	
	Parte aérea	Raíces	Parte aérea	Raíces
A	126.99	43.50	10.94	3.94
B	104.82	30.04	9.64	2.65
C	91.47	21.30	9.31	1.41

Tabla 4. Valores medios por planta de peso fresco y seco (g $planta^{-1}$) de la parte aérea y radicular de *S. soleirolii* en cada módulo

Módulo de jardín vertical	Peso fresco		Peso seco	
	Parte aérea	Raíces	Parte aérea	Raíces
A	54.81	10.53	8.21	1.52
B	50.63	10.34	7.56	1.28
C	24.52	11.56	2.62	1.32

Los resultados obtenidos son coherentes con los presentados anteriormente en otro estudio de sistemas de iluminación para jardines verticales en el que se testaron lámparas incandescentes, de halogenuros metálicos y fluorescentes [9]. Con la luminaria A, se han conseguido valores ligeramente superiores a los fluorescentes (que fueron los que propiciaron un mayor desarrollo de las plantas) para *S. wallisii*, siendo algo menores para las luminarias B y C. Sin embargo, curiosamente, para *S. soleirolii* los LED han funcionado considerablemente mejor que otras luminarias testadas en dicho estudio. Bergstrand y Schüssler [10] también obtuvieron mejores resultados de producción utilizando LED con respecto a lámparas de halogenuros metálicos. De este modo, tanto por el desarrollo mostrado por las plantas como por un menor consumo energético, las luminarias LED se posicionan como la mejor alternativa para la iluminación artificial de plantas.

En cuanto a la percepción de la cobertura vegetal bajo la lámpara LED incluyendo solo rojos y azules, los efectos detectados son coincidentes con los reportados por Jost-Boissard et al. [11],

determinando que este tipo de iluminación resulta indeseable cuando se van a visualizar elementos vegetales.

4. Conclusiones

En general, las tres luminarias testadas son aptas para el cultivo de plantas en jardines verticales en términos de correcto desarrollo de las plantas. No obstante, la lámpara C presentó en general un menor crecimiento en las plantas, exhibiendo claramente una menor cobertura del módulo y plantas más pequeñas (menor área foliar y peso por planta). Por otro lado, la calidad visual aportada por la luminaria C fue reducida ya que daba una apariencia poco natural a las plantas debido a la mezcla de rojos y azules y ausencia de otras longitudes de onda. En relación al consumo de agua, fue un 30% superior en el caso de la luminaria A en referencia a las otras dos.

Referencias

1. Thiel, S., Dohring, T., Kofferlein, M., Kosak, A.,Martin, P. & Seidlitz, H.K. (1996). A Phytotron for Plant Stress Research: How Far Can Artificial Lighting Compare to Natural Sunlight? *Journal of Plant Physiology*, 148, 456-463.
2. Goto, E. (2003). Effects of light quality on growth of crop plants under artificial lighting. *Environment Control in Biology*, 41, 121-132.
3. Pinho, P., Jokinen, K. & Halonen, L. (2012). Horticultural lighting - Present and future challenges. *Lighting Research and Technology*, 44, 427-437.
4. Niinemets, Ü. (2006). The controversy over traits conferring shade-tolerance in trees: ontogenetic changes revisited. Journal of Ecology, 94, 464–470.
5. Mortensen, L.M., & Grimstad, S.O. (1990). The effect of lighting period and photon flux density on growth of six foliage plants. *Scientia Horticulturae*, 41, 337-342.
6. Mattson, N.S., & Erwin, J.E. (2005) The impact of photoperiod and irradiance on flowering of several herbaceous ornamentals. *Scientia Horticulturae*, 104, 275–292.
7. Olle, M., & Virsile, A. (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science*, 22, 223-234.
8. Yeh, N. & Chung, J. (2009). High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2175-2180.
9. Egea, G., Pérez-Urrestarazu, L., González-Pérez, J., Franco-Salas, A. & Fernández-Cañero, R. (2014). Lighting systems evaluation for indoor living walls. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13 (3), 475-483.
10. Bergstrand, K.J. & Schüssler, H.K. (2012). Growth and photosynthesis of ornamental plants cultivated under different light sources. *Acta Hortic.* 956, 141–147.
11. Jost-Boissard, S., Fontoynont, M. & Blanc-Gonnet, J. (2009). Perceived lighting quality of LED sources for the presentation of fruit and vegetables. *J. Mod. Opt*. 56, 1420–1432.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Implantación de un Visor GIS con software libre en la Comunidad de Regantes del Trasvase Tajo-Segura de Totana, Murcia

MD Gómez-López [1], J Cánovas[2], F Costa[2], MD Carrillo[3], MP Navarro[3], P Gómez[3]

[1] Cátedra AgritechMurcia, Universidad Politécnica de Cartagena; lola.gómez@upct.es
[2] Comunidad de Regantes del Trasvase Tajo-Segura de Totana
[3] La Compañía del Agua, GIS y Energía, S.L; pgomezg@gestiontecnica.eu

Resumen: En el ámbito del desarrollo de software orientado a la implementación de sistemas de información geográfica, una de las empresas de referencia a nivel internacional es la multinacional estadounidense Esri. En particular, en el contexto de los visores cartográficos para la web, por la experiencia del usuario que aportan. No obstante, la utilización de visores, tal y como los ofrece Esri en su sitio web, queda circunscrita al consumo de servicios ArcGIS Server, que sólo se pueden gestionar mediante la aplicación de Esri ArcGIS for Server. El elevado coste de la adquisición de este software propicia, en muchos casos, la búsqueda de soluciones alternativas, que casi siempre pasan por la utilización de librerías de desarrollo de código abierto, como son OpenLayers, GeoExt y ExtJS, entre otras. Aquí se plantea una propuesta que aprovecha las características funcionales del visor de Esri, evitando recurrir a ArcGIS for Server como servidor de mapas. Es posible gracias a la generación de servicios WMS y WFS a partir de software libre (servidores de mapas MapServer o GeoServer) y, al hecho de que Esri mantenga liberado bajo la licencia Apache 2.0 el código de su visor, permitiendo la alteración del código, lo que permite implementar capacidades funcionales nuevas, como la recuperación interactiva de datos temáticos (operación GetFeatureInfo en servicios WMS) y las búsquedas multicriterio sobre el mapa (operación GetFeature en servicios WFS).

Palabras clave: sistema de información geográfica; servicio OGC; software libre; ArcGIS Server; visor Flex.

1. Introducción

En el ámbito del desarrollo de software orientado a la implementación de sistemas de información geográfica, una de las empresas de referencia a nivel internacional es la multinacional estadounidense Esri. En particular, en el contexto de los visores cartográficos para la web, son muy conocidos, por la experiencia del usuario que aportan [1], sus visores Flex, basados en la tecnología Adobe Flash [2].

No obstante, la utilización de visores Flex, tal y como los ofrece Esri en su sitio web (http://resources.arcgis.com/es/communities/flex-viewer), queda circunscrita al consumo de servicios ArcGIS Server, que sólo se pueden gestionar mediante la aplicación de Esri ArcGIS for Server [3]. La elevada inversión que para empresas y administraciones supone la adquisición de este software propicia, en muchos casos, la búsqueda de soluciones alternativas, que casi siempre pasan por la utilización de librerías de desarrollo de código abierto, como son OpenLayers, GeoExt y ExtJS, entre otras [4]. Esta alternativa, que en general puede dar

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3472

resultados aceptables, necesariamente implica renunciar a las ventajas que, desde diversos puntos de vista (ergonómico y funcional, sobre todo), conlleva el uso de los visores Flex.

En esta comunicación se plantea, sin abandonar la línea del software libre, una segunda propuesta que pretende aprovechar las características funcionales del visor Flex, evitando recurrir a ArcGIS for Server como servidor de mapas. Ello es posible gracias a varios factores: en primer lugar, existe la posibilidad de generar servicios WMS y WFS a partir de software libre, como es el caso de los servidores de mapas MapServer [5] o GeoServer [6]; además, el visor Flex ya cuenta por defecto con la capacidad de mostrar servicios WMS, lo que evita la necesidad de implementar consultas GetMap; por último, el hecho de que Esri mantenga liberado bajo la licencia Apache 2.0 [7] el código ActionScript de su visor hace viable la libre alteración de dicho código, lo que, en última instancia, permite implementar las capacidades funcionales pendientes, que básicamente son la recuperación interactiva de datos temáticos (operación GetFeatureInfo en servicios WMS) y las búsquedas multicriterio sobre el mapa (operación GetFeature en servicios WFS).

En la siguiente sección se desarrolla esta idea, ilustrándola con la descripción del proceso seguido para la implementación de un visor Flex, que en lo sucesivo denominaremos "visor de Totana" (http://gis.lacompania.eu/visorcrtotana), y que muestra, entre otras capas, las fincas de los comuneros, las conducciones y los puntos de mantenimiento de la Comunidad de Regantes.

En el caso del visor de Totana, se ha seguido un protocolo compuesto por las fases siguientes:

Preparación de la cartografía
Creación de servicios OGC
Acceso a la documentación adjunta
Construcción del visor Flex

En todas las fases, salvo en la última, se ha recurrido a herramientas libres de desarrollo.

Tabla 1. Software necesario para la implementación del visor de Totana

Fase	Alternativas	Software libre o propietario (L/P)	Sistema operativo	Opción elegida
Preparación de la cartografía	QGIS, gvSIG	L	Linux / Windows	QGIS + Windows
Creación de servicios OGC	MapServer, GeoServer	L	Linux / Windows	MapServer + Apache + Linux
Acceso a documentos adjuntos	PHP, Java	L	Linux / Windows	PHP + Linux
Construcción del visor Flex	Adobe Flash Builder	P	Windows	Flash Builder + Windows

Los requisitos funcionales que, en su momento, se plantearon como condiciones *sine qua non* para el nuevo visor fueron las cuatro siguientes:

1. La interfaz de usuario y las funcionalidades básicas deben ser idénticas o muy similares a las ofrecidas por el visor Flex de Esri.
2. Ha de ser posible, mediante click de ratón sobre cada elemento, recuperar la información temática vinculada al mismo, recurriendo a algún tipo de panel o cuadro de diálogo emergente.
3. Ha de ser posible, mediante click de ratón sobre un punto cualquiera del mapa, recuperar la información pública catastral de la parcela concernida (rústica o urbana).

4. Debe permitirse la localización sobre el mapa de cualquier parcela catastral, mediante la indicación, por parte del usuario, de su provincia, municipio, número de polígono y número de parcela.

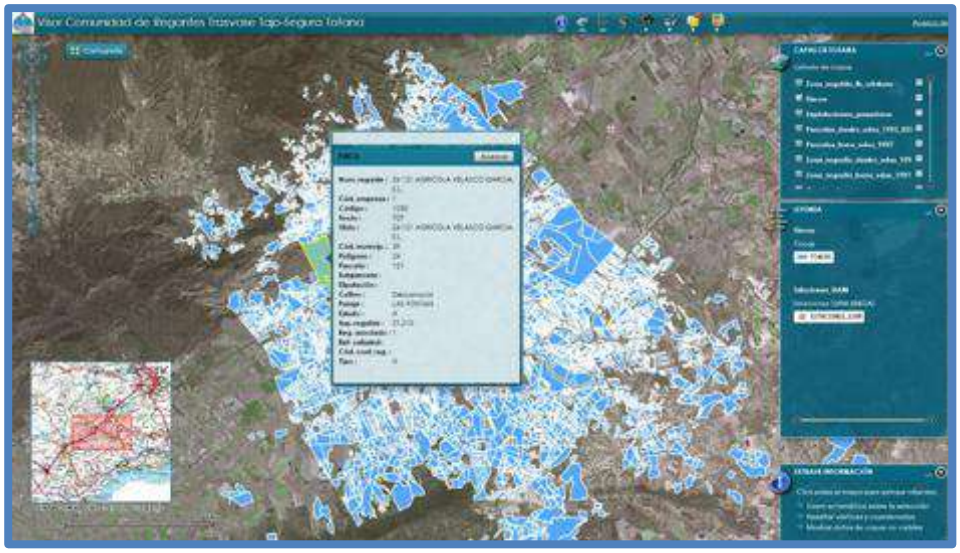


Figura 1. Captura de pantalla del visor de Totana

El requisito funcional número 1 se consigue gracias a la disponibilidad del código fuente del visor Flex original. Un desarrollador puede, de un modo relativamente sencillo, modificar o extender discrecionalmente la funcionalidad del visor Flex de Esri, siempre y cuando los cambios que introduzca en el código fuente se atengan a la jerarquía de clases ActionScript sobre la que se sustenta su estructura.

El resto de requisitos funcionales requieren, cada uno de ellos, la implementación de su correspondiente *widget*. Un widget es un módulo ejecutable con identidad y funcionalidad propias. Dispone de su propia interfaz de usuario y es integrable, como fichero SWF, en otros visores, siempre y cuando estos otros visores hayan sido compilados con la misma versión de Flex y con el mismo API de Esri que el widget. Este modo de proceder es consecuencia directa de la estructura del visor, que se basa en un diseño modular de componentes autónomos y que tiene muy en cuenta los conceptos de alta cohesión (un widget ejecuta sólo una tarea determinada) y bajo acoplamiento (los widgets descienden de una clase común, pero no mantienen entre ellos ningún tipo de vínculo). Algunos de estos componentes autónomos son troncales y otros, los widgets, son componentes adicionales que han sido concebidos e implementados para un fin concreto. En general, extender la funcionalidad de un visor Flex no implica, salvo raras excepciones, alterar el código fuente preexistente, sino sólo añadir código nuevo para implementar un widget nuevo. Se evita así o, en el peor de los casos, se atenúa el riesgo de que el visor resultante manifieste algún tipo de efecto colateral.

Entre los widgets incluidos en el visor de Totana hay tres que permiten el cumplimiento de los requisitos 2, 3 y 4. Estos tres widgets son, respectivamente, **PopupWMSWidget.swf**, **CaPPSearchWidget.swf** y **CaRCSearchWidget.swf**. En consonancia con la filosofía de desarrollo que acaba de ser expuesta, en las siguientes fases (diseño y programación) nos centraremos en únicamente el desarrollo del más destacable de estos tres widgets: **PopupWMSWidget.swf** (la implementación de los otros dos es conceptualmente similar, y metodológicamente más sencilla).

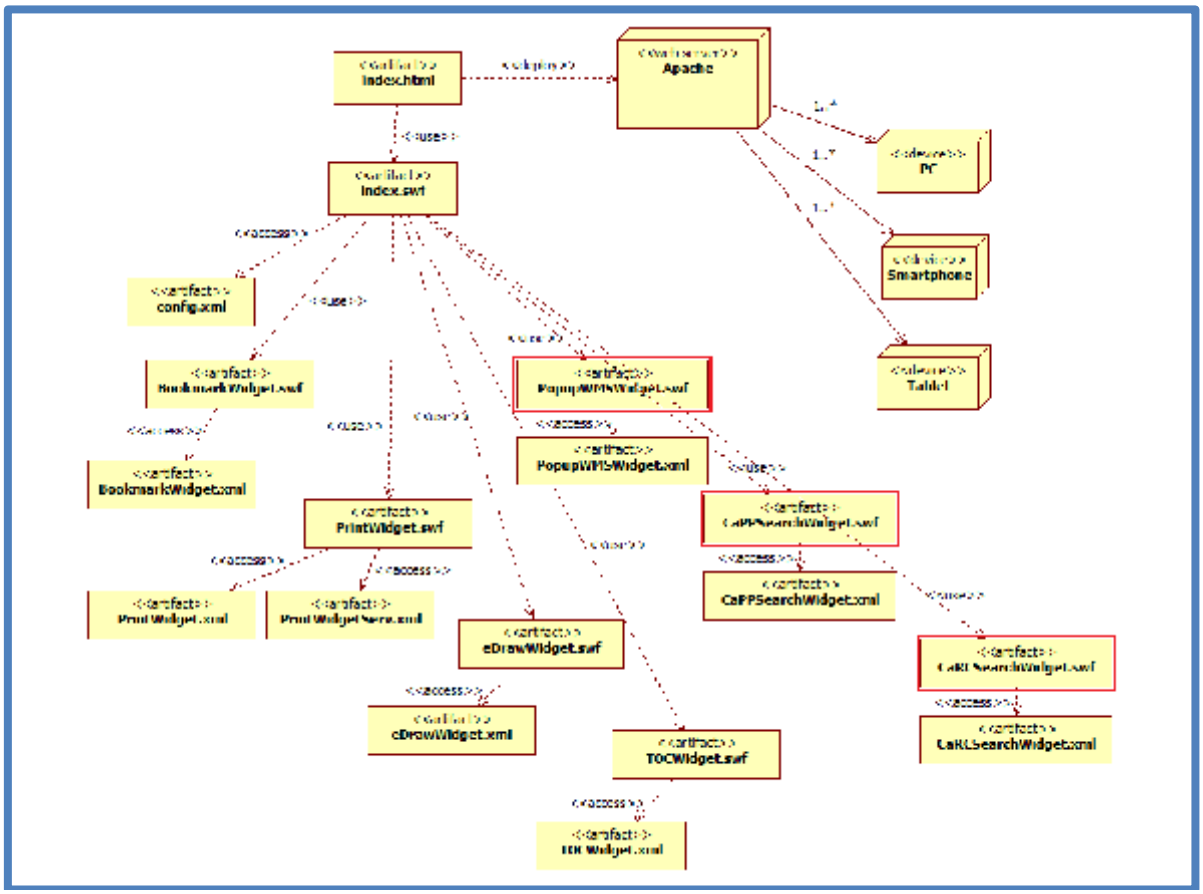


Figura 2. Diagrama de parte del despliEgue del visor de Totana (los widgets enmarcados son los de implementación propia)

2. Materiales y métodos

2.1. Preparación del entorno de desarrollo

En el caso general, la introducción de modificaciones y nuevas mejoras en un visor Flex requiere, en primer lugar, descargar del sitio web de Esri el código fuente del visor (https://github.com/Esri/arcgis-viewer-flex). También es necesaria la descarga de las librerías del API para Flex.

A continuación, siguiendo las instrucciones proporcionadas por Esri, se debe configurar apropiadamente el entorno de desarrollo de la herramienta Adobe Flash Builder. A partir de este momento, el visor ya debería ser compilable [8]. Los cambios en el código fuente han de consistir en fragmentos de código ActionScript, que, por lo común, tendrán por objeto implementar llamadas a operaciones de servicios OGC, como, por ejemplo, la operación GetFeatureInfo de un servicio WMS [9] o la operación GetFeature de un servicio WFS [10].

En el caso del visor de Totana, la funcionalidad añadida mediante la modificación del código fuente incluye, entre otras características, la invocación a la operación GetFeatureInfo del servicio WMS crtotana y la obtención de datos catastrales públicos de cualquier punto del mapa, vía peticiones HTTP a los servidores de la Dirección General de Catastro.

Del conjunto de fases que, desde el punto de vista de la ingeniería del software, requiere el desarrollo completo de una aplicación (obtención de requerimientos, análisis de requisitos, diseño arquitectónico, programación, pruebas, documentación y mantenimiento), en este caso resultan hasta cierto punto críticas, por su relativa dificultad, las fases de diseño y

programación. Procede, pues, llevar a cabo una exposición con cierto detalle de cómo se han ejecutado estas dos fases.

2.2. Diseño arquitectónico

El desarrollo de los componentes del visor que se están mencionando en este documento (se han desarrollado otros como la búsqueda de fincas y dos widgets que extraen información pública de las parcelas registradas en el catastro español que no se detallarán en este documento), PopupWMSWidget.swf, CaPPSearchWidget.swf y CaRCSearchWidget.swf, inevitablemente habrá de estar sometido al modelo de implementación de widgets preestablecido en el código fuente original.

A la hora de describir cómo implementar nuestra solución, que es el propósito de todo diseño arquitectónico, el diseñador deberá partir de dos clases básicas de la jerarquía ActionScript del visor: BaseWidget y WidgetTemplate.

La clase BaseWidget es el ancestro común a todos los widgets. Cualquier nuevo widget que se implemente obligatoriamente deberá pertenecer a una clase derivada de BaseWidget; de lo contrario, la instancia que gestiona los widgets (perteneciente a la clase WidgetManager) sería incapaz de cargar el correspondiente módulo SWF. BaseWidget proporciona, por una parte, una interfaz con el fichero de XML de configuración del widget, y por otra, una segunda interfaz con el mapa mostrado en el visor.

La clase WidgetTemplate viene a desempeñar el rol de interfaz de usuario del widget. Se trata de un panel que, en principio, cuenta con únicamente un icono, una barra de título y los botones de minimización y cierre. El resto de controles que, en cada caso, sean precisos para completar la interfaz de usuario tendrían que ser colocados por el desarrollador en el WidgetTemplate.

Resultará particularmente útil ofrecer detalles sobre las particularidades de los atributos y métodos más relevantes de las clases BaseWidget y WidgetTemplate mencionadas.

Clase BaseWidget:

Module es la clase ActionScript que se utiliza para desarrollar nuevos módulos SWF que puedan ser dinámicamente cargados desde otros módulos SWF. Es, pues, el punto de partida apropiado para *BaseWidget*.

El atributo *configXML* es la interfaz con el fichero de configuración del widget; la consulta de cualquier parámetro del widget siempre se realizará por medio de este atributo. El método más adecuado para consultar, a través de *configXML*, la parametrización del widget es cualquiera que se constituya en respuesta al evento *widgetConfigLoaded*, que es automáticamente disparado por el propio widget dentro del evento *creationComplete* de la clase padre (*Module*).

El atributo *map* representa el mapa del visor. Pertenece a *Map*, una clase que no forma parte del SDK nativo de Flex ni está en el código fuente del visor, sino que se encuentra en la librería compilada que conforma el API de Esri para Flex (**agslib-3.7-2014-11-06** -para la versión 3.7-). Cualquier representación de elementos vectoriales propios sobre el mapa (iconos, líneas, etc) deberá realizarse sobre una intancia de *GraphicsLayer*, que posteriormente se añadirá al mapa a través del método *addLayer* de la clase *Map*.

widgetTemplate, por último, es el atributo que contiene el puntero a la instancia *WidgetTemplate* que proporciona la interfaz de usuario del widget.

Clase WidgetTemplate:

Aparte de servir de panel contenedor para los controles que doten de interfaz gráfica al widget, la clase *WidgetTemplate* ofrece un conjunto de eventos que permiten asociar métodos a

instantes muy concretos del ciclo de vida del citado contenedor, como son su apertura, su cierre, su minimización y su arrastre.

Una instancia de *WidgetTemplate* puede acceder a los atributos y métodos públicos de su *BaseWidget* a través del atributo *baseWidget*.

El diagrama de clases que ilustra el diseño de **PopupWMSWidget.swf** es el mostrado en la Fig. 3.

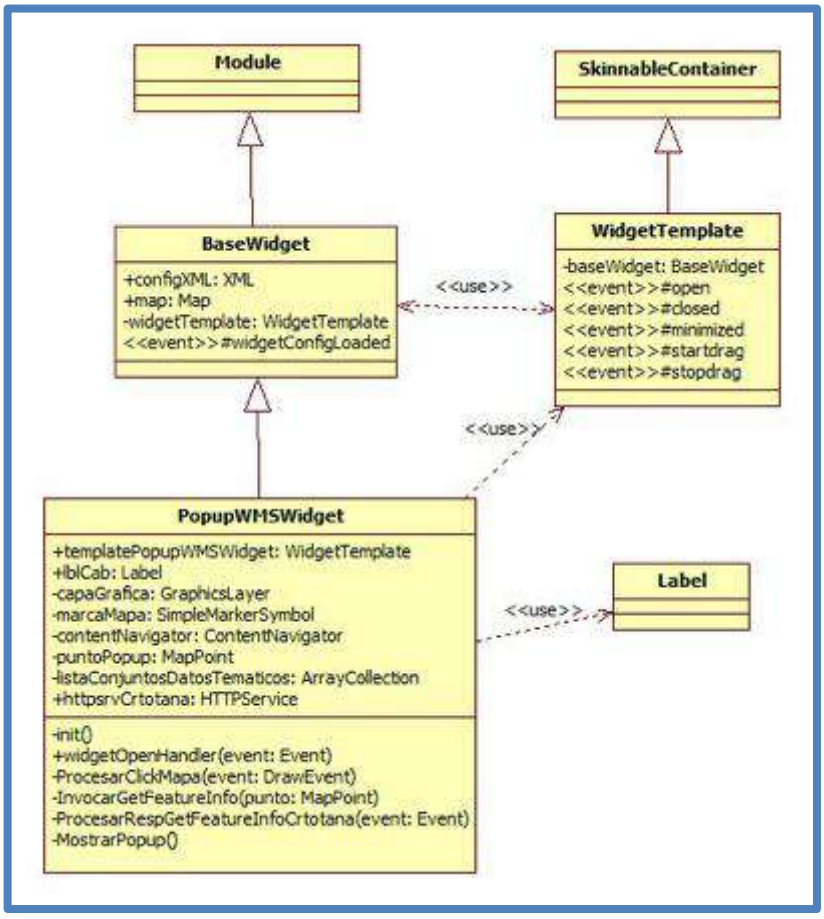


Figura 3. Diagrama de clases de PopupWMSWidget.swf

2.3. Programación del widget PopupWMSWidget.swf

La finalidad de este widget es satisfacer el requisito funcional número 2 ("ha de ser posible, mediante click de ratón sobre cada elemento, recuperar la información temática vinculada al mismo, recurriendo a algún tipo de panel o cuadro de diálogo emergente").

Para el código fuente, en este caso, la clase descendiente de BaseWidget es PopupWMSWidget, y también existe un WidgetTemplate, aunque su contenido es prácticamente irrelevante, ya que consiste en únicamente una etiqueta de ayuda. Ateniéndonos a la estructura de PopupWMSWidget, expuesta en el anterior diagrama de clases, se mostrará seguidamente los fragmentos de código ActionScript de mayor interés.

El primer método en ejecutarse es init(). En él se crean las instancias asociadas a las variables capaGrafica (capa que contiene el punto rojo sobre el que se hace click), listaConjuntosDatosTematicos (lista con los datos devueltos por la operación GetFeatureInfo) y contentNavigator (panel emergente que muestra el resultado de GetFeatureInfo).

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<!--
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// Copyright (c) 2010-2011 Esri.
// Copyright (c) 2017 La Compañía.
//
// PopupWMSWidget: Extracción de información temática incluida en el
//                 servicio WMS "crtotana".
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
-->
<viewer:BaseWidget xmlns:fx="http://ns.adobe.com/mxml/2009"
                           xmlns:s="library://ns.adobe.com/flex/spark"
                           xmlns:mx="library://ns.adobe.com/flex/mx"
                           xmlns:viewer="com.esri.viewer.*"
                           widgetConfigLoaded="init()">
    <fx:Script>
        <![CDATA[
            import com.esri.ags.Graphic;
            /* (resto de “import” y declaración de variables) */
                    private function init():void {
                           // Creación de la capa gráfica que se utiliza
                           // para pintar cada feature sobre la que se haga click.
                           capaSeleccion = new GraphicsLayer();
                           map.addLayer(capaSeleccion);

                           // Creación de la capa gráfica de sobreimpresiones.
                           capaGrafica = new GraphicsLayer();
                           map.addLayer(capaGrafica);
                           marcaMapa = new SimpleMarkerSymbol("diamond");
                           contentNavigator = new ContentNavigator();

                           // Creación de la capa gráfica que se utiliza
                           // para escribir la altura de cada punto.
                           capaAlturas = new GraphicsLayer();
                           map.addLayer(capaAlturas);
                if (configXML) {
                     /* (lectura de parámetros) */
                 }
            }
```

Una vez creado el widget, se produce la ejecución del método widgetOpenHandler(), que está asociado al evento *open* del *WidgetTemplate*. En widgetOpenHandler() se acaba llamando a dos métodos de *BaseWidget* que "preparan al terreno" para la extracción de información mediante los click de ratón sobre el mapa; estos dos métodos son SetMapNavigation() y SeMapAction(). El primero de ellos anula temporalmente el comportamiento inicial de los clicks sobre el mapa (ya no servirán, por ejemplo, para obtener información proveniente de algún servicio ArcGIS Server); el segundo establece una función, en este caso ProcesarClickMapa(), que se ejecutará cada vez que el usuario haga click sobre un punto cualquiera del mapa. ProcesarClickMapa() provocará, a su vez, la ejecución del método InvocarGetFeatureInfo().

```
// Apertura de la interfaz de usuario del widget.
private function widgetTemplateOpenHandler(event:Event):void {
    if (!widgetCargado) {
       // Se anula (provisionalmente, mientras el widget esté en ejecución)
    // el modo de navegación por defecto (el modo que, entre otras cosas, nos
       // permite extraer información a través de paneles "pop-up").
       setMapNavigation(null, null);
       // Se activa el click sobre el mapa para extraer las coordenadas.
       var value:String=DrawTool.MAPPOINT;
       var status:String="click";
       setMapAction(value, status, null, ProcesarClickMapa, null, false, true);
       widgetCargado = true;
       }
}

// Procesamiento de "clicks" sobre el mapa.
private function ProcesarClickMapa(event:DrawEvent):void {
    var geom:Geometry = event.graphic.geometry;
       var punto:MapPoint = geom as MapPoint;
       var coorX:int = (int)(punto.x);
       var coorY:int = (int)(punto.y);

       if (coorX > 0 && coorY > 0) {
              InvocarGetFeatureInfo(punto);
              if (ObtenerAlturas)
                     PonerAltura(punto);
       }
}
```

El método InvocarGetFeatureInfo() admite como único argumento el punto sobre el que el usuario haya hecho click. Este punto, como puede verse en el anterior fragmento código fuente,

es devuelto a través del parámetro DrawEvent de ProcesarClickMapa(). InvocarGetFeatureInfo() considerará el punto que se le suministra y el marco actual del mapa para construir la línea de parámetros de la petición HTTP-REST asociada a la operación GetFeatureInfo (servicio WMS http://gis.lacompania.eu/wms/crtotana).

```
// Adición de contenido a la ventana "popup".
private function InvocarGetFeatureInfo(punto:MapPoint):void {
    var hayInfoTematica:Boolean = false;
       var BBOX_x0:int = 0, BBOX_y0:int = 0, BBOX_xf:int = 0, BBOX_yf:int = 0;
                          var WIDTH:int = 0, HEIGHT:int = 0;
       var X:int = 0, Y:int = 0;
       var capaVisible:Boolean = false;

       puntoPopUp = punto;
       listaConjuntosDatosTematicos.removeAll();

    // Se resetean los flags de respuesta para todas las capas.
    averias_CapaConsultada = false;
    arquetasHidrantes_CapaConsultada = false;
    /* (resto de capas) */

    // Inicialización de los argumentos de "GetFeatureInfo" que
    // tienen que ver con la ubicación del punto.
    BBOX_x0 = map.extent.xmin; BBOX_y0 = map.extent.ymin;
    BBOX_xf = map.extent.xmax; BBOX_yf = map.extent.ymax;
    WIDTH = map.toScreenX(BBOX_xf) - map.toScreenX(BBOX_x0);
    HEIGHT = map.toScreenX(BBOX_yf) - map.toScreenX(BBOX_y0);
    X = map.toScreenX(punto.x); Y = map.toScreenY(punto.y);

    // Llamada a "GetFeatureInfo" para la capa "averias" (si la capa
    // es visible en estos momentos).
    capaVisible = LlamarAHttpServiceDeGetFeatureInfo
        (urlWMSCrtotana, NOMBRE_CAPA_AVERIAS, BBOX_x0, BBOX_y0,
            BBOX_xf, BBOX_yf, WIDTH, HEIGHT, X, Y, httpsrvCrtotanaAverias);
       if (!capaVisible) averias_CapaConsultada = true;

    // Llamada a "GetFeatureInfo" para la capa "arquetas_hidrantes" (si la
capa
    // es visible en estos momentos).
    capaVisible = LlamarAHttpServiceDeGetFeatureInfo
        (urlWMSCrtotana, NOMBRE_CAPA_ARQUETAS_HIDRANTES, BBOX_x0, BBOX_y0,
            BBOX_xf,       BBOX_yf,       WIDTH,       HEIGHT,       X,       Y,
        httpsrvCrtotanaArquetasHidrantes);
       if (!capaVisible) arquetasHidrantes_CapaConsultada = true;
```

Las llamadas HTTP-REST, httpsrvCrtotanaAverias, httpsrvCrtotanaArquetasHidrantes, etc. son asíncronas. Deben efectuarse mediante un objeto *HTTPService* que lleve asociados un método para una respuesta satisfactoria y otro para una respuesta de error. La obtención de una respuesta correcta por parte de la operación GetFeatureInfo del servicio WMS de Totana provocará, en este caso, el disparo de los métodos ProcesarRespGetFeatureInfoAverias(), ProcesarRespGetFeatureInfoArquetasHidrantes(), etc.

```
<fx:Declarations>
    <!-- Invocación a la operación "GetFeatureInfo" del WMS
    "http://gis.lacompania.eu/wms/crtotana", para recuperar los datos
       temáticos de los elementos de la capa "averias". -->
       <s:HTTPService id="httpsrvCrtotanaAverias"
                              resultFormat="e4x"
fault="ProcesarErrorAverias(event)"
                              result                                    =
"ProcesarRespGetFeatureInfoAverias(event)"/>

       <!-- Invocación al PHP que permite obtener la lista de ficheros
       contenidos en un directorio de un servidor web, e inclusión de
       dicha lista en el nodo de "listaConjuntosDatosTematicos"
       correspondiente a la capa "averias". -->
       <s:HTTPService id="httpsrvAccesoDirAverias"
                              resultFormat="e4x" fault="ProcesarError(event)"
                              result                                    =
"ProcesarRespAccesoDirAverias(event)"/>

       <s:HTTPService id="httpsrvCrtotanaArquetasHidrantes"
                              resultFormat="e4x"
fault="ProcesarErrorArquetasHidrantes(event)"
                              result                                    =
```

ProcesarRespGetFeatureInfoAverias() recibirá, a través de su parámetro ResultEvent, la respuesta XML de la operación GetFeatureInfo. Tras procesar dicha respuesta, este método la introducirá en la lista listaConjuntosDatosTematicos y, por último, invocará a MostrarPopup(), que es el método responsable de mostrar el panel de resultados.

```
// "Depuración" de la respuesta XML obtenida desde un servicio HTTP.
public static function BorrarEspacionombresEnXML(xml:XML):XML {
    var rawXMLString:String = xml.toXMLString();
       var xmlnsPattern:RegExp = new RegExp("xmlns=[^\"]*\"[^\"]*\"", "gi");
       var cleanXMLString:String = rawXMLString.replace(xmlnsPattern, "");
       return new XML(cleanXMLString);
}
```

```
// Extracción de los datos temáticos devueltos (en formato XML) por la
operación
// GetFeatureInfo ejecutada por "httpsrvCrtotanaAverias".
private function ProcesarRespGetFeatureInfoAverias(evento:ResultEvent):void
{
var                                resp:XML                                =
UtilStr.BorrarEspacionombresEnXML(XML(evento.result.valueOf()));
var hayInfoTematica:Boolean = resp.children().length() > 0;

if (hayInfoTematica) {
         // Se crea el conjunto de datos respuesta.
         var datosExtraidos:ArrayCollection = new ArrayCollection();
         datosExtraidos.addItem(NOMBRE_CAPA_AVERIAS);
         // Se añaden los campos de información.
         var               nombre:String               =               new
XMLListCollection(XMLList(resp.nombre)).text();
         datosExtraidos.addItem(nombre);
         /* (lectura e inclusión del resto de campos) */

         listaConjuntosDatosTematicos.addItem(datosExtraidos);
         if (dir_docadj == "") {
                averias_CapaConsultada = true;
                MostrarPopup();
         }
else {
                var                subdir_dir_docadj:String                =
dir_docadj.substr(urlServidor.length+1);
                if (subdir_dir_docadj != "") {
                       var patronSust:RegExp = new RegExp("/", "g");
                       subdir_dir_docadj                                    =
subdir_dir_docadj.replace(patronSust, "%2F");
                       var  patronSustPubPorPri:RegExp  =  new  RegExp("%2F"  +
nombreDirPub, "g");
                       var subdir_dir_docadj_pri:String =
                              subdir_dir_docadj.replace(patronSustPubPorPri,
"%2F" + nombreDirPri);
                              httpsrvAccesoDirAverias.url = urlPhp +
                                     "?op=leerdirbis&dir="                  +
subdir_dir_docadj +
                                     "&dir2=" + subdir_dir_docadj_pri;
                              httpsrvAccesoDirAverias.send();
                }
```

```
// Extracción de la lista de archivos devuelta por la llamada a
// "httpsrvAccesoDirAverias" y posible exhibición de la ventana popup.
private function ProcesarRespAccesoDirAverias(evento:ResultEvent):void {
    // Obtención de la respuesta generada por "accesodir.php".
       var datosExtraidos:XML =
             UtilStr.BorrarEspacionombresEnXML(XML(evento.result.valueOf()));
       // Extracción de las posibles referencias a documentos adjuntos
    // que haya en "datosExtraidos", relacionadas con la capa "averias".
       AgregarAConjuntoDatosLosDocAdj(datosExtraidos,
             NOMBRE_CAPA_AVERIAS,
             INDICE_CAMPO_DOCADJ_AVERIAS);
       // Exhibición de resultados.
       averias_CapaConsultada = true;
       MostrarPopup();
}
```

El método MostrarPopup() construye un panel en el que se van colocando, de forma ordenada, todos los nodos de la lista listaConjuntoDatosTematicos (junto con sus respectivos títulos), incluidos los documentos adjuntos. Para ello se llama al método EscribirDatosAverias(). A continuación, elimina cualquier posible punto de algún "popup" anterior y crea otro nuevo para señalar el lugar exacto del mapa del que se acaba de extraer información temática. Por último, se añade al contentNavigator adscrito a la variable map (ver método init()) el panel que acaba de construirse, y se ordena su exhibición por medio del método infoWindow() de la clase *Map*.

```
private function MostrarPopup():void {
       var conjunto:ArrayCollection = null;
       var nombreCapa:String = "";

       if (averias_CapaConsultada && arquetasHidrantes_CapaConsultada &&
    (variables del resto de capas) && listaConjuntosDatosTematicos.length > 0) {
              // Se añade el punto.
              capaGrafica.clear();

              if (MostrarPopupSiempre) {
                     capaGrafica.add(new Graphic(puntoPopUp, marcaMapa));
                     var listaItems:ArrayList = new ArrayList();
                     // Se añade a "listaItems" un panel por cada capa de la que
                     // haya que mostrar información temática.
                     for each (conjunto in listaConjuntosDatosTematicos) {
                            // Creación del panel.
                            var pnlPopUp:Panel = new Panel();
                            pnlPopUp.width = anchuraPanel;
                            pnlPopUp.height = alturaPanel;
                            pnlPopUp.setStyle("backgroundColor",
configXML.popup.backgroundcolor);
                            pnlPopUp.setStyle("color",
configXML.popup.normalcolor);
                            nombreCapa = conjunto[0];
                            var indiceCampo:int = 0;
                            switch(nombreCapa) {
                                   case NOMBRE_CAPA_AVERIAS:
                                   {
                                          indiceCampo                          =
INDICE_CAMPO_DOCADJ_AVERIAS;
                                          break;
                                   }
                     /* (igual para el resto de capas) */
                            }

                  // ¿Cuántas columnas deberá tener el panel?
                            var hayDocAdj: Boolean = conjunto[indiceCampo + 3] !=
"" ||
                                   conjunto[indiceCampo + 5] != "";
                            var hayImagenes: Boolean = conjunto[indiceCampo + 4]
!= "" ||
```

```
                        if (!hayImagenes) pnlPopUp.width = pnlPopUp.width -
                              (int)((anchuraPanel-(6*MARGEN))    /    3)    -
(2*MARGEN);
                        // Poblado del panel (en función de la capa).
                        switch(nombreCapa) {
                              case NOMBRE_CAPA_AVERIAS:
                              {
                              pnlPopUp.uid = NOMBRE_CAPA_AVERIAS + " " +
                                    NOMBRE_CAMPO_IDENTIF_AVERIAS + " " +

      conjunto[INDICE_CAMPO_IDENTIF_AVERIAS];

                  EscribirDatosAverias(pnlPopUp, conjunto, puntoPopUp);
                                    break;
                              }
           /* (igual para el resto de capas) */
               }
                  listaItems.addItem(pnlPopUp);

                  pnlPopUp.addEventListener(FlexEvent.UPDATE_COMPLETE,
   PopupActivate);
            }

            map.infoWindowContent = contentNavigator;
            contentNavigator.dataProvider = listaItems;
            map.infoWindow.show(puntoPopUp);
      }
      else {
          conjunto = listaConjuntosDatosTematicos[0];
            nombreCapa = conjunto[0];
            switch(nombreCapa) {
                  case NOMBRE_CAPA_AVERIAS:
                  {
                        IluminarFeature(nombreCapa,
                              NOMBRE_CAMPO_IDENTIF_AVERIAS,
                              conjunto[INDICE_CAMPO_IDENTIF_AVERIAS]);
                        break;
                  }
             /* (igual para el resto de capas) */
          }
```

```
// Inclusión en el panel "popup" de los datos temáticos del elemento
// de la capa "averias" recuperado en la última operación "GetFeatureInfo".
private function EscribirDatosAverias
       (panel:Panel, datos:ArrayCollection, punto:MapPoint):void {

       // Inicialización de los marcadores de coordenadas de controles.
       var posY:int = MARGEN;
       var x:int = 0, y:int = 0;
       var anchoPanelCab:int = (int)((anchuraPanel-(6*MARGEN)) / 3);
       var posXCol01:int = MARGEN;
       var posXCol02:int = (3*MARGEN) + anchoPanelCab - 2;
       var posXCol03:int = (5*MARGEN) + (2*anchoPanelCab) - 2;

       panel.title = configXML.labels.averiasname;
       x = posXCol01;
       y = posY + ALTURA_PANEL_CAB + MARGEN;

       // Nombre
       var lblnombreTit:spark.components.Label =
       new spark.components.Label();
       lblnombreTit.left = x; lblnombreTit.top = y;
       lblnombreTit.setStyle("fontWeight", "bold");
       lblnombreTit.text = configXML.labels.averias_nombre + " :";
       panel.addElement(lblnombreTit);
       var lblnombre:spark.components.Label = new spark.components.Label();
       lblnombre.left = x + MARGEN_CONTENIDO; lblnombre.top = y;
       lblnombre.text = datos[1];
       panel.addElement(lblnombre);
       y = y + SEPARA;

    /* (igual para el resto de campos y para los posibles documentos adjuntos e
imágenes) */
```

3. Resultados y discusión

El widget **PopupWMSWidget.swf** permite la exhibición de un panel emergente que muestra, adecuadamente formateada, toda la información temática vinculada con aquel elemento que el usuario haya elegido antes, a través de un click de ratón directamente ejercido sobre el mapa. Esta información, que de otro modo sólo hubiese sido accesible en formato XML o de manera estrictamente tabular, es mostrada de una forma que para el usuario resulta, como puede apreciarse en la Fig. 4 y en la Fig. 5, mucho más inteligible.



Figura 4. Resultado de una operación GetFeatureInfo sobre una arqueta hidrante



Figura 5. Resultado de una operación GetFeatureInfo sobre una parcela de consolidado provisional

El procedimiento de introducción de cambios en el código fuente del visor Flex se atiene estrictamente a las recomendaciones fijadas por Esri. Una de estas recomendaciones establece como entorno de desarrollo la herramienta Adobe Flash Builder. Respetar tal consejo facilita mucho el inicio de los trabajos, si bien tiene como inconveniente el hecho de que esta herramienta no es software libre. A este respecto, existen alternativas libres cuyo uso podría intentarse, como es el caso de Flash Develop, e incluso el propio compilador de Flex (sin IDE), que es posible ejecutar en modo línea de comandos tanto en Windows como en Linux.

4. Conclusiones

Tras considerar la jerarquía de clases en la que cabe contextualizar la implementación de cualquiera de los widgets del visor Flex de Esri, se han desarrollado otros widgets para agregar funcionalidades adicionales que no tenían cabida en la versión original; este es el caso de los dos widgets que extraen información pública de las parcelas registradas en el catastro español y de la búsqueda de fincas (la capa 'fincas' es una de las que forman parte de la base de datos de este proyecto).

En resumen, tres son las ideas básicas que, en el contexto de los visores cartográficos, hemos querido poner de manifiesto con la presente comunicación, en la línea de pensamiento propugnada por la Free Software Foundation (http://www.fsf.org). En primer lugar, rebatir el

tópico de que con software libre no es posible construir visores con las mismas funcionalidades que los visores implementados con software propietario. En segundo lugar, recalcar las ventajas que, desde el punto de vista del ahorro de costes, supone aplicar una estrategia de desarrollo basada en el uso de software libre. Por último, un tercer objetivo, no menos importante, es lograr una plena independencia tecnológica de las empresas que comercializan software propietario.

El visor de Totana que hemos expuesto a lo largo de esta comunicación pretende servir de argumento y justificación de estas tres ideas.

Referencias

1. Fleming, J. (1998). Web Navigation: Designing the User Experience. O'Reilly.
2. Cole, A., & Robison, E. (2010). *Learning Flex 4*. O'Reilly Media.
3. Esri (2009). *ArcGIS Server in Practice* Series: Best Practices for Creating an ArcGIS Server Web Mapping Application for Municipal/Local Government. Disponible en http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/creating-arcgisserver-web-mapping.pdf
4. Hazzard, E. (2011). OpenLayers 2.10 Beginner's Guide. Packt Publishing.
5. MapServer (2014). MapServer Documentation. Release 6.4.1. Disponible en http://mapserver.org/MapServer.pdf
6. GeoServer (2014). GeoServer User Manual. Release 2.3.0. Disponible en http://geoserver.org/display/GEOS/GeoServer+2.3.0
7. Apache Software Foundation (2012). Licenses. Disponible en http://www.apache.org/licenses
8. Zhang, M. (2009). Create GeoWeb Applications with the Sample Flex Viewer. Developer's Guide. Disponible en http://gis.calhouncounty.org/FlexViewerDevelopersGuide_.pdf
9. Open Geospatial Consortium (2006). OpenGIS Web Map Server Implementation Specification. Disponible en http://www.opengeospatial.org/standards/wms
10. Open Geospatial Consortium (2010). OpenGIS Web Feature Service 2.0 Interface Standard. Disponible en http://www.opengeospatial.org/standards/wfs

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Interferometría diferencial como herramienta para el estudio localizado de la erosión por escorrentía

Francisco A. Sánchez-Crespo[1], María T. Gómez-Villarino[2], Francisco Ayuga[2], Ana I. García[2]

[1] C/Abogados de Atocha, 39. 28710 El Molar (MADRID); francisco.screspo@alumnos.upm.es
[2] Grupo de investigación EIPIRMA, Universidad Politécnica de Madrid; gi.eipirma@upm.es

Resumen: Las nuevas misiones espaciales como la Sentinel-1 (Proyecto Copernicus de la Agencia Espacial Europea en colaboración con la Comisión Europea) son capaces de obtener imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar) con una alta frecuencia, resolución, cobertura y, sobre todo, disponibilidad, lo cual permite la aplicación de técnicas como la interferometría diferencial en nuevos ámbitos. El objetivo del presente estudio es analizar la posible aplicación de la técnica de la interferometría diferencial para el estudio localizado de la erosión superficial debido a fenómenos de escorrentía, estudiando los parámetros de cálculo, las limitaciones de aplicación y la interpretación de los resultados. En una primera fase se realizó un estudio cuantitativo contrastando las deformaciones registradas mediante interferometría diferencial con las registradas mediante un LIDAR terrestre (el sistema más preciso disponible actualmente), concluyendo la suficiente capacidad del sistema para medir pequeñas erosiones. En la segunda y actual fase se está realizando un estudio cualitativo en una cuenca agrícola monitorizada (eminentemente cerealista) en Daganzo de Arriba (Madrid) con resultados que muestran una erosión proporcional a la intensidad de lluvia, a la cobertura del suelo en el momento de la precipitación y acorde con lo observado durante las inspecciones visuales. Además, se ha observado que no existe interferencia en los resultados debido a actividades agrícolas que alteran la altura del cultivo como puede ser la cosecha.

Palabras clave: Sentinel, Copernicus, SAR, LIDAR.

1. Introducción

Si bien la técnica de interferometría diferencial a partir de imágenes de radar de apertura sintética no es algo nuevo (las misiones ERS de la Agencia Espacial Europea se remontan a 1991), sí que lo es la resolución, frecuencia de revisitación, cobertura y disponibilidad de imágenes que ofrece la misión Sentinel-1 del Proyecto Copernicus [1] (iniciativa conjunta de la Agencia Espacial Europea y la Comisión Europea), lo que posibilita nuevos usos y aplicaciones.

1.1.- La misión Sentinel-1

La misión Sentinel-1 está compuesta por dos satélites equipados con radares de apertura sintética (SAR) que trabajan en la banda C de las microondas, lo cual capacita a tomar imágenes tanto de día como de noche, e independientemente de las condiciones de nubosidad.

Los satélites Sentinel-1 tienen órbitas casi polares con un desfase de 180º en el mismo plano, de tal forma que cada satélite visita una zona determinada de la superficie terrestre al menos una vez cada 12 días, y cada zona de la superficie terrestre es visitada por alguno de los dos satélites al menos una vez cada 6 días [1].

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3356

Los sensores equipados disponen de 4 modos de adquisición: Strip Map, Interferometric Wide Swath, Wave y Extra Wide Swath [2].

El modo Interferometric Wide Swath (IW) tiene una resolución media-alta (5x20 metros), muy buena cobertura (franja de 250 km) y, sobre todo, alta disponibilidad, con las imágenes listas para su descarga pocas horas después de su adquisición. Estas características lo convierten en el modo más adecuado para el presente estudio.

El modo IW captura las imágenes en tres sub-franjas usando la técnica de Observación Terrestre con Barridos SAR Progresivos (TOPSAR - Terrain Observation with Progressive Scans SAR). Cada una de estas sub-franjas se compone de varias ráfagas.

El modo TOPSAR presenta una serie de mejoras sobre el modo ScanSAR precedente, relativos al control electrónico de la orientación de las ráfagas y sincronización entre pasadas que logran mejorar el SNR (Signal to Noise Ratio) y DTAR (Distributed Target Ambiguity Ratio), logrando imágenes con menos ruido y deformaciones [3].

1.2.- Interferometría diferencial

La interferometría en radares de apertura sintética (InSAR) que equipan estos satélites permite la medición precisa del viaje de ida y vuelta de la radiación, registrando la intensidad y la fase de la señal electromagnética en una imagen SAR. Una imagen SAR está compuesta por un mosaico bidimensional de elementos llamados pixeles, cada uno referenciado a una pequeña área de la superficie terrestre o celda. Cada pixel contiene la información de intensidad y fase de la radiación rebotada en su celda o superficie terrestre correspondiente.

La interferometría SAR aprovecha la diferencia de fase entre dos observaciones SAR de una misma área de la superficie terrestre, tomadas desde posiciones del sensor ligeramente distintas, para extraer la información de la distancia a la tierra [4].

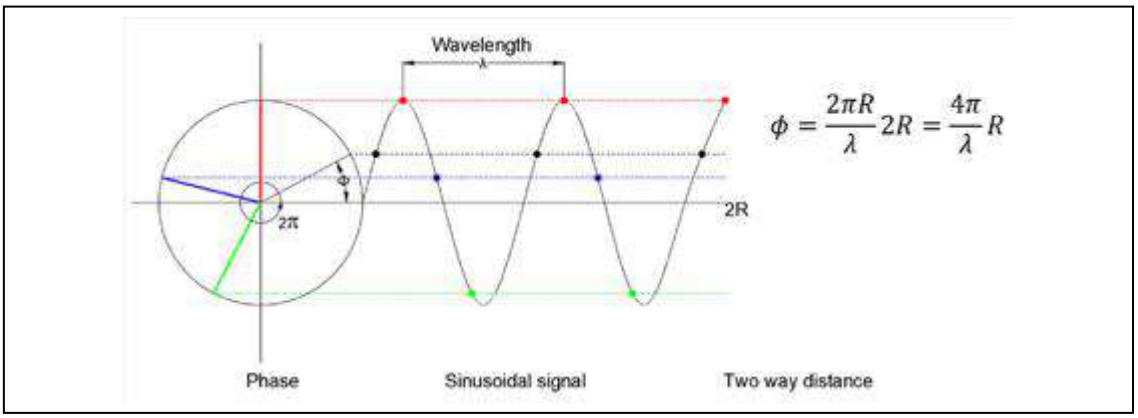
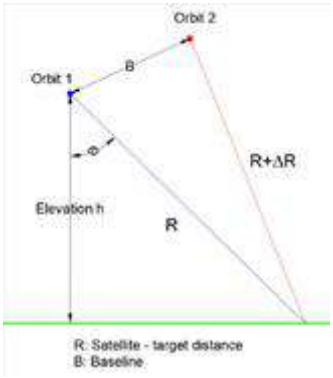


Figura 1: Diferencia de fase. Fuente ESA-TM19 InSAR Principles.

Tras un corregistro y mediante la combinación de las diferencias de fases de las dos observaciones, se puede generar un interferograma en donde la información de la diferencia de fase está altamente relacionada con la topografía del terreno [5], y las deformaciones del mismo pueden ser incorporadas a un mapa.



$$\phi_1 = \frac{4\pi R}{\lambda}, \phi_2 = \frac{4\pi(R+\Delta R)}{\lambda}$$

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{4\pi\Delta R}{\lambda}$$

Figura 2: Esquema de la disposición de los satélites en la interferometría diferencial Fuente ESA-TOPS Interferometry Tutorial.

La diferencia de fase puede deberse a 5 factores [4]:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{elevation} + \Delta\varphi_{displacement} + \Delta\varphi_{atmosphere} + \Delta\varphi_{noise} \qquad (1)$$

Flat: Curvatura de la tierra.
Elevation: Topografía.
Displacement: Deformaciones del terreno entre ambas adquisiciones.
Atmosphere: Debidos a las diferencias de humedad, presión y temperatura entre adquisiciones.
Noise: Cambios temporales en los reflectores, volume scattering y ángulos de adquisición.

A través del análisis interferométrico se procura eliminar las fuentes de error (flat, atmosphere y noise) para quedarse tan solo con las contribuciones de interés: elevation (para generar modelos digitales del terreno) y displacement (para analizar los cambios en el terreno).

Si el desfase debido a la topografía es restado al interferograma, la diferencia de fase resultante corresponderá a los patrones de deformación entre las dos fechas de adquisición.

Simultáneamente al interferograma se genera la banda de coherencia, que muestra cuanto de similar son ambas imágenes a nivel de pixel en una escala del 0 (baja) al 1 (alta).

La pérdida de coherencia entre un par de imágenes puede deberse a varios factores [6,7]:

$$\gamma = \gamma_T * \gamma_G * \gamma_V * \gamma_P \qquad (2)$$

Temporal: No puede ser evitado, es debido a diferencias en el terreno entre ambas tomas, y precisamente uno de los objetivos de la interferometría diferencial.

Geometric: Debidos a errores en las órbitas de los satélites, puede ser parcialmente eliminado.

Volumetric: Debido a la vegetación existente, no puede ser evitado.

Processing: Debido a errores de cálculo. Debe de ser evitada.

La técnica de la Interferometría diferencial se ha empleado con éxito en el análisis de subsidencias debidas a obra civil, deslizamientos de laderas, terremotos y erupciones volcánicas.

2. Materiales y métodos

Se ha realizado el estudio de las variaciones topográficas en la cuenca del arroyo del Monte (TM Daganzo de Arriba, Madrid), mediante imágenes TOPSAR procedentes de la misión Sentinel-1 y la técnica de la interferometría diferencial.

Al mismo tiempo se ha procedido a monitorizar visualmente las condiciones de la superficie, la cobertura del suelo y los cambios en los cultivos, cárcavas y zonas inundadas.

Los resultados obtenidos del proceso de interferometría diferencial han sido interpretados empleando la información recogida durante las inspecciones visuales.

Para el análisis interferométrico se emplean un par de imágenes obtenidas del Scientist Data Hub de la Agencia Espacial Europea, de tipo IW (Interferometric Wide Swath), SLC (Single Look Capture) y Banda VV (la polarización VV minimiza el efecto de la vegetación pequeña [8,9]).

Se utiliza la herramienta Sentinel Application Platform SNAP Desktop de la Agencia Espacial Europea [10,11] y el algoritmo SNAPHU de la Universidad de Stanford para el "desdoblado" de fase [12,13,14]. Con el análisis mediante esta herramienta de interferometría diferencial de imágenes satélite se pueden detectar pequeñas variaciones (del orden de milímetros) en la elevación del suelo, si bien hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las microondas de la banda C son capaces de penetrar la pequeña vegetación, si bien no las masas arbóreas ni vegetación de hoja o fruto grande [15,16].
- Diferencias de saturación de agua en el suelo entre tomas, puede generar falsas deformaciones [6].
- Las láminas de agua y zonas con abundante vegetación arrojan poca coherencia en los resultados, mientras que los suelos desnudos, pavimentados y edificios arrojan una alta coherencia en los resultados [16].
- Las variaciones en altura del terreno entre una toma y otra pueden deberse a varios factores distintos a los procesos de erosión:
    - Crecimiento de la vegetación, prácticas de laboreo y cultivo y des/aparición de elementos [26,27,28].
    - Otros procesos geológicos (fenómenos de expansión de las arcillas, subsidencia del terreno, terremotos, deslizamiento de laderas, disolución de calizas, etc) [17,18,19,20,21,22,23].

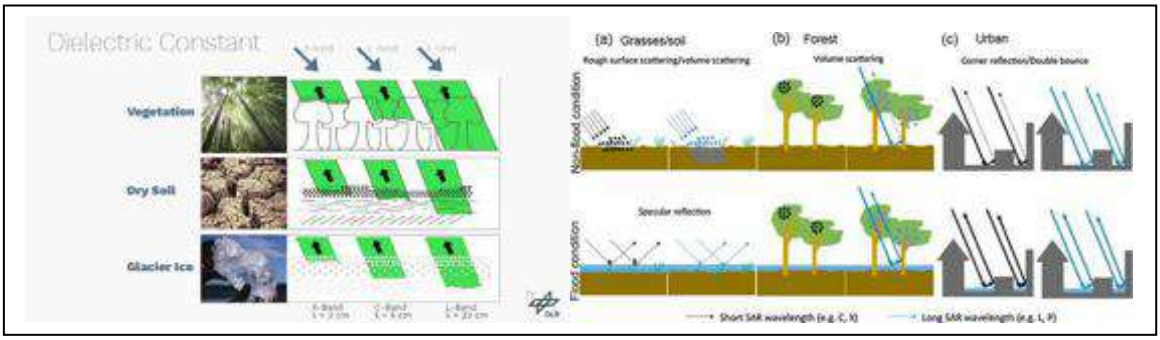


Figura 3. Microondas y constante dieléctrica. Las microondas de la banda C tienen escasa capacidad de penetración en el suelo seco, y ninguna en suelos saturados. Fuente EO College Course "Echoes in Space" [16] y Schumann & Moller [25]

3. Resultados y discusión

Se han seleccionado 3 tomas realizadas a lo largo del tiempo para mostrar las capacidades y limitaciones de la herramienta:

3.1.- Caso con labores agrícolas y apenas sin precipitaciones (15/06/2017 →27/06/2017)

Durante este periodo de tiempo apenas hubo precipitaciones (total 12mm en 12 días), y bastantes parcelas agrícolas cerealistas de la cuenca fueron cosechadas.

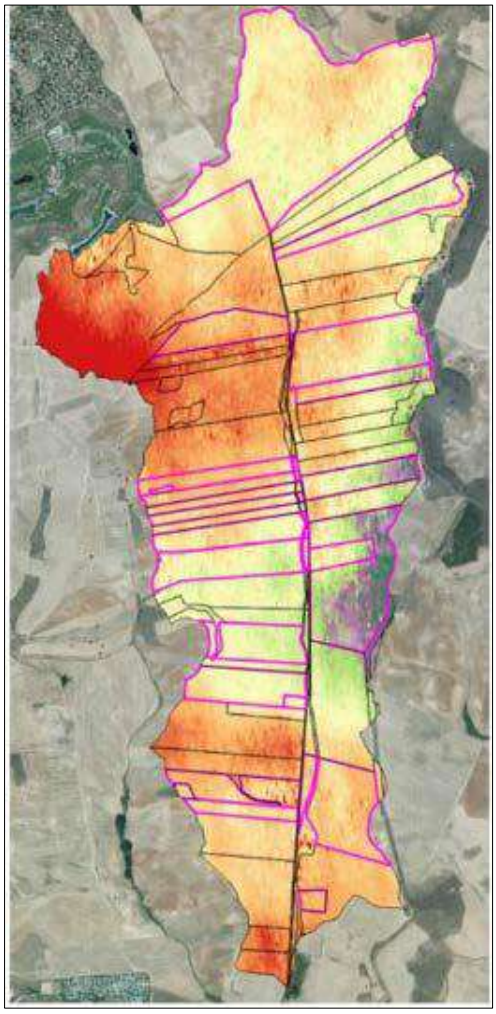


Figura 4: Resultados 15-27/05/2017

La humedad precedente entre ambas fechas era similar.

El resultado del análisis interferométrico arroja una amplitud de deformación en el global de la cuenca (la diferencia entre la celda que más se eleva y la que más desciende) de 8mm.

Entre ambas adquisiciones todas las parcelas marcadas en magenta fueron cosechadas, no observándose diferencias relevantes respecto a las parcelas que no fueron cosechadas.

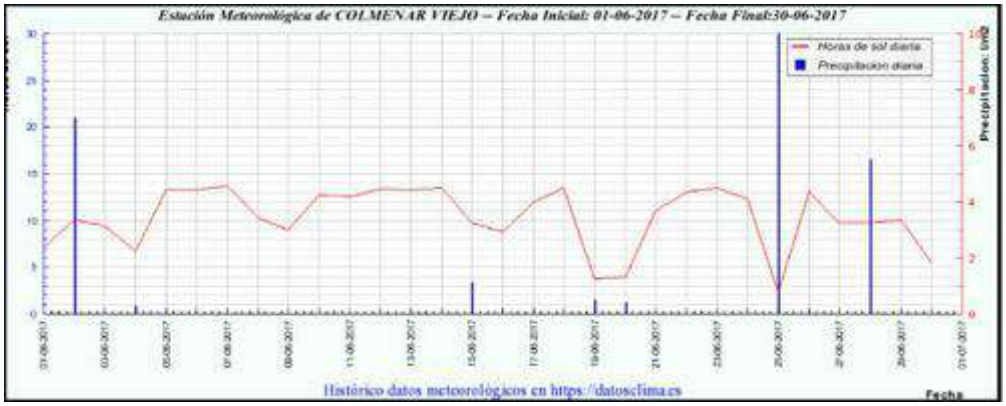


Figura 5: Lluvias en el periodo 15-27/06/2017

Del análisis interferométrico basado en microondas de la banda C de este periodo se puede concluir que:

1.- No se ve afectado por cultivos de tipo cerealista.

2.- Sus resultados fueron coincidentes con lo observado en campo, y por tanto pueden considerarse como correctos.

3.2. Caso de intensas lluvias sin labores agrícolas (28/02/2018 →06/03/2018)

Durante este periodo de tiempo hubo intensas precipitaciones (total 101,5mm en 6 días).

Entre ambas fechas no se observó ninguna actividad agrícola relevante.

La humedad precedente no es la misma entre ambas tomas, estando bastante más cerca de la saturación (incluso con zonas encharcadas como se verá más adelante) en la toma del segundo día.

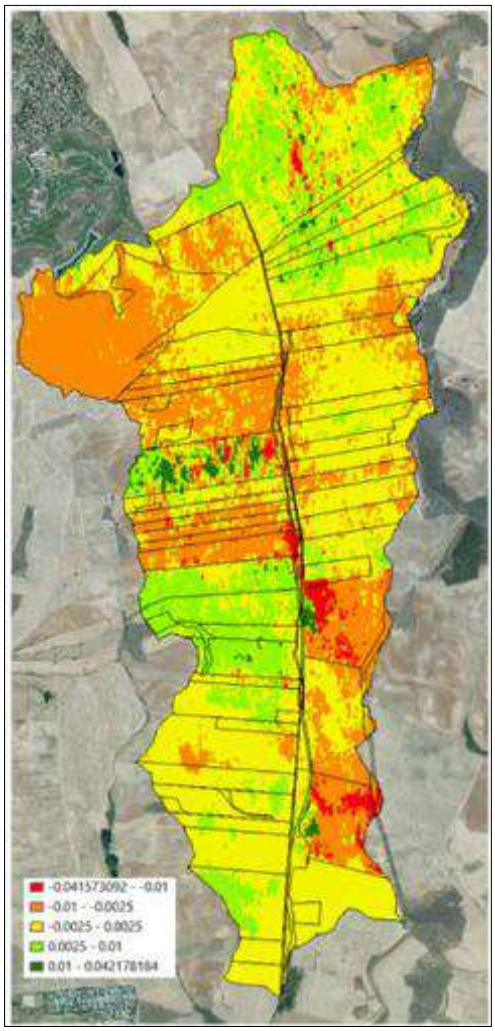


Figura 6: Resultados 28/02/2018-06/03/2018

El resultado del análisis interferométrico arroja una amplitud de deformación superior a los 8 cm, con las siguientes características:

Zonas en color rojo y naranja: Zonas donde se ha detectado erosión, hasta 1cm en las zonas naranjas y entre 1 – 4 cm en las zonas rojas. Se trata de zonas en las que, durante este periodo, el suelo estaba eminentemente desnudo (barbecho).

Zonas en color amarillo: Representan zonas donde no se detectan procesos erosivos o de

sedimentación relevantes. Se trata de zonas en las que, durante este periodo, el suelo estaba cubierto por cultivos de tipo cereal (trigo o cebada).

Zonas de color verde claro: Se trata de extensas zonas en las que se ha observado una ligera elevación (entre 0,25 – 1 cm) del terreno, no explicable por procesos erosivos-sedimentarios. Debido a que era la primera precipitación tras un largo periodo sin lluvias, las explicaciones a este fenómeno son 2:

1.- Una posible expansión de las arcillas debido al cambio de humedad en el suelo.

2.- Un seguro y fehaciente cambio en la humedad y constante dieléctrica del suelo (durante las visitas se observó que el primer día el suelo estaba seco mientras que el segundo día el suelo totalmente encharcado, por lo que estaba saturado), que provoca un reflejo más superficial si cabe de las microondas de la banda C.

Zonas de color verde oscuro: Durante la inspección visual del segundo día se comprobó que dichas zonas se correspondían con zonas encharcadas o con mucha sedimentación.

Por tanto, para el periodo estudiado, el análisis interferométrico basado en microondas de la banda C fue coincidente con lo observado en campo, y se puede concluir que sus resultados fueron correctos.

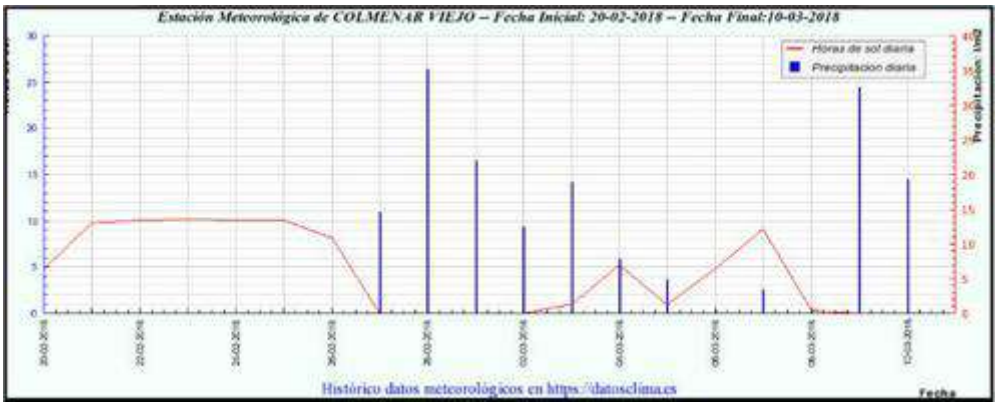


Figura 7: Lluvias en el periodo 28/02/2018-06/03/2018

3.3. Caso de error indeterminado en el análisis interferométrico(18/04/2019→30/04/2019)

Durante este periodo de tiempo hubo precipitación (52,6mm en 12 días).

Entre ambas fechas no se observó ninguna actividad agrícola relevante, aunque si se observaron trabajos de movimiento de tierras en algunas parcelas anexas al camino (acopio de material para acondicionar el camino), así como los trabajos de acondicionamiento del propio camino.

La humedad precedente no es la misma entre ambas tomas, pues había llovido el día previo e incluso el mismo día de la primera adquisición, mientras que no llovió en los tres días precedentes a la segunda adquisición.

Con una amplitud de deformación superior a los 15 cm el resultado del análisis interferométrico no responde a ninguna interpretación lógica relativa a los procesos de erosión-sedimentación, ni a los posibles efectos de la obra de acondicionamiento del camino central.

Debido a la existencia de lluvias en uno de los días de adquisición, se procedió a repetir el análisis entre los días 12-30/04/2019, con resultados de similar magnitud.

Se ha observado que durante estas fechas se produjo un reajuste de las órbitas de los satélites, si bien eso no debería ser motivo para los resultados obtenidos.

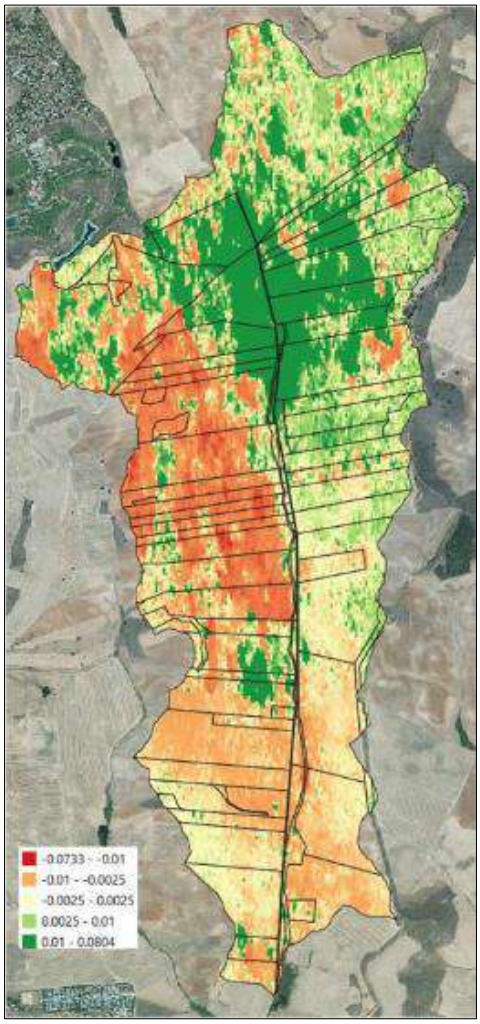


Figura 8: Resultados 18-30/04/2019

Con este ejemplo se quiere remarcar la necesidad de interpretar siempre los resultados, y más aún cuando no se encuentran dentro de la horquilla esperada, para descartarlos si no pueden ser explicados.

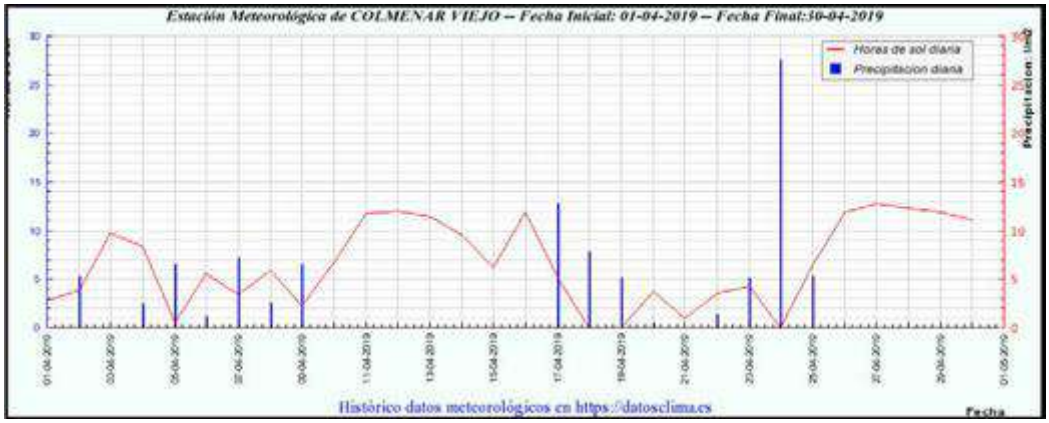


Figura 9: Lluvias en el periodo 18-30/04/2019

4. Conclusiones

La interferometría diferencial sobre imágenes TopSAR se presenta como una herramienta de gran utilidad para analizar la erosión que provocan eventos singulares de precipitación.

Su capacidad de análisis temporal, pudiendo analizar periodos de tiempo tan cortos como 6 días, permite analizar los eventos de precipitación de una forma prácticamente aislada.

Su capacidad de análisis espacial, con un resultado en raster con 13,93 m de paso de celda, permite conocer cómo reacciona cada zona de la cuenca a los procesos de erosión – sedimentación en función de la orografía, manejo del suelo, cobertura vegetal e intensidad de lluvia. Esto permitiría comprobar que situaciones comportan mayor riesgo, así como evaluar la eficacia de posibles medidas antierosión.

El sistema presenta además las siguientes ventajas:

Hay adquisiciones disponibles cada seis días. Y gratuitas.

Al ser un sensor activo basado en las microondas de banda C, funciona independientemente del día y la noche y de la existencia de nubes.

Las mediciones no se ven afectadas por cultivos pequeños como los cereales (trigo y cebada).

Pero se debe de atender a las siguientes limitaciones:

Diferentes estados de saturación del suelo durante las adquisiciones provocarán una falsa deformación a evaluar y corregir, debido a la escasa capacidad de penetración en el suelo seco y la nula capacidad de penetración en el agua de las microondas de la banda C.

Las zonas encharcadas durante la captación de las imágenes darán una falsa sedimentación, debido a la incapacidad de las microondas de la banda C de penetrar el agua.

Cuando la erosión hace desaparecer por completo el primer horizonte de suelo se produce una pérdida de coherencia entre las imágenes que no asegura la fiabilidad de las mediciones obtenidas.

Las mediciones se van afectadas por vegetación arbórea, o de hojas o fruto de gran tamaño y densidad.

Es necesario comprobar si las deformaciones registradas se han podido deber a otro fenómeno distinto de la erosión-sedimentación, como pueden ser terremotos, subsidencias, expansión de las arcillas, etc.

La lluvia en el preciso momento de una de las adquisiciones puede provocar una pérdida de coherencia que altere significativamente los resultados.

Los resultados siempre deben de ser interpretados y, a ser posible contrastados parcialmente sobre el terreno (no hace falta verificar toda la cuenca, pero si es conveniente algún punto de control para dar validez a la totalidad de la cuenca), máxime si se obtienen resultados que no respondan a las condiciones de precipitaciones y laboreo acaecidas.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la institución "Cátedra Rafael Dal-Ré/TRAGSA" por la ayuda prestada para el desarrollo de la investigación de doctorado de Francisco A. Sánchez-Crespo.

Referencias

1. Peter, H., Jäggi, A., Fernández, J., Escobar, D., Ayuga, F., Arnold, D., Wermuth, M., Hackel, S., Otten, M., Simons, W., Visser, P., Hugentobler, U., & Féménias, P. 2017. Sentinel-1A–first precise orbit determination results. Advances in space research, 60 (5), 879-892.
2. Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B.Ö., Floury, N., Brown, M., Traver, I.N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M., Rostan, F. 2012. GMES Sentinel-1 mission. Remote Sens. Environ. 120, 9–24. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028

3. De Zan, F., & Guarnieri, A. M., 2006. TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 44(9), 2352-2360.
4. Ferreti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca., F. 2007. TM-19 InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. European Space Agency. http://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications
5. Geudtner, D., Torres, R., Snoeij, P., Davidson, M., Rommen, B. 2014. Sentinel-1 system capabilities and applications. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International (pp. 1457-1460). IEEE. DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6946711
6. Touzi, R., Lopes, A., Bruniquel, J., Vachon, P. W., 1999. Coherence estimation for SAR imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37(1), 135-149. DOI: 10.1109/36.739146
7. Martone, M., Bräutigam, B., Rizzoli, P., Gonzalez, C., Bachmann, M., Krieger, G. 2012. Coherence evaluation of TanDEM-X interferometric data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 73, 21-29. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.06.006
8. Tamm, T., Zalite, K., Voormansik, K., Talgre, L. 2016. Relating Sentinel-1 interferometric coherence to mowing events on grasslands. Remote Sens. 8, 1–19. https://doi.org/10.3390/rs8100802
9. Koch, B. 2010. Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65(6), 581-590. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.09.001
10. Engdahl, M., Minchella, A., Marinkovic, P., Veci, L., Lu, J. 2012. NEST: an ESA open source toolbox for scientific exploitation of SAR data. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International (pp. 5322-5324). IEEE. DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6352406
11. Zuhlke, M., Fomferra, N., Brockmann, C., Peters, M., Veci, L., Malik, J., Regner, P. 2015. SNAP (sentinel application platform) and the ESA sentinel 3 toolbox. In Sentinel-3 for Science Workshop (Vol. 734, p. 21).
12. Chen, C. W. Zebker, H. A. 2000. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms, Journal of the Optical Society of America A, 17, 401-414.
13. Chen, C. W. Zebker, H. A. 2001. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization, Journal of the Optical Society of America A, 18, 338-351.
14. Chen, C. W., Zebker, H. A. 2002. Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40, 1709-1719.
15. Paloscia, S., Macelloni, G., Pampaloni, P., Sigismondi, S. 1999. The potential of C-and L-band SAR in estimating vegetation biomass: the ERS-1 and JERS-1 experiments. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37 (4), 2107-2110. DOI: 10.1109/36.774723
16. ESA and Friedich-Schiller-Universitat Jena, 2018. EO College Course "Echoes in Space". https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/
17. González, P. J., Bagnardi, M., Hooper, A. J., Larsen, Y., Marinkovic, P., Samsonov, S. V., Wright, T. J. 2015. The 2014–2015 eruption of Fogo volcano: Geodetic modeling of Sentinel-1 TOPS interferometry. Geophysical research letters, 42 (21), 9239-9246. https://doi.org/10.1002/2015GL066003
18. Massonnet, D., Feigl, K. L. 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, Rev. Geophys., 36 (4), 441–500, doi: 10.1029/97RG03139.
19. Spreckels, V., Wegmüller, U., Strozzi, T., Musiedlak, J., Wichlacz, H. C. 2001. Detection and observation of underground coal mining-induced surface deformation with differential SAR interferometry. In ISPRS Workshop" High Resolution Mapping from Space (pp. 227-234)
20. Salvi, S., Stramondo, S., Funning, G.J., Ferretti, A., Sarti, F., Mouratidis, A. 2012. The Sentinel-1 mission for the improvement of the scientific understanding and the operational monitoring of the seismic cycle. Remote Sens. Environ. 120, 164–174. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.029
21. Barboux, C., Strozzi, T., Delaloye, R., Wegmüller, U., Collet, C. 2015. Mapping slope movements in Alpine environments using TerraSAR-X interferometric methods. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 109, 178-192. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.09.010
22. Colesanti, C., Wasowski, J. 2006. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. Eng. Geol. 88, 173–199. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.013

23. Anghel, A., Vasile, G., Boudon, R., d'Urso, G., Girard, A., Boldo, D., Bost, V. 2016. Combining spaceborne SAR images with 3D point clouds for infrastructure monitoring applications. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 111, 45-61.
24. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.11.008
25. Di Martire, D., Iglesias, R., Monells, D., Centolanza, G., Sica, S., Ramondini, M., Pagano, L., Mallorquí, J.J., Calcaterra, D. 2014. Comparison between Differential SAR interferometry and ground measurements data in the displacement monitoring of the earth-dam of Conza della Campania (Italy). Remote Sens. Environ. 148, 58–69. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.014
26. Schumann, G. J. P., Moller, D. K. 2015. Microwave remote sensing of flood inundation. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 83, 84-95.
27. Francisco A. Sánchez-Crespo, Francisco Ayuga, Ana I. García. Interferometría como herramienta para el estudio localizado de la erosión por escorrentía. Jornadas de Ingeniería Rural Homenaje a Rafael Dal-Ré. Universidad Politécnica de Madrid, España,16-17/01/2017.
28. Francisco A. Sánchez-Crespo, Francisco Ayuga, Ana I. García. Interferometría como herramienta para el estudio localizado de la erosión por escorrentía. IX Congreso Ibérico de Agroingeniería (Braganza, Portugal, 4-6/09/2017)
29. Francisco A. Sánchez-Crespo, Francisco Ayuga, Ana I. García. Differential Interferometry as a Tool for Localized Study of Runoff Erosion. AgEng 2018 Conference (Wageningem, Netherlands, 7-11/07/2018)

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Promover o desenvolvimento sustentável do território pela inovação agrícola. Desafios da agricultura biológica no Vale do Lis, Portugal

Susana Ferreira[1], Fátima Oliveira[1], José M. Gonçalves[1], Francisco Gomes Da Silva[2], Margarida Teixeira[3], Madalena Gonçalves[3], Rui Eugénio[4], Henrique Damásio[4]

[1] Instituto Politécnico de Coimbra, Escola Superior Agrária de Coimbra, Bencanta, 3045-316 Coimbra; susana.ferreira@esac.pt, foliveira@esac.pt, jmmg@esac.pt.
[2] Universidade de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa; fgsilva@isa.ulisboa.pt
[3] Direção Regional de Agricultura e Pescas do Centro, Avenida Fernão de Magalhães, 465, 3000-177 Coimbra; margarida.teixeira@drapc.gov.pt, madalena.goncalves@drapc.gov.pt
[4] Associação de Regantes e Beneficiários do Vale do Lis, Quinta do Picoto, 2425-492 Souto da Carpalhosa, Leiria; eugenio-rui@sapo.pt, hdamasio71@gmail.com

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo de avaliação da propensão dos proprietários de parcelas no Aproveitamento Hidroagrícola do Vale do Lis, na região de Leiria, Portugal, em mudar o modo de produção praticado, em geral convencional ou de produção integrada, para o modo de produção biológico. A metodologia aplicada baseou-se num inquérito aos agricultores e em entrevistas dirigidas às entidades públicas e privadas. A amostra foi obtida por estratificação por classes de dimensão das explorações. Os resultados obtidos revelaram que 84% dos agricultores não apresentam predisposição para o modo de produção biológico e que existe uma relação significativa entre a classe etária, as habilitações literárias e a predisposição para a mudança, a qual é mais elevada para os agricultores mais jovens e com um nível de escolaridade mais elevada. Os agricultores assumem que realizam agricultura em modo de produção integrada e o mercado preferencial é o circuito curto de comercialização. Estas variáveis foram importantes na definição da predisposição para a mudança, sendo esta mais impulsionável pelos fatores comercialização e preço. Concluiu-se também que a política de renovação geracional é um fator importante para o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Produção Biológica, Predisposição para a mudança, Associação de Regantes do Vale do Lis, Cadeias curtas de comercialização.

1. Introdução

O desenvolvimento sustentável do território rural está relacionado com as condições socioeconómicas da agricultura e da preservação do ambiente e em estreita ligação com as tecnologias aplicadas. Para [1], a base do desenvolvimento sustentável consiste numa articulação entre os sistemas económico, social e ecológico, e sendo a agricultura uma atividade diretamente relacionada com o meio-ambiente, este balanço é-lhe inerente. Entende [2] que devido à proximidade entre o desenvolvimento agrícola e o desenvolvimento rural, não se deve falar de desenvolvimento sustentável destas áreas sem recorrer à agricultura sustentável. De acordo com [3], o desenvolvimento sustentável da agricultura deve ser equacionado com o desenvolvimento

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3488

sustentável das áreas rurais, uma vez que a agricultura é o sector primário e o principal utilizador do meio ambiente.

A agricultura biológica assume-se como um percursor do desenvolvimento sustentável. Os produtos biológicos são considerados alimentos saudáveis e seguros, produzidos de uma forma amiga para o ambiente, sem causar degradação ambiental e mantendo a fertilidade dos solos. Por isso, a agricultura biológica é um pilar para a sustentabilidade nas áreas rurais, porque satisfaz ao mesmo tempo as necessidades dos agricultores, da natureza e da sociedade. Em Portugal, estas premissas vão ao encontro da Estratégia Nacional para a Agricultura Biológica [4] e do Plano de Ação para a Produção e Promoção de Produtos Biológicos [5], bem como da Estratégia Nacional para as Compras Públicas Ecológicas 2020 [6].

Para uma agricultura sustentável do ponto vista social económico e ambiental, existe a opção da gestão racional de recursos através de sistemas sustentáveis, como sejam a agricultura em Modo de Produção Integrada ou em Modo de Produção Biológica (MPB), que permitem produtos que poderão ser mais valorizados no mercado, uma melhor adaptabilidade à estrutura da agricultura familiar e com um elevado potencial de conservação dos recursos naturais e da biodiversidade. De acordo com [7] e [8], o preço é um fator importante na decisão de compra do produto. No entanto, a mudança de modo produtivo com vista a alcançar uma maior sustentabilidade assume-se como um grande desafio, pois exige inovação tecnológica, novos conhecimentos na gestão agrícola e exigências especiais na relação com o mercado.

Esta comunicação procurou avaliar a motivação dos agricultores, as condições tecnológicas e gestão das empresas e a perceção de risco económico dos decisores, num estudo aplicado ao Aproveitamento Hidroagrícola do Vale do Lis (AHVL), localizado no Centro Litoral de Portugal, com cerca de 2000 ha.

Os objetivos do estudo compreendem: i) Caracterização da agricultura do AHVL nas dimensões demográfica, social e económica; ii) Identificação das tecnologias de inovação agrícola de produção integrada e agricultura biológica, incluindo os tipos de cultura; iii) Avaliação da propensão dos agricultores para a mudança do modo produtivo; iv) Identificação das principais dificuldades para efetivação da mudança; e v) Estabelecimento de um plano de ação para apoio aos agricultores, incluindo divulgação, formação, certificação e comercialização. Com este intuito, foi realizado um questionário, cujas perguntas versara sobre o modo de produção atual, a disponibilidade para adotar agricultura biológica e as principais medidas de apoio necessárias, entre outras. Estas questões irão permitir obter uma análise da situação atual e reconhecer qual a disponibilidade para a mudança e quais seriam os fatores que poderiam alavancar essa mudança para uma agricultura em MPB.

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo de caso no AHVL, integrado na atividade do Grupo Operacional para a gestão da água no Vale do Lis, que visa a melhoria da planificação, gestão e uso da água e a sua modernização sustentável. No quadro destes objetivos de sustentabilidade, pretende-se que esta seja uma primeira abordagem para o delineamento de um plano de ação de apoio aos agricultores, pois muitos deles manifestam recetividade em aprofundar conhecimentos para fundamentar tomadas de decisão, através de ações de divulgação, ou na participação em ações do tipo demonstrativo.

2. Material e métodos

A área de estudo está integrada na área administrada pela Associação de Regantes e Beneficiários do Vale do Lis e apresenta como característica particular uma elevada heterogeneidade em relação à dimensão das parcelas, sua distribuição pelos blocos de drenagem e pelos agricultores e formas de titularidade. O estudo abrangeu os proprietários e os agricultores das parcelas do AHVL.

Conhecida a área de cada parcela a partir do registo fundiário, apurou-se a área total das parcelas que cada agricultor possui no AHVL. Daqui resultaram três conjuntos de amostras

representativas das várias classes de dimensão das explorações: 20 proprietários com maior área (> 8,5 ha), doravante referidos por "Grandes"; 20 proprietários com área de muito pequena dimensão (área ≤ 25 m²) designados "Pequenos", e 21 proprietários, em geral com áreas entre 0,5 e 2 ha, apelidados de "Médios". Foi necessário fazer esta estratificação porque no AHVL predominam os proprietários de parcelas com dimensão reduzida. No entanto, os proprietários de grande dimensão apresentam um maior volume de vendas da produção e são os que mais participam e que maior influência têm nas decisões do AHVL, sendo de todo o interesse elegê-los como amostra. Para a determinação das classes de dimensão, realizou-se uma análise estatística segundo a Lei de Gauss, tendo sido decidido entrevistar as classes "Grandes" e "Pequenos" e, aleatoriamente, uma amostra dos "Médios". Os inquéritos foram realizadas com o apoio do técnico da AHVL o que permitiu facilitar a relação entre os inquiridos e o inquiridor. Aquando a realização dos mesmos, foi entregue uma brochura sobre a Estratégia Nacional para a Agricultura Biológica [4-5]. As perguntas do questionário foram estruturadas da seguinte forma: i) informações sociodemográficas dos agricultores; ii) relevância e motivação da atividade agrícola; iii) forma de titularidade e exploração das parcelas; iv) mercado e produções e v) modo de produção, a predisposição de mudança para o MPB e os apoios necessários para mudança.

Foi ainda realizada uma entrevista dirigida às entidades públicas e privadas possuidoras de áreas agrícolas no perímetro que, concomitantemente, se incluíssem na classe "Grandes". As entidades que se consideraram elegíveis como tal foram o Município de Leiria, as Infraestruturas de Portugal, a DGADR e a Fundação Bissaya Barreto. Nestas entrevistas procurou-se saber qual a forma de exploração das parcelas e, em caso de arrendamento, o conhecimento das entidades sobre a forma de aproveitamento dos terrenos. Procurou-se ainda saber se o modo de produção biológico poderá ser relevante para a entidade pública, nomeadamente em termos de sequestro de carbono, e se poderia influenciar decisões futuras sobre as parcelas agrícolas de que são proprietárias.

Os inquéritos aos proprietários rurais foram efetuados de forma presencial, após contacto prévio com os inquiridos. As entrevistas às entidades públicas e privadas foram realizados telefonicamente.

Os inquéritos decorreram nos meses de março a abril de 2019, tendo-se obtido um total de 57 inquéritos e 4 entrevistas. Os dados recolhidos foram analisados através do *software SPSS 25*. Para medir a força da associação entre as variáveis, utilizou-se a correlação do coeficiente de Pearson (r), que se aplica quando as variáveis seguem uma distribuição normal. O valor de r situa-se entre -1 e +1, com r = 0 correspondendo à não associação. Valores de r negativos indicam uma associação negativa, enquanto valores de r positivos indicam uma associação positiva [9,10].

O termo correlação positiva é utilizado quando r >0, e nesse caso, à medida que x cresce, também cresce y. Existe correlação negativa quando r <0, e nesse caso à medida que x cresce, y decresce. Quanto maior o valor de r (positivo ou negativo), mais forte a associação.

Para análise da correlação, considerou-se a seguinte escala: Muito alta: 0,9-1,0; Alta: 0,7-0,89; Média: 0,4-0,69; Fraca: 0,2-0,39 e Muito fraca <0,2. Em algumas situações, as variáveis não seguiam uma distribuição normal. O coeficiente de Spearman (ρ) é utilizado em alternativa e, não sendo sensível às assimetrias na distribuição, não é necessário estar-se perante uma Distribuição Normal [9,10, 11]. O coeficiente de correlação de Spearman baseia-se nos valores classificados de cada variável, em vez de se basear nos dados brutos, sendo muito utilizado para avaliar relações que envolvam variáveis ordinais.

É de ressalvar que estes dois coeficientes medem correlações lineares (Pearson) ou monótonas (Spearman), podendo existir outras relações que não foram exploradas. O número reduzido de inquiridos e o tipo de dados obtidos dificulta a aplicação de outros tipos de análise, optando-se sempre pela análise descritiva e detalhada dos elementos obtidos.

3. Resultados e discussão

Os resultados serão apresentados em subsecções de acordo com a estruturação do inquérito realizado. Como referido anteriormente, em face da reduzida dimensão das amostras, apresenta-se a análise descritiva dos resultados.

3.1. Caracterização sociodemográfica

Para a caracterização sociodemográfica das amostras, questionou-se a idade, o género e as habilitações literárias dos proprietários (não se incluíram aqui as entidades públicas e privadas), tendo-se obtido 57 respostas (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1. Idade e género dos inquiridos.

Classe etária	**Total de inquiridos**		**Género**			
			Masculino		**Feminino**	
Anos	Nº	%	Nº	%	Nº	%
20-40 anos	8	14,0	8	100	0	0,0
41-49 anos	6	10,5	5	83,3	1	16,7
50-64 anos	23	40,4	18	78,3	5	21,7
>= 65 anos	20	35,1	17	85,0	3	15,0
TOTAL	57	100	48	84,2	9	15,8

Analisando a Tabela 1, verificamos que a maior parte dos inquiridos tem mais de 50 anos (75,5%, sendo que destes 35,1% têm mais de 65 anos), o que se verifica em ambos os géneros, e que 84,2% são do género masculino

Tabela 2. Habilitações literárias dos inquiridos.

Grau de escolaridade	**Nº**	**%**
Até à 4ª classe	31	54,4
Até ao 9º ano	11	19,3
Até ao 12º ano	7	12,3
Bacharelato/Licenciatura	7	12,3
Mestrado/Doutoramento	1	1,8
TOTAL	57	100

Nas Tabelas 1 e 2, podemos realçar o baixo nível de escolaridade (54,4% só frequentou até à 4ª classe), o que está associado à elevada faixa etária dos inquiridos (cerca de 35% dos inquiridos pertencem à faixa etária de maiores de 65 anos). Os resultados são inferiores aos obtidos no Inquérito à Estrutura das Explorações Agrícolas [12], no qual se verificou que 54,6% dos indivíduos tinham mais de 65 anos. No entanto, se acompanharmos o Recenseamento Agrícola de 2009, os valores obtidos estão de acordo com a caracterização do produtor agrícola: "produtor agrícola tipo é homem, tem 63 anos" e "apenas completou o 1º ciclo do ensino básico" [13].

As frequências das classes relativas à idade, género e habilitações literárias foram correlacionadas com a classe da dimensão das explorações, apresentando-se os resultados na Tabela 3.

Tabela 3. Relação da idade, género e grau de escolaridade dos inquiridos com a dimensão das explorações

Classe etária	Grandes		Médios		Pequenos		Total		Género Masculino					Género Feminino				
									G	M	P	Total		G	M	P	Total	
Anos	**Nº**	**%**	**Nº**	**%**	**Nº**	**%**	**Nº**	**%**	**Nº**			**%**		**Nº**			**%**	
20-40 anos	2	12,5	5	23,8	1	5,0	8	14,0	2	5	1	8	16,7	0	0	0	0	0,0
41-49 anos	2	12,5	4	19,0	0	0,0	6	10,5	1	3	0	4	8,3	0	1	0	1	11,1
50-64 anos	8	50,0	8	38,1	7	35,0	23	40,4	6	7	6	19	39,6	3	1	1	5	55,6
>= 65 anos	4	25,0	4	19,0	12	60,0	20	35,1	4	3	10	17	35,4	0	1	2	3	33,3
TOTAL	**16**	100	**21**	100	**20**	100	57	100	**13**	**18**	**17**	48	100	**3**	**3**	**3**	9	100

	Classificação da dimensão							
Habilitações	**Grandes**		**Médios**		**Pequenos**		**Total**	
Literárias	**Nº**	**%**	**Nº**	**%**	**Nº**	**%**	**Nº**	**%**
até à 4ª classe	3	18,8	10	47,6	18	90	31	54,4
até ao 9º ano	4	25	6	28,6	1	5	11	19,3
até ao 12º ano	3	18,8	4	19	0	0	7	12,3
Bacharelato/ Licenciatura	5	31,3	1	4,8	1	5	7	12,3
Mestrado/ Doutoramento	1	6,3	0	0	0	0	1	1,8
TOTAL	16	100	21	100	20	100	57	100

G – Grandes; M – Médias; P – Pequenas explorações

Analisando o coeficiente de correlação de Pearson (r) verifica-se uma correlação negativa média, significativa a 1%, entre a idade e as habilitações literárias (r = -0,601); se aplicarmos o coeficiente de Spearman (ρ) a relação é semelhante (ρ = -0,640). Para melhor interpretação dos resultados obteve-se o valor de r2, o qual avalia a percentagem de variabilidade de uma das variáveis explicada pela outra. Assim, verifica-se que cerca de 40% da variação na idade é explicada pelas habilitações literárias, em que, como é normal, os proprietários com mais idade são os que têm habilitações literárias mais baixas.

Existe uma correlação positiva fraca (nível de significância de 5%) entre a idade e a classificação da dimensão das explorações, com coeficientes r = 0,267 e ρ = 0,311. À medida que a idade dos inquiridos aumenta, as explorações tendem a aproximar-se do tipo "pequeno". Estes resultados são importantes, pois níveis de escolaridade e de dimensão da exploração mais elevados irão permitir ao agricultor melhor capacidade de escolha, devido à sua melhor competência para gerir as novas tecnologias. Evidências parecem indicar que as variáveis-chave das explorações são melhores para os jovens agricultores, do que para os agricultores em geral [14].

3.2. Relevância e motivação da atividade agrícola

Os proprietários foram inquiridos sobre a relevância que a atividade agrícola tem na sua vida, em termos profissionais e económicos, tendo-se relacionado estes dados com a dimensão da exploração (Tabela 4).

Tabela 4. Relevância da atividade agrícola e dimensão das explorações.

Relevância da atividade agrícola	Grandes		Médios		Pequenos		Total	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	N	%
Principal atividade e fonte de rendimento	8	50,0	12	57,1	2	10,0	22	38,6
Act. Secundária e apoia o rendimento familiar	7	43,8	9	42,9	17	85,0	33	57,9
Sem relevância	1	6,3	0	0,0	1	5,0	2	3,5
TOTAL	16	100	21	100	20	100	57	100

A atividade agrícola tem um papel secundário para mais de metade dos inquiridos (57,9%). Os rendimentos obtidos permitem acrescentar um rendimento extra ao que auferem com a atividade principal porque arrendam as suas parcelas, ou têm outra atividade noutro setor de atividade económica. As respostas "sem relevância" abrangem os proprietários que fazem agricultura para autoconsumo ou optam por não cultivar as parcelas. A maioria dos pequenos proprietários atribuiu à atividade agrícola um papel secundário. Este facto confirma a importância da agricultura familiar em Portugal e o autoconsumo da estrutura agrícola [15].

Verifica-se uma correlação positiva fraca (5% de nível de significância) entre a relevância da atividade agrícola e a classificação da dimensão das explorações (r = 0,301; ρ = 0,328). À medida que a dimensão das explorações vai diminuindo, a atividade agrícola vai perdendo relevância enquanto atividade principal e passa para um plano secundário.

Sobre a motivação para a prática da agricultura, os resultados são apresentados na Tabela 5. Os inquiridos podiam escolher duas razões principais, caso existisse mais do que uma motivação.

Tabela 5. Motivação para a prática da agricultura.

Motivação para a prática da agricultura	Nº
Foi sempre uma atividade familiar.	19
Quero ser agricultor e tenho formação académica na área agrícola	4
Estava desempregado/reformado	1
Quero ser agricultor e tenho terrenos que quero rentabilizar	27
Quis mudar de profissão, aproveitando os apoios do PDR	2
Descontentamento profissional (resolvi mudar de vida)	3
Nenhum dos anteriores	7
Total	63

A motivação para a prática da agricultura está, em muitos casos, relacionada com o facto de esta ser uma atividade familiar, tendo o proprietário a possibilidade de continuar um negócio que já existia na família. Esta motivação relaciona-se com uma outra: a existência de terrenos, herdados ou adquiridos, que se pretende rentabilizar.

A resposta "nenhum dos anteriores" contemplou as situações de proprietários que arrendam as parcelas, porquanto o proveito que pretendem da terra e que lhes pode trazer motivação é a renda e não a atividade agrícola per si. Podemos dizer que a agricultura familiar abrange vários elementos e está associada a valores familiares como a solidariedade, a continuidade e o compromisso. Os resultados demonstram que a agricultura familiar é identificada com habilidades empreendedoras, propriedade e comportamento de risco, resiliência e realização individual. Independentemente da dimensão da empresa agrícola familiar, esta é um fator de continuidade para o futuro da agricultura pelas competências que ministram in situ aos futuros agricultores [16-17].

3.3. Titularidade e forma de exploração das parcelas

Relativamente à titularidade e forma de exploração das parcelas, pretendeu-se distinguir entre as seguintes figuras jurídicas: proprietários, arrendatários, exploração por comodato (empréstimo gratuito das parcelas) e figuras mistas. Neste trabalho, e de acordo com a metodologia utilizada, o objeto foi os proprietários das parcelas, arrendatários e aqueles que possuíam as terras por regime de comodato. O inquérito terminava quando os inquiridos referiam que eram senhorios e arrendavam as suas terras, sendo desta forma simplesmente proprietário. Nestas situações, pressupôs-se que o proprietário não tinha acesso à decisão sobre o modo de cultivo das terras. Em relação a titularidade das parcelas, 54% são proprietários e 19% são arrendatários (Tabela 6).

A figura do arrendamento no Vale do Lis tem grande tradição no perímetro. Através de conversas informais mantidas com os proprietários, as razões que estes apontaram para arrendar as suas parcelas foram distintas, tais como: não desejam vender as parcelas, por terem herdeiros a quem desejam transmitir o acesso às terras; o preço de venda que lhes oferecem não lhes agrada; têm um grande apego à terra; têm outra atividade e fontes de rendimentos; existe a sensação de que a terra é uma garantia para o futuro e, por último, não precisarem do dinheiro da venda.

Do lado dos arrendatários, e mantendo o mesmo registo de conversa informal, indicaram que arrendam as parcelas pelas seguintes razões: é difícil pagar o preço solicitado pelo vendedor; o arrendamento tornou-se uma forma de uso da terra tradicional e não sentem a necessidade de deterem a propriedade; têm outras atividades e a agricultura é atividade secundária e não lhes transmite estabilidade; há uma forte variabilidade na escolha da cultura a realizar e na produtividade, e com o arrendamento possuem maior liberdade de escolher das parcelas; a dificuldade de obter mão-de-obra, especialmente nas empresas hortícolas, condiciona a área a cultivar, pois esta é dimensionada de acordo com a equipa, o que condiciona a compra, visto ser um ato definitivo e o arrendamento facilita assim a gestão da empresa; têm mais facilidade em se desligar da terra, sem que ela se torne um encargo, quando a agricultura não é rentável; a agricultura exige muito esforço físico. Os 19,3% de arrendamento "puro", excluindo a figura mista com o proprietário, demonstram bem o impacto desta forma de exploração das parcelas.

No entanto, esta questão dificulta o investimento a longo prazo, visto que a incerteza da manutenção da parcela está sempre presente. Para o investimento em agricultura biológica, esta é uma questão importante a considerar, porque para se obter a certificação necessita-se de um mínimo de 3 anos, que será o tempo de conversão. Nas hortícolas, este tempo é considerado importante porque as culturas são anuais. Vários autores, como [18] e [19], realizaram estudos sobre as questões do investimento, custo das terras, da propriedade das terras e retorno do investimento relacionado com a valorização destas. Outros autores [20] apresentaram um estudo acerca da propriedade de terra e as barreiras para uma agricultura sustentável e observou-se que a incerteza por parte dos arrendatários é uma barreira para uma agricultura sustentável e que é necessário existir um trabalho conjunto entre proprietários e rendeiros para que se possa reduzir a incerteza e garantir a continuidade de investimentos.

Tabela 6. Titularidade das parcelas.

Titularidade	Nº	%
Proprietário e agricultor	31	54,4
Proprietário e não agricultor	11	19,3
Comodato e agricultor	6	10,5
Proprietário + arrendatário	8	14,0
Proprietário + comodato	1	1,8
TOTAL	57	100

Aos proprietários questionou-se a forma de exploração das parcelas, apresentando-se os resultados na Tabela 7.

Tabela 7. Forma de exploração das parcelas.

Forma de exploração das parcelas (proprietário)	Nº	%
Cultivo a(s) minha(s) parcela(s)	43	78,2
Arrendo a(s) minha(s) parcela(s)	7	12,7
Cultivo algumas parcelas e arrendo/cedo outras	3	5,5
Deixo as parcelas em pousio	2	3,6
TOTAL	55	100

A maioria dos proprietários cultiva as próprias parcelas (78,2%); mas também há quem as arrende (12,7%), e existe o mercado para arrendamento.

Para os inquiridos que responderam que "arrendo a(s) minha(s) parcela(s)" ou "deixo a(s) parcela(s) em pousio", o questionário remetia para a última questão, sobre o destino das parcelas, e cujos resultados se encontram na Tabela 8. Os proprietários que só arrendam não foram questionados sobre a quarta e quinta parte do inquérito, visto não cultivarem e as decisões sobre as culturas diziam respeito aos que arrendavam as parcelas.

Tabela 8. Destino das parcelas (se arrendamento, comodato ou em pousio)

Destino das parcelas	Nº	%
Pretendo continuar a arrendar/ceder	9	100
Pretendo começar a cultivá-las	0	0
Pretendo vendê-las	0	0
Total	9	100

Todos os inquiridos responderam que pretendem continuar a arrendar ou a ceder gratuitamente as parcelas, mantendo a relação jurídica com as terras. As respostas dos proprietários explicam a dificuldade que os arrendatários sentem em aceder à terra por completo e consequentemente a dificuldade de investimento de longo prazo. Alguns autores [21] realçam que, apesar do valor com a venda de terras agrícolas ser considerada superior ao valor com o arrendamento, porque transfere direitos totais de propriedade ao novo proprietário, de ser mais fácil o acesso ao crédito, porque as terras podem ser dadas como garantia e as vendas serem incentivos ao investimento pela segurança que transmitem, na maior parte dos países da União Europeia (UE), o mercado de arrendamento parece ser mais importante do que o mercado de vendas e uma grande parte da área agrícola é arrendada. De acordo com os mesmos autores, em 2007, Portugal era o País membro da EU que apresentava uma das mais baixas percentagens de terras arrendadas inferior a 25% da Superfície Agrícola Utilizada (SAU). Na região em estudo 29,3% arrenda ou cede as terras. Aqueles que são proprietários cultivam as terras e este facto é importante para as perspetivas futuras da agricultura, sendo de salientar que os proprietários que arrendam as terras a terceiros não se mostram disponíveis para vender as suas parcelas.

3.4. Mercado e produções

Os proprietários ou os rendeiros que cultivam foram inquiridos sobre o destino da produção agrícola, tendo-se relacionado estes dados com a dimensão da exploração, idade e relevância da atividade agrícola (Tabelas 9 e 10).

Tabela 9. Destino da produção, dimensão das explorações e idade dos inquiridos.

Destino da produção	Grandes		Médias		Pequenas		Total		20-40 anos		41-49 anos		50 – 64 anos		>= 65 anos	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
Vendo toda a produção	5	45,5	12	70,6	3	16,7	20	43,5	5	83,3	3	75,0	8	44,4	4	22,2
Vendo uma parte + consumo próprio	2	18,2	4	23,5	5	27,8	11	23,9	1	16,7	0	0,0	5	27,8	5	27,8
Apenas para consumo próprio	4	36,4	1	5,9	10	55,6	15	32,6	0	0,0	1	25,0	5	27,8	9	50,0
TOTAL	**11**	100	**17**	100	**18**	100	**46**	100	**6**	100	**4**	100	**18**	100	**18**	100

Em relação ao destino da produção, verifica-se que não há uma resposta que predomine em relação às outras, porque o cenário intermédio de "venda de uma parte da produção, sendo a outra parte para consumo próprio" mitiga a diferença que existe entre a venda de toda a produção (43,5%) e a produção para autoconsumo (32,6%).

No entanto, correlacionando o destino da produção com a dimensão das explorações, existe uma correlação positiva fraca, com 5% de nível de significância, entre estas duas variáveis (r = 0,282; ρ = 0,314). À medida que a dimensão das explorações vai ficando mais reduzida, a produção que se faz nelas tende a ser para consumo próprio.

Existe também uma correlação positiva média entre a idade e o destino da produção, com significativa no nível 5%, com r = 0,433 e ρ = 0,432, o que significa que com o avançar da idade dos agricultores, a sua produção tende a destinar-se para o autoconsumo. A magnitude do coeficiente de correlação de Pearson mostra que cerca de 19% da variação no destino da produção é explicada pela idade, e vice-versa.

Relacionando o destino da produção com a relevância que a atividade agrícola tem para os proprietários, verifica-se predominantemente que quem tem na agricultura a sua atividade principal, vende toda a produção. Quando a mesma passa para um plano secundário, a produção para consumo próprio ganha destaque.

Tabela 10. Destino da produção e relevância da atividade agrícola.

Destino da produção	Atividade principal		Atividade secundária		Sem relevância		Total	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
Vendo toda a produção	16	76,2	4	16,7	0	0,0	20	20,0
Vendo uma parte + consumo próprio	4	19,0	7	29,2	0	0,0	11	23,9
Apenas para consumo próprio	1	4,8	13	54,2	1	100,0	15	32,6
TOTAL	21	100	24	100	1	100	46	100

Existe uma correlação significativa (1% de nível de significância) positiva média (r = 0,646; ρ = 0,651) entre a relevância da atividade agrícola e o destino da produção: à medida que a atividade agrícola perde relevância, o destino da produção tende a ser o autoconsumo. A magnitude do coeficiente de correlação de Pearson mostra que cerca de 42% da variação no destino da produção é explicada pela relevância da atividade agrícola.

Os canais de venda e o tipo de mercado foram também questionados e os resultados encontram-se na Tabela 11. Foi solicitado aos proprietários que escolhessem no máximo dois canais de venda, caso existisse mais do que um aplicável. Quanto ao mercado, que escolhessem se vendem apenas para o mercado nacional, para o mercado estrangeiro, ou para ambos.

Tabela 11. Canais de venda e mercado.

Canais de venda	Total		Nacional		Estrangeiro		Nacional e Estrangeiro	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
Consumidor final	27	77,1	22	73,3	0	0	4	80,0
Pequenos retalhistas	4	11,4	3	10,0	0	0	1	20,0
Cooperativa ou grossistas	3	8,6	4	13,3	0	0	0	0,0
Grandes superfícies	0	0,0	0	0,0	0	0	0	0,0
Outros produtores	1	2,9	1	3,3	0	0	0	0,0
TOTAL	35	100	30	100	0	0	5	100

A maioria dos agricultores (77%) vende diretamente ao consumidor final, que é sobretudo português. Pode por isso dizer-se que no Vale do Lis predominam as cadeias curtas de comercialização. É importante salientar que a venda para as grandes superfícies não existe, o que poderá significar valores de produção que não justifiquem esta escolha, ou porque o preço de venda para este canal não será compensador em relação aos outros canais de comercialização. Seria importante analisar num estudo futuro a relação específica dos canais de comercialização com o MPB.

As Tabelas 9, 10 e 11, revelam a importância dos circuitos curtos e a relação desta com a agricultura, sendo estes dois fatores importantes para a sua sustentabilidade. A pequena agricultura familiar foi considerada importante pelo Estado Português, pelo peso que representa em termos do número de explorações (242,5 mil explorações, ou seja, 94% do total de explorações) e 54% da Superfície Agrícola Útil (SAU) e mais de 80% do trabalho total agrícola. No Estatuto da Agricultura Familiar foi realçada a necessidade de criação de apoios à criação de mercados de proximidade e de circuitos curtos e a criação de um regime específico de contratação pública para produtos agroalimentares de proximidade [15]. Mastronardi *et al.* [22] apresentam uma análise bibliográfica sobre a relação entre os circuitos curtos e a sua sustentabilidade. Os circuitos curtos de comercialização foram identificados como predominantes neste trabalho e de acordo com os autores, existe uma possibilidade real de que os sistemas curtos promovam sistemas produtivos mais sustentáveis, tanto do ponto vista social como ambiental, ou seja, de uma agricultura "mais verde" No entanto, não existe consenso sobre os possíveis benefícios ambientais. Alguns estudos consideram que o impacto ambiental depende mais do modo de produção agrícola do que do transporte, mas é referido por vários autores que as cadeias de comercialização curtas reduzem os custos de transporte e podem ajudar a melhorar o desempenho ambiental, por exemplo, limitando as emissões de CO_2 ou de embalagens [23]. Kneafsey *et al.* [24] referem o papel dos circuitos curtos na EU em termos de sustentabilidade económica, social e a sua importância na sustentabilidade ambiental. Os autores identificam como importante instrumento de política saber, ou seja, esclarecer se a rastreabilidade e a transparência são condições necessárias e essenciais para o funcionamento das cadeias curtas "*is important to be clear whether 'traceability' or 'transparency' would be required*". De acordo com os autores, existe escassa investigação publicada para que se possa avaliar os impactos das cadeias curtas sobre as economias rurais, a gestão dos recursos ambientais, a qualidade e diversidade alimentar, a preservação de competências e o saber-fazer dos conhecimentos tradicionais, de forma a introduzir a inovação pela aplicação de conhecimentos ancestrais que podem estar mais adaptados as condições locais e deste modo manter a sustentabilidade ambiental da agricultura.

Foi solicitado aos inquiridos que indicassem as quatro principais produções nas suas parcelas. As hortícolas (32%), o milho-grão (28%) e as pastagens e forragens (18%) representam as principais culturas realizadas no AHVL. Na rubrica "outros" foi incluída a produção animal: vacas leiteiras e vacas com aptidão para carne (Tabela 12).

Tabela 12. Principais produções.

Principais produções	Nª	%
Hortícolas	16	32
Vinha	1	2
Arroz	1	2
Milho (grão)	14	28
Pastagens e forragens	9	18
Frutícolas	2	4
Bacelos	4	8
Pequenos frutos	1	2
Outros	2	4
TOTAL	50	100

Tendo em consideração a produção de hortícolas, podemos conjeturar um potencial para exportação, no qual interessa investir, visto que o setor de frutas e produtos hortícolas cresceu 23% entre 2016 e 2017 (representando em 2017 cerca de 937 milhões de euros). Os produtos hortícolas, plantas, raízes e tubérculos comestíveis, representaram 23% das exportações vegetais; a região centro, em 2017, representou 29% das exportações hortícolas nacionais e a região de Leiria 2%. O crescimento de exportações de hortícolas, plantas, raízes e tubérculos tiveram desde 2011 um crescimento sustentável de 11% ao ano e a Região Centro de 14%. A região de Leiria, na qual se situa o caso em estudo, apresenta um crescimento das exportações de 10%, no entanto manifesta oscilações no período analisado [25].

3.5. Modo de produção e predisposição de mudança para MPB

Dos entrevistados neste trabalho, apenas um agricultor produz em modo de produção biológico. Todos os outros indicaram que produzem em modo de produção integrada.

Considerando que existe uma Estratégia Nacional para a Agricultura Biológica e um Plano de Ação para a Produção e Promoção de produtos biológicos [4, 5], documento que de acordo com a metodologia foi apresentado aquando da realização dos inquéritos e explicados os princípios básicos do Plano de Ação, os agricultores foram questionados se estariam dispostos a mudar o seu modo de produção para MPB e suas principais as razões para a mudança ou para a não alteração do modo de produção. Tanto em caso afirmativo como negativo, era-lhes fornecido um elenco de apoios que poderiam ajudar na conversão ou que os fizessem mudar de opinião. Cada inquirido poderia escolher até três apoios, que considerasse mais relevantes. Os resultados relativos à predisposição de mudança e aos apoios foram relacionados com a dimensão das explorações e encontram-se na Tabela 13.

A maior parte dos inquiridos (84%) respondeu que não estava interessado em mudar o modo de produção para MPB, o que se verificou em todas as classes de dimensão das explorações.

Tanto os proprietários que responderam que estavam interessados em mudar para MPB como os que não estavam interessados, indicaram dois apoios fundamentais para a ajuda na conversão/mudança de decisão: a garantia de escoamento e os preços mais elevados de produção. No entanto, das 45 respostas obtidas, 32 foram no sentido de que não existem quaisquer apoios que os façam mudar de opinião. Para estes proprietários, nenhum dos apoios elencados funciona

como alavanca para mudar para o MPB. Só dois referiram apoios que se incluem diretamente em incentivos do Estado, apoio à comercialização e apoio à conversão.

Tabela 13. Predisposição de mudança para MPB e apoios necessários para ajudar na conversão (se sim) ou que possam fazer mudar de opinião (se não) – relação com a dimensão das explorações.

Predisposição para mudar para MPB	**Sim**		**Não**	
	Nº	%	Nº	%
Médias	4	8,9	13	28,9
Grandes	2	4,4	9	20
Pequenas	1	2,2	16	35,6
TOTAL	**7**	**15,6**	**38**	**84,4**
Se sim – apoios necessários para ajudar na conversão	**Grandes**	**Médias**	**Pequenas**	
Apoio na comercialização	0	1	0	
Subsídio para conversão	0	0	0	
Apoio nos custos dos fatores de produção	0	0	0	
Formação técnica	0	0	0	
Apoio financeiro para a certificação	0	0	0	
Garantia de escoamento	2	3	0	
Preços mais elevados de produção	2	4	1	
Maior área de produção	0	1	0	
Outros	0	0	0	
TOTAL	**4**	**9**	**1**	
Se não – apoios que pudessem fazer mudar de opinião	**Grandes**	**Médias**	**Pequenas**	
Apoio na comercialização	0	0	0	
Subsídio para conversão	0	1	0	
Apoio nos custos dos fatores de produção	0	0	0	
Formação técnica	0	0	0	
Apoio financeiro para a certificação	0	0	0	
Garantia de escoamento	1	2	1	
Preços mais elevados de produção	1	3	1	
Maior área de produção	0	1	2	
Outros	0	0	0	
Não há nenhuns apoios que me façam mudar de opinião	8	10	14	
TOTAL	**10**	**17**	**18**	

Apesar das respostas serem tendencialmente para uma "não" predisposição à mudança, é necessário referir que os agricultores afirmaram que produzem em modo de produção integrada, que é um sistema de produção sujeito a certificação, de produção de produtos agroalimentares de qualidade, que respeita as boas práticas agrícolas, a gestão racional dos recursos naturais, favorece a avaliação ponderada de todos os métodos de proteção das culturas disponíveis e a integração de medidas adequadas em substituição de fatores de produção, contribuindo, deste modo, para uma agricultura sustentável, minorando os riscos para a saúde humana e o ambiente, uma agricultura que privilegia a menor perturbação possível dos ecossistemas agrícolas e agroflorestais [26]. A produção em MPB irá implicar uma nova certificação e o cumprimento de regras mais restritas no uso de fatores de produção.

Para melhor compreender as escolhas dos inquiridos, realizou-se uma pergunta aberta questionando as razões da opção pelo "sim" e pelo "não". Todos os agricultores inquiridos

responderam à pergunta aberta. É de destacar a disponibilidade dos inquiridos para a resposta aberta, considerando que o tempo disponível dos agricultores é limitado. Esta recetividade poderá demonstrar interesse pela atualidade do assunto e a necessidade que estes sentem em apresentarem as suas ideias e expressarem as opiniões. Este trabalho, para além de apresentar um reflexo sobre a questão fundamental, que é a predisposição para a mudança, reflete também a necessidade de os agricultores serem auscultados aquando a formulação das políticas agrícolas.

Em relação aos agricultores que responderam "sim", é de realçar as seguintes palavras-chaves: o preço; incentivos; a vantagem para a saúde dos seres vivos e para o ambiente e a facilidade de mudar devido a dimensão das parcelas.

Em relação aos que responderam "não", as palavras-chaves foram: a produção para alimentação animal; a pequena produção; reduzida dimensão das parcelas; a não diferenciação pelo consumidor entre os diferentes modos de produção; a reduzida aplicação de fitofármacos e de pesticidas; a baixa produtividade da produção em MPB; perceção de contaminação cruzada entre parcelas e do ambiente e a reduzida disponibilidade de mão-de-obra que os agricultores entendem como necessária para produzirem segundo o MPB.

Da análise das respostas é importante observar que existe uma preocupação com a saúde e com o ambiente, mas o facto de que as parcelas são pequenas e contíguas dificulta a certificação para agricultura biológica. Cerca de 14% dos inquiridos produz milho para alimentação animal e deste modo não consideram a produção de milho em MPB como forma de agricultura, porque o produto que vendem é carne ou leite e a certificação para MPB de produtos de origem animal é complexa, implicando a certificação de toda a cadeia agroalimentar. Considerando que 77% dos inquiridos vende para o consumidor final e cerca de 81% vende para o mercado nacional, isto é, ao pequeno retalho local ou diretamente ao consumidor, nas designadas cadeias curtas, não sentem necessidade de realizar outro modo de agricultura porque o consumidor não valoriza como diferente os produtos em MPB e os agricultores já consideram que produzem de forma sustentável.

Foi referido a continuidade das parcelas e a sua pequena dimensão como dificuldades para implementação da produção em MPB. Para analisar esta questão, foram realizadas correlações entre a dimensão e a predisposição, mas não foi encontrada correlação entre as duas variáveis. No entanto, as explorações com parcelas de maiores dimensões maiores, permitem a aplicação de faixas e corredores ecológicos, permitindo a entrada de máquinas e alfaias evitando contaminação cruzada, o que poderá colocar em perigo a conversão.

A correlação entre as habilitações literárias e a predisposição a mudar, com 5% de nível de significância, é negativa com r = -0,37 e ρ = -0,34. Se relacionarmos com a idade, essa correlação é significativa a 1% de nível de significância (r = -0,49; ρ =- 0,45). O nível de ensino é um fator importante para a predisposição para a mudança e quanto mais jovem, maior é a predisposição para a mudança, mas só explica 14% dessa relação. No caso da idade e da predisposição a mudar, 24% da variabilidade de uma variável é explicada pela outra. Em suma, quanto mais jovem for o agricultor, maior será a predisposição para a mudança.

Os resultados têm de ser observados com cuidado, devido à reduzida dimensão da amostra, nomeadamente no que respeita a classe de idades compreendidas entre os 20 e 40 anos (jovens agricultores). Dos 8 inquiridos nesta classe etária, 38% demonstraram predisposição à mudança e 25% afirmarem que não estavam disponíveis para essa mudança. No entanto, é importante referir que 38% não responderam à questão, o que prejudica a análise de resultados e a correlação terá de ser avaliada com cuidado. A análise mais detalhada dos dados permite observar que na classe entre os 50-64 só 3 inquiridos responderam disponíveis (13%) e 67% responderam que não estavam disponíveis (5 respostas em branco). Se considerarmos o conjunto das classes superior a 50 anos, a recetividade à mudança diminui significativamente. Dos 43 inquiridos, 74% respondeu que não estava disponível e só 7% o estaria, sendo estes pertencentes à classe de entre os 50-64 anos, mas com 7 respostas em branco (16%). Estes resultados justificam as correlações

encontradas. Como foi referido, a renovação geracional é importante para a transformação da agricultura. Jovens agricultores com melhor formação académica e agrícola são mais capazes de gerir as novas tecnologias e estão interessados em aumentar a produtividade agrícola de forma sustentável. Os jovens possibilitam e estão interessados em criar um novo modelo de desenvolvimento regional baseado projetos partilhados que podem introduzir os conceitos de uma circular economia e inovação contínua [27]. Para que os agricultores em modo de proteção integrada possam converter o modo de produção para MPB necessitam de um período de transição, que para os produtos vegetais é no mínimo de 3 anos [26]. No entanto, antes de iniciar a atividade no novo modo de produção, o produtor deve elaborar uma avaliação prévia, que identifica as áreas de risco de contaminação, os antecedentes de aplicação de fertilizantes e de produtos fitofarmacêuticos, as análises de terra e águas realizadas. Na análise dos resultados, observa-se que os agricultores conhecem os diferentes modos de produção e reconhecem as vantagens e as dificuldades na conversão.

Aos agricultores, aquando da questão da predisposição para a mudança e como foi referido no trabalho foi-lhes apresentado um folheto Estratégia Nacional para a Agricultura Biológica e os incentivos do Estado para o desenvolvimento deste modo de agricultura, mas não se mostraram recetivos aos incentivos resultantes desta Estratégia. O escoamento do produto foi referenciado com fator importante para a mudança e a Estratégia Nacional poderá ser importante porque esta apresenta também planos de ação que têm como objetivo a promoção dos produtos de agricultura biológica como sejam: a promoção da representação da produção biológica em certames nacionais e internacionais; desenvolvimento de um plano de comunicação; criação de uma aplicação móvel para os portugueses poderem localizar unidades de produção ou comercialização de produtos biológicos, incrementar a expansão das áreas em MPB para aumentar a oferta de produtos agrícolas e agroalimentares biológicos e aumento o consumo, envolvendo as compras públicas [4, 5]. Estas estratégias poderão ajudar no escoamento do produto em MPB e na valorização deste por parte do consumidor, sendo o elemento alavanca para o desenvolvimento deste modo de produção.

3.6. Entrevista dirigida às entidades públicas e privadas

As entidades públicas e privadas foram entrevistadas por ser possuidores de áreas de grandes dimensões na zona de estudo, segundo a metodologia adotada, foram entrevistados o Município de Leiria, as Infraestruturas de Portugal, a DGADR e a Fundação Bissaya Barreto.

Todas estas entidades indicaram que arrendam algumas das suas parcelas e mantêm incultas as outras. Procurou-se então saber, em primeiro lugar, se sabiam qual a forma de utilização das parcelas pelos arrendatários. A resposta foi negativa para todos os entrevistados. Sendo questionados se o modo de agricultura, sobretudo biológica, poderia ter importância para a entidade pública, as respostas foram negativas.

No caso da DGADR, as parcelas servem para permutas de algumas áreas. Estas foram adquiridas para a sua "bolsa de terras", quando se perspetivava executar o projeto do emparcelamento, mas como este não se concretizou, estas as terras foram arrendadas aos agricultores. As parcelas do Município foram, na sua maioria, herdadas, e têm servido como vias de comunicação ou para espaços públicos (p.e., jardins). Semelhante situação ocorre nas parcelas da Fundação Bissaya Barreto, que são constituídas por terrenos doados ou pertencentes à família. Quanto às Infraestruturas de Portugal, estas parcelas correspondem a áreas sujeitas ao alargamento de vias de comunicação rodoviária.

Finalmente, questionados sobre o destino a dar em futuro próximo às parcelas, todos clarificaram que pretendem continuar com o arrendamento, mantendo assim a atual utilização das mesmas. O tipo de cultura ou o modo de cultura seria desta forma uma preocupação dos agricultores e não dos proprietários. É de salientar o papel da DGDAR na realização de um parcelamento voluntário pela permuta e compra/vendas das terras. Este facto irá permitir

aumentar a dimensão das parcelas e poder-se-á dar capacidade ao agricultor de aumentar a sua área de cultivo e rentabilizar investimentos nas novas tecnologias e em particular nas tecnologias de redução de custos, tanto económicos como ambientais, através de uma agricultura mais racional e mais rentável.

4. Conclusão

O trabalho realizado consistiu numa análise económica e social dos agricultores optando pela metodologia de inquérito e da estratificação da amostra. Os resultados em termos socioeconómicos estão próximos dos obtidos para as mesmas variáveis nos inquéritos às estruturas agrícolas realizadas pelo Instituto Nacional de Estatística, confirmando a baixa dimensão da estrutura agrícola, a reduzida escolaridade e as elevadas taxas etárias dos agricultores. Os agricultores reconhecem a agricultura biológica como um fator positivo para o desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável, mas apresentam um conjunto de questões que dificultam a sua implantação. Os resultados obtidos apontam para diversas dificuldades na conversão dos modos produtivos, sendo de salientar a incerteza quanto ao acréscimo dos fatores de produção sobre o rendimento económico, a insuficiência de conhecimento técnico sobre as novas tecnologias, a pequena dimensão das parcelas e a falta de garantias de escoamento dos produtos. É de realçar a importância do reconhecimento por parte dos consumidores da diferenciação pelos produtos de agricultura biológica através do preço. Na área de estudo, usam-se circuitos curtos de comercialização, o que dificulta a certificação, a valorização e a diferenciação pelo preço por parte do consumidor. É manifesto o papel do Estado na promoção da agricultura em modo biológico, através da clarificação dos vários sistemas de produção e também do modo de comercialização, mas o desenvolvimento da Agricultura em MPB deverá resultar do consumo pela valorização do produto em termos de preço e do escoamento. O aumento das parcelas e o esclarecimento sobre custos de produção, mecanização da agricultura, o apoio aos jovens agricultores e a renovação geracional são questões importantes e serão fatores a ter em consideração no desenvolvimento de políticas para este modo de agricultura. Realça-se ainda a grande recetividade em aprofundar conhecimentos para fundamentar tomadas de decisão, através de ações de divulgação ou na participação em ações do tipo demonstrativo. Este trabalho irá ser aprofundado através do Projeto Grupo Operacional para a Gestão da Água no Vale do Lis, com o objetivo de se monitorizar a área em estudo e serão desenvolvidas ações para apoio dos agricultores com o objetivo de desenvolver esta temática no sentido de uma agricultura de maior valor acrescentado, desenvolver canais de comercialização mais amplos e os circuitos curtos já existentes. De acordo com [28], estes desempenham um papel importante no desenvolvimento rural e estão em acordo com o desenvolvimento de uma agricultura sustentável. Este trabalho será realizado com a cooperação dos agricultores que serão parte ativa no desenvolvimento do projeto em que se pretende que os agricultores sejam parte ativa para se atingir os objetivos de uma agricultura racional na gestão de recursos naturais e ao mesmo tempo economicamente sustentável.

5. Agradecimentos

O Projeto Grupo Operacional para a Gestão da Água no Vale do Lis (PDR2020-1.0.1-FEADER- 030911) tem o apoio financeiro do PDR2020 cofinanciado pelo FEDER, no âmbito do Acordo de Parceria Portugal 2020, Programa PDR2020, Medida Inovação.

Referências

1. Klos L. The Development of organic farming in Poland after joining the European Union. In: Agriculture in the context of sustainable development of rural areas. Wydawnictwo Economicu, Szczecin, 48.

2. Zmija, D. Sustainable development of agriculture and rural areas in Poland. Economics, Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach, 166, 149-158.
3. Ronowski, H. Sustainable development of agriculture and family farms. In: Rural areas and agriculture, development prospects. IERiGZ, IRWiR PAN, Warszawa, 139-141.
4. Hagaton C. Estratégia Nacional para a Agricultura Biológica. Seminário - Agricultura Biológica: da Sustentabilidade à Competitividade, Samora Correia, 2018, Portugal
5. DR. Resolução do Conselho de Ministros n.º 110/2017. DR, 1ª série, n.º 144, 27 de Julho de 2017.
6. EU, Food and Catering Services Background Product Report, European Commission Green Public Procurement (GPP) Training Toolkit- Module 3: Purchasing Recommendations, European Commission, 2008, DG Environment-G2, B-1049, Bruxelles
7. Stolz, H., Stolze, M., Hamm, U., Janssen, M., Ruto, E,. Consumer attitudes towards organic versus conventional food with specific quality attributes, NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, 2011, Vol. 58, Issues 3–4, pp. 67-72.
8. Carlson, A. Investigating Retail Price Premiums for Organic Foods, Food Markets & Prices, https://www.ers.usda.gov/amber-waves/2016/may/investigating-retail-price-premiums-for-organic-foods/, acedido em 08/05/2019.
9. Gujarati D. Basic Econometrics. McGraw-Hill Book, Inc., 1995, 3ª edição, 372-374.
10. Laureano R. Teste de Hipóteses com o SPSS. Edições Sílabo, 2013, 2ª edição, 126-135.
11. Pestana M., Gageiro J. Análise de dados para ciências sociais. Edições Sílabo, 2008, 5ª edição, 178-186.
12. Inquérito à Estrutura das Explorações Agrícolas 2016. INE, I.P., 2017, 33.
13. Recenseamento Agrícola 2009. INE, I.P., 2011, 36-37.
14. Oliveira M-F., Carvalho L. New Farmers in Portuguese Agriculture: The Role of Younger Farmers. Changes for the New Rurality in a Changing World. 7th International Conference on Localized Agri-Food Systems, Estocolmo, Suécia, 8-10 de maio de 2016, 57-58.
15. DR, Estatuto da Agricultura Familiar, Decreto-Lei n.º 64/2018 – D.R. n.º 151/2018, Série I de 07/08/2018.
16. EU, Family farming, disponível em: https://ec.europa.eu/agriculture/family-farming_en, 2019, consultado a 20/04/2019.
17. EU Summary of proceedings - Agriculture and Rural Development: Conference on "Family Farming: A dialogue towards more sustainable and resilient farming in Europe and the world" Brussels, 2013, 29 November.
18. Murray, L., McGrath, M., (2016) Sustainable farmland investment strategies: An Introduction to Current Yale School of Management & Yale School of Forestry and Environmental Studies
19. Ruhf, K, Wagner, B., (2013) Farmland Investors: An Exploration for New England and Beyond, Land Access Project, August 2013.
20. Carolan M S; Mayerfeld, D; Bel,M M l e Exner, R., (2004). Rented Land: Barriers to Sustainable Agriculture. Journal of Soil and Water Conservation. 59.
21. Ciaian, P., Kancs, d' A., Swinnen, J., e Van Herck, C., Vranken, L, Rental Market Regulations for Agricultural Land in EU Member States and Candidate Countries Pavel, d'Artis, Factor Markets Working Paper No. 15/February 2012, Disponível em http://aei.pitt.edu/58518/1/Factor_Markets_15.pdf, consultado a 12/05/2019.
22. Mastronardi, L.., Marino D., Cavallo, A. Giannelli, A. Exploring the Role of Farmers in Short Food Supply Chains: The Case of Italy International Food and Agribusiness Management Review , Volume 18 Issue 2, 2015
23. EPRSLibrary Local Agriculture And Short Food Supply Chains, Disponível em https://epthinktank.eu/2013/10/14/local-agriculture-and-short-food-supply-chains/, consultado a 12/05/2019.
24. Kneafsey, M., Venn L., Schmutz, B., Balázs , B., Trenchar, L, Eyden, T., Bos, E., Sutton, G., Blackett, M Short Food Supply Chains an, d Local Food Systems in the EU. A State of Play of their Socio-Economic Characteristics, eds Fabien Santini, Sergio Gomez y Paloma, Joint Research Center, EU, 2013, 116.
25. INE, Database (2019). Exportações (€) de bens por Localização geográfica (NUTS - 2013), Tipo de comércio e Tipo de bens (Nomenclatura combinada - NC2); Anual - INE, Estatísticas do comércio internacional de bens, acedido em 04/04/2019.

26. DR, Decreto-Lei n.º 37/2013, Diário da República, 1.ª série — N.º 51 — 13 de março de 2013
27. Epi-Agri, Agrinnovation 2: Where Research and Practice Meet, 2015, Disponível em https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agrieip/files/eipagri_magazine_agrinnovation_2015_web.pdf, acedido a 07/05/2019.
28. Canfora, I., Florence "Sustainability of Well-Being International Forum". 2015: Food for Sustainability and not just food, Agriculture and Agricultural Science Procedia 8, 2016, pp. 402 – 407.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Proyecto LIFE Ammonia Trapping: planta piloto para la captura de amoniaco del purín

M. C. García-González[1], I. González García[1], B. Riaño[1], B. Molinuevo Salces[1], D. Hernández González[1], M. Soto-Herranz[1], A. Correa-Guimarães[2], L. M. Navas Gracia[2], M. Sánchez-Báscones[2]

[1] Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León. Ctra. Burgos, km. 119 47071, Valladolid, España.
[2] Departamento de Agricultura e Ingeniería Forestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, Avenida de Madrid 44, 34004 Palencia, España.

Resumen: Las emisiones de amoniaco son uno de los contaminantes más importantes generados en las actividades agrícolas y ganaderas, estos sectores son los responsables de más del 93% de las emisiones de amoniaco en la UE. Dichas emisiones causan problemas medioambientales y de salud, por lo que la Unión Europea trata de reducirlas desde el año 2010 con la Directiva NEC 2001/81/CE sobre techos de emisiones, la cual ha sido revisada a través de la Directiva 2016/2284/EU. El proyecto Life Ammonia Trapping tiene como principal objetivo reducir las emisiones de amoniaco de granjas porcinas y avícolas, a través de la aplicación de una nueva tecnología de membranas permeables a los gases. En este trabajo se presentan resultados del primer estudio a escala piloto con la tecnología de membranas permeables a los gases, llevado a cabo en una granja porcina. De acuerdo con estos datos se ha conseguido una recuperación de amoníaco del 66,2% en el prototipo estudiado.

Palabras clave: amoniaco, emisiones, purines, prototipo, tecnología de membranas

1. Introducción

El sector ganadero, y especialmente el porcino, es un sector altamente competitivo, basado en sistemas de manejo de alta productividad y con alta demanda de recursos como materias primas para piensos, agua y energía. La especialización del sector en los últimos años se ha traducido en una mayor y mejor producción animal, con granjas de gran tamaño y menor número de granjas, por lo que España cuenta con la mayor cabaña ganadera de Europa, pero con menos granjas que hace unos años, en torno al 13% [1]. Además, se suelen agrupar en zonas determinadas, lo cual tiene implicaciones ambientales graves debidas a determinados elementos contaminantes como los nitratos y el amoníaco.

En el caso de este último, la Unión Europea a través de su Directiva 2016/2284 (Directiva Techos o NEC Directive) [2] ha fijado límites máximos para las emisiones de gases a todos Estados miembros a partir de 2010 con el objetivo de mitigar la contaminación atmosférica. Para ello, se están desarrollando una serie de actuaciones, tales como la revisión del Protocolo de Gotemburgo de 2012 y la revisión de la Directiva de Techos, con una propuesta de techos de emisión en 2020 y 2030, así como niveles intermedios para 2025 que permitan hacer un seguimiento de las emisiones para conseguir el objetivo de 2030. En el caso del amoníaco, se han constatado cantidades de 378,7 y 375,3 Gg según los inventarios de 2005 y 2012 respectivamente, estableciéndose una previsión de 396,3 Gg en el año 2020 cuando el techo establecido en la UE es

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3435

de 365,0 Gg, tendencia que se agrava en el año 2030 en el cuál la previsión de emisión es de 393,7 Gg y el techo de 267,2 Gg [3]. El no cumplimiento de estos techos implica sanciones para España.

El sector agroganadero está directamente relacionado con la emisión de diferentes tipos de gases emitidos a la atmósfera, especialmente el NH_3, que se genera por la descomposición de la urea y del ácido úrico contenidos en las excretas. El NH_3 puede formar aerosoles, acidificar suelos, contaminar con nitratos las aguas subterráneas y superficiales y causar eutrofización de esas aguas. Además, en la atmósfera contribuye a la formación de partículas PM 2.5. Todo ello justifica la adopción de medidas para su reducción, algunas de las cuales ya se están implementando, como son las relacionadas con la aplicación de las Mejores Técnicas Disponibles, las incluidas en el Código de Buenas Prácticas Agrarias o las relacionadas con la gestión del estiércol.

En este sentido, el proyecto Life Ammonia Trapping trata de contribuir a la reducción de las emisiones de amoniaco generadas por los residuos ganaderos que se producen en las granjas de ganado porcino y avícola, aplicando la tecnología novedosa de membranas permeables a los gases. A lo largo del proyecto se han diseñado y construido dos prototipos de captura de amoniaco, uno directamente del purín (prototipo de líquidos) y otro del aire que se encuentra en el interior de las naves de los animales (prototipo de gases).

El proceso de captura de NH_3 se basa en la capacidad que tiene este compuesto para atravesar la membrana permeable a los gases pudiéndose recuperar en una solución ácida al otro lado de dicha membrana. Una vez el NH_3 se concentra en la solución ácida, se combina con los H^+ para formar iones amonio (NH_4^+) no volátiles, convirtiéndose en una sal de amonio que se puede usar como fertilizante, y neutralizando el ácido, de manera que la solución producida no tendría que ser neutralizada para su uso posterior [4]. Este producto fertilizante se puede exportar fuera de la granja hacia regiones donde sea necesario, lo cual evitaría la contaminación nitrogenada al suelo, agua y al aire en zonas con exceso de nutrientes, como por ejemplo las zonas vulnerables.

El objetivo de este trabajo es presentar resultados del primer estudio a escala piloto con la tecnología de membranas permeables a los gases para la captura de amoniaco del purín. El estudio se ha llevado a cabo en una granja porcina dentro del marco del proyecto Life Ammonia Trapping, sin que haya terminado todavía la fase experimental del proyecto.

2. Metodología

2.1 Descripción del prototipo.

El prototipo está ubicado en una granja de ganado porcino de la provincia de Palencia (Figura 1). Consta de los siguientes elementos: 1) un tanque de 5,8 m^3; 2) una bomba de alimentación del purín que introduce el purín desde la balsa de almacenamiento de la granja hasta el tanque de 5,8 m^3; 3) 16 paneles de membrana que están sumergidos en el purín y dentro del tanque de 5,8 m^3, cada panel contiene aproximadamente 50 m de membrana tubular; 4) una soplante; 5) una bomba de recirculación del ácido; 6) un tanque de 250 litros para el almacenamiento de la solución ácida; 7) una bomba de recirculación del purín; 8) dos sondas de pH y temperatura y 9) un sistema de control de los equipos (Figura 2). Este sistema de control regula el funcionamiento de la soplante de manera que cuando el pH del purín es inferior a 8,3 entra en funcionamiento la soplante para introducir aire y así subir el pH de nuevo. Esto es importante ya que el equilibrio NH_3/NH_4^+ está gobernado por el pH del purín y la temperatura. A mayor pH mayor NH_3 en el purín, lo cual favorece su captura por la membrana. Asimismo, el pH del ácido se ha mantenido por debajo de 2 para favorecer también la captura de NH_3.



Figura 1. Vista general del prototipo, tanque de purín, paneles con las membranas, panel de control, tanque de solución ácida, salida de la solución ácida de cada panel.

2.2. Muestreos y caracterización de las muestras.

Los ensayos se han realizado por lotes, es decir, se introduce el purin en el tanque de 5,8 m^3 y se mantiene el mismo purín durante 7-10 días. El volumen de purin tratado es de 5 m^3 y el de solución ácida es de 150 L. Durante todo el periodo experimental se han recogido muestras diarias de purín y de solución ácida, se han transportado y mantenido refrigeradas a 4 °C hasta su análisis. Se han realizado los siguientes análisis: pH, temperatura, TAN (nitrógeno amoniacal total) de los dos tipos de muestra. Al inicio y al final de cada lote se han hecho los siguientes análisis: alcalinidad total, sólidos totales (ST) y volátiles (SV), TAN, nitrógeno total (Nt), DQO total y soluble (demanda química de oxígeno). La alcalinidad total y el pH se han medido con un pHmetro Crison Basic 20 (Crison Instrumentos S.A., Barcelona). Los analisis de ST, SV, DQOt, DQOs, TAN y Nt se realizaron según la metodología del Standard Methods [5].

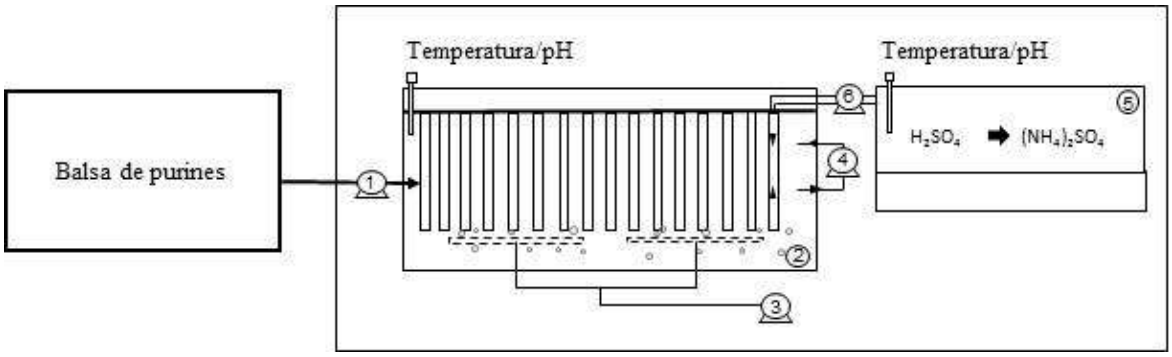


Figura 2. Esquema del prototipo de líquidos. 1) bomba de alimentación de purín, 2) aireadores, 3) soplante, 4) bomba de recirculación del purín, 5) tanque de solución ácida, 6) bomba de recirculación de la solución ácida.

3. Resultados y discusión

El prototipo está instalado en una granja de ganado porcino, el purín de la granja tiene un alto contenido en materia orgánica con 41,87 g·L^{-1} de DQO total y 30,42 g·L^{-1} de sólidos totales y 2,82 g·L^{-1} de nitrógeno amoniacal (Tabla 1), por lo que se considera un purín muy cargado.

Tabla 1. Caracterización química del purín al inicio y final del ensayo. Los datos son la media de seis muestreos, entre paréntesis se indican las desviaciones estándar.

Parámetro	Inicial	Final
pH	7,26 (0)	8,49 (0)
DQOt (g·L^{-1})	41,87 (3,24)	n.d
ST (g·L^{-1})	30,42 (2.23)	n.d
TAN (g·L^{-1})	2,82 (0)	1,92 (0)
Nt (g·L^{-1})	3,38 (0,01)	n.d

n.d: no determinado

Según se observa en la figura 3, la concentración de TAN disminuyó en el purín desde 2,82 g·L^{-1} hasta 1,92 g·L^{-1} en un periodo de 7 días. Dicho TAN se recuperó en la solución ácida en una concentración de 18,6 g·L^{-1}, lo que implica una concentración 6,6 veces superior al TAN del purín. En comparación con otros estudios llevados a cabo en nuestro laboratorio, en este ensayo se han obtenido mayores concentraciones de TAN en la solución ácida [4,6], debido a una mayor concentración de TAN en el tanque de purín. Hay que resaltar que la solución ácida ha sido la misma durante todo el ensayo, recirculándose constantemente dentro de las membranas. Esta solución está formada por ácido sulfúrico, que combinado con el NH_3 del purín producen sulfato de amonio, que es un fertilizante comercial de uso general en agricultura. Por lo que el fin último de esta solución es su uso como fertilizante. Además, dado que la captura de TAN hace que el pH de la solución ácida aumente, cuando sea necesario reemplazar dicha solución no será necesaria su neutralización ya que ocurrirá debido al propio mecanismo de la reacción.

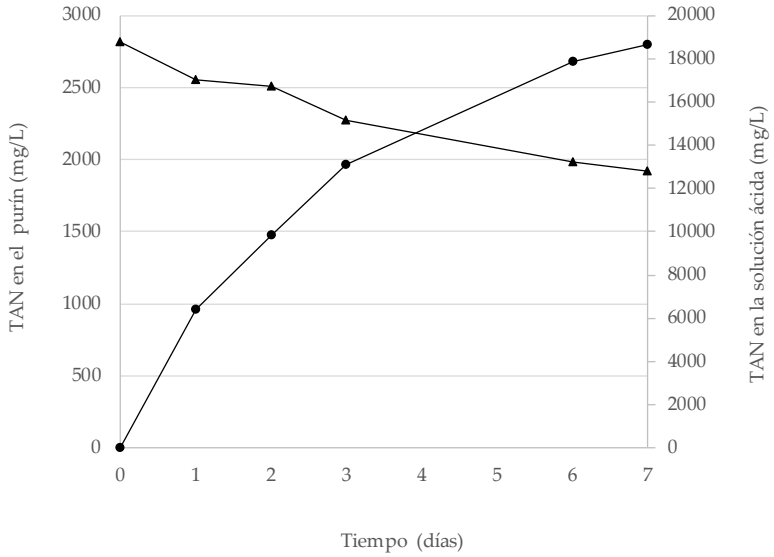


Figura 3. Eliminación de TAN del purín y recuperación de TAN en la solución ácida mediante la tecnología de membranas permeables a los gases.

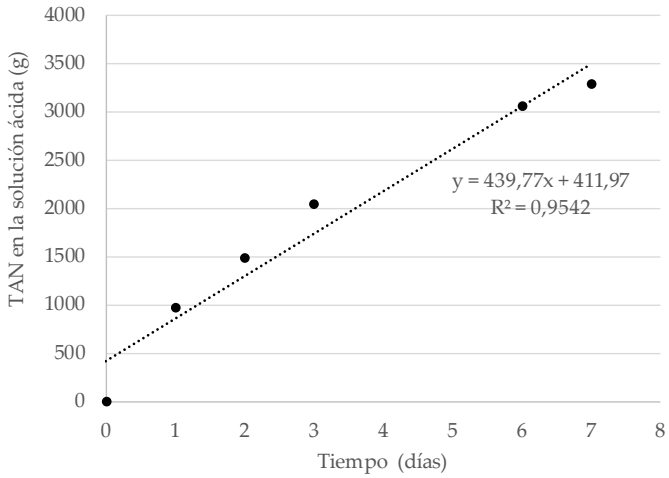


Figura 4. Masa de TAN recuperado en la solución ácida. Se representa la ecuación de primer orden y R^2.

Como se muestra en la figura 4, la captura de TAN por la membrana ha sido lineal durante el periodo experimental, lo cual significa que la tasa de captura de TAN fue constante durante ese periodo, y que la concentración de TAN en el purín fue lo suficientemente alta para que la membrana lo capturase de forma continua. En estudios llevados a cabo en el laboratorio durante un periodo experimental mayor [4,6], la recuperación de TAN no ha sido lineal, si no que ha seguido una curva de segundo grado debido a la disminución del contenido de TAN en el tanque. En base a estos resultados, es importante mantener una concentración de TAN alta en el tanque para maximizar la captura de TAN por la membrana.

Tabla 2. Balance de masa de la recuperación de nitrógeno utilizando las membranas permeables a los gases.

	Ensayo 1
TAN inicial en el purín (g)	14.001
TAN final en el purín (g)	9.050
TAN eliminado (g)	4.951
TAN recuperado en la solución ácida (g)	3.279
Porcentaje de TAN recuperado en el ácido (%)	66,2
Tasa de recuperación (g TAN·m-2·d-1)	38,2

A lo largo del ensayo realizado en el prototipo, se ha eliminado un del 45% del TAN. Del TAN eliminado en el purín se ha recuperado el 66,2%, lo cual implica un alto porcentaje en la reducción de las emisiones de amoniaco del purín (Tabla 2). En cuanto a la tasa de recuperación, en este ensayo se han alcanzado tasas de recuperación de 38,2 g $TAN \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, que son algo mayores a las obtenidas en ensayos previos de laboratorio. Además, se han alcanzado valores de recuperación de 180 mg $TAN \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, que son mayores a la propuesta en uno de los objetivos del proyecto, que es capturar al menos 150 mg $TAN \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, por lo tanto, en este primer ensayo llevado a cabo con el prototipo, se ha logrado cumplir uno de los objetivos del proyecto.

4. Conclusiones

La recuperación de amoniaco del purín utilizando el prototipo diseñado y construido en el marco del proyecto Life Ammonia Trapping ha sido un éxito. Se han conseguido tasas de recuperación de 180 mg $TANL^{-1}d^{-1}$, que son mayores a la propuesta en uno de los objetivos del proyecto. Además, se ha conseguido una recuperación de TAN del purín del 66,2%. La solución de sulfato de amonio generada en el proceso es un producto fertilizante que será evaluado en el proyecto para su uso como fertilizante.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con recursos procedentes de fondos FEDER a través del proyecto RTA2015-00060-C04-01, y del proyecto Life Ammonia Trapping Life15ENV/ES/284.

Referencias

1. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. 2018a. El sector de la carne de cerdo en cifras. Principales indicadores económicos 2017. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/estadisticas/indicadoreseconomicoscarnedecerdo2017comentarios_tcm30-379728.pdf. Acceso 03/04/2019.
2. EC-European Commission (2016). Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the Reduction of National Emissions of Certain Atmospheric Pollutants, Amending Directive 2003/35/EC and Repealing Directive 2001/81/EC. OJL 344, 1–31.
3. Sanchez Bascones, M., García-González, M.C. Reducción de las emisiones de amoníaco y producción de fertilizantes de los residuos ganaderos. Retema, (2018), nº de noviembre-diciembre, (22-27).
4. García-Gonzalez M. C., Vanotti M. B. Recovery of ammonia from swine manure using gas-permeable membranes: effect of waste strength and pH. Waste Management (2015), 38, (455 – 461).
5. APHA. Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. Washington, D.C. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation (2005).
6. García-Gonzalez, M.C., Vanotti, M.B., Szogi, A.A. Recovery of ammonia from swine manure using gas-permeable membranes: Effect of aeration. Journal of Environmental Management (2015), 152 (19-26).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

TERR@ENO - Terroir e zonagem agro-ecológica como fator crítico de competitividade e inovação dos Vinhos Verdes

Mendes, S.[1], Alonso, J.[1], Castro, P.[2], Araújo-Paredes, C.[1], Valin, M.I.[1], Rodrigues, A. S.[1], Afonso, I.[1]., Nogueira, J.[1], Santos, J.C.[1], Lourenço, M.[4], Sobrinho, R.[5], Cortez, I.[3], Moutinho-Pereira, J.[3], Baptista, A.[3]

[1] Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Ponte de Lima, Portugal; smendes@esa.ipvc.pt
[2] Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Viana do Castelo, Portugal
[3] Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal
[4] Adega Cooperativa Regional de Monção, Mazedo, Monção, Portugal
[5] Adega Cooperativa de Ponte de Lima, Ponte de Lima, Portugal

Resumen: O projeto TERR@ENO abordou o *Terroir* e zonagem agro-ecológica como fator crítico de competitividade e inovação da produção vitivinícola nas Sub-regiões de Monção e Melgaço e do Lima, da Região dos Vinhos Verdes. Este projeto, focado na sub-região de Monção e Melgaço e do Lima, ambas da Região Demarcada dos Vinhos Verdes, envolveu as entidades privadas de natureza associativa da fileira interprofissional e entidades do sistema científico e tecnológico, com o objetivo de contribuir para a produção de informação económica, alicerçada no conhecimento científico e técnico. As principais ações deste projeto foram: (i) a zonagem agro-ecológica e aptidão natural, cultural e económica vitícola para a definição e gestão do *terroir*; (ii) a especificação, desenvolvimento e sustentabilidade do sistema de informação territorial e plataforma colaborativa WEBSIG; (iii) a validação da zonagem vitivinícola; (iv) divulgação dos resultados e capacitação e organização dos agentes. Os resultados deste projeto são bases de dados espaciais, um sistema de informação territorial, uma plataforma WEBSIG de consulta e comunicação com recursos e conteúdos acessíveis por geoportal e cartografia de aptidão e capacidade produtiva vitícola. O projeto contribuiu para que as empresas do setor vitivinícola das sub-regiões referidas, tivessem uma maior sensibilização para os fatores críticos de competitividade, particularmente nos domínios da inovação, relacionados com a zonagem e aferição das principais variáveis envolvidas no *terroir*.

Palavras-chave: Aptidão natural; Aptidão cultural; plataforma WEBSIG.

1. Introdução

O conhecimento sobre o *terroirs* e zonagem, como instrumentos de competitividade e decisão, são estratégicos para a definição de políticas e planeamento de investimentos estruturantes, como sejam as opções de novas áreas de plantação e a reconversão de vinha e para a organização e capacitação dos agentes de produção de uvas, vinhas e outros produtos vitícolas. Também na comunicação e na promoção territorial, o conhecimento do *terroir* é fundamental à dinamização do sector e das áreas de produção vitícola, contribuindo para visibilidade e atração de investimento e para o desenvolvimento regional e local. A efetivação da comunicação dos

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3477

territórios vitícolas e *terroirs* apresenta um elevado potencial de retorno social, económico e ambiental, no quadro das estratégias de desenvolvimento local e rural. O conhecimento gerado nestas atividades será um suporte a atividades de inovação de processos e de produto, assim como de sistemas de apoio à decisão-ação na produção, enologia e marketing, fundamentais para maiores eficiências de processo e confiança do consumidor.

O plano de ação do presente projeto visou identificar e sensibilizar para os fatores críticos de competitividade, em particular nos domínios da inovação relacionados com a zonagem agro-ecológica.

2. Material e métodos

O projeto dividiu-se em quatro ações, que se identificam de seguida, e respetivas tarefas.

2.1. Zonagem agro-ecológica e aptidão natural, cultural e económica vitícola para a definição e gestão do terroir.

Esta ação subdividiu-se nas seguintes tarefas: captura, normalização e avaliação da qualidade dos dados existentes, definição e implementação da metodologia da zonagem agro-ecológica à escala regional, zonagem e aptidão cultural à escala local e zonagem e aptidão económica à escala da parcela. Para isso, houve necessidade de recolher, transformar, modelar e avaliar a qualidade das bases de dados espaciais (ISO19157) associada à produção de metainformação (ISO19115 e 19139) de referência, biofísicas e humanas organizadas de acordo com os Anexos I, II e III da Diretiva INSPIRE num sistema de informação territorial das sub-regiões. Neste sistema, incluíram-se os dados pertinentes para a realização da zonagem, que foram dados administrativos, estatísticos, de clima, geologia, solos, fisiografia, hidrografia, unidades naturais, vegetação, ocupação e uso do solo, planeamento, ordenamento, proteção e conservação da natureza associados a ortoimagens espaciais (MODIS) e aéreas, bem como, bases de dados obtidos em sensores terrestres. Na zonagem vitícola natural à escala regional considera-se a interação entre o clima, fisiografia, hidrografia, geologia e solos [1]. A partir das bases de dados espaciais desenvolveram-se análises intermédias que incluem o tratamento dos dados climatológicos e geração de índices bioclimáticos, análise de distância e reclassificação, análise fisiográfica, modelação do ciclo hidrológico incluindo a evapotranspiração e água no solo à escala regional (Entre Douro e Minho e espaço transfronteiriço com a Galiza). Estes dados foram integrados por algoritmos de agrupamento multivariado na representação de unidades agro-ecológicas homogénea e delimitação do *terroir* para a produção vitícola para cada sub-região num contexto regional.

2.2. Especificação, desenvolvimento e sustentabilidade do sistema de informação territorial e plataforma colaborativa WEBSIG.

Nesta ação efetuou-se a definição de âmbito espacial, temático, temporal e organizacional da plataforma num trabalho próximo dos decisores e técnicos que incluiu o diagnóstico e análise de requisitos seguidos da especificação tecnológica e funcional para o desenvolvimento da plataforma WEBSIG colaborativa. Os componentes da plataforma WEBSIG estão assentes no desenvolvimento de um sistema de informação geográfica desktop com as bases de dados pré-existentes e recolhidas, a implementação de módulos e dos equipamentos de entrada/carregamento dos dados, a implementação de módulos de visualização, consulta e análise de dados, a implementação de elementos de partilha, comunicação e divulgação para diferentes utilizadores, a instalação do geoportal com possibilidade de informação, interação e responsabilização, e, por último, o desenvolvimento e aplicação de modelos de edição e análise espacial de dados on-line.

2.3. Validação da zonagem vitivinícola através de estudos de eco-fisiologia, da produção, fitossanidade e fatores sociais e económicos.

Para a validação da zonagem por estudos ecofisiológicos monitorizou-se o comportamento fisiológico e vitícola nas parcelas das sub-regiões. Estes estudos consistiram na monitorização das relações hídricas das videiras, a caraterização das variáveis fenológicas, vitícolas e fisiológicas nos diferentes locais. No âmbito da validação socioeconómica da zonagem pretende-se identificar os sistemas de exploração tipo mais relevantes e analisar a sua distribuição relativa em cada zona, com base em análise de dados secundários e na informação obtida junto dos atores chave quanto a processos de diferenciação das explorações com base em distintos modos de produção (biológico, biodinâmico, produção e proteção integrada e produção convencional) e com base em diferentes estratégias de posicionamento no mercado (nichos de alto valor acrescentado *versus* consumo de massas, mercado nacional *versus* internacional, com ou sem componente enoturística integrada na formação de valor ao nível do território e exploração).

2.4. Divulgação e aplicação dos resultados da zonagem, organização e capacitação dos agentes.

Para a divulgação dos resultados da zonagem realizaram-se vários workshops técnico-científicos especializados, missões científicas, técnicas e económicas externas e ações de apresentação e capacitação dos agentes, designadamente junto dos produtores associados dos parceiros do projeto.

3. Resultados e discussão

Relativamente à ação 2.1, efetuou-se a definição de unidade agro-ecológicas naturais à escala regional [2] em que se modelaram diferentes parâmetros ambientais e índices bioclimáticos para a vinha para o Noroeste Peninsular (Norte de Portugal e Galiza). A agregação espacial hierárquica desenvolvida mostra a possibilidade de separar sequencialmente as Unidades agro-geológicas naturais subjacentes às diferenças e às similaridades entre as regiões vitivinícolas (com denominação de origem) e terroirs desta região transfronteiriça (figura 1). Os resultados obtidos podem apresentar interesse para as políticas territoriais e sectoriais e para a comercialização e promoção dos vinhos, dos territórios e das paisagens vitivinícolas.

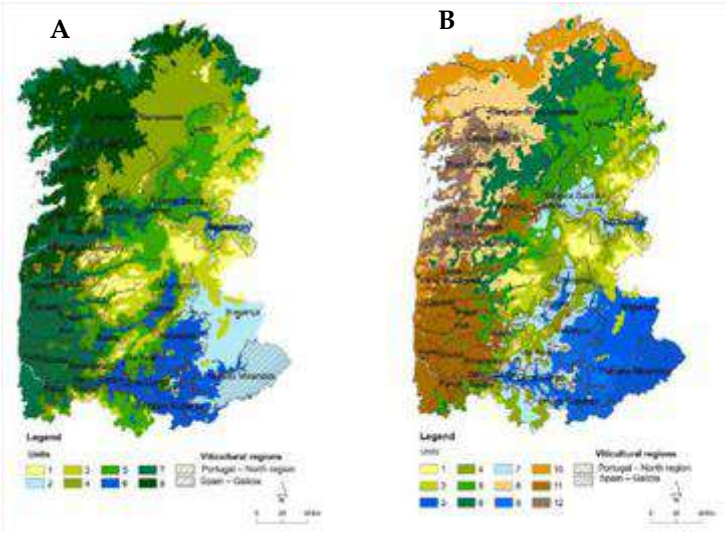


Figura 1. Definição e separação de 8 (**A**) e de 12 (**B**) unidades agro-ecológicas naturais na relação com as regiões vitivinícolas.

A plataforma WEBSIG desenvolvida inclui níveis de acesso correspondentes a 4 tipos de utilizadores: administrador geral da plataforma, administrador de sub-região, utilizador carregador de dados por sub-região, utilizador de consulta de dados por sub-região, cuja hierarquia de gestão é apresentada na figura 2.

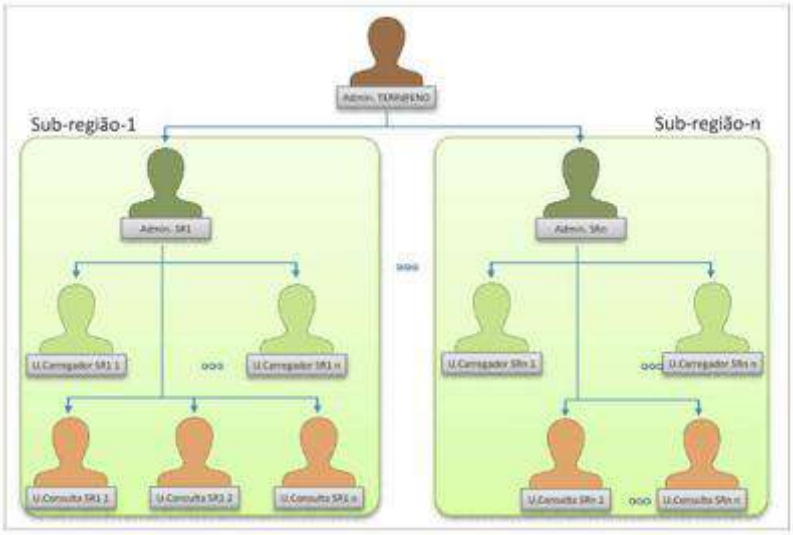


Figura 2. - Estrutura dos níveis de acesso à plataforma TERR@ENO.

Na ação identificada no ponto 2.3, acompanharam-se um conjunto de variáveis biofísicas da vegetação, relacionados com o coberto vegetal, com a folha e o solo. Destes destacamos a evolução do Índice de área foliar (IAF) (figura 3-A) e a evolução do teor de clorofila na folha (figura 3-B).

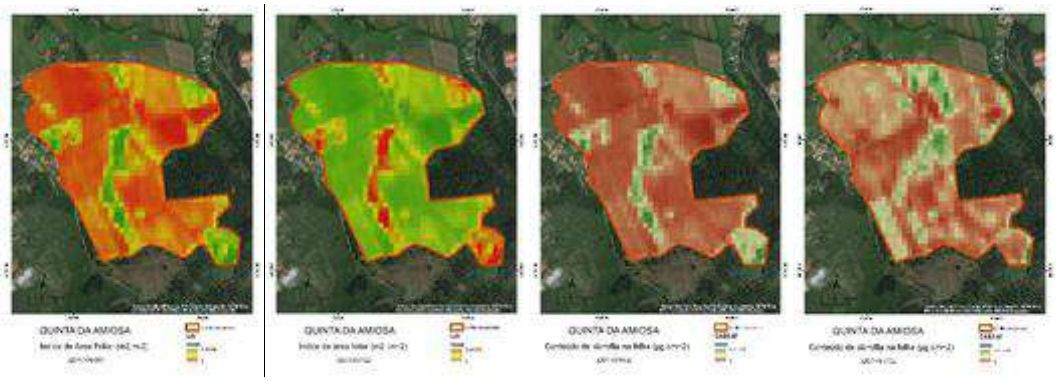


Figura 3. A - Evolução do IAF (abril-julho); B – Evolução do conteúdo de clorofila na folha (abril-julho).

Para os estudos eco-fisiológicos (descritos no ponto 2.3), foram acompanhados os estados fenológicos (quadro 1) e, a partir do estado fenológico da floração, foram monitorizados semanalmente, o teor de água no solo (mm), o potencial hídrico de caule (MPa), a temperatura do coberto vegetal vegetativo ao meio dia (ºC) e o teor de clorofila na folha (mg cm^{-2}).

Quadro 1. Estados fenológicos das castas Alvarinho (SR-MM) e Loureiro (SR-L).

	Estados fenológicos (Dias do ano, DOY)				
Parcelas	**Abrolhamento**	**Floração**	**Bago ervilha**	**Pintor**	**Vindima**
PC-SRMM	71	150	172	214	269
PE-SRL	70	157	177	221	263

No quadro 2 apresentam-se os índices de stress hídrico CWSI (Crop Water Stress índex) e o IG (index of relative stomatal conductance) calculados através dos dados de temperatura registados com uma câmara térmica portátil e os teores de clorofila (Chl, mg cm-2).

Quadro 2. Índices de stress (CWSI e Ig) e teores de clorofila (Chl, mg cm-2) para as parcelas da sub-região de Monção e Melgaço (SR-MM) e da sub-região do Lima (SR-L)

	CWSI	**IG**	**Chl (mg cm-2)**
SR-MM	0,557	1,27	0,035
SR-L	0,583	2,7	0,040

4. Conclusões

A avaliação de unidades *terroir* agro-ecológicas homogéneas incluiu fatores ambientais climáticos e do solo, selecionados pela sua relevância à escala regional. A metodologia considerou as diretrizes da Organização Internacional da Vinha e do Vinho (OIV) e baseou-se no desenvolvimento de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) que utiliza a zonagem multivariada e com análise de componentes principais e procedimentos de agrupamento. Dentro da área de estudo, foram obtidas doze unidades agroecológicas de *terroir* e os resultados mostram que os índices climáticos mais importantes do Noroeste da Península Ibérica, por ordem descendente, incluem o índice Huglin, o índice de Winkler, o índice hidrotérmico de Selianinov e os índices hidrotérmicos de Branas, Bernon e Levadoux.

A partilha, acesso e distribuição dos dados gerados, ao longo do projeto, mostraram ser uma ferramenta importante na divulgação do conhecimento, no suporte à investigação, à decisão técnica, à decisão política e à promoção territorial.

A utilização de sensores terrestres de proximidade configura-se como uma boa solução para os estudos eco-fisiológicos ao nível da parcela.

5. Agradecimientos

Este trabalho foi financiado pelo projeto Terr@eno - Terroir e zonagem agro-ecológica como fator crítico de competitividade e inovação dos Vinhos Verdes (NORTE-02-0853-FEDER-000113).

Referencias

1. Moral, F. J., Rebollo, F. J., Paniagua, L. L., & García-Martín, A. A GIS-based multivariate clustering for characterization and ecoregion mapping from a viticultural perspective. Spanish Journal of Agricultural Research, 2016, 14(3), 1-10.
2. Saavedra-Cardoso, A., Alonso, J., Rodrigues, S., Araújo-Paredes, C., Mendes, S. e Valín, I.. Agro-ecological terroir units in the North West Iberian Peninsula wine regions. Applied Geography, 107, 2019, 51-62.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Uso de herramientas de geoproceso de los SIG sobre datos LIDAR, para el análisis territorial

J. Santamaría-Peña[1], F. Sanz-Adán[2], M.E. Palacios-Ruiz[3]

[1] Departamento de Ingeniería Mecánica-Universidad de La Rioja; jacinto.santamaria@unirioja.es
[2] Departamento de Ingeniería Mecánica-Universidad de La Rioja; felix.sanz@unirioja.es
[3] Consejería de Fomento y Política Territorial-Gobierno de La Rioja; epalacios@larioja.org

Resumen: En la mayoría de estudios sobre elementos del territorio, la geolocalización es un aspecto fundamental. Fijar la posición exacta X,Y,Z del máximo de detalles del suelo y de cuanto está sobre él, ha sido siempre uno de los grandes objetivos de la humanidad. El desarrollo de la tecnología LIDAR en sus distintas variantes (satelital, aérea, terrestre) ha intentado dar respuesta a este deseo y hoy en día disponemos de abundante material para abordar análisis más o menos complejos del territorio. Los ficheros LIDAR contienen información de una inmensa cantidad de puntos y su tratamiento resulta difícil si no se conocen en profundidad programas informáticos que desarrollan algoritmos complejos para su tratamiento. Hoy en día disponemos de diverso software propietario orientado a la gestión de datos LIDAR, además de soluciones integradas en Sistemas de Información Geográfica. En esta comunicación pretendemos mostrar alguna de las soluciones LIDAR integradas en los Sistemas de Información Geográfica más utilizados actualmente y que se orientan claramente al análisis territorial, desgranando cada uno de los procesos y los resultados que generan. A pesar de la íntima relación existente entre SIG y LIDAR, que comparten muchos puntos de encuentro, deberían manejarse siempre como elementos diferenciados. Los datos LIDAR dotan a los SIG de un mayor potencial de análisis y los SIG constituyen un entorno natural para gestionar la información que extraemos de los datos LIDAR. Y en esta simbiosis está precisamente su fortaleza cuando trabajan conjuntamente.

Palabras clave: LIDAR-GIS; análisis territorial; geoprocesos; raster-vector

1. Introducción

El tratamiento de los datos LIDAR (Light Detection and Ranging) en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica se ha desarrollado mucho en los últimos 15 años. La cada vez más necesaria utilización de datos geolocalizados con información tridimensional ha hecho que los Sistemas de Información Geográfica se hayan adaptado a este nuevo contexto.

Para la gestión o planificación territorial, originalmente se utilizaron los datos LIDAR obtenidos desde plataformas aéreas, que hoy día están ampliamente distribuidos por los organismos oficiales (PNOA-Instituto Geográfico Nacional; vuelos específicos de Organismos Autónomos, etc.). En la actualidad, se han incorporado otro tipo de materiales como los procedentes de escaneos mediante Laser Terrestre (estacionado y móvil) o vuelos LIDAR mediante drones. Todos estos materiales en definitiva constituyen inmensas cantidades de nubes de puntos con información precisa de elementos geolocalizados que es necesario organizar, filtrar, jerarquizar y explotar al máximo la información que almacenan.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3471

El tratamiento y la explotación de la información georreferenciada ha sido y sigue siendo el principal de los objetivos de los Sistemas de Información Geográfica, existiendo en el mercado soluciones diversas tanto en el ámbito del software propietario como en los ámbitos freeware u open-source.

En esta comunicación, trataremos de indagar y poner de manifiesto la situación actual en torno al tratamiento de los datos LIDAR, estudiando las soluciones incorporadas por los dos grandes paquetes software más extendidos a nivel mundial en cada uno de los ámbitos antes descritos: ArcGIS y QGIS. Somo conscientes de que existen otras plataformas con objetivos similares, pero consideramos que estas dos herramientas SIG abarcan un gran espectro de soluciones con objetivos concretos de gestión y análisis territorial.

Tradicionalmente los SIG se han desenvuelto perfectamente en el entorno bidimensional de la información geográfica. Las herramientas típicas de geoproceso vectorial (intersección, diferencia, buffer,….) encontraban su material adecuado en las bases de datos con información georreferenciada en las que el "dato" ocupaba una posición x,y concreta y no tenía ninguna referencia a su altura u otra cualidad dimensionable. La irrupción del LIDAR en el análisis territorial ha tenido dos consecuencias importantes en el mundo de los SIG:

- por un lado, han de tratarse conjuntos de millones de puntos, que es necesario identificar, procesar y organizar.
- por otro lado, los puntos llevan otro tipo de información, además de su posicionamiento X,Y,Z, como puede ser la intensidad, la clase, el color,…. Y de cada uno de estos datos surgen interesantes procesos de los cuales se puede obtener información útil.

A nivel de usuario, el tratamiento de datos LIDAR adopta dos metodologías bien diferenciadas: o bien optamos por soluciones específicas ajenas a los sistemas de información geográfica del tipo FUSION™ (desarrollado por el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de Estados Unidos [USDA]), FUGROVIEWERTM (Fugro N.V.), DIELMOLIDARTM (DIELMO 3D S.L.), LASSTOOLSTM (Rapidlasso GmbH); o bien nos decantamos por soluciones LIDAR integradas en SIG del tipo (ArcGIS https://www.esri.es/arcgis/, QGIS http://www.qgis.org , SAGA-GIS http://www.saga-gis.org/en/index.html , gvSIG www.gvsig.com/es. La integración en los SIG puede hacerse mediante desarrollos propios internos en diversos lenguajes de programación (caso típico en ArcGIS) o mediante desarrollos de interface que hacen llamadas a herramientas externas (caso típico de QGIS con herramientas de LASTools o con libLAS-PDAL).

En este trabajo trataremos de desarrollar alguna de las herramientas de geoproceso de datos LIDAR más utilizadas en el entorno GIS para el análisis territorial y las soluciones que alguno de estos paquetes han implementado.

2. Materiales y métodos

El tratamiento de datos LIDAR requiere mucha capacidad de cálculo y, por tanto, el uso de algoritmos muy especializados que sean capaces de tratar un gran volumen de información. En esta comunicación vamos a tratar de describir el conjunto de herramientas para tratamiento de datos LIDAR denominado LASTools®, implementadas como complemento en QGIS.

2.1. Herramientas LASTools en QGIS

En QGIS es posible cargar mediante un complemento específico las herramientas LIDAR desarrolladas en LASTools®. Permite el procesamiento de nubes de puntos en formatos LAS, LAZ y ASCII. La apariencia en la caja de herramientas de procesos es la siguiente:



Las herramientas se organizan en cinco grandes bloques:

a) Herramientas de control de calidad de los datos dentro de los ficheros.

b) Herramientas de conversión

c) Herramientas de procesamiento de puntos

d) Procesos relacionados con soluciones ráster.

e) Procesos relacionados con soluciones vectoriales.

2.1.1. Herramientas de control de calidad:

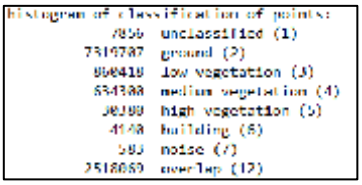


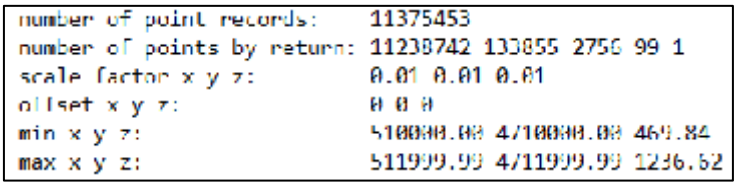
LASCONTROL: Esta utilidad, básicamente triangula los puntos terreno generando un TIN (*Triangulated Irregular Network)* y compara la cota de una serie de puntos de control con la cota de una zona de puntos alrededor *(por defecto 15m x15m*) de dichos puntos de control. El error medio encontrado lo aplica a las cotas de todos los puntos de la nube, generando un nuevo fichero LAS o LAZ con el sufijo "_ajustado". Es pues una forma de depurar los ficheros LIDAR originales mediante puntos de control de cota bien conocida.



LASDIFF: esta herramienta calcula la diferencia de cota entre los puntos de dos ficheros LIDAR y genera un nuevo fichero con el atributo de cota correspondiente a esta diferencia. El proceso más común realizado por esta herramienta es la llamada "normalización", es decir, obtener la altura de los puntos de un Modelo digital de superficie (MDS) respecto al Modelo digital del terreno (MDT), para el cálculo de la altura de los árboles en una masa forestal.

LASINFO: realiza un informe del contenido de la cabecera del fichero y de la clasificación ordenada de los puntos





LASOVERLAP: esta herramienta lee los puntos LIDAR desde un fichero LAS/LAZ/ASCII/BIN/SHP y chequea el solapamiento de las líneas de vuelo y la alineación vertical y horizontal. Se pueden identificar las zonas de recubrimiento del vuelo LIDAR.

LASPRECISION: herramienta que comprueba si la precisión de los datos que indica la cabecera del fichero LAS es la que corresponde a los puntos.

LASVALIDATE: utilidad que comprueba si el fichero LIDAR es conforme a las especificaciones ASPRS LAS 1.0 a 1.4 , generando un fichero *.xml como informe.

LASVIEW: es un simple visualizador OpenGL para puntos LIDAR en formatos LAS/LAZ/ASCII, con opciones para editar, borrar puntos y generar TIN desde una selección.



Figura 1. Distintas visualizaciones con LASVIEW desde QGIS.

2.1.2. Herramientas de conversión de ficheros:

LAS2SHAPE – SHP2LAS: convierte ficheros de puntos LAS/LAZ/ASCII a formato Shapefile de ESRI, por defecto, agrupándolos en grupos de 1024 puntos como entidades multipunto, y viceversa.

LAS2TXT – TXT2LAS: convierte la nube de puntos LAS/LAZ 1.0 - 1.4 a formato de texto ASCII, incorporando en cada línea distintos atributos.

LASZIP: comprime y descomprime los ficheros LAS a LAZ y viceversa, con mínima pérdida.

LASMERGE: une varios ficheros en formato LAS/LAZ/ASCII en uno solo y, si se quiere, luego lo trocea en varios ficheros del tamaño que se quiera.

LASTILE: crea mosaicos contiguos sin solapamiento desde ficheros LAS y los guarda en fichero individuales LAS/LAZ.

LASPUBLISH: crea un portal para visualización y descarga de ficheros LIDAR LAS/LAZ en cualquier navegador WEB.

2.1.3. Herramientas de procesamiento de puntos:

LAS2LAS_filter: para filtrar, transformar, proyectar, afinar o modificar de algún modo su contenido; por ejemplo, puntos que estén dentro de un rectángulo, o puntos que están entre dos cotas concretas, o puntos que sean primeros retornos o puntos de determinada clase.

LAS2LAS_project: convierte un fichero LAS/LAZ en determinada proyección a otra proyección.

LAS2LAS_transform: escala, traslada y sube o baja la nube de puntos original; además puede modificar la intensidad, el ángulo de escaneo, el tiempo GPS…

LASCLASSIFY: clasifica puntos como edificios y vegetación alta. Lo que hace es buscar puntos cercanos que estén a más de 2 metros del suelo y genera regiones de tejados y regiones de árboles.

LASCLIP: a partir de un fichero LAS/LAZ/TXT de puntos y de un fichero SHP/TXT de polígonos cerrados, extrae los puntos que quedan dentro de los polígonos y los guarda en un fichero LAS/LAZ/TXT.

LAS COLOR: asigna a cada punto LIDAR el color que le corresponde de acuerdo al pixel de la ortofoto TIF, definido el sistema de coordenadas con etiquetas GEOTIFF o mediante un fichero externo *.tfw.

LASDUPLICATE: elimina todos los puntos del fichero LAS/LAZ/ASCII en los que coincidan la coordenada X y la Y, o en los que coincidan las coordenadas X,Y,Z, pudiendo elegir entre quedarse el de menos cota o el de más cota o generar un fichero nuevo LAS con los eliminados.

LASGROUND – LASGROUND_NEW: extrae los puntos-terreno, asignándoles la clase = 2. En función del entorno se pueden ajustar pasos de búsqueda de entre 5 y 50 metros. Contiene otros muchos parámetros para afinar la búsqueda de dichos puntos.

LASHEIGHT: calcula la altura sobre el terreno de cada punto del fichero LAS/LAZ/ASCII. Primero construye un TIN con los puntos terreno y luego calcula la elevación de cada uno de los puntos con respecto al TIN.

LASINDEX: crea un fichero *.lax, a partir de un fichero LS/LAZ que contenga información indexada, para acceder más rápidamente a determinadas zonas del fichero con los comandos de búsqueda espacial.

LASNOISE: esta herramienta busca puntos aislados y los etiqueta o elimina, fijando ciertos criterios de paso (por defecto 4 m) y de aislamiento (por defecto 5 puntos)

LASOVERAGE: lee los ficheros LAS/LAZ/ASCII/BIN y encuentra puntos que son cubiertos por más de una línea de vuelo, y los etiqueta o los elimina. El paso de búsqueda debería fijarse en torno a dos veces el espaciado medio entre los puntos.

LASSORT: ordena los puntos de un fichero LAS de acuerdo al tiempo GPS, al número de retorno o por el identificador del punto.

LASPLIT: trocea la nube de puntos en ficheros individuales de acuerdo a diversos parámetros (por líneas de vuelo, por clasificación, por intervalos de tiempo GPS, por intervalos de X de Y o de Z, por intervalos de intensidad, por intervalos de ángulo de escaneo, …).

LASTHIN: genera una rejilla uniforme sobre los puntos en ficheros LAS/LAZ/ASCII y de cada celda solo mantiene el punto más alto, o el más bajo o toma uno aleatoriamente.

2.1.4. Herramientas de geoproceso ráster:

BLAST2DEM-LAS2DEM: esta utilidad lee ficheros de puntos LA/LAZ, los triangula en un TIN y genera un ráster DEM con el TIN, que puede ser dividido en mosaico. Los formatos de salida pueden ser BIL, ASC, IMG, XYZ, DTM, TIF, PNG o JPG. Los cuatro primeros almacenan información de la altura, la pendiente o la intensidad, mientras que los tres últimos se usan más para destacar sombreados, tonalidades de grises o falso color.

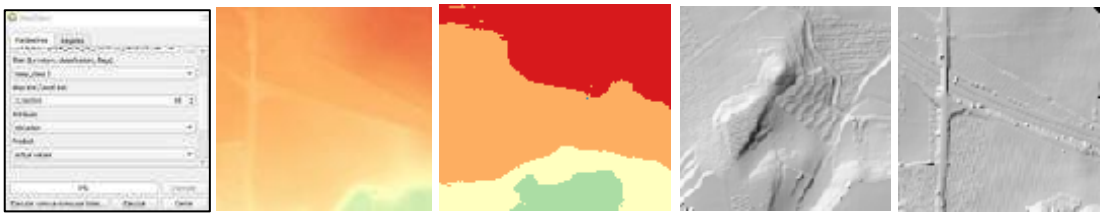


Figura 2. Proceso de trabajo con BLAST2DEM-LAS2DEM.

LASGRID: lee archivos LAS/LAZ/ASCII y genera un ráster con tamaño de pixel definido por el usuario, computando el valor más bajo, el más alto, la media, la desviación estándar o el rango de todos los puntos dentro de una celda. Los posibles formatos de salida son BIL, ASC, IMG, TIF, PNG, JPG, XYZ, CSV o DTM.

LASCANOPY: esta herramienta lee ficheros LAS/LAZ/BIN/SHP/QFIT/ASCII, realiza cálculos de utilidad forestal y genera un ráster en formato BIL, ASC, IMG, TIF, XYZ, FLT, o DTM. Es necesario ajustar bien el paso de trabajo del algoritmo, que por defecto es 20 m.



Figura 3. Ajustes y proceso de trabajo con LASCANOPY.

Ajustes - LASHEIGHT (genera LAZ con alturas respecto al suelo) – LASGRID (genera ráster con altura media en cada pixel sobre el suelo) – LASCANOPY (modelo de copas)

2.1.5. Herramientas de geoproceso vectoriales:

LASBOUNDARY: lee los ficheros LAS/LAZ/ASCII y crea polígono cerrado que los abarca.

LAS2ISO – BALS2ISO: esta herramienta lee ficheros de puntos LA/LAZ, los triangula en un TIN y extrae las curvas de nivel, suavizadas, simplificadas, limpias o también, en forma de mosaico. Los formatos de salida pueden ser SHP, TXT, WKT, o KML.

LAS2TIN: lee ficheros LAS/LAZ/ASCII y triangula los puntos en un TIN.



Figura 4. Resultados con LAS2ISO

3. Resultados y discusión

Del análisis de las herramientas que QGIS (al igual que ARCGIS) dispone para el tratamiento de datos LIDAR a través de su complemento a LASTools® y su aplicación a ficheros LAS/LAZ procedentes de escaneos laser de vuelos aéreos (Airbone LIDAR), llegamos a una serie de resultados, que describimos a continuación:

- La cantidad de opciones que QGIS nos ofrece por medio de su interface para el acceso a datos LIDAR es muy abundante, y puede considerarse similar en las herramientas fundamentales a las que podemos acceder corriendo directamente el programa nativo LASTools®.
- Es cierto que QGIS y su complemento no disponen de herramientas de visualización y renderizado ágiles, como las que nos facilita FUGROVIEWER®, ya que la herramienta LASVIEW, aunque dispone de muchas opciones, es poco amigable y ciertamente limitada.
- El interface nativo de LASTools® es mucho más completo que el complemento de QGIS. En una única paleta tenemos todo lo necesario para realizar ajustes y afinar los resultados. En QGIS tenemos que conocer muy bien la estructura interna y la sintaxis de cada comando para extraer todo su potencial de análisis.

- Las herramientas LIDAR integradas en los SIG les dotan una mayor potencialidad para abordar el análisis territorial y deben entenderse como un complemento importante en la mayoría de los estudios e imprescindibles en algunos casos.

4. Conclusiones

Después de comprobada la versatilidad de cada uno de los comandos del complemento LASSTools® para QGIS, llegamos a las siguientes conclusiones:

1. La existencia de complementos dentro de los SIG para el tratamiento de datos LIDAR, viene justificada más por la inmediatez y comodidad para los usuarios que por la agilidad de cálculo y herramientas a su disposición. Es cierto que cuando uno se acostumbra a trabajar en un entorno GIS agradece que todos los procesos puedan realizarse en dicho entorno. Pero hay que reconocer también, que cuando se controlan diversos programas de tratamiento específico de datos LIDAR, éstos suelen ser más versátiles, más específicos y generalmente más potentes.
2. Cuando los tratamientos primarios a someter a la nube de puntos original son importantes, suele merecer la pena trabajar con las herramientas originales.
3. Dentro de QGIS, las herramientas LIDAR deben considerarse como complementarias, para abordar ciertos trabajos en los que este material pueda aportar alguna propiedad de interés (DEM, MDT, curvas de nivel, métricas forestales, edificios, infraestructuras, …).
4. Los datos LIDAR constituyen un material tan específico que por sí solo puede exigir el uso de software orientado y su inclusión como complemento dentro de los GIS, a veces, resulta casi anecdótico.

Referencias

1. Koukoulas, S.; Blackburn, G. Alan. Quantifying the spatial properties of forest canopy gaps using LiDAR imagery and GIS. International Journal of Remote Sensing, 2004, vol. 25, no 15, p. 3049-3072.
2. Palenzuela, J. A., et al. Landslide detection and inventory by integrating LiDAR data in a GIS environment. Landslides, 2015, vol. 12, no 6, p. 1035-1050.
3. Hills, John. Review of'making spatial decisions using GIS and Lidar: a workbook'. The Cartographic Journal, 2017, vol. 54, no 2, p. 189-190.
4. Jo, Jin H., et al. Application of airborne LiDAR data and geographic information systems (GIS) to develop a distributed generation system for the town of normal, IL. AIMS Energy, 2015, vol. 3, p. 173-183.
5. Verso, A., et al. GIS-based method to evaluate the photovoltaic potential in the urban environments: The particular case of Miraflores de la Sierra. Solar Energy, 2015, vol. 117, p. 236-245.
6. Pérez, Luis Julián Santos. La tecnología LIDAR en el procedimiento de regularización catastral. Resultado de su validación. CATASTRO, 2015, p. 31.
7. NOVERO, Annabelle U., et al. The use of light detection and ranging (LiDAR) technology and GIS in the assessment and mapping of bioresources in Davao Region, Mindanao Island, Philippines. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2019, vol. 13, p. 1-11.
8. Grigolato, Stefano; Mologni, Omar; Cavalli, Raffaele. GIS applications in forest operations and road network planning: an overview over the last two decades. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 2017, vol. 38, no 2, p. 175-186.
9. Rybansky, Marian, et al. Vegetation structure determination using LIDAR data and the forest growth parameters. En IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2016. p. 012031.
10. Torre Tojal, Leyre, et al. Diseño y contraste de nuevos modelos de estimación del potencial energético de biomasa forestal en el Territorio de Bizkaia mediante técnicas de análisis estadístico espacial usando herramientas GIS con datos LIDAR. 2016.

Área temática:

Suelos y aguas



X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Análisis de la velocidad de infiltración del agua en suelos saturados mediante lisímetros de pesada

L. Ávila-Dávila[1], M. Soler-Méndez[2], P. Madrona-Sánchez[2], A. Ruiz-Canales[3], C.F. Bautista-Capetillo[1], J. González-Trinidad[1], J.M. Molina-Martínez[2]

[1] Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus UAZ Siglo XXI, Carretera Zacatecas-Guadalajara Km. 6, Ejido la Escondida, C.P. 98160 Zacatecas, México. laura_14avila@uaz.edu.mx; baucap@uaz.edu.mx; jgonza@uaz.edu.mx

[2] Grupo de I+D+i Ingeniería Agromótica y del Mar. Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Ángel s/n Ed. ELDI, 30202 Cartagena, España. manuel.ia@agrosolmen.es; josem.molina@upct.es

[3] Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández de Elche, Escuela Politécnica Superior de Orihuela, Crtra. De Beniel, km 3,2, 03212 Orihuela (Alicante), España; acanales@umh.es

Resumen: La velocidad de infiltración permite estimar la penetración del agua en el suelo, se puede medir como una lámina en función de la profundidad y el tiempo. Existen algunos métodos para medir el comportamiento de la lámina de agua en el suelo. En esta investigación se empleó un lisímetro compacto desarrollado por el grupo de investigación Ingeniería Agromótica y del Mar de la Universidad Politécnica de Cartagena. Se instaló en una finca con suelo de textura franco- limosa, y se registraron los valores minutales del peso del recipiente de cultivo y del depósito de drenaje. Los resultados obtenidos permitieron conocer la evolución de la velocidad de infiltración a lo largo del tiempo. La máxima velocidad de infiltración fue de 0,093 mm/minuto, en el suelo saturado. Con los datos obtenidos en campo se calibró el modelo empírico de Kostiakov, con un error cuadrático medio de 0,00024. Se concluyó que con el empleo de los nuevos lisímetros de pesada que permiten conocer, en tiempo real, la velocidad de infiltración del agua en suelos saturados, es posible calibrar modelos matemáticos empíricos para su empleo cuando no se dispone de esta nueva tecnología. En el suelo franco-limoso estudiado, el comportamiento fue similar al descrito por Kostiakow, para el cual se obtuvo una ecuación exponencial calibrada.

Palabras clave: humedad del suelo, modelo de infiltración, hidrología, balance hídrico

1. Introducción

La demanda de agua en la agricultura de regadío es especialmente relevante en países o regiones de clima árido o semiárido, donde se desarrolla bajo un escenario crítico de limitación de agua. Esta situación, hace necesario que se incrementen los esfuerzos para lograr una gestión óptima de los recursos hídricos disponibles para el riego. Se requiere, por tanto, conocer con la mayor exactitud posible el agua que necesita el cultivo para una producción óptima, ya sea en forma de precipitación o de su aplicación desde fuentes superficiales o subterráneas.

La capacidad de retención del agua en el suelo y el movimiento del agua depende de sus características hidrodinámicas. La ecuación de Richards modela el movimiento del agua en el suelo. Se basa en la transferencia de agua en medios porosos considerando la ley de Darcy generalizada y el concepto de potencial de capilaridad [1]. Debido a la complejidad de la estimación de los parámetros de la ecuación de Richard, fueron desarrollados un gran número de modelos empíricos simples de infiltración por [2], [7], [4], entre otros. También, es posible

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3370

medir la infiltración de manera puntual "IN SITU" por medio de infiltrómetros de cilindro simple o bien doble, los cuales son de fácil operación en una dimensión [1, 5, 9].

La infiltración es un parámetro que describe la tasa de agua que logra entrar al perfil del suelo. Este parámetro es variable tanto en espacio como en tiempo, debido a que está influenciado por la textura, porosidad, densidad aparente, contenido de materia orgánica, contenido de humedad inicial, compactación del suelo, profundidad del manto freático, y uso del suelo, entre otros [1].

Existen ecuaciones empíricas simples para describir la infiltración en función del tiempo. En algunas ocasiones sus parámetros de ajuste no tienen un significado físico, por lo cual, no representan la infiltración real del suelo y no coinciden con los datos tomados en campo [6, 10].

La forma más precisa y fiable de conocer la variación del agua en el suelo es mediante el empleo de lisímetros de pesada. Estos dispositivos permiten realizar experimentos bajo diferentes condiciones (variedad de planta, composición de la tierra, condiciones atmosféricas, horas de riego y duración) y extrapolar el comportamiento a grandes extensiones de terreno, permitiendo de esta manera optimizar los recursos hídricos según sea el caso [3]. Estos dispositivos han sido usados para cuantificar precipitaciones, no solo en forma de lluvia, sino también condensación, y también para determinar la evapotranspiración del cultivo [8].

El objetivo de esta comunicación es mostrar la evolución de la infiltración del agua, considerando las características reales del suelo cuando se desarrolla un cultivo de cebada, a partir de los datos proporcionados por un lisímetro de pesada compacto durante los eventos de lluvia en los que el suelo estuvo saturado, junto con los modelos matemáticos calibrados.

2. Materiales y métodos

El experimento se realizó entre febrero y julio de 2017 en una parcela experimental de una hectárea de extensión, llamada "Las Tiesas", perteneciente al Instituto Agronómico Provincial de Albacete (ITAP). El cultivo empleado fue cebada (*Hordeum vulgare*), variedad "SHAKIRA" de ciclo corto en primavera. El suelo de la parcela experimental es franco-limoso determinado con el triángulo de textura de Marshal, a partir de los porcentajes de las partículas del suelo obtenidos de la prueba de densímetro de Bouyoucos (27,1% de arena, 51,5% de limo y 21,4 de arcilla).

Se utilizó el lisímetro de pesada, modelo LP1, diseñado por el grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar de la Universidad Politécnica de Cartagena, cuya precisión de medición es de 0,063 mm de agua. El dispositivo cuenta con un recipiente de cultivo (RC) cuyas dimensiones son 0,96 m x 0,56 m y 0,35 m de profundidad en el centro y con depósito de drenaje (DD) utilizado para almacenar y medir el agua, que se filtra a través del volumen de suelo confinado [11].

Por medio de dos sistemas de pesaje, se conocen las variaciones en el contenido de agua del RC y del DD. De esta forma, el lisímetro proporciona una medida directa de las variaciones de peso ocurridas en el RC (provenientes de forma positiva de precipitaciones (P) y riego (R), y de forma negativa del drenaje (D) y de la evapotranspiración (ET_C)); así como en el depósito de drenaje (provenientes de forma positiva del drenaje), Figura 1 [12]. La ecuación 1, describe el balance de hídrico, a partir de los datos proporcionados por el lisímetro de pesada:

$$d\theta/dt = P + R - ET_c - E - D \quad (1)$$

donde dθ/dt es el cambio volumétrico en el almacenamiento en la humedad del suelo en el perfil del suelo (variación volumétrica del RC) y E es la pérdida dada por la escorrentía [1].



Figura 1. Diagrama de entradas y salidas de agua del recipiente de cultivo y el depósito de drenaje del lisímetro de pesada.

2.1. Modelo de velocidad de infiltración del agua en suelo saturado con cultivo de cebada

La metodología que se siguió para obtener el modelo de velocidad de infiltración del agua en el suelo saturado con el cultivo de cebada, consistió en:

1.- Simplificar la ecuación 1, considerando un evento de lluvia, para evitar las pérdidas por evapotranspiración (ETc) y eliminar la entrada de agua del riego (R), quedando la expresión del siguiente modo:

$$d\theta/dt = P - E - D \quad (2)$$

2. Descartar el intervalo de tiempo en el que el suelo no alcanzó la saturación; es decir, desde que comenzó el evento de lluvia hasta que el suelo alcanzó la capacidad de campo. Durante ese intervalo, la velocidad de infiltración sigue un modelo de suelo NO saturado, no siendo objeto de estudio en esta comunicación.

3. Determinar la velocidad de infiltración del suelo saturado. Una vez se alcanzó la *saturación del suelo*, el RC del lisímetro de pesada, empezó a evacuar el agua drenada hacia el DD, siendo medida cada segundo y guardada en el datalogger como promedio minutal. A partir de estos datos, se determinó la *velocidad de infiltración* del agua en el suelo saturado mediante la siguiente ecuación:

$$VI = \Delta DD/\Delta t \quad (3)$$

donde ΔDD es la variación del peso del depósito de drenaje, en gramos, y Δt es la variación del tiempo, en minutos.

Para convertir los gramos medidos por el lisímetro de pesada, a lámina de agua, se empleó la siguiente ecuación:

$$lámina\ de\ agua = \frac{W}{\rho_{H2O} * A_{RC}} * 1000 = \frac{W}{A_{RC}} \quad (4)$$

donde la lámina de agua está en mm, W_{RC} es el peso del recipiente de cultivo o del depósito de drenaje en kg, ρ_{H2O} es la densidad del agua (1.000 kg/m^3) y A_{RC} es el área del recipiente de cultivo (0,537 m^2).

2.2. Modelo de Kostiakov

El modelo que se obtuvo fue comparado con el modelo empírico propuesto por Kostiakov (1932), que establece la siguiente ecuación:

$$I = at^b \quad (5)$$

$$VI = {}^{dI}/_{dt} = abt^{b-1} \quad (6)$$

donde I es la lámina de agua acumulada que entra al suelo, t es el tiempo de oportunidad de infiltración, a y b son parámetros de ajuste que dependen del suelo y de su condición física y VI es la velocidad de infiltración en mm/min. Fue elegido este modelo porque la velocidad de infiltración final es cero, que es una de las dos condiciones que establece [1] para el uso de estas ecuaciones.

Los parámetros a y b de Kostiakov se estimaron mediante el método de los mínimos cuadrados a partir de los datos de la lámina infiltrada acumulada (I_{acum}), obtenida con el lisímetro "IN SITU [13].

3. Resultados y discusión

La variación de peso del recipiente de cultivo y del depósito de drenaje monitoreado del 28 de abril hasta el 1 de mayo se presenta en la Figura 2. Los eventos de precipitación de estos cuatro días permitieron llevar al suelo a saturación, lo que ocasionó tres vaciados del depósito de drenaje de los cuales fue posible medir la velocidad de infiltración.

Un suelo saturado permite tener valores fiables y que representan las verdaderas condiciones de campo, en cambio, si es suelo está seco o parcialmente húmedo los valores iniciales de la velocidad de infiltración irán descendiendo con gran rapidez debido a la presión ejercida por el mismo suelo, como en la Figura 3.

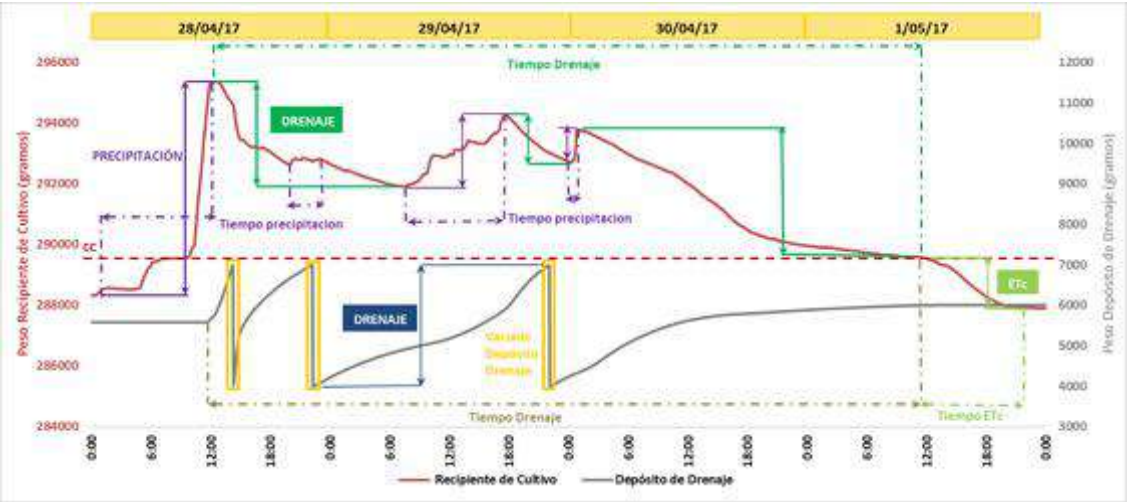


Figura 2. Evolución del peso del recipiente del cultivo y drenaje del 28/04 al 01/05 de 2017, en gramos (g).

En la Figura 3, se aprecia la evolución de la velocidad de infiltración en mm/minuto, función del evento de precipitación que tuvo lugar los días del 28 al 29 de abril. La velocidad máxima de infiltración se alcanzó en el momento en empezó a drenar el DD a las 14:20 horas, la cual generó un valor de 0,093 mm/minuto, debido a la sorción, a la que determinamos como *VI básica*, ya que el suelo está saturado [1]. La disminución de la curva conforme va pasando el tiempo se va acercando al cero, esto porque el suelo ya no está siendo capaz de aceptar más agua.

Los momentos de vaciado no afectan el proceso de determinación de la velocidad de infiltración ya que ocurre en un lapso de cuatro minutos, además, la capacidad de saturación ya fue alcanzada por lo que las variaciones del drenado del suelo serán muy pequeñas.

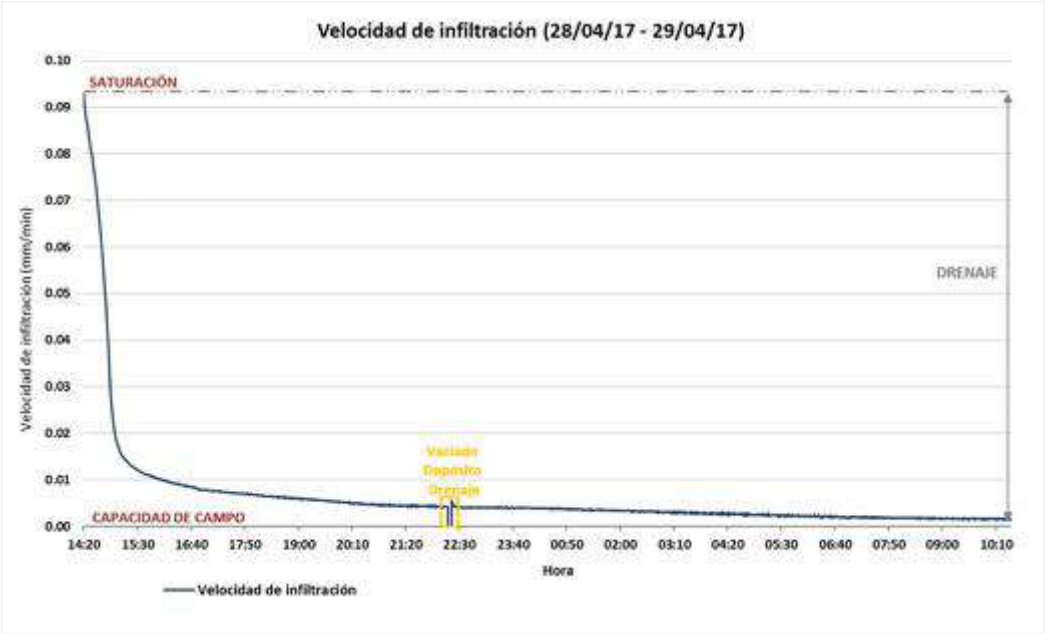


Figura 3. Curva de la velocidad de infiltración del evento de lluvia del 28-29/04/2017

El valor de *VI básica* obtenido está dentro de los valores estándares para un suelo franco-limoso propuesto por [1] y [13] son muy cercanos, 0,08-0,13 mm/min y 0,17-0,33 mm/min, respectivamente. Según [13] la VI básica obtenida puede clasificarse como baja.

Para obtener la ecuación característica de la curva de la Figura 3, se realizó un ajuste de los datos, el mejor fue con una línea de tendencia de potencia presentando un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9608, el modelo obtenido es el siguiente:

$$VI_{lisimetro} = 0{,}298t^{-0{,}699} \quad (7)$$

Para la estimación de las constantes de la ecuación de Kostiakov, se obtuvo un a=0,168 y b=0,53 El modelo que dio menor error cuadrático medio fue el siguiente:

$$VI_{Kostiakov} = 0{,}168(0{,}53)t^{(0{,}53-1)} = 0{,}089t^{-0{,}47} \quad (8)$$

A continuación, se muestra las dos curvas de velocidad de infiltración obtenidas con ambos modelos. El caso de la obtenida con el lisímetro de pesada únicamente el primer evento de lluvia, esto porque los eventos consecutivos son muy cercanos a una *VI* igual a cero (Figura 4).



Figura 4. Curvas de los modelos de la velocidad de infiltración del lisímetro y Kostiakov.

El error cuadrático medio entre la velocidad de infiltración obtenida entre lisímetro y la de Kostiakov es de 0,00024, el cual es muy pequeño de acuerdo a los valores recomendados.

Además, fueron validados con los otros eventos de lluvia que hubo del 28 al 30/04/17, los dos modelos obtenidos anteriormente, resultando un error cuadrático de 0,001 con el modelo obtenido con el lisímetro y 0,008 con el modelo de Kostiakov con respecto a los valores medidos.

4. Conclusiones

El error cuadrático medio tan cercano a cero entre los dos modelos de Kostiakov y el obtenido con el lisímetro de pesada en el mismo evento de lluvia queda validado, por lo que es posible el empleo de cualquiera de ellos para la estimación de la velocidad de infiltración en este suelo en particular (franco-limoso) cultivado con cebada. Lo cual se comprobó con los errores cuadráticos medios tan pequeños que resultaron en la estimación de las posteriores lluvias al validarlos con los valores reales. Esta investigación seguirá con validaciones en diferentes texturas de suelos, cultivos y con modelos empíricos ya establecidos. Es una investigación a nivel bilateral, entre España y México, con el objetivo de lograr la caracterización del movimiento del agua en el suelo por medio de lisimetría de pesada.

5. Agradecimientos

Al Proyecto de Investigación y Desarrollo con referencia IDI-20190146, titulado “Desarrollo e implantación de un equipo de ferticontrol por lisimetría de pesada para uso en agricultura intensiva”, en colaboración con la empresa AGROSOLMEN, S.L., cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Operativo Plurirregional de España 2014-2020.

Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete (ITAP) y al Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), por su colaboración para realizar esta investigación.

Referencias

1. Ali, H. Fundamentals of irrigation and on-farm water management. Springer Science & Business Media. 2010, volume 1, p. 560.

2. Green, W.H. and Ampt, G.A., Studies on soil physics, I. The flow air and wáter through soils. J. Agric. Sci. 1911, 4, 1—24.
3. Jiménez-Buendía, M., Ruiz Peñalver, L., Vera-Repullo, J. A., Intrigliolo-Molina, D. S., Molina-Martínez, J. M. Development and assessment of a network of water meters and rain gauges for determining the water balance. New SCADA monitoring software. Agricultural Water Management. 2014, 151.
4. Kostiakov, A.N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Trans. Comm. Int. Soil Sci. Soc., A, Moscow, 1932, 17-21.
5. Mahmood, Sajid and Latif, Muhammad. A simple procedure for simulating surge infiltration using first-surge infiltrometer data. Irrigation and Drainage. 2005, 54. 407-416.
6. Mattar, M.A., Alazba, A.A., Zin Elabadin, T.K. Forecasting furrow irrigation infiltration using artificial neural networks. Agricultural Water Management. 2015, 148, 63-71.
7. Philip J. R. "The Theory of Infiltration: 4. Sorptivity and Algebraic Infiltration Equations," Soil Science. 1957, Vol. 84, No. 3, 257-264.
8. Schrader, F., Durner, W., Fank, J., Gebler, S., Pütz, T., Hannes, M., and Wollschläger, U. Estimating precipitation and actual evapotranspiration from precision lysimeter measurements. Procedia Environmental Sciences. 2013, 19, 543-552.
9. Teofilo-Salvador, E., Morales-Reyes, GP. Proposal of the physical model of the multifunctional redesigned double ring infiltrometer (ICCRM). Tecnología y Ciencias del Agua. 2018, 9 (6): 103-131.
10. Yuan, J; Feng, WZ; Jiang, XM; Wang, JL. Saline-alkali migration in soda saline soil based on sub-soiling technology. Desalination and Water Treatment. 2019, 149: 352-362.
11. Nicolás Cuevas J.A., Parras Burgos D., Ruiz Peñalver L., y Molina Martínez J.M. Diseño y modelado gráfico 3D de un lisímetro de pesada de bajo coste. IX Congreso Ibérico de Agroingeniería. 4-6 de septiembre de 2017.
12. Parras Burgos D., Nicolás Cuevas J.A., Ruíz Peñalver L., y Molina Martínez J.M. Evolución del diseño de prototipos de lisímetros de pesada enterrados para cultivos hortícolas. III Symposium Nacional de Ingeniería Hortícola. I Symposium Ibérico de Ingeniería Hortícola. 21-23 de febrero de 2018.
13. Maldonado Rojas T. Manual de Riego Parcelario. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Desarrollo de Tierras y Aguas. Santiago de Chile, febrero del 2001.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Apoio à gestão do regadio coletivo. Estudo de caso de monitorização da água no Aproveitamento Hidroagrícola do Vale do Lis, Portugal

José M. Gonçalves[1*], Manuel Nunes[1], Rui Eugénio[2], Susana Ferreira[1], Paula Amador[1], Olga Filipe[1], Isabel Maria Duarte[1], Margarida Teixeira[3], Helena Marques[1], Fátima Oliveira[1], Madalena Gonçalves[3], Henrique Damásio[2]

[1] Instituto Politécnico de Coimbra, Escola Superior Agrária de Coimbra, Portugal; jmmg@esac.pt, mnunes@esac.pt, susana.ferreira@esac.pt, paula_amador@esac.pt, olga@esac.pt, iduarte@esac.pt, foliveira@esac.pt, hmarques@esac.pt,

[2] Associação de Regantes e Beneficiários do Vale do Lis, Leiria; eugenio-rui@sapo.pt, hdamasio71@gmail.com.

[3] Direção Regional de Agricultura e Pescas do Centro, margarida.teixeira@drapc.gov.pt, madalena.goncalves@drapc.gov.pt.

Resumo: A presente comunicação apresenta resultados da atividade de monitorização da água em 2018, do Grupo Operacional para a gestão da água no Vale do Lis, regadio coletivo público localizado no Centro Litoral de Portugal. A monitorização da rede coletiva de abastecimento baseou-se na subdivisão do sistema em setores de medição e controlo, com a respetiva medição de caudais de rega afluentes nas derivações graviticas e estações elevatórias de reforço. Recorreu-se ao método secção-velocidade com molinete electromagnético e observações regulares durante a campanha de rega. A monitorização da qualidade físico-química e microbiológica da água foi efectuada em pontos de entrada e saída do aproveitamento, recorrendo-se a sonda multiparamétrica e a medições laboratoriais. Aplicou-se o método do balanço hídrico nos setores de medição e controlo e obtiveram-se dotações brutas entre 6470 e 9220 m^3/ha. Identificaram-se os maiores constragimentos do abastecimento e determinaram-se indicadores de eficiência global do sistema, entre valores de 53% e 72%, com média de 67%. Os resultados das análises fisico-químicas e microbiológicas permitiram concluir que as águas de superfície e subsuperficiais indiciam situações de risco ao nível de pH, salinização e microbiologia, justificando agir para solucionar ou mitigar os problemas, em especual ao nível da parcela do agricultor.

Palavras-chave: regadio coletivo público, gestão da água em regadio, qualidade da água em agricultura, desenvolvimento rural, drenagem agrícola

1. Introdução

O Aproveitamento Hidroagrícola do Vale do Lis (AHVL) é um aproveitamento de iniciativa estatal, com uma área total de cerca de 2000 ha, localizado nos concelhos de Leiria e Marinha Grande (Fig. 1). Os principais problemas da gestão da água nas redes coletivas de rega e drenagem, bem como ao nível da parcela, prendem-se com a escassez e qualidade deficiente da água em período estival, com os riscos de inundação e de drenagem deficiente, e com a incipiente fonte de informação hidráulica e hidrológica para apoio ao planeamento e operação da rede pela Associação de Regantes para a otimização da produtividade da água e do rendimento dos

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3489

agricultores. No âmbito do programa de desenvolvimento rural, estão previstas obras de modernização que visam transformar as redes de distribuição de água em parte do aproveitamento (no sub-perímetro I, na sua parte jusante), o que irá estimular o desenvolvimento agrícola [1].

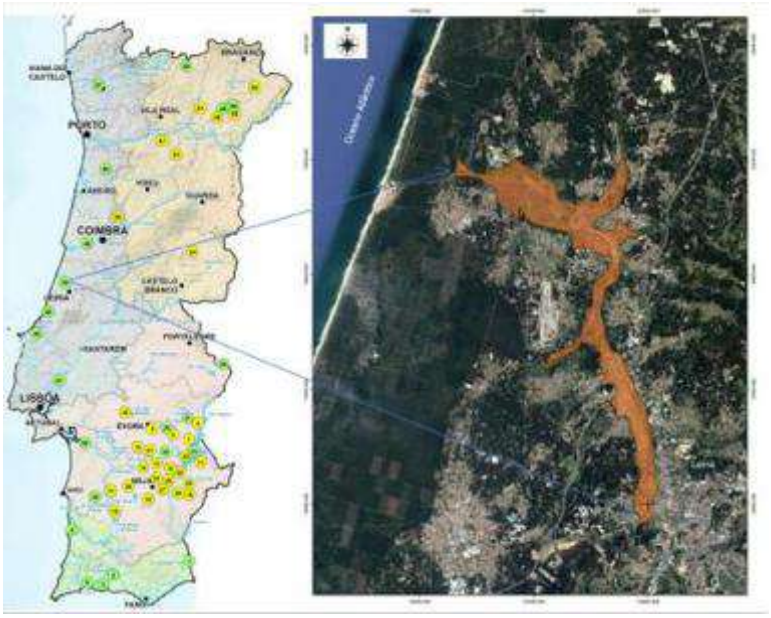


Figura 1. Localização do aproveitamento hidroagrícola do Vale do Lis (a partir de http://www.dgadr.gov.pt).

O Grupo Operacional para a gestão da água no Vale do Lis (GoLis) [2,3] visa a melhoria da planificação e gestão da água como requisito para a modernização consistente e sustentável do AHVL, no âmbito de uma intervenção integrada e harmonizada nos diferentes níveis do Aproveitamento. O objetivo geral deste projeto é a melhoria do uso e produtividade da água na produção agrícola, em resultado das ações de monitorização e avaliação de campo conducentes a um melhor diagnóstico dos problemas de abastecimento de água e drenagem, melhor qualidade das práticas operativas e redução de desperdícios de água e energia. Quanto aos seus objetivos específicos, são os seguintes: a) Redução dos custos energéticos nas estações elevatórias (EE), em consequência da monitorização e das auditorias energéticas; b) Diminuição dos riscos sanitários e ambientais devido a problemas de qualidade da água, em resultado do melhor conhecimento do problema e das medidas mitigadoras a implementar; c) Melhoria do planeamento e gestão da rede hidráulica coletiva, permitindo uma melhor equidade na distribuição da água, com gestão mais criteriosa nos períodos de escassez e a redução de desperdícios; d) Melhoria das condições de rega e drenagem na parcela, em resultado das melhorias na gestão da rede coletiva, e o maior apoio técnico da Associação de Regantes e Beneficiários do Vale do Lis (ARBVL) ao maneio da água na parcela, tal como na modernização e melhor utilização dos sistemas de rega.

Os objetivos desta comunicação consistem em apresentar as metodologias e os resultados das ações de monitorização da quantidade e qualidade da água desenvolvidas em 2018 no AHVL, no âmbito do GoLis.

2. Material e métodos

2.1. Caracterização do AHVL - setores de medição e controlo

Os solos dominantes do AHVL são aluviossolos modernos de elevada qualidade agrícola, alguns sujeitos a drenagem deficiente. As "Obras do Rio Lis" decorreram de 1943 a 1957 e a sua gestão desde esta data é efetuada pela ARBVL. As obras apresentam objetivos de defesa dos campos através de coletores de encosta, de drenagem do vale e rega realizada com a aplicação de diversos açudes a partir do rio Lis e seus afluentes (Fig. 2). O Perímetro estrutura-se em sete blocos hidráulicos concebidos de acordo com a lógica da rede de drenagem. A rede de rega compreende 17 açudes e 15 estações elevatórias (EE), captando água do Lis, afluentes e valas de drenagem, funcionando a fio de água através de uma rede gravítica com condução de água em canal. Para efeito da monitorização da quantidade de água para rega estabeleceram-se unidades de gestão, os setores de medição e controlo (SMC), correspondendo a componentes da rede coletiva, abastecidas por derivação gravítica ou EE, cuja afluência foi sujeita a medição. Os valores de área e de ocupação cultural estão representados na Tabela 1, e a sua identificação geográfica na Fig. 2. Estes SMC perfazem no seu conjunto uma área de 1871 ha, correspondendo a 93% do total. A área restante, excluída desta análise por questões operacionais, corresponde a zonas marginais do perímetro em que, em geral, a distribuição da água é feita diretamente pelos agricultores, com intervenção mínima da ARBVL.

Tabela 1. Área regada e ocupação cultural dos SMC em 2018

SMC	**C1A**	**C1B**	**C2A**	**C2B**	**C4**	**C5**	**C7**
Blocos	**III**	**III, IIs**	**IV**	**V**	**II**	**II**	**I**
Área total, ha	175,6	104,4	189,7	286,2	418,4	207,6	257,1
Área regada, ha	114,2	82,8	159,5	214,7	292,8	166,1	205,7
Área regada, %	65	80	85	75	70	80	80
milho	20%	18%	43%	33%	61%	60%	9%
Pastagens	48%	30%	7%	24%	29%	10%	77%
Hortícolas	5%	13%	14%	11%	4%	0	0
Arroz	0	5%	0	15%	5%	30%	1%
Bacelo	20%	13%	15%	15%	0	0	0
Frutícola	6%	19%	20%	0	0	0	10%

2.2. Monitorização da quantidade de água

A metodologia para a monitorização das redes coletivas de abastecimento considerou o desenvolvimento de uma rede de observações de modos operativos e de hidrogramas de abastecimento, com a finalidade de avaliar as condições de derivação gravítica a partir das linhas de água principais, dos consumos de energia e eficácia nas EE e redes secundárias de rega, e do balanço entre procura e oferta de água ao longo da campanha de rega, para avaliação de desempenho e identificação de problemas.

Para a avaliação da procura de água no período da época de rega em 2018, estabelecido entre os meses de maio a outubro, obtiveram-se os dados de evapotranspiração de referência decendiais a partir do Instituto Português do Mar e Atmosfera (www.ipma.pt) referentes a Leiria. Estes dados estão apresentados na Tabela 2. A partir do conhecimento da ocupação cultural nas várias SMC (Tabela 1), e com base em [4], estimaram-se os coeficientes culturais ao longo do ciclo cultural, também na base decendial. Estes valores estão apresentados na Tabela 2.

2.3. Monitorização da qualidade de água

A metodologia de monitorização da qualidade da água das redes de rega e drenagem considerou, numa primeira fase, a definição dos locais de observação e a frequência de colheita de amostras. Como regra geral de amostragem, optou-se por incluir os pontos de entrada e saída do AHVL, privilegiar os períodos de início da campanha de rega e de ponta de estiagem e incluir os diversos blocos hidráulicos do sistema de rega e drenagem. Os pontos de amostragem efetuada em 2018 estão descritos na Tabela 3.

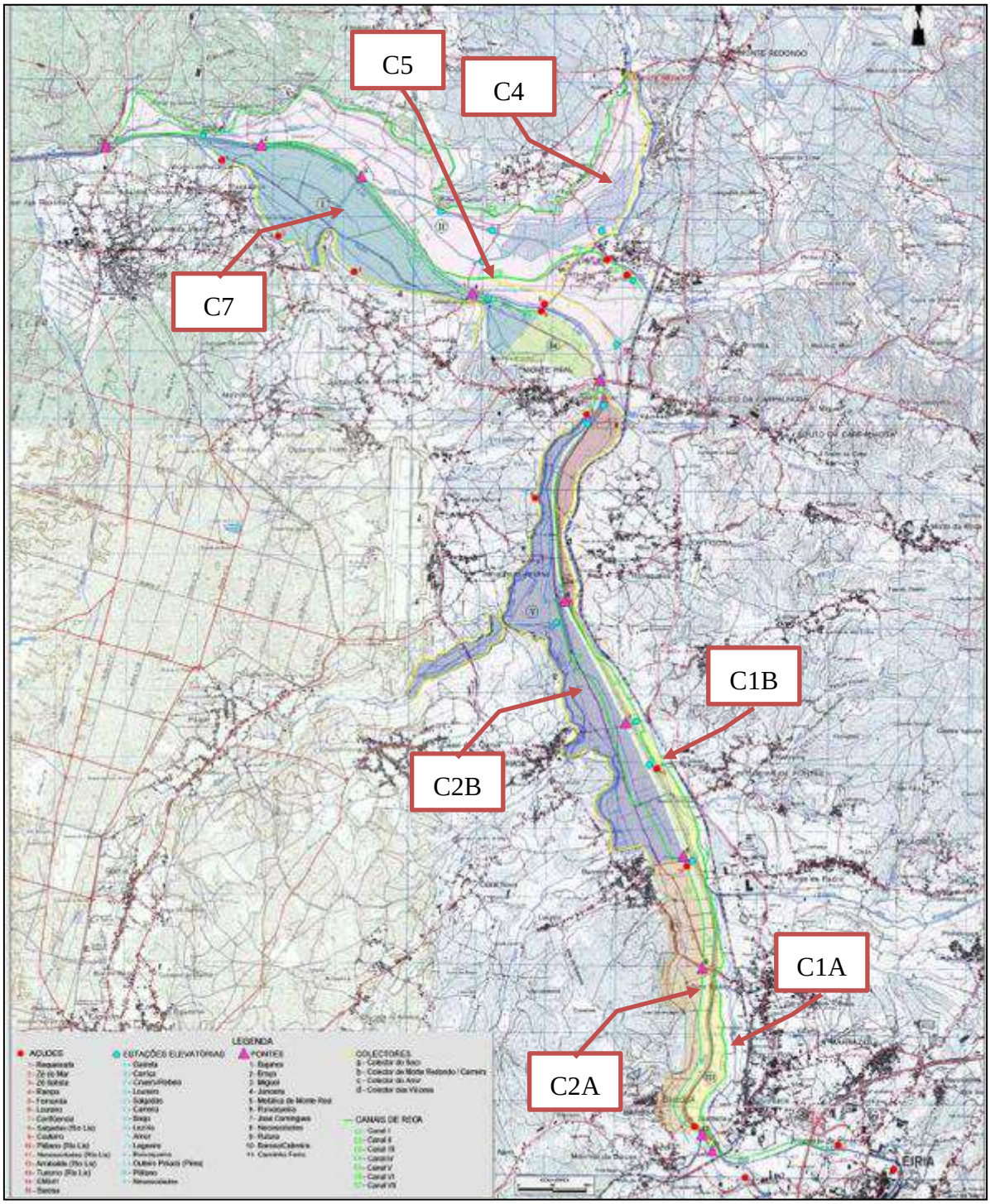


Figura 2. Aproveitamento hidroagrícola do Vale do Lis e localização dos SMC [5].

A avaliação da qualidade físico-química das amostras de água foi efectuada com sonda multiparamétrica portátil marca In-Situ, modelo SmarTROLL RDO Handheld, previamente calibrada, e também em laboratório, para os seguintes parâmetros: Cloretos (Cl, mg/L), Oxigénio Dissolvido Resistivo (RDO, mg/L), Saturação do Oxigénio Dissolvido (SOD, %), Temperatura (T, ºC), Condutividade Elétrica (CE, μS/cm), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT, ppm). Os resultados obtidos foram comparados com os valores máximos recomendados (VMR), de acordo com as Normas de Qualidade da Água para rega (NQAR) [6]. As análises microbiológicas das amostras de água incluíram a enumeração de coliformes totais (CT, UFC/mL) através de filtração por membrana e incubação em meio de cultura apropriado, de acordo com o Anexo III da referida Norma. Foram efetuadas medições em várias datas, indicadas na Tabela 4.

Tabela 2. Dados meteorológicos e coeficientes culturais ponderados aos SMC, decendiais em 2018

Mês	**Maio**			**Junho**			**Julho**			**Agosto**			**Setembro**			**Outubro**		
Década	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
ET0, mm(1)	35,4	41,6	31,6	25,5	44,7	37,9	37,0	38,6	43,9	37,0	76,3	82,0	35,8	35,4	33,9	34,8	21,3	19,8
P, mm(1)	0,0	0,5	26,0	38,9	1,8	17,6	1,7	0,1	0,1	0,7	0,3	0,7	0,9	0,0	0,1	0,0	27,4	42,9
Kc(milho)	0,30	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,80	0,60	0,50	0,50	0,50
Kc(pastagem)	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Kc(hortícola)	0,80	0,80	0,80	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Kc(arroz)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kc(bacelo)	0,30	0,40	0,70	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,50	0,50
Kc(frutícola)	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,70	0,60	0,50	0,50
Kc (C1A)	0,62	0,65	0,74	0,81	0,83	0,85	0,89	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,87	0,83	0,77	0,72	0,71	0,71
Kc (C1B)	0,61	0,64	0,72	0,79	0,83	0,85	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,87	0,84	0,77	0,72	0,70	0,70
Kc (C2A)	0,43	0,47	0,58	0,69	0,75	0,79	0,88	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,86	0,81	0,68	0,61	0,58	0,58
Kc (C2B)	0,61	0,63	0,71	0,78	0,81	0,85	0,92	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,90	0,85	0,77	0,72	0,72	0,72
Kc (C4)	0,53	0,53	0,59	0,66	0,72	0,78	0,91	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,91	0,84	0,72	0,66	0,66	0,66
Kc (C5)	0,57	0,57	0,63	0,69	0,75	0,81	0,93	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,93	0,87	0,75	0,69	0,69	0,69
Kc (C7)	0,79	0,80	0,82	0,84	0,86	0,87	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,88	0,85	0,83	0,82	0,82

(1) Dados decendiais relativos a Leiria, em 2018, a partir de www.ipma.pt.

Tabela 3. Identificação e caracterização dos pontos amostrais de qualidade da água.

Ponto	Local	Bloco	Função*	Ponto	Local	Bloco	Função*
1	Rib. Aroeira, açude C4	II	A	16	Vala Real (EE AdCL)	V	D
2	Rib. Aroeira, açude, C5	II	A	17	Vala do Seixal, conf. Amor	IV, V	D
3	Rib. Aroeira, conf. Lis	II	A	18	Vala do Carvão (início)	III	A,D
4	Rio Lis, açude Salgadas	Is, II	A	19	Vala do Carvão (açude Pires)	III	A,D
5	Rio Lis, Ponte da Bajanca	II	A	20	Piezómetro 1 (Termas)	Is	P
6	Tomada do Canal 3	V, Is	A	21	Piezómetro 2 (pomar VD)	Is	P
7	Canal 2, jus. EE Necessidades	V	A	22	Piezómetro 3 (arroz NG)	II	P
8	Canal 1, açude do Plátano	IIs, III	A	23	Lis, ponte da Junceira	I, Is, II	D
9	Canal 2, tomada, rio Lis	IV	A	24	Vala das Termas M. Real	Is	D
10	Rib. Milagres (foz, ponte)	III	A	25	Canal 3, açude, col. de Amor	IV, V	A
11	Rio Lena (foz), Ponte Mestras	III, IV	D	26	Vala Real, Estr. Ruivaqueira	V	D
12	Rio Negro (meio)	II	A,D	27	Vala do Seixal, montante	IV	D
13	Rio Negro (final) - EE Boco	I, II	A,D	28	Canal VII – a montante	Is	A
14	Vala Termas (EE Salgadas)	Is	D	29	Canal II – a montante	IV	A
15	Vala da Pedra (final)	Is, I	D	30	Rio Lis, açude Arrabalde	III, IV, V, IIs	A

*Função: A=Abastecimento; D=Drenagem; S=Subterrânea (piezómetro)

3. Resultados e discussão

3.1. Quantidade de água - balanço hídrico nos SMC

As condições gerais de afluência e efluência nos canais de abastecimento dos SMC estão representadas na Tabela 4. As efluências referem-se aos SMC C1A e C2A pois os respetivos canais principais têm continuidade nos SMC C1B e C2B, com o reforço das EE Plátano e Necessidades, respetivamente. Para se estabelecerem séries contínuas de dados a partir das medições pontuais de caudais, recorreu-se a informação empírica local para completar os dados mensurados. São exemplo a indicação da relação entre o escoamento diurno e noturno, assim como se se verificava escoamento no fim de semana. Por otro lado, a estimativa do caudais nas EE foi correlacionada com o consumo de energia registado.

Tabela 4. Condições de afluência e efluência nos canais de abastecimento dos SMC

SMC	C1A	C1B	C2A	C2B	C4	C5	C7
Caudal máximo (l/s)	231	152	401	244	369	168	240
Caudal médio (l/s)	119	68	195	120	156	71	120
Nº dias c. escoamento	125	110	159	159	146	151	140
Afluente (10^3 m^3 ano^{-1})	1289	1958	2682	1776	1966	1012	1456
Efluente (10^3 m^3 ano^{-1})	237	-------	1650	-----	-----	-----	----

O balanço hídrico dos SMC vai colocar em confronto a procura de água ao longo da campanha, na base decendial, estimada pelo défice de precipitação (ETc - P) e pelo consumo bruto de água através das afluências gravíticas e bombeadas. Estes resultados estão apresentados graficamente na Figura 3. Destes resultados há a realçar que os SMC C4 e C5 são tratados, em termos de balanço hídrico, em conjunto, pelo seguinte motivo. Uma parte significativa do abastecimento de C5 resulta da drenagem de C4, a qual é coletada pela vala denominada Rio Negro, com a função dupla de drenagem e abastecimento. Os valores de bombagem apresentados foram obtidos por estimativa a partir do balanço hídrico e do conhecimento local da existência de várias EE coletivas e privadas, com esta mesma função. Em termos de drenagem, esta área pertence ao Bloco II, e embora o abastecimento gravítico esteja diferenciado nos canais 4 e 5, a gestão da água de rega é integrada e não dissociável. Finalmente sobre o SMC C7, foi considerado na área regada a fração de prados permanentes em que não há aparentemente uma instalação de rega, na sua acepção corrente. Acontece que predomina nestas áreas a rega subsuperficial a partir da ascensão capilar da toalha freática, a qual é, por sua vez, abastecida pelas valas de drenagem e pela rede de rega.

Na Figura 4 (superior) apresentam-se, para cada SMC, valores sazonais da procura de água (ETc-P), afluência bruta total e a sua componente de bombagem. Permite concluir que se obtiveram valores de dotação bruta entre 6470 e 9220 m^3/ha. Como medida de eficiência global em cada SMC, através do ratio procura de água pelas culturas - dotação bruta, obtiveram-se os valores representados na Figura 4 (inferior), entre 53% e 72%, com média de 67%. Por um lado, há que atender à precariedade dos canais de abastecimento, muitos delas em mau estado de conservação pela degradação dos materiais de revestimento e, por outro lado, o enorme cuidado de gerir a água quando ela é mais escassa, com o recurso à reutilização por bombagem. Assim se explica, em grande parte, os valores relativamente elevados da eficiência global, comprovada pela elevada produtividade da terra nas condições de regadio.

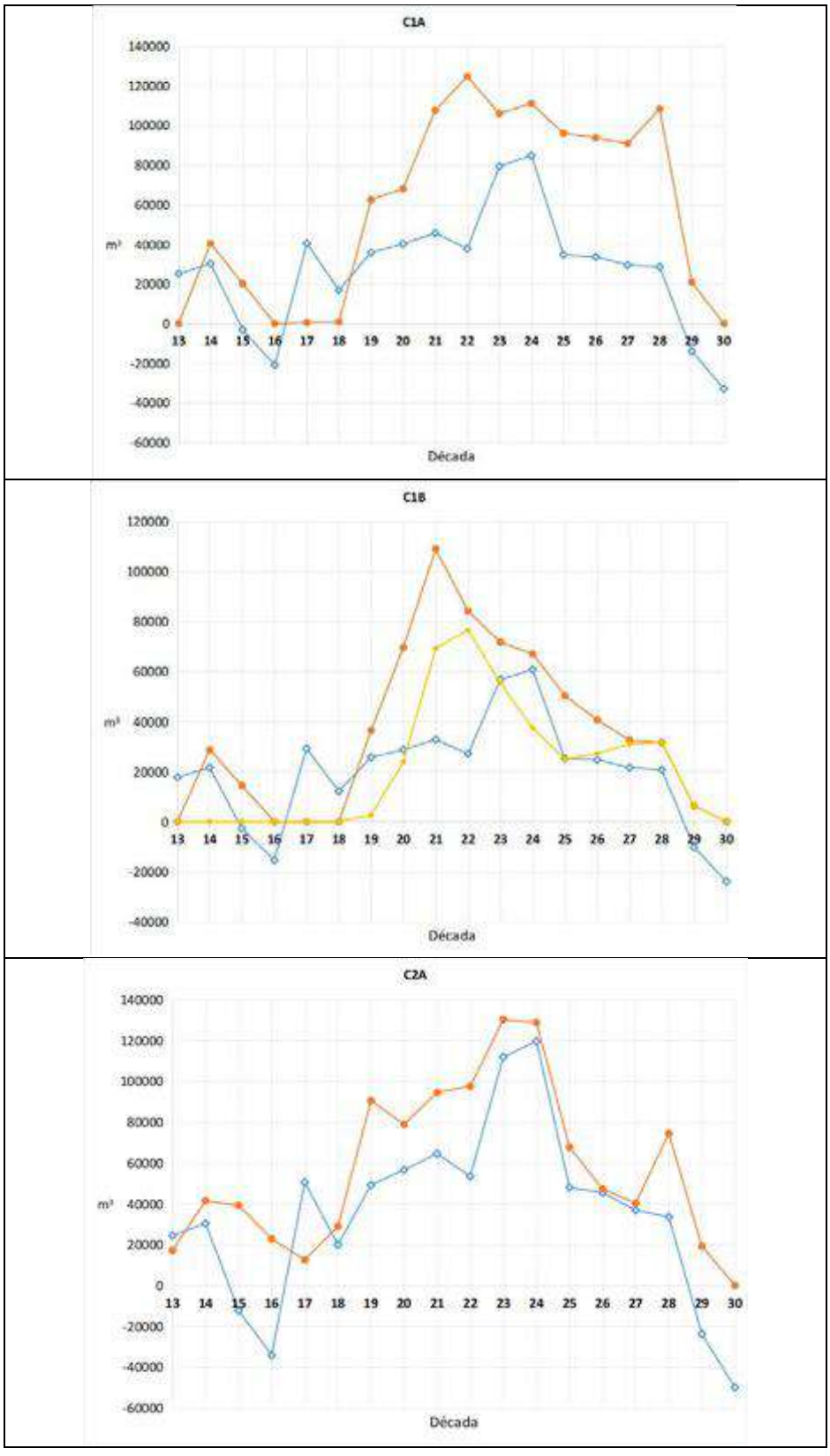


Figura 3a. Variação sazonal da procura de água, através dos défices de evapotranspiração, ETc - P ( ), afluência bruta total ( ), e afluência por bombagem ( ). Valores decendiais, em m³, para cada um dos SMC.

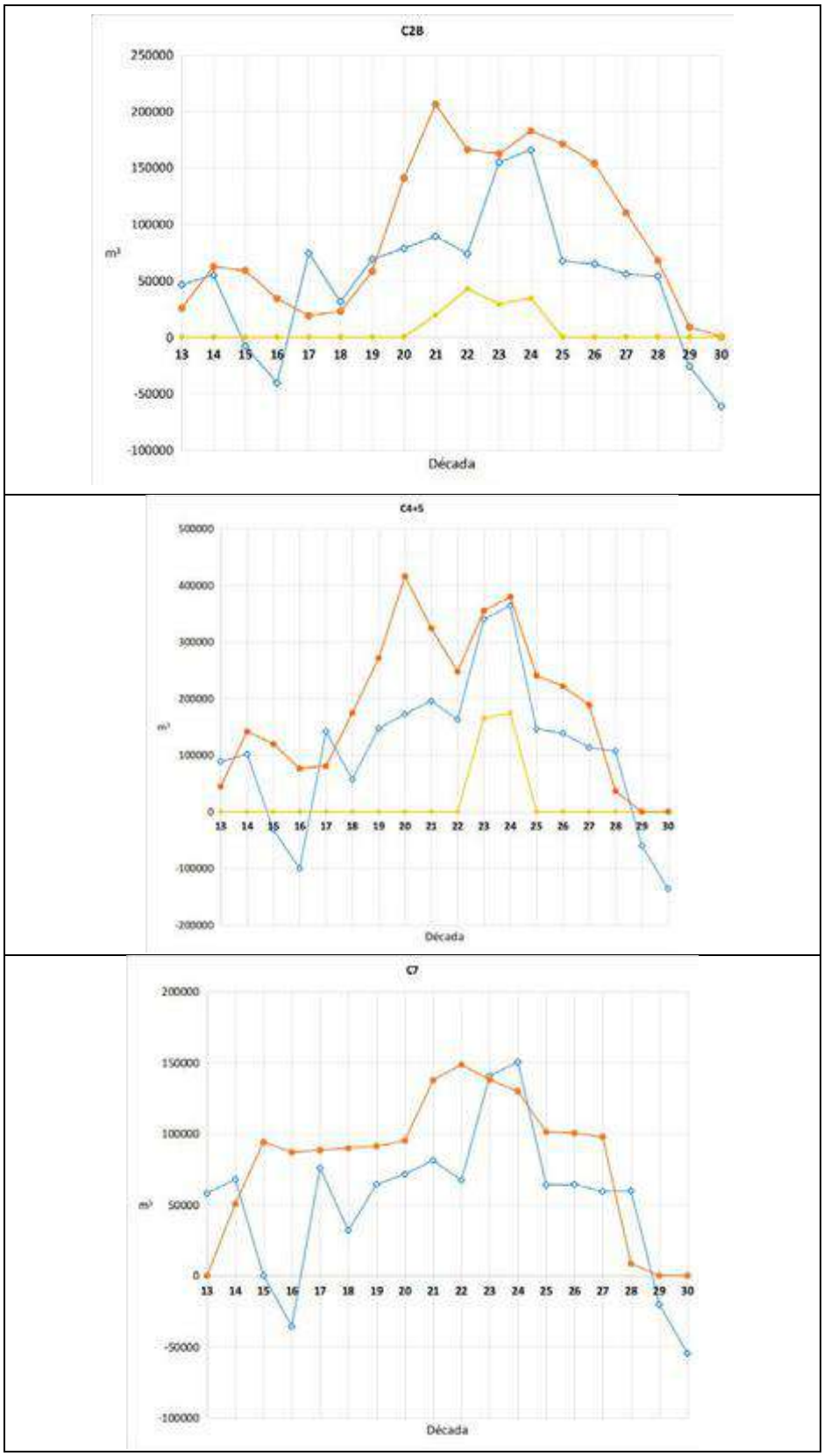


Figura 3b. Variação sazonal da procura de água, através dos défices de evapotranspiração, ETc - P ( ), afluência bruta total ( ), e afluência por bombagem ( ). Valores decendiais, em m³, para cada um dos SMC.

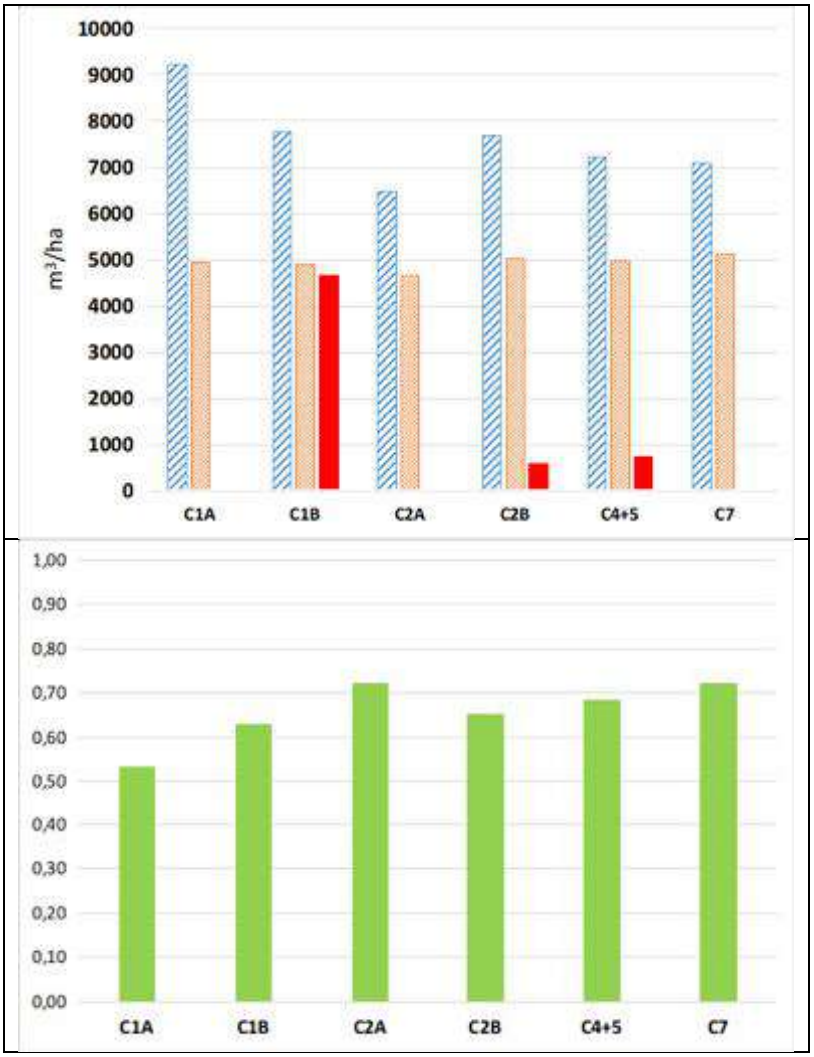


Figura 4. Superior: Valores sazonais da procura de água ( ), afluência bruta total ( ), e afluência por bombagem ( ), valores em m³/ha para cada SMC; Inferior: Eficiência global dos SMC, ratio ( ).

3.2. Qualidade de água

Na Tabela 5 apresenta-se um excerto dos resultados obtidos, em particular os pontos 1 e 30 de água de abastecimento para rega (ribeira da Aroeira e rio Lis), o ponto 12 com função dupla de drenagem e rega (rio Negro), o ponto 16 de drenagem agrícola (Vala Real), o ponto 24 de drenagem de água residual das Termas de Monte Real, com salinidade particularmente elevada de origem subterrânea (elevado valor de CE e cloretos), e o ponto 21 de água subterrânea (pomar no bloco Is).

No que diz respeito aos valores de pH (Tabela 5) na água da Ribeira da Aroeira (ponto 1) e do Rio Negro (ponto 12), linha de drenagem desta ribeira, em 19/09, estes estão fora do intervalo de VMR para a água de rega. Notar a situação de anormalidade deste parâmetro neste dia de observação, explicado pela provável descarga de material poluente ácido a montante, da qual não se tem mais informação. Sobre a salinidade elevada da água residual das Termas (elevado valor de CE e cloretos do ponto 24), esta tem origem subterrânea devida a problema de selagem de um furo de captação. O efeito agrícola negativo é controlado dentro do possível pela sua drenagem direta rio Lis por bombagem. Quanto à questão microbiológica, de momento não é possível fazer

comparações com a legislação, uma vez que as análises quantificaram coliformes totais, enquanto que o Anexo XVI do DL 236/98 estabelece o VMR de 100 UFC/100mL do grupo dos coliformes fecais. A norma portuguesa (NP) 4434:2005 refere os requisitos de qualidade para a reutilização de águas residuais urbanas tratadas na rega de culturas agrícolas, florestais, ornamentais, viveiros, relvados e outros espaços verdes. Esta norma afasta-se claramente do requisito do Anexo XVI do DL 236/98, recomendando valores variáveis e menos restritivos, em função do tipo de cultura e do método de rega. Segundo [7], o DL 136/98 é bastante exigente, dado que a água da generalidade dos rios não apresenta teores de coliformes fecais inferiores a 100 UFC/100mL. Os requisitos de qualidade microbiológica estabelecidos na NP 4434 tiveram em consideração o uso das culturas regadas (p.e. consumo em cru, consumo animal, floresta, culturas industriais, relvados desportivos) e o respetivo método de rega aplicado.

A identificação de situações de risco de contaminação microbiana na água de rega que aflui ao Vale do Lis, cuja responsabilidade é externa ao AHVL, obriga a medidas especiais de precaução, nomeadamente a nível da segurança dos agricultores e consumidores. A estes riscos será necessário também avaliar a influência da atividade agrícola no interior do AHVL, designadamente ao nível da rede de drenagem.

Tabela 5. Resultados da análise de qualidade físico-química da água (valores de VMR da NQAR)

Ponto	Parâmetros	pH	CE, µS/cm	Cl, mg/L	RDO, mg/L	SOD, %	T, ˚C	SDT, ppm	CT, 10^3 UFC/mL
	VMR	**6,5-8,4**	**1000**	**70**	**-----**	**-----**	**-----**	**640**	**-----**
1	23/07/18	5,28	230	8,6					
	19/09/18	4,6	356				16,0		2,7
	10/10/18	7,73	229		9,79	104,81	18,1	171,35	
12	19/09/18	6,4	1140				18,5		7,2
	10/10/18	7,23	987		8,01	84,82	17,5	749,95	
16	23/07/18	7,45	590	7,4					
	19/09/18	7,4	657				18,0		1,9
	10/10/18	7,53	507		8,98	95,31	17,6	383,53	
21	10/10/18	6,57	6646		3,88	42,68	18,2	4966,6	
24	23/07/18	6,35	6850	249,4					
	10/10/18	6,84	6127		6,65	72,76	18,0	4601,9	
30	19/09/18	7,3	556				19,0		11

4. Conclusões

Esta comunicação presenta os resultados experimentais de 2018 relativos à monitorização da água no AHVL. Em relação à monitorização da quantidade de água, as observações de campo e a análise de dados pelo método do balanço hídrico aos setores de medição e controlo, permitiu concluir que foram aplicadas dotações brutas entre 6470 e 9220 m^3/ha. Identificaram-se os maiores constragimentos do abastecimento, resultantes da grande precariedade da rede de transporte de água em canais, muitos deles extremanente degradados com elevadas perdas de água. Numa avaliação global a partir do indicadores de eficiência global do sistema ao nível de cada SMC, obtiveram-se resultados entre 53% e 72%, com média de 67%. As eficiências mais elevadas resultam da reutilização da água de drenagem por bombagem, acarretando por isso custo acrescido pelo consumo de energia. Os resultados das análises fisico-químicas e microbiológicas permitiram concluir que as águas de superfície e subsuperficiais indiciam situações de risco ao nível de pH, salinização e microbiologia, justificando agir para solucionar ou mitigar os problemas, em especual ao nível da parcela do agricultor.

A atividade experimental do projeto, para além da monitorização da água, considera também a monitorização o solo e a avaliação de campo de práticas agrícolas, conducente a um melhor diagnóstico dos problemas de abastecimento de água e drenagem, e na melhoria de qualidade das práticas operativas e de redução de desperdícios de água e energia. Os potenciais destinatários das atividades do grupo operacional são a Associação de Regantes e os agricultores do Vale do Lis, os consumidores e as empresas da região de comércio de fatores agrícolas e de transformação e comercialização de produtos.

5. Agradecimentos

O Projeto Grupo Operacional para a Gestão da Água no Vale do Lis (PDR2020-1.0.1-FEADER- 030911) tem o apoio financeiro do PDR2020 cofinanciado pelo FEDER, no âmbito do Acordo de Parceria Portugal 2020, Programa PDR2020, Medida Inovação.

Referências

1. Ministério da Agricultura e do Mar – Gabinete de Planeamento e Políticas (MAM-GPP) 2014. Programa de Desenvolvimento Rural do Continente para 2014–2020.
2. Gonçalves J.M. , H. Damásio, I. P. de Lima, F. Castro, F. Oliveira, M. Teixeira, M. Gonçalves, M. Nunes, I. Duarte, P. Amador, S. Ferreira, J. L. M. P. de Lima. Grupo operacional para a gestão da água no Vale do Lis: Melhorar o uso da água e do solo e a competitividade agrícola, Comunicação apresentada no VII Congresso Nacional de Rega e Drenagem, Monte Real, 27 a 29 de junho 2018, www.cotr.pt/VIICNRD/Comunicacoes/7_Artigo.pdf.
3. GoLis, https://inovacao.rederural.gov.pt/2/81-grupo-operacional-para-a-gestao-da-agua-no-vale-do-lis
4. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. 1998, FAO Irrig. Drain. Pap. 56, FAO, Rome, 300 p.
5. COBA. Estudo de impacte ambiental do Projeto de Emparcelamento do Vale do Lis. 2001,IHERA, Lisboa.
6. Decreto-Lei nº 236/98 de 1 de Agosto - Normas de Qualidade da Água - Artº 58º Águas destinadas à rega.
7. Monte H, Albuquerque A. Reutilização de Águas Residuais. Série Guias Técnicos, ISEL-ERSAR, 2010, Lisboa.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

App para la programación del riego y la fertilización del olivar regado con agua regenerada

C. Alcaide Zaragoza [1], I. Fernández García[2], R. González Perea[3], E. Camacho Poyato[4], P. Montesinos Barrios[5], J.A. Rodríguez Díaz [6]

[1] Investigador predoctoral. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Campus Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci, 14071. Córdoba; g12alzac@uco.es
[2] Profesora Sustituta Interina, Departamento de Ingeniería eléctrica, Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci; g52fegai@uco.es
[3] Investigador Juan de la Cierva. Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria. Universidad de Castilla-La Mancha, Campus universitario s/n, 02071. Albacete; Rafael.GonzalezPerea@uclm.es
[4] Catedrático. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Campus Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci, 14071. Córdoba; ecamacho@uco.es
[5] Catedrática. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Campus Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci, 14071. Córdoba; pmontesinos@uco.es
[6] Profesor Titular. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Campus Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci, 14071. Córdoba; jarodriguez@uco.es

Resumen: El olivar es el cultivo más representativo y simbólico de Andalucía, teniendo un gran impacto social, cultural y económico en toda la región. Sin embargo, debido a su gran extensión, aproximadamente 1 de cada 3 ha es de riego, y, pese a que se riega de forma deficitaria, es el cultivo con mayor consumo de agua en la Cuenca del Guadalquivir. A esto hay que añadir que, generalmente, la aplicación de fertilizantes suele ser poco precisa, dando lugar a una aportación excesiva de macronutrientes esenciales, especialmente de nitrógeno, lo que provoca problemas de contaminación de acuíferos, suelos y atmósfera. El empleo de aguas regeneradas para el riego de olivar está suscitando gran interés como alternativa al uso de fuentes de aguas convencionales. El problema asociado al riego con este tipo de aguas es la gestión de la fertilización, ya que esta agua incorpora una cantidad considerable de nutrientes que, además, es variable a lo largo del año. Por ello, en este trabajo, se ha desarrollado una aplicación de fácil manejo para técnicos y agricultores que integra la programación en tiempo real del riego y de la fertilización (fertirriego) de olivar para el caso específico del uso de agua regenerada. El modelo en el que se fundamenta la aplicación tiene en cuenta datos climáticos, tanto históricos como predictivos, características del suelo, características hidráulicas del sistema de riego, dotación concedida, análisis del estado nutritivo del árbol y análisis continuos de la calidad del agua. Como resultado, la aplicación genera la programación diaria o semanal del riego y la fertilización, priorizando la aplicación del agua en los momentos en los que el cultivo es más sensible al estrés hídrico.

Palabras clave: Reutilización, Riego de precisión, Fertirriego, Programación del riego

1. Introducción

En España, más del 75% del agua dulce total distribuida va destinada a la agricultura de regadío [1], lo que provoca que ésta sea especialmente vulnerable ante periodos de sequía. Este

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3375

problema se agudiza si se consideran los efectos del cambio climático, los cuales están causando importantes alteraciones en los patrones de lluvia y temperatura, así como un aumento en la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos [2]. Esto provocará un aumento en la demanda de agua y en el déficit de agua en el suelo, convirtiendo a España en uno de los países con mayor estrés hídrico del mundo [3]. Por todo esto, la agricultura de regadío tendrá que evolucionar para hacer frente a estos desafíos. Esta situación se agudiza en Andalucía, ya que la agricultura es uno de los pilares de su economía. En esta región, el olivar es el cultivo más representativo y simbólico, teniendo un gran impacto social, cultural y económico. Sin embargo, debido a su extensión, y pese a seguir estrategias de riego deficitario, el olivar es el cultivo con mayor uso de agua en la Cuenca del Guadalquivir, con un consumo de más de 580 hm^3/año, lo que implica alrededor del 20% del total del agua destinada a agricultura [4]. Por otro lado, la fertilización de este cultivo, generalmente, se realiza de forma poco precisa, siguiendo prácticas culturales tradicionales y sin métodos de diagnóstico previos sobre el estado nutritivo del árbol o análisis sobre la calidad de agua. Esto provoca que se realice una fertilización en exceso, especialmente de nitrógeno, lo que ocasiona no solo pérdidas económicas sino también problemas medioambientales como contaminación de acuíferos, del suelo y de la atmósfera [5]. Esta situación puede agravarse para el caso de riego con aguas regeneradas, ya que dichas aguas ya incorporan una cantidad importante de nutrientes, siendo ésta además variable a lo largo del año. Sin embargo, la utilización de este tipo de aguas, gestionadas correctamente y con ayuda de los nuevos avances en las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs), puede convertirse en una solución estratégica a la problemática planteada [6].

Las aguas residuales tratadas son aguas de origen doméstico, municipal, industrial o pluvial que han sido procesadas en una planta de tratamiento. Posteriormente, estas aguas reciben un tratamiento adicional que las hace adecuadas para su reutilización, pasándose a denominar aguas regeneradas. Este tipo de aguas deben alcanzar unos mínimos de calidad, los cuales se establecen en el RD1620/2007 [7] y la propuesta de la Comisión Europea para los requerimientos mínimos para la reutilización de agua [8] . Los impactos del uso de aguas regeneradas para riego de olivar han sido considerados por varios autores, los cuales centran su atención en los impactos en el suelo [9, 10], en el desarrollo del árbol [11, 12] y en la calidad del aceite [12, 13], concluyendo que el uso de estas aguas, siempre que se haga de manera controlada y se realicen los correspondientes análisis de forma regular, no afecta a ninguno de los parámetros evaluados.

Por otro lado, diferentes autores han desarrollado aplicaciones enfocadas a la gestión del riego y la fertilización. Bueno-Delgado et al. [14] y Pagán et al. [15] propusieron herramientas que determinaban el tipo de fertilizante que debería aplicarse, desde un punto de vista económico, teniendo en cuenta la calidad del agua de riego. Sin embargo, en ambos trabajos era necesario conocer la solución nutritiva ideal, la cual el agricultor suele desconocer. Pérez-Castro et al. [16] desarrollaron una aplicación que determinaba la cantidad de fertilizante que se debe aplicar según el tipo de cultivo y las condiciones del sistema. Sin embargo, esta aplicación solo era válida para cultivos hortícolas de invernadero. Considerando la gestión del agua de riego, González Perea et al. [17] implementaron los principios del riego de precisión para el cultivo de la fresa en la aplicación *irrifresa*, lo que conllevó importantes ahorros de agua en el entorno de Doñana. Mérida García et al. [18] presentaron un modelo de gestión óptima de riego de olivar mediante energía solar que ajustaba el riego según las necesidades de riego del cultivo en tiempo real. Sin embargo, no existe ninguna herramienta que integre todos los elementos anteriormente citados: gestión del uso del agua y el fertilizante para el cultivo de olivar regado con aguas regeneradas. El objetivo de este trabajo, por tanto, es el desarrollo de una aplicación, de escritorio y para dispositivos móviles, destinada a agricultores y técnicos, para la programación en tiempo real del fertirriego de precisión del olivar regado con aguas regeneradas, que maximice la eficiencia en el uso del agua y del fertilizante.

2. Materiales y métodos

2.1. Caso de estudio

El estudio se ha llevado a cabo en la Comunidad de Regantes (C.R.) de Tintín, localizada en Montilla (Córdoba), concretamente en una finca comercial de olivar tradicional destinado a producción de aceite. El clima de esta zona es mediterráneo, con una precipitación media anual (P_t) de 590 mm, principalmente en primavera y otoño. La temperatura media anual (T_m) es de 16,9ºC y la evapotranspiración de referencia media (ET_0) es 3 mm día^{-1}. La finca está compuesta por árboles adultos (*Olea europea* L., cv 'Hojiblanca' y *Olea europea* L., cv 'Nevadillo azul') espaciados a 8 x 8 m. El agua utilizada para el riego procede de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Montilla y se almacena en una balsa, donde se aplican los tratamientos necesarios para alcanzar los requerimientos exigidos por la legislación. Desde allí se distribuye a los regantes mediante una estación de bombeo localizada aguas abajo de dicha balsa. El sistema de riego empleado es riego por goteo subterráneo, con goteros de 2,2 lh^{-1}, enterrados a aproximadamente 40 cm y espaciados 1 m.

2.2. Caracterización de la finca

Se caracterizó el suelo, el estado nutricional de los árboles y la calidad del agua de riego. Respecto a la caracterización del suelo, se tomaron ocho muestras de suelo en cuatro puntos diferentes, considerando cambios en la morfología, color, pendiente y profundidad. Dos de esos puntos se localizaron bajo dos árboles y los dos restantes en mitad de dos calles. En cada punto seleccionado se tomaron dos muestras, una en la capa de suelo de 0-15 cm y la otra en la de 15-30 cm para evaluar textura, pH y contenido de nutrientes. Respecto al estado nutricional del árbol se realizaron análisis foliares en el mes de julio. Se tomaron dos muestras, correspondientes a las dos variedades de olivo presentes en la finca, formadas por 100 hojas de 50 árboles cada una. Finalmente, para la evaluación de la calidad de agua de riego se tomaron muestras en dos ocasiones en diferentes puntos de la instalación, pero para este estudio solo se tuvo en cuenta la muestra de agua obtenida a la salida del sistema de filtración. En la siguiente campaña, se tomarán muestras de agua cada dos semanas.

2.3. Descripción del modelo

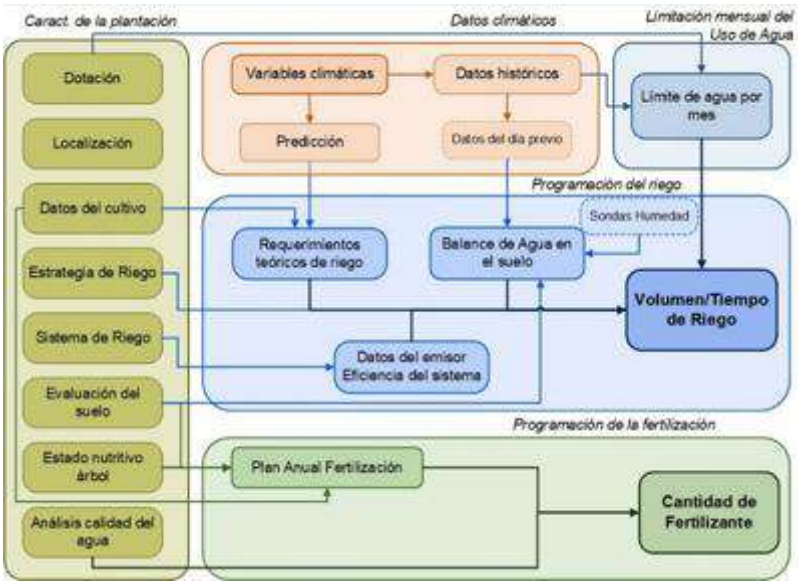


Figura 1. Esquema general modelo *FertigOlive*

El modelo desarrollado proporciona la cantidad de agua y fertilizante óptimos a aportar en tiempo real, ajustando estos valores a las necesidades reales del cultivo, asegurando así la sostenibilidad del sistema productivo. El modelo, denominado *FertigOlive*, se ha desarrollado en MATLAB™ [19] y está formado por cinco módulos relacionados (Figura 1): 1) características de la plantación, 2) datos climáticos, 3) volumen de agua mensual disponible, 4) programación del riego y 5) programación de la fertilización. Estos módulos se describen a continuación.

2.3.1. Características de la plantación

En este módulo se introducen los datos generales de la plantación tales como localización, dotación concedida, datos del cultivo (coeficiente de cultivo, ciclo productivo, etc.), características del suelo, estrategia de riego seleccionada, características del sistema de riego (caudal de gotero, separación goteros, etc.), estado nutritivo del árbol y calidad del agua de riego.

2.3.2. Datos climáticos

Este módulo contempla dos submódulos, ambos dependientes de la localización: predicción meteorológica y registros agroclimáticos históricos. En primer lugar, a partir de la localización, se determina la estación agroclimática más cercana según la Red de Estaciones Agroclimáticas de Andalucía. De esta estación, mediante técnicas de *web scraping* (extracción automática de información desde un sitio web) se obtienen todos los valores históricos disponibles de P y ET_0 diarios, los cuales se almacenan en una base de datos relacional MySQL. Además, cada día, se actualiza dicha base de datos con los valores de P y ET_0 del día anterior.

Así mismo, de forma diaria, se obtiene la predicción meteorológica de la zona para una semana mediante el uso de *AEMET OpenData*, la API REST (Application Programming Interface. REpresentational State Transfer) que la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2015) pone a disposición de los usuarios. Los parámetros obtenidos son temperatura media, temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), humedad relativa máxima (HR_{max}), humedad relativa mínima (HR_{min}), velocidad del viento (u_2) e índice de nubosidad (nu), los cuales mediante la ecuación de FAO Penman-Monteith [21], se utilizan para obtener el valor de ET_0. Por último, se obtiene el valor de la predicción de la precipitación (P) siguiendo la misma metodología. Toda esta información es la que se usa para la programación de los eventos de riego.

2.3.3. Agua mensual disponible

En este módulo se establecen los límites mensuales de cantidad de agua que se puede utilizar para riego, para ajustar la dotación concedida a las necesidades del olivo, de forma que se garantice la disponibilidad de agua en los momentos en los que el cultivo es más sensible al estrés hídrico. Esta limitación mensual se obtiene a partir de la concesión de uso de aguas regeneradas, de la estrategia de riego que se adopte y de las necesidades de riego históricas del olivo en la zona, calculadas a partir de los datos históricos de la estación agroclimática y de las características del cultivo. De forma quincenal, se comprueba si se ha consumido el agua inicialmente establecida. En caso contrario, se realiza una corrección y se vuelve a calcular el límite de agua para los meses restantes hasta terminar la campaña de riego, de forma que el agua no usada se pueda aplicar en dichos meses.

2.3.4. Programación del riego

La programación del riego se realiza considerando las necesidades de riego teóricas, el contenido de agua en el suelo, la estrategia de riego seleccionada, las características del sistema de riego y la limitación mensual al uso del agua. Las necesidades hídricas de riego se calculan, de forma diaria y a partir de las predicciones meteorológicas, como la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la precipitación efectiva (P_{ef}) del día de riego. La P_{ef}, es

decir, el agua de lluvia almacenada en la zona radicular y la realmente aprovechable por el cultivo, se calcula aplicando un porcentaje fijo. Las necesidades de riego del cultivo se calculan para reponer la ET_c diaria, calculada por el método propuesto por la FAO [22] (Ec.(1)):

$$ET_c = ET_0 \cdot k_c \cdot k_r \quad (1)$$

donde ET_0 se calcula con la predicción meteorológica (ver apartado 0), k_c es el coeficiente de cultivo para olivar, cuyos valores son los propuestos por Orgaz y Fereres [23] (Tabla 1) y k_r es el coeficiente de cobertura, el cual es igual a 1 para árboles con más del 60% de cubierta o toma valores entre 0 y 1 en caso contrario.

Tabla 1. Coeficiente de cultivo (k_c) de olivar en la provincia de Córdoba

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50	0,55	0,60	0,60	0,65

En cuanto a la estrategia de riego utilizada, el modelo ofrece tres opciones al usuario: riego completo (RC), riego deficitario sostenido (RDS) y riego deficitario controlado (RDC). El RC programa el evento de riego cubriendo el total de las necesidades que tiene el cultivo. El RDS distribuye equitativamente un porcentaje de las necesidades a lo largo de la campaña de riego. Por último, la estrategia de RDC también aplica un porcentaje del total de las necesidades teóricas, pero en este caso, el porcentaje es variable a lo largo de la campaña. Esta variabilidad se debe a que esta estrategia se adapta al ciclo fenológico del cultivo, concentrando la mayor aplicación de agua en las fases en las que el olivo es más sensible al estrés hídrico, con el objetivo de minimizar los impactos en el desarrollo del árbol, rendimiento y calidad del aceite. Estos porcentajes se seleccionaron siguiendo los criterios establecidos por Rallo y Cuevas [24] y Orgaz *et al.* [25]. Para el caso particular de Andalucía, debido a los problemas asociados a la escasez de agua y a la extensión e importancia del cultivo de olivar, la estrategia recomendada es la de RDC [26, 27].

Además de las necesidades teóricas del cultivo y la estrategia de riego, para la programación de los eventos de riego, se tiene en cuenta el contenido de humedad en el suelo. Para ello, se determina el Balance de Agua en el Suelo (BAS) cuyo valor se reajusta semanalmente en el caso de disponer de sondas de humedad instaladas en campo, como es el caso de la finca de estudio. El BAS se calcula de forma diaria según la (2):

$$BAS_d = BAS_{d-1} + P_{eff,d} + I_{ap,d} - ET_{c,adj,d} - R_d - D_d \quad (2)$$

donde d es un índice relativo al día, BAS_{d-1} es el contenido de agua en el día anterior, $I_{ap,d}$, el riego aplicado (mm), $ET_{c,adj,d}$ la evapotranspiración del cultivo ajustada (mm), R_d la escorrentía (mm) y D_d la percolación profunda (mm). R_d y D_d son considerados nulos en este caso, ya que se trata de riego por goteo.

La $ET_{c,adj}$ se relaciona con la dificultad del cultivo de extraer el agua en el caso de que el contenido de humedad en el suelo sea bajo. El valor de esta variable se calcula mediante la (3):

$$ET_{c,adj} = ET_c \cdot \frac{ATD - D_r}{ATD - AFA} \quad (3)$$

donde ATD es el agua total disponible del suelo (mm), D_r, el agotamiento en la zona radicular (mm), calculado como la diferencia entre ATD y BAS_{d-1}, y AFA es el agua fácilmente aprovechable en el suelo (mm).

Como salida, el modelo proporciona el tiempo de riego t (h) según la (4):

$$t = \frac{H_r \cdot A_s \cdot 10^4}{IE \cdot \sum_{i=1}^{e} q_e \cdot n_e} \quad (4)$$

donde H_r son los requerimientos de riego (mm), A_s es el área del sector (ha), *IE* la eficiencia de riego, que en este caso se considera 0,90, q_e el caudal del gotero (L/h) y n_e el número de goteros del sector. Se instaló una sonda de humedad en la finca para corregir periódicamente las estimaciones de humedad basadas en el balance hídrico.

2.3.5. Programación de la fertilización

La programación de la fertilización se fundamenta, en primer lugar, en el establecimiento de un plan anual basado en la evaluación del estado nutritivo del árbol. Esta evaluación se lleva a cabo mediante la realización de análisis foliares [28]. La toma de muestras se lleva a cabo en el mes de julio del año previo ya que es el momento en el que la concentración de los elementos en hoja es estable y es para el periodo para el cual están establecidos los niveles críticos de nutrientes en hoja [29] (Tabla 2). La comparación de los resultados obtenidos de los análisis foliares con dichos niveles críticos es lo que proporciona información sobre el exceso o carencia de nutrientes en el árbol. La aplicación de fertilizante solo se aplicará en el caso de que exista deficiencia de algún elemento ya que, tal y como demostraron Fernández-Escobar et al. [5], la aplicación de fertilizante en caso contrario puede ocasionar problemas de contaminación y pérdida económica sin aumentar la productividad. En segundo lugar, y de forma complementaria y opcional, la programación de la fertilización tiene en cuenta la evaluación de la cantidad de nutrientes presentes en el suelo para comprobar si esta es suficiente para cubrir las necesidades de fertilización del olivar y diagnosticar toxicidades [30].

Tabla 2. Interpretación de los niveles de nutrientes en hoja de olivo recogidas en julio, expresados en porcentaje de materia seca

Elemento	Deficiente	Adecuado	Tóxico
Nitrógeno (N) (%)	1,2	1,3 – 1,7	> 1,7
Fósforo (P) (%)	0,05	0,1 – 0,3	-
Potasio (K) (%)	0,4	> 0,8	-

En caso de detección de deficiencia en algún elemento, se establece la cantidad del nutriente a aportar en función de una estimación del consumo del árbol de dicho elemento [31]. Al año siguiente se vuelve a realizar el análisis foliar y se comprueba si es necesario aumentar o disminuir dicha dosis. En el caso del N, si su nivel en hoja es menor de 1,3% se aplican 0,5 kg/árbol de N, sin superar los 100 kg/ha. En el caso del K, cuando el valor sea inferior o igual a 0,7% en hoja, se aplicará 1 kg/árbol. Por último, en el caso del P, el valor inicial de aplicación será de 0,5 kg/árbol, en el caso de que su contenido en hoja sea inferior a 0,1%. La aplicación se hace en la fase central del riego ya que su eficacia es mayor y además evita que queden restos en los goteros a final de campaña.

Una vez establecido el plan anual de fertilización, es necesario considerar la calidad de agua aplicada, ya que, si se tiene en cuenta que los casos que aborda este trabajo son árboles regados con aguas regeneradas, es posible que se estén aportando algunos nutrientes a través del riego. La cantidad de fertilizante final a aportar será la diferencia entre la programada inicialmente en el plan anual y la cantidad de nutrientes presentes en el agua. Por último, la distribución de nutrientes se ajusta a la programación del riego realizada previamente y se ajusta la dosis de forma que la concentración de fertilizante nunca sea mayor a 0,7 l/m^3.

2.4. Aplicación

El trabajo contempla la implementación del modelo descrito previamente en una aplicación de escritorio y para dispositivos móviles. En primer lugar, la aplicación de escritorio se ha

desarrollado en el entorno gráfico para desarrollo de interfaces que MATLAB™ pone a disposición de sus usuarios, App Designer, de la versión R2018a de MATLAB. Posteriormente, para hacer la aplicación independiente y disponible para todos los usuarios, se ha llevado a cabo la compilación de la aplicación por medio de MATLAB Compiler™ con MATLAB Runtime 9.4. En cuanto a la aplicación móvil, en la actualidad se encuentra en desarrollo en Android Studio 3.3.2, el entorno de desarrollo integrado (IDE) oficial de Google para el desarrollo de aplicaciones con Sistema Operativo Android, para nivel 21 de API mínimo, que abarca más del 90 % de los dispositivos Android actuales. Estas aplicaciones se han probado y calibrado con datos de la campaña 2018 y, con las mejoras introducidas, se usarán durante la campaña de riego de 2019 en la Comunidad de Regantes Tintín (Montilla).

3. Resultados y discusión

3.1. Evaluación situación de partida

Los resultados relativos al análisis de suelo, a los análisis foliares y a los análisis de calidad de agua se observan en las Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5.

Tabla 3. Análisis de suelo realizados en septiembre de 2018 en la finca de estudio, localizada en la CR Tintín (Montilla)

Nombre muestra	Espesor (cm)	Textura			P (mg/Kg)	K (mg/Kg)
		Arcilla	Limo	Arena		
A1P1	0 – 15	37,8	26,7	35,3	14,1	563
A1P2	15 – 30	38,1	28,0	33,9	7,7	454
A2P1	0 – 15	33,8	23,3	42,0	9,9	454
A2P2	15 – 30	37,4	20,0	42,7	5,8	317
C1P1	0 – 15	37,0	28,0	34,4	23,6	872
C1P2	15 – 30	34,2	28,6	36,1	25,7	794
C2P1	0 – 15	32,0	23,4	43,5	22,8	978
C2P2	15 – 30	36,1	21,2	42,1	27,0	598

En primer lugar, del análisis de las texturas mediante el triángulo textural del USDA, se obtuvo que el suelo en todas sus muestras se corresponde con el tipo franco-arcilloso y mediante el modelo ROSETTA [32] se obtuvieron las curvas de retención de humedad del suelo. De estas curvas se determinó que el valor de capacidad de campo (CC) para el suelo es de 0.41 cm^3/cm^3 y el punto de marchitez permanente (PMP) de 0.20 cm^3/cm^3. Por último, en cuanto al contenido de macronutrientes, la cantidad de P en las calles es alta, mientras que en los árboles es menor, pero aun así se encuentra en un rango en el que es poco probable la respuesta al abonado, especialmente para el caso del olivo, ya que la importancia de este macronutriente es inferior que para otros cultivos anuales, debido a sus bajas extracciones y a su facilidad de reutilización [31]. Además, se ha demostrado que un alto contenido en fósforo (P) puede ocasionar bloqueos de Cinc en el suelo, pudiendo provocar deficiencias de este en el olivo. Por último, en cuanto al contenido de potasio (K) en el suelo, también se observan valores altos para todas las muestras, por lo que al igual que el caso del P, la respuesta al abonado es poco probable. Lo niveles de nitrógeno (N) en suelo no se han analizado debido a la elevada movilidad a corto plazo de dicho elemento.

Tabla 4. Análisis foliares de olivar realizados en julio 2018 en la finca de estudio

Elemento	N (g/100g)	P (g/100g)	K (g/100g)
'Hojiblanca'	2,02	0,11	0,92
'Nevadillo azul'	1,35	0,13	0,88

Como se puede observar, los niveles de nutrientes en hoja en todos los casos se encuentran en el rango recomendado, excepto en el caso del N en la variedad 'Hojiblanca', que se encuentra en el rango de toxicidad. Numerosos estudios afirman que un exceso de nitrógeno en olivar puede ocasionar importantes perjuicios, tales como disminución de la calidad del aceite [33, 34], mayor sensibilidad a las heladas [35] o retraso en la maduración del fruto, lo que suele relacionarse con una disminución del rendimiento graso [36], además de problemas de contaminación en el suelo por lixiviación [5].

Tabla 5. Análisis de calidad del agua realizados en la finca de estudio

Fecha	pH	C.E. (µS/cm)	SST (mg/l)	N total (mg/l)	P total (mg/l)	E. coli (UFC/100ml)
21-ago-18	9	1,147	< 10	4,8	2	110
25-sep-18	8,2	1,421	< 10	4	1,4	90

Finalmente, en cuanto a la calidad del agua, se puede observar que el pH es también alcalino, lo cual es necesario considerar para la elección del tipo de fertilizante. La conductividad eléctrica no es elevada, por lo que el riesgo de salinidad se considera bajo (Troncoso et al., 2017). El resto de los parámetros se encuentran en el umbral establecido por la legislación.

3.2. Programación de fertirriego de precisión

La programación del fertirriego se ha aplicado a los datos disponibles de 2018, cuyos resultados se observan en la Figura 2. En esta figura, no hay información referente a la cantidad de fertilizante a aplicar en la campaña de riego debido a que, para el caso de estudio que se aborda, no es necesaria la aplicación adicional de ningún fertilizante, ya que el cultivo no presenta ninguna deficiencia nutricional y es suficiente con los nutrientes que ya de por sí incorporan las aguas regeneradas.

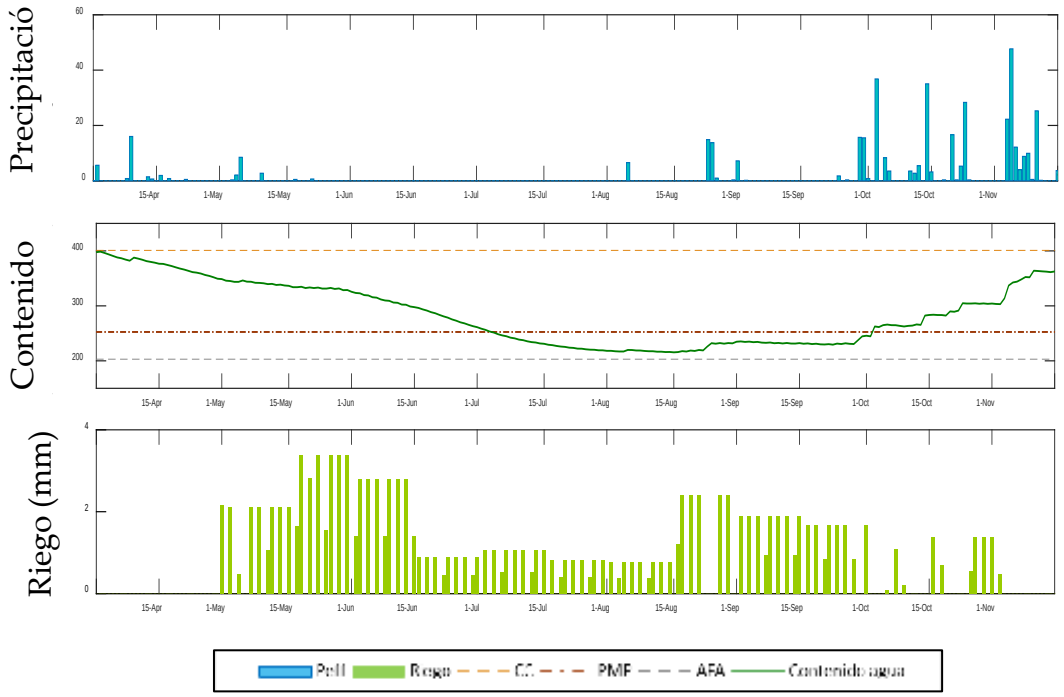


Figura 2. Distribución de la programación de riego propuesta, contenido de humedad en el suelo y precipitación efectiva a lo largo de la campaña de riego de 2018

El modelo ofrece una programación del riego que distribuye la dotación concedida aplicando un total de 1.490 m^3/ha. Los momentos en los que se concentra el riego son mayo, junio y septiembre, momentos especialmente críticos al estrés hídrico [24, 38], concentrándose el déficit en los meses de verano. En agosto y hasta mediados de octubre, el contenido de agua en el suelo es inferior al contenido de agua fácilmente aprovechable, por lo que el cultivo tendrá mayor dificultad para extraer el agua del suelo.

3.3. Aplicación informática

El modelo se implementó en una aplicación informática. La Figura 3 muestra la interfaz gráfica de la versión para PC.

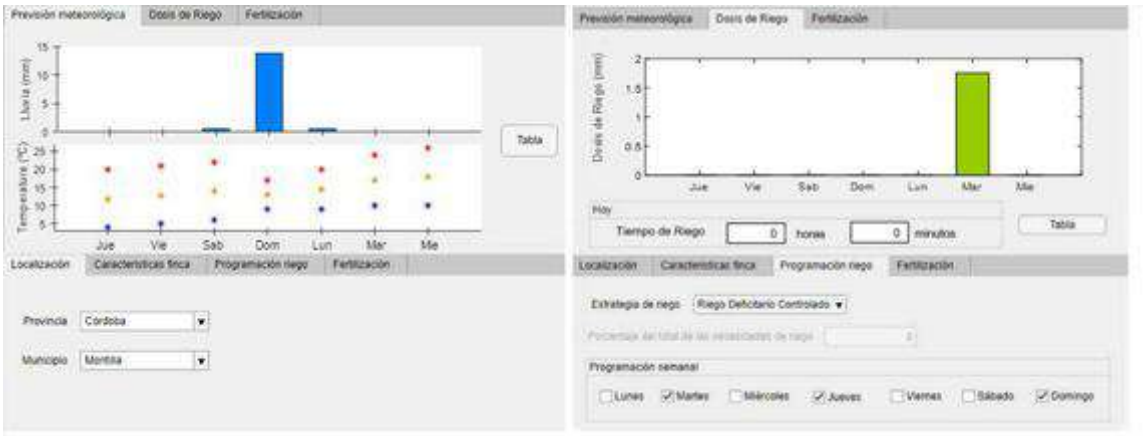


Figura 3. Interfaz gráfica de la aplicación de escritorio para la predicción de la programación para la semana del 28/03/2019 al 03/04/2019

En la aplicación informática el usuario debe introducir los datos mencionados anteriormente. Esto se realiza en la parte inferior de la interfaz, la cual se divide en cuatro pestañas: localización, características finca, programación riego y fertilización. En la parte superior aparecen gráficas de la predicción semanal de clima, riego y fertilización para la semana del 28/03/2019 al 03/04/2019. En este caso, pese a existir precipitación los días previos y debido a la escasez de agua en los meses anteriores, se recomendó realizar una aplicación de riego el martes 02/04. En cuanto a la fertilización, al no existir deficiencias nutricionales es recomendable no aplicar ningún fertilizante en esta campaña.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado una aplicación de fácil manejo, *FertigOlive*, que permite la programación de un fertirriego de precisión empleando aguas regeneradas. *FertigOlive* se validó durante la campaña 2018 en una parcela de olivar mostrando que, gracias a los nutrientes incorporados en el agua de riego, no era necesaria ninguna aportación adicional de fertilizante, lo que conlleva una reducción tanto de los costes de producción como del impacto ambiental de la actividad.

La aplicación de *FertigOlive* muestra que el riego con aguas regeneradas es una alternativa sostenible y rentable para el riego de olivar en Andalucía, pues pone de manifiesto que el uso de este tipo de aguas permite el ahorro de fertilizante, lo que implica importantes beneficios económicos, ambientales y sociales.

5. Agradecimientos

Este trabajo forma parte del Grupo Operativo REUTIVAR, proyecto de innovación cofinanciado por la Junta de Andalucía y la Unión Europea a través del FEADER 2014-2020, en el marco de las ayudas de la *Línea Olivar* para el funcionamiento de grupos operativos de la Asociación Europea de Innovación (AEI) en materia de productividad y sostenibilidad agrícola.

Referencias

1. INE, I.N. Encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario 2018.
2. Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., et al. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Clim. Change* 2007, 81, 71-95.
3. Bisselink, B., Bernhard, J., Gelati, E., Adamovic, M., Guenther, S., Mentaschi, L., De Roo, A. *Impact of a changing climate, land use, and water usage on Europe's water resources: A model simulation study*, 2018, ISBN 9789279802874.
4. CHG - Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (Spanish Government) Plan Hidrológico de la demarcación hidrográfica del Guadalquivir. Ciclo de planificación hidrológica 2015-2021. 2016, 2015-2021.
5. Fernández-Escobar, R., Marin, L., Sánchez-Zamora, M.A., García-Novelo, J.M., Molina-Soria, C., Parra, M.A. Long-term effects of N fertilization on cropping and growth of olive trees and on N accumulation in soil profile. *Eur. J. Agron.* 2009, 31, 223-232.
6. Trinh, L.T., Vu, G.N.H., Van Der Steen, P., Lens, P.N.L. Climate Change Adaptation Indicators to Assess Wastewater Management and Reuse Options in the Mekong Delta, Vietnam. *Water Resour. Manag.* 2013, 27, 1175-1191.
7. Gobierno de España *Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas*, Spain, 2007,
8. European Commission *Proposal for a regulation of the european parliment and of the council on minimum requirements for water resuse*, 2018,
9. Petousi, I., Fountoulakis, M.S., Saru, M.L., Nikolaidis, N., Fletcher, L., Stentiford, E.I., Manios, T. Effects of reclaimed wastewater irrigation on olive (Olea europaea L. cv. 'Koroneiki') trees. *Agric. Water Manag.* 2015, 160, 33-40.
10. Segal, E., Dag, A., Ben-Gal, A., Zipori, I., Erel, R., Suryano, S., Yermiyahu, U. Olive orchard irrigation with reclaimed wastewater: Agronomic and environmental considerations. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2011, 140, 454-461.
11. Ayoub, S., Al-Shdiefat, S., Rawashdeh, H., Bashabsheh, I. Utilization of reclaimed wastewater for olive irrigation: Effect on soil properties, tree growth, yield and oil content. *Agric. Water Manag.* 2016, 176, 163-169.
12. Bedbabis, S., Ferrara, G., Ben Rouina, B., Boukhris, M. Effects of irrigation with treated wastewater on olive tree growth, yield and leaf mineral elements at short term. *Sci. Hortic. (Amsterdam).* 2010, 126, 345-350.
13. Bourazanis, G., Roussos, P.A., Argyrokastritis, I., Kosmas, C., Kerkides, P. Evaluation of the use of treated municipal waste water on the yield, oil quality, free fatty acids' profile and nutrient levels in olive trees cv Koroneiki, in Greece. *Agric. Water Manag.* 2016, 163, 1-8.
14. Bueno-Delgado, M. V., Melenchon-Ibarra, A., Molina-Martinez, J.M. Software application for real-time ETo/ETc calculation through mobile devices. *Precis. Agric.* 2017, *18*, 1024-1037.
15. Pagán, F.J., Ferrández-Villena, M., Fernández-Pacheco, D.G., Rosillo, J.J., Molina-Martínez, J.M. Optifer: An application to optimize fertiliser costs in fertigation. *Agric. Water Manag.* 2015, 151, 19-29.
16. Pérez-Castro, A., Sánchez-Molina, J.A., Castilla, M., Sánchez-Moreno, J., Moreno-Úbeda, J.C., Magán, J.J. cFertigUAL: A fertigation management app for greenhouse vegetable crops. *Agric. Water Manag.* 2017, 183, 186-193.

17. González Perea, R., Fernández García, I., Martin Arroyo, M., Rodríguez Díaz, J.A., Camacho Poyato, E., Montesinos, P. Multiplatform application for precision irrigation scheduling in strawberries. *Agric. Water Manag.* 2017, 183, 194-201.
18. Mérida García, A., Fernández García, I., Camacho Poyato, E., Montesinos Barrios, P., Rodríguez Díaz, J.A. Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system. *J. Clean. Prod.* 2018, 175, 670-682.
19. Pratap, R. *Getting started with Matlab. A quick introduction for scientist and engineers*, Oxford University Press, Ed., 7th ed., 2017,
20. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) AEMET OpenData.
21. Allen, R.G. FAO Irrigation and Drainage Paper Crop by. *Irrig. Drain.* 1998, 300, 300.
22. Doorenbos, J., Pruit, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrig. Drain.* 1977, 24.
23. Orgaz, F., Fereres, E. El Riego. En *El Cultivo del Olivo*, Junta de Andalucía, Ediciones Mundiprensa, Eds., Madrid, 2001, pp. 285-306.
24. Rallo, L., Cuevas, J. Fructificación y producción. En *El Cultivo del Olivo*, 2017, pp. 145-186.
25. Orgaz, F., Fereres, E., Testi, L. El Riego. En *El Cultivo del Olivo*, 2017, pp. 461-490.
26. Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M., Fereres, E. Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 2003, 128, 425-431.
27. Padilla-Díaz, C.M., Rodriguez-Dominguez, C.M., Hernandez-Santana, V., Perez-Martin, A., Fernández, J.E. Scheduling regulated deficit irrigation in a hedgerow olive orchard from leaf turgor pressure related measurements. *Agric. Water Manag.* 2016, 164, 28-37.
28. Fernández-Escobar, R., Parra, M.A., Navarro, C., Arquero, O. Foliar diagnosis as a guide to olive fertilization. *Spanish J. Agric. Res.* 2009, *7*, 212-223.
29. Fernández-Escobar, R. Trends in olive nutrition. *Acta Hortic.* 2018, 1199, 215-223.
30. Parra, M.A. Suelo. En *El Cultivo del Olivo*, 2017, pp. 251-287.
31. Fernández-Escobar, R. Fertilización. En *El Cultivo del Olivo*, 2017, pp. 419-460.
32. Schaap, M.G. ROSETTA model. *J. Hydrol.* 1999, 251, 0-3.
33. Erel, R., Kerem, Z., Ben-Gal, A., Dag, A., Schwartz, A., Zipori, I., Basheer, L., Yermiyahu, U. Olive (Olea europaea L.) tree nitrogen status is a key factor for olive oil quality. *J. Agric. Food Chem.* 2013, 61, 11261-11272.
34. Fernández-Escobar, R., Beltrán, G., Sánchez-Zamora, M.A., García-Novelo, J., Aguilera, M.P., Uceda, M. Olive oil quality decreases with nitrogen over-fertilization. *HortScience* 2006, 41, 215-219.
35. Fernández-Escobar, R., Navarro, S., Melgar, J.C. Effect of Nitrogen Status on Frost Tolerance of Olive Trees. *Acta Hortic.* 2011, 41-45.
36. Fernández-Escobar, R., Antonaya-Baena, M.F., Sánchez-Zamora, M.A., Molina-Soria, C. The amount of nitrogen applied and nutritional status of olive plants affect nitrogen uptake efficiency. *Sci. Hortic. (Amsterdam).* 2014, 167, 1-4.
37. Troncoso, A., Magán, J.J., Cantos, M., Liñan, J., Fernández, J.E. Fertirrigación. En *El Cultivo del Olivo*, 2017, pp. 491-517.
38. García, J.M., Cuevas, M. V., Fernández, J.E. Production and oil quality in «Arbequina» olive (Olea europaea, L.) trees under two deficit irrigation strategies. *Irrig. Sci.* 2013, 31, 359-370.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Concentración, distribución y procedencia de metales y metaloides en suelos bajo diferentes sistemas de cultivo

J.A. Acosta[1], M. Gabarrón[1], A. Faz[1], M.D. Gómez-López[1], R. Zornoza[1], S. Martínez-Martínez[1]

[1] Universidad Politécnica de Cartagena. Área de Ingeniería Agroforestal (Departamento de Ingeniería Agronómica). Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena (Murcia); ja.acosta@upct.es

Resumen: El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de cuatro tipos de cultivo en la acumulación y especiación de metales en suelos, e identificar su procedencia. Se tomaron 40 muestras de suelo de cereales, frutales, cítricos y hortícolas, y se analizaron Cd, Co, Cr, Cu, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, As y su especiación química. Los resultados mostraron que los suelos de cítricos y hortícolas estaban enriquecidos con Pb y Cd, los de cereales con Pb y los de frutales con Zn, destacando que todos estaban enriquecidos con Cu, especialmente los suelos de cítricos. Los suelos de cereales tienen un mayor riesgo debido a la alta movilidad de Cd, mientras que en los de hortícolas el mayor riesgo fue causado por la movilidad de Pb. En los suelos de cereales, Pb, Cu y Cd tenían origen antrópico, mientras que el resto tenía un origen geológico. En cítricos, Cd, Pb, Zn y Cu tenían un origen antropogénico, y el resto geogénico. En cítricos, As, Pb, Zn, Cu, Mn y Cd tenían un origen antropogénico mientras que Fe y Cr tenían un origen geogénico. Los suelos hortícolas, Cu, Mn, Pb, and Zn tendrían un origen antropogénico mientras que el resto tendrían un origen geogénico. Por lo tanto, se puede concluir que la producción agrícola intensiva enriquece los suelos por metales de acuerdo con el tipo de cultivo.

Palabras clave: especiación química, metales pesados, análisis multivariante, sistema de cultivo

1. Introducción

Los metales que pueden hallarse en suelos agrícolas proceden tanto de fuentes geológicas como antropogénicas. Cuando la concentración de estos elementos supera la capacidad de amortiguación del suelo, pueden producirse efectos potencialmente perjudiciales para la salud y el medio ambiente [1]. De este modo, la agricultura intensiva puede contribuir al enriquecimiento de metales en suelos, con el consiguiente riesgo de contaminación [2].

Se ha demostrado que las prácticas agrícolas intensivas causan a largo plazo el enriquecimiento de metales, particularmente Zn, Cu y Cd, debido a la aplicación incontrolada de fertilizantes inorgánicos, pesticidas y enmiendas orgánicas [3]. Aunque muchos metales son micronutrientes esenciales (p.e. Zn, Cu, Mn, etc.), una concentración excesiva puede tener un efecto negativo en la calidad de los productos agrícolas [4]. De este modo, la identificación de las fuentes de contaminación y la evaluación del comportamiento de los metales en el suelo son factores clave para alcanzar un manejo eficiente del mismo [5]. De esta manera, muchos autores han utilizado el análisis multivariante como método para la identificación de las fuentes de metales en suelos agrícolas [6, 7, 8, 9], así como la especiación química para evaluar el comportamiento de los metales en los suelos, lo cual está estrechamente relacionado con su movilidad y biodisponibilidad. En este sentido, los procedimientos de extracción secuencial

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3437

proporcionan información tanto sobre la identificación de los principales lugares de unión, como la fuerza de la unión entre el metal y los distintos constituyentes del suelo. Los metales unidos a las fases lábiles del suelo (es decir, intercambiables o unidos a carbonatos) son más propensos a ser absorbidos por las plantas y transferidos a la cadena trófica que aquellos unidos principalmente a la matriz mineral del suelo [10].

A pesar de la gran cantidad de información existente sobre la concentración de metales en los suelos, las investigaciones sobre la influencia del sistema de cultivo en la acumulación y especiación de metales en los suelos agrícolas siguen siendo limitadas. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue dilucidar la influencia del sistema de cultivo en la acumulación y especiación de los metales en los suelos, e identificar la fuente de cada metal en cada tipo de cultivo estudiado.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio y toma de muestras

La Región de Murcia se caracteriza por una agricultura intensiva, cubriendo más del 50% de la superficie total de la Región, siendo uno de los principales impulsores económicos de la zona. La agricultura regional incluye explotaciones hortícolas intensivas ubicadas principalmente en el Campo de Cartagena, cultivos frutales y cítricos ubicados en la cuenca del río Segura y alrededores, y cultivos de cereales ubicados en la zona norte de la Región. Por lo tanto, se seleccionaron cuatro áreas agrícolas de diferentes municipios dentro de la Región de Murcia según el sistema de cultivo predominante: cereales (CER), frutales (FRU), cítricos (CIT) y hortícolas (HOR) (Figura 1).

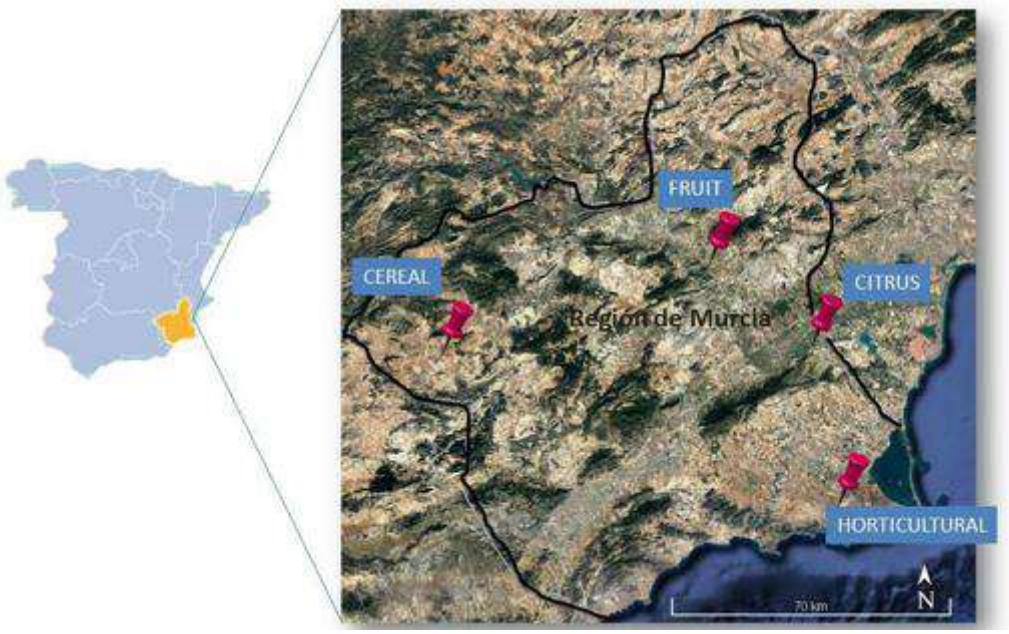


Figura 1. Localización de la zona de estudio

Se tomaron aleatoriamente cuarenta muestras de suelo (10 por cada tipo de sistema de cultivo) y 5 muestras de suelo natural cerca de cada cultivo (CER-UND, FRU-UND, CIT-HOR-UND). Cada muestra estuvo compuesta por 5 sub-muestras de 0-30 cm de profundidad.

2.2. Metodología analítica

Las muestras de suelo se secaron a 40ºC durante 48 h y se pasaron por un tamiz de 2 mm de diámetro de luz. Una fracción de cada muestra se molió utilizando un mortero de ágata

(RetschRM 100). El pH se determinó en una suspensión de suelo/agua 1:1 [11], mientras que la conductividad eléctrica (EC) se determinó en una suspensión de suelo/agua 1: 5 [12]. El contenido en carbonatos se determinó utilizando el calcímetro de Bernard, mientras que el carbono orgánico fue determinado usando el método de oxidación por dicromato [11]. Por su parte, la textura del suelo se determinó utilizando un analizador de tamaño de partícula por difracción láser (Mastersizer 2000).

Para determinar las concentraciones totales de metales (Cd, Co, Cr, Cu, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn) y arsénico (As) las muestras se digirieron utilizando una solución nítrico-perclórico [13]. Las concentraciones de metales y arsénico se determinaron por ICP-OES / MS (Agilent 7500CE).

La especiación química de metales en el suelo se determinó mediante un procedimiento de extracción secuencial [14]. Se obtuvieron las siguientes fracciones: F1- intercambiables; F2-unidos a carbonatos; F3-fase reductora (unidos a óxidos de Fe / Mn); F4-fase oxidable (unida a materia orgánica y sulfuros) y F5-fase residual.

2.3. Análisis estadístico

Se realizó un análisis ANOVA, post hoc de Tukey (p-value <0.05) para identificar las diferencias entre el tipo de sistema de cultivo tanto para las propiedades edáficas como para el contenido de metales en los suelos estudiados. Con el fin de identificar las fuentes potenciales de cada metal, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA). Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando SPSS 23 para Windows.

3. Resultados y discusión

3.1. Efecto del sistema de cultivo en las propiedades del suelo y en el contenido de metales

Los suelos agrícolas estudiados fueron no salinos y moderadamente alcalinos debido al alto porcentaje de carbonatos (> 35%). La mayoría de los suelos estudiados mostraron un bajo contenido de carbono orgánico como consecuencia de la agricultura intensiva y la rápida mineralización de la materia orgánica en condiciones semiáridas [15], excepto los suelos CER-UND (> 2%). La textura de los suelos CER y CER-UND, CIT-HORT-UND y HOR era franco limosa, mientras que los suelos FRU y FRU-UND tenían una textura franca y franca arenosa respectivamente, mientras que la textura de los suelos CIT era limosa (Tabla 1).

Las concentraciones medias totales de metales y arsénico (Tabla 1) disminuyeron de la forma siguiente: Fe> Mn> Cu> Zn> Cr> Pb> Ni> As> Co> Cd en suelos de cereales, frutales y cítricos, tanto en suelos agrícolas como en los naturales. Por el contrario, la acumulación de metales en el suelo hortícola fue Fe> Mn> Zn> Pb> Cu> Cr> Ni> As> Co> Cd. Las concentraciones de fondo de metales en suelos de la Región de Murcia [16] fueron utilizaron para evaluar el enriquecimiento de cada metal en los suelos estudiados. De este modo, las concentraciones de Cu en los suelos CER, CER-UND, FRU, FRUT-UND superaron su valor de referencia (50 mg kg-1) así como para Pb en los suelos CER y CER-UND (26 mg kg-1). Por su parte, en los suelos hortícolas, Cd, Cu, Pb y Zn superaron sus concentraciones de referencia (0,6, 23, 43 y 96 mg kg-1, respectivamente). De igual modo, el sistema de cultivo de cítricos presentó una alta concentración de Pb y Cu tanto en suelos naturales como en los cultivados.

Tabla 1. Propiedades de suelo y concentración de metales

	Cereales	Natural-cereales	Frutales	Natural-frutales	Cítricos	Natural cítricos/hortícola	Hortícola
pH	8.3 (0.02)a**	8.0 (0.04)a	8.1 (0.05)a	8.5 (0.10)b	8.5 (0.03)b	8.21 (0.04)a	8.1 (0.06)a
CE*(dS/m)	0.18 (0.01)a	0.24 (0.01)b	2.1 (0.48)d	0.17 (0.01)a	0.39 (0.04)c	0.44 (0.05)cd	1.2 (0.20)d
$CaCO_3$ (%)	36 (3.4)a	37 (1.7)a	57 (2.5)b	51 (1.9)b	39 (0.31)a	39 (0.22)a	32 (0.82)a
C.O.* (%)	1.4 (0.09)ab	4.0 (0.24)c	0.97 (0.17)a	1.4 (0.18)ab	1.5 (0.07)ab	1.8 (0.05)b	0.97 (0.07)a
Clay (%)	16 (1.0)c	5.8 (0.51)a	7.2 (0.55)a	4.7 (0.31)a	11 (0.34)b	13 (0.40)bc	15 (0.47)c
Silt (%)	68 (2.2)c	50 (2.8)b	44 (2.8)ab	37 (3.0)a	81 (1.1)d	76 (1.9)cd	69 (1.5)c
Sand (%)	16 (3.0)a	44 (3.3)b	49 (3.3)bc	58 (3.3)c	8.3 (1.1)a	11 (1.6)a	16 (1.4)a
Total Pb	29 (1.2)c	36 (1.6)d	18 (0.72)a	18 (1.0)a	23 (0.84)b	22 (0.87)b	98 (9.6)d
Total Zn	62 (1.3)bc	61 (3.0)bc	54 (2.7)b	40 (2.1)a	83 (5.5)ab	74 (4.5)a	102 (2.6)d
Total Cu	120 (10)bc	106 (7.1)abc	144 (6.5)c	130 (25)c	141 (10)c	83 (0.80)a	86 (2.1)ab
Total Cd	0.49 (0.04)ab	0.46 (0.02)ab	0.36 (0.02)a	0.39 (0.02)ab	0.52 (0.04)b	0.89 (0.08)c	0.84 (0.05)c
Total Cr	37 (2.0)b	30 (4.3)b	28 (1.96)ab	18 (1.4)a	33.7 (1.8)b	33 (1.3)b	28 (2.2)ab
Total Co	8.2 (0.28)d	6.3 (0.21)c	4.0 (0.15)b	2.8 (0.11)a	7.2 (0.16)cd	6.7 (0.09)c	7.7 (0.23)d
Total Ni	24 (2.9)d	16 (0.72)c	12 (0.35)b	9.5 (0.42)a	22 (0.50)d	32 (8.0)d	23 (0.73)d
Total Fe	26005 (1218)b	26018 (2136)b	17774 (362)a	17298 (538)a	27134 (1226)b	26503 (1264)b	28070 (1026)b
Total Mn	412 (20)c	310 (12)b	167 (6.6)a	148 (9.7)a	334 (12)b	308 (2.6)b	369 (16)bc
Total As	12 (0.34)ab	12 (0.30)ab	12 (0.25)ab	11 (0.36)a	14 (0.40)c	13 (0.17)bc	12 (0.38)ab

*CE: conductividad eléctrica; C.O.: carbono orgánico. Todos los metales expresados en mg kg-1.

**diferentes letras indican diferencias significativas ($p<0.05$).

Se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas de cultivo y sus suelos naturales para Co y Ni en cereales, frutales y zonas hortícolas, siendo las concentraciones de metales en suelos de cultivos más altas que en suelos natuales, aunque sus concentraciones se encontraban por debajo del nivel de referencia [16]. Se observó una mayor concentración de Pb en los suelos CER-UND que en el sistema de cultivo CER, lo que podría deberse a la deposición atmosférica de partículas enriquecidas por Pb provenientes de caminos cercanos [15].

También se observaron diferencias significativas para Pb en el sistema de cultivo hortícola, donde los suelos HOR mostraron las concentraciones más altas. Además, los suelos de cultivos frutales y hortícolas mostraron enriquecimiento en Zn, mostrando diferencias estadísticamente significativas con sus suelos naturales correspondientes. De manera similar, se observaron diferencias significativas para el Cu en los suelos de cítricos cuya concentración fue dos veces superior que en los suelos naturales.

3.2. Efecto del sistema de cultivo en la especiación química de cada metal

La Figura 2 muestra la distribución química de metales y arsénico en los suelos cultivados y en los suelos naturales. La fracción residual fue dominante para Zn, Cr, Cu, Fe y As en todos los cultivos estudiados y en sus suelos naturales. La distribución de Cd y Mn estaba asociada principalmente por la fracción reducible y unida a carbonatos en todos los suelos. Por lo tanto, la acidificación del suelo del cultivo podría resultar en la liberación de Cd y Mn en los mismos. Destacar que en el suelo de cereales, la fracción intercambiable presenta un porcentaje muy significativo, alcanzando el 10% de Cd unido a esta fracción. Esta alta solubilidad de Cd en suelos de cereales puede ser debida a la adición de enmiendas orgánicas o fertilizantes fosfatados donde el Cd podría ser aportado.

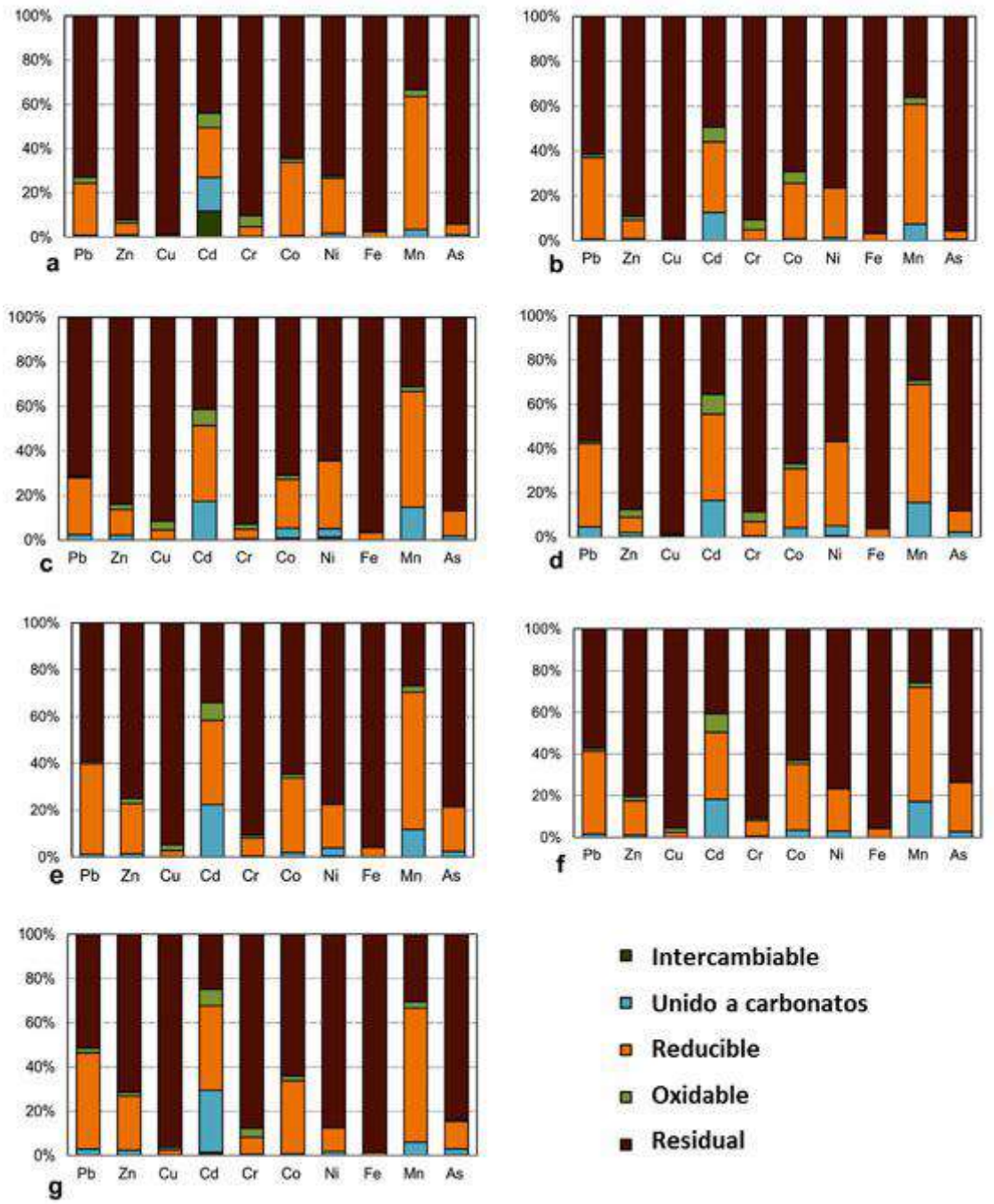


Figura 2. Distribución de metales en suelos de cereales (a), natural-cereales (b), frutales (c), natural-frutales (d), cítricos (e), naturales cítricos y hortícolas (f) y hortícolas (g).

Los suelos de cítricos, hortícolas, UND-CER, UND-FRU y CIT-HOR-UND mostraron alrededor del 40% de Pb unido a la fracción reducible, seguido por la oxidable y unido a carbonatos. Alrededor del 20% de Zn también se limitó a la fracción reducible en los suelos de cítricos, hortícolas y CIT-HOR-UND, siendo ligeramente más biodisponible para la absorción de plantas que en los otros suelos estudiados. En suelos de frutales y FRU-UND, el Ni unido a la fase reducible alcanzó el 40%, lo que indica que en estos suelos el Ni generalmente se encuentra adsorbido en los óxidos de Fe y Mn [17]. A pesar de la alta concentración de Cu encontrada tanto en los suelos agrícolas como en los suelos naturales, su movilidad fue baja debido a la presencia de materia orgánica y al alto contenido de carbonatos [18].

3.3. Identificación de la fuente de los metales en los suelos

Para identificar las fuentes de metales y arsénico en los suelos agrícolas, se realizó un análisis de componentes principales (PCA), cuyos resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Matriz del análisis de principales componentes en los cultivos estudiados

	CEREALES					FRUTALES					CITRICOS					HORTICOLAS				
	PC1	PC2	PC3	PC4	COM*	PC1	PC2	PC3	PC4	COM	PC1	PC2	PC3	PC4	COM	PC1	PC2	PC3	COM
Total Pb	-0,87	0,08	0,34	-0,20	0,922	-0,40	0,53	-0,50	-0,41	0,863	0,75	0,08	-0,31	0,48	0,895	0,92	0,15	-0,01	0,863
Total Zn	0,13	0,81	-0,26	0,21	0,793	0,08	0,93	-0,06	0,21	0,918	0,85	0,03	-0,09	0,36	0,855	0,86	-0,14	0,29	0,846
Total Cu	0,13	0,11	-0,09	0,68	0,502	-0,12	0,05	0,96	-0,02	0,946	0,02	0,47	-0,75	0,30	0,876	0,73	0,54	0,24	0,882
Total Cd	-0,08	0,10	0,64	0,58	0,764	-0,06	0,04	-0,54	-0,55	0,59	-0,04	-0,95	0,25	0,00	0,956	-0,22	-0,68	0,42	0,691
Total Cr	0,06	0,79	0,29	-0,05	0,711	0,64	0,54	0,12	0,08	0,723	0,12	0,04	0,07	0,85	0,745	-0,63	0,12	0,11	0,425
Total Co	0,92	0,20	0,30	-0,01	0,979	0,64	0,72	0,17	-0,03	0,954	0,78	0,49	0,14	-0,23	0,918	0,88	0,31	0,20	0,909
Total Ni	0,60	0,13	0,44	-0,54	0,852	0,82	0,29	0,31	0,28	0,936	-0,12	0,04	0,81	0,20	0,703	-0,44	0,72	0,25	0,775
Total Fe	0,03	0,66	-0,17	-0,68	0,932	0,94	-0,05	-0,10	-0,22	0,941	0,31	0,49	0,30	0,38	0,568	0,21	0,01	0,92	0,899
Total Mn	0,96	0,09	0,10	0,01	0,944	0,93	0,05	-0,21	0,08	0,918	0,91	0,15	0,05	0,02	0,858	0,89	0,36	0,11	0,924
Total As	-0,15	0,08	-0,87	0,12	0,789	-0,04	0,19	-0,01	0,95	0,942	0,89	-0,06	-0,11	0,09	0,819	0,23	0,76	0,00	0,627

Para los suelos cultivados con cereales, el PCA explicó el 82% de la varianza total (Tabla 2). El primer componente (PC1) explicó el 30% de la varianza y agrupó Pb, Co, Ni y Mn. Las concentraciones totales de Co, Mn y Ni estaban por debajo de los valores de referencia, pero más altas que las del suelo natural, lo que indica un ligero enriquecimiento del suelo en estos metales. A pesar de que PCA agrupó al Pb en PC1, aunque un análisis cluster lo incluyó junto con Cd y As (datos no mostrados). Varios estudios [19, 20, 21] concluyeron que las concentraciones de Pb en los suelos agrícolas generalmente provienen de gases de escape de vehículos y pesticidas de arseniato de plomo. En este caso, las muestras de la zona natural de cereales han mostrado una mayor concentración de Pb que los suelos cultivados, lo cual puede ser debido a la influencia de una carretera junto al área natural muestreada. El segundo componente (PC2) agrupó Cr, Fe y Zn explicando el 18% de la varianza, mientras que PC3 incluyó As y parcialmente Cd, y explicó el 18% de la varianza. En las regiones mediterráneas, el Cr y el Fe provienen principalmente de material parental [6], así como Zn, que puede formar sales solubles o insolubles [20, 22]. Finalmente, PC4 explica el 17% de la varianza total, y puede considerarse como fuente antrópica de Cu y Cd. La acumulación de Cu en los suelos agrícolas mediterráneos se debe principalmente al uso de productos agroquímicos, especialmente pesticidas a base de Cu [18, 23], así como algunos fertilizantes minerales, estiércol de ganado y lodos de aguas residuales que además aporta Cd a los suelos agrícolas.

En los frutales, los resultados del PCA explicaron el 87% de la varianza total. El PC1 incluía Co, Cr, Fe, Mn y Ni y explicó el 34% de la varianza. Los altos valores de PC1 para Fe, Mn y Ni sugieren una fuente geológica [6]. Por su parte, el PC2 agrupó Pb y Zn, cuyo origen podría ser antrópico, ya que algunos fertilizantes y pesticidas son fuente de Pb, Zn y Cu en suelos agrícolas. La asociación de As en PC4 y su baja concentración en los suelos sugiere una fuente geogénica de este elemento. Por el contrario, Cd se asoció tanto al PC3 como al PC4 lo que indica un origen mixto, dando más peso a las fuentes antrópicas (Tabla 2).

En los cítricos, el PCA explicó el 82% de la varianza total. Arsénico, Co, Mn, Pb y Zn se incluyeron dentro de PC1. Debido a que los suelos naturales y los suelos cultivados con cítricos mostraron cierto enriquecimiento en Pb y Cu, y a que Mn puede encontrarse en ciertos pesticidas y el As en fertilizantes fosfatados [21], posiblemente estos metales presenten una fuente antrópica. Por su parte, Cd se incluyó en el PC2 (16% de la varianza), y Cu y Ni en el PC3 (15% de la varianza) ambos componentes asociados a fuentes antropogénicas.

En suelos hortícolas, Co, Cu, Mn, Pb y Zn se agruparon en el PC1, lo que explica el 44% de la varianza total. La aplicación continua de estiércol, fertilizantes inorgánicos, productos agroquímicos y otras enmiendas del suelo, como sucede en cultivos hortícolas, puede llevar a incrementar de forma significativa la concentración de metales en el suelo [9, 22], por lo que estos

elementos podrían asociarse a una fuente antrópica. Por el contrario, el Fe se asoció al PC3 (12.9% de la varianza), lo que sugiere un comportamiento independiente de otros metales. Sin embargo, el análisis de conglomerados (datos no mostrados) agrupó Fe con Cd, Ni y As, incluidos en la PC2 (21% de la varianza). Según [23], los metales de PC2 parecen tener un origen geológico, al igual que lo haría el Fe.

4. Conclusiones

El estudio comparativo de las concentraciones de metales entre cultivos y suelos naturales ha demostrado que las prácticas de manejo realizadas en diferentes cultivos determinan la concentración final de la mayoría de los metales evaluados

En general, los suelos estudiados han presentado enriquecimiento en Cu, siendo los cítricos los que mostraron la mayor concentración de Cu en el suelo. Por su parte, los suelos de cereales, cítricos y hortícolas tienden a acumular Pb, aunque solamente los cítricos y hortícolas acumularon Cd. Destacar que el suelo de hortícolas fue el más propenso a acumular Pb, con un gran porcentaje vinculado a las fases reducibles y unido a carbonatos. A pesar de que se encontró una mayor concentración de Cd en los cultivos de cítricos y hortícolas, los suelos de cereales presentan un mayor riesgo, ya que cerca del 30% del Cd estaban unido a la fase intercambiable. Finalmente, los frutales mostraron el mayor enriquecimiento en Zn de todos los suelos estudiados

Finalmente, el análisis multivariable reveló que todos los tipos de cultivos estudiados favorecen la acumulación de Cd, Cu y Pb, excepto en cultivos hortícolas donde el Cd tenía un origen geogénico. Por su parte, los cultivos de frutales, cítricos y hortícolas provocaron la acumulación de Zn, del mismo modo que en cereales y cítricos donde se acumuló As; siendo la práctica de cultivo de cítricos el principal contribuyente al enriquecimiento de metales en los suelos.

5. Agradecimientos

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de la Fundación Séneca de la Comunidad Autónoma de Murcia mediante el proyecto (15380 / PI / 10).

Referencias

1. Acosta J.A., Gabarrón M., Faz A., Martínez-Martínez S., Zornoza R., Arocena J.M. Influence of population density on the concentration and speciation of metals in the soil and street dust from urban areas. Chemosphere. 2015, 134, 328–337.
2. Khan K., Lu Y., Khan H., Ishtiaq M., Khan S., Waqas M., Wei L., Wang T. Heavy metals in agricultural soils and crops and their health risks in Swat District, northern Pakistan. Food and Chemical Toxicology. 2013, 58, 449–458.
3. Liu Y., Wang H., Li X., Li J. Heavy metal contamination of agricultural soils in Taiyuan, China. Pedosphere. 2015, 6, 901–909.
4. Nicholson F.A., Smithb S.R., Allowayc B.J., Carlton-Smithd C. ,Chambers B.J. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. The Science of the Total Environment. 2003, 311, 205–219.
5. Chen T., Liu X., Li X., Zhao K., Zhang J., Xu J., Shi J., Dahlgreen R.A. Heavy metal sources identification and sampling uncertainty analysis in a field-scale vegetable soil of Hangzhou, China. Environmental Pollution. 2009, 157, 1003–1010.
6. Peris M., Recatalá L., Micó C., Sánchez R., Sánchez J. Increasing the Knowledge of Heavy Metal Contents and Sources in Agricultural Soils of the European Mediterranean Region. Water Air and Soil Pollution. 2008, 192, 25–37.
7. Rodríguez-Martin J.A., López-Arias M., Grau J.M. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). Application of the multivariate geostatistical methods to study spatial variations. Environmental Pollution. 2006, 144, 1001-1012.

8. Deng W., Li X., An Z., Yang L., Hou K., Zhang Y. Identification of sources of metal in the agricultural soils of the Guanzhong plain, northwest China. Environmental Toxicology and Chemistry. 2016, 1, 1–7.
9. Lin Y. Hana P., Huang Y., Yuan G-L., Guo J-X., Li,J. Source identification of potentially hazardous elements and their relationships with soil properties in agricultural soil of the Pinggu district of Beijing, China: Multivariate statistical analysis and redundancy analysis. Journal of Geochemical Exploration. 2017, 173, 110–118.
10. Botsou F., Sungur A., Kelepertzis E., Soylak M. Insights into the chemical partitioning of trace metals in roadside and off-road agricultural soils along two major highways in Attica's region, Greece. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2016, 132, 101–110.
11. Soil Survey Staff. Soil survey laboratory methods manual.Version No. 4.0.USDA NRCS. Soil Survey Investigations Report Nº. 42. 2004. U.S. Govt. Print. Office, Washington, DC
12. Andrades M. Prácticas de Edafología y Climatología In Universidad de la Rioja (Ed.). Logroño, La Rioja, España, 1996. pp. 14–16.
13. Risser J.A., Baker D.E. Testing soils for toxic metals, in: Soil Testing and plant analysis. R. L. Westerman (Ed), Soil Science Society of America. Special Publication 3.3rd Ed., Madison, 1999. pp 275-298.
14. Li X.D., Coles B.J., Ramsey M.H., Thornton I. Sequential extraction of soils for multielement analysis by ICP-AES. Chemical Geology. 1995, 124, 109–123.
15. Micó C., Peris M., Sánchez J., Recatalá L.. Heavy metal content of agricultural soils in a Mediterranean semiarid area: the Segura River Valley (Alicante, Spain). Spanish Journal of Agricultural Research. 2006, 44, 363-372.
16. Martínez-Sánchez M.J., Pérez-Sirvent C. Niveles de fondo y niveles genéricos de referencia de metales pesados en suelos de la Región de Murcia. 2007. Secretaría autonómica para la sostenibilidad. Dirección General de calidad ambiental Ed. Spain.
17. Gasparatos D., Mavromati G., Kotsovilis P., Massas I. Fractionation of heavy metals and evaluation of the environmental risk for the alkaline soils of the Thriassio plain: a residential, agricultural, and industrial area in Greece. Environmental Earth and Sciences. 2015, 74, 1099–1108.
18. Cavani L., Manici L.M., Caputo F., Peruzzi E., Ciavatta C. Ecological restoration of a copper polluted vineyard: Long-term impact of farmland abandonment on soil bio-chemical properties and microbial communities. Journal of Environmental Management. 2016, 182, 37-47.
19. Facchinelli A., Sacchi E., Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metals sources in soils. Environmental Pollution. 2001, 114, 313-324.
20. Sun C., Liu J., Wang Y., Sun L., Yu H .Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China. Chemosphere. 2013, 92, 517–523.
21. Kelepertzis E. Accumulation of heavy metals in agricultural soils of Mediterranean: Insights from Argolida basin, Peloponnese, Greece. Geoderma. 2014, 221–222, 82–90.
22. Zhang J., Wang Y., Liu J., Liu Q., Zhou Q. Multivariate and geostatistical analyses of the sources and spatial distribution of heavy metals in agricultural soil in Gongzhuling, Northeast China. Journal of Soils and Sediments. 2016, 16, 634–644.
23. Tóth G., Hermann T., Da Silva M.R., Montanarella L. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. Environment International. 2016, 88, 299–309.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Determinación del consumo de agua en lechuga (*Lactuca Sativa* L CV Neruda) mediante lisimetría de pesada compacta y sondas de humedad

A. Fernández López[1], M. Soler-Méndez[2], M.J. Oates[2], J.M. Molina-Martínez[2], A. Ruiz-Canales[1]

[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández de Elche, Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO-UMH). Crtra. de Beniel, km 3,2. 03312 Orihuela (Alicante), Spain.
[2] Grupo de I+D+i de Ingeniería Agromótica y del Mar. UPCT. C/ del Ángel s/n. Ed. ELDI E1.06.30202 Cartagena (Murcia), Spain

Resumen: Se desarrollaron los ensayos en una parcela experimental de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO) de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH). En la citada parcela se instaló un sistema de riego localizado con cuatro sectores para aplicar cuatro tratamientos diferenciales de fertilización. Se escogió como cultivo de control la lechuga (*Lactuca Sativa* L Neruda). Se evaluaron las estrategias culturales más adecuadas en el manejo del cultivo en la parcela experimental a partir de los datos periódicos proporcionados por una estación meteorológica próxima y los datos de sensores de humedad del suelo. En uno de los tratamientos se hizo el seguimiento del riego mediante la instalación de un lisímetro de pesada compacto enterrado. La metodología utilizada para la medida simultánea del balance hídrico se ha contrastado y es válida. Es necesario contrastar con más campañas.

Palabras clave: sostenibilidad, ahorro de agua, sensores de bajo coste, programación de riego, horticultura

1. Introducción

El uso eficiente del agua de riego disponible es fundamental para conseguir la mejora de la gestión de los recursos hídricos en agricultura [1]. El conocimiento del consumo de agua por los cultivos y el manejo adecuado del riego son factores determinantes. El agua aplicada en exceso o en momentos inadecuados puede provocar efectos no deseados. Un manejo eficiente del agua empleada en riego se fundamenta en la elección del sistema de riego adecuado, la modernización de los regadíos, el ajuste de la dosis de riego a las necesidades reales del cultivo en cada momento y evitar las pérdidas de agua por escorrentía e infiltración fuera del alcance de las raíces. Las mejoras en las técnicas de programación de riego no sólo producen un ahorro del agua, sino que también reduce el riesgo del lavado de nutrientes y minimiza el impacto de la agricultura en las aguas subterráneas. Adicionalmente se asegura el correcto desarrollo del cultivo [2].

La programación del riego se basa principalmente en la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos, el conocimiento del estado hídrico de las plantas y la determinación del agua del suelo disponible para el cultivo. El nivel de agua en suelo se puede medir mediante el uso de sensores de humedad instalados de forma apropiada en zonas representativas del cultivo permitiendo observar y estimar la distribución de la humedad y determinar si el riego es excesivo o deficitario [3].

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3497

En los últimos años se han desarrollado distintos sistemas que permiten conocer en tiempo real el contenido de humedad del suelo. Suponen una herramienta importante que facilita la toma de decisiones en la programación del riego, tales como determinar la cantidad de agua y el momento de aplicarla. Así, se evitan pérdidas excesivas por percolación profunda o por escorrentía para reducir los impactos ambientales o bien evitar aplicar una cantidad insuficiente y optimizar la producción [4].

A partir de estos sistemas, junto a medios de control y los componentes de riego necesarios (electroválvulas, programadores, etc), se han desarrollado y estudiado métodos de automatización de riego que desencadenan el mismo en función de los niveles de humedad del suelo [5].

Mejorar el manejo del agua en los cultivos, permite conservar agua y aumentar la rentabilidad en las tierras agrícolas. Por lo tanto, el manejo del riego, y con ello su monitorización, constituye una técnica efectiva para obtener cosechas ajustadas, en cuanto a cantidad y calidad, a los requerimientos del mercado.

El objetivo del presente trabajo es el seguimiento del consumo hídrico de cuatro tratamientos diferenciales respecto a las propiedades del suelo de cultivo en lechuga (*Lactuca Sativa* L cv Neruda). Se emplearon simultáneamente un lisímetro de pesada compacto y sensores de humedad de bajo coste.

2. Materiales y métodos

Se desarrollaron los ensayos durante los meses de febrero a marzo de 2017 en una parcela experimental de 300 m² de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO) de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH). En la citada parcela se instaló un sistema de riego localizado con cuatro sectores para aplicar cuatro tratamientos diferenciales respecto a las propiedades del suelo de cultivo. El desarrollo experimental principal de este proyecto fue el estudio del efecto en las propiedades texturales y edáficas del suelo, así como sus efectos en la producción hortícola, de la adición de harina de roca de pórfido, material desarrollado por la empresa Fulsan, S.A., a un suelo agrícola. Se escogió como cultivo de control la lechuga (*Lactuca Sativa* L Neruda) pues tiene un ciclo corto y se obtienen resultados de una manera relativamente rápida y sencilla. En esta comunicación solamente se muestran los aspectos relacionados con el empleo de sensores de humedad del suelo experimentales y un lisímetro de pesada compacto.

Se evaluaron estrategias de abonado y enmiendas diferenciales en el manejo del cultivo en la parcela experimental a partir de los datos periódicos proporcionados por una estación meteorológica próxima y mediante el uso simultáneo de lisimetría de pesada compacta y sensores de bajo coste en la parcela experimental. Adicionalmente se realizaron análisis periódicos de los principales parámetros de cosecha (peso, producción por superficie, calibre, entre otros).

En el primer tratamiento (T1) se le añadió al suelo al inicio de la campaña una cantidad convenida de harina de roca Fulsan y se aplicó junto con un abonado de fondo inorgánico. Durante las dos campañas de riego de los dos ciclos de cultivo se le aplicó al correspondiente sector (T1) de la plantación de lechuga, además de las correspondientes dosis de riego establecidas, un abonado inorgánico (fertirriego).

Para el segundo tratamiento (T2) se mezclaron harina de roca Fulsan y compost (Bocashi) con el suelo agrícola de la parcela experimental y esta mezcla constituyó un abonado de fondo orgánico. Durante las dos campañas de riego se le aplicó al correspondiente sector (T2) de la plantación de lechuga, además de las correspondientes dosis de riego establecidas, un fertirriego orgánico. El tratamiento T2 no recibió fertirriego inorgánico.

Para el tercer tratamiento (T3) no se añadió ninguna sustancia inicialmente al suelo agrícola. Durante las dos campañas de riego de los dos ciclos de cultivo se le aplicó al correspondiente sector (T3) de la plantación de lechuga, además de las correspondientes dosis de riego establecidas, un abonado inorgánico (fertirriego), como en el tratamiento T1.

Adicionalmente se consideró incluir un cuarto tratamiento control (T4) para compararlo con los tratamientos anteriores. A este último tratamiento no se añadió abonado de fondo ni se le añadió fertirriego. Únicamente se le aplicó una dosis de riego similar a los tratamientos anteriores.

Se resumen las cantidades aplicadas en los tratamientos en la tabla 1.

Tabla 1. Tratamientos y cantidades de abono aplicado en el periodo experimental.

	T1	**T2**	**T3**	**T4**
Harina de pórfido (kg/ha)	210	0	0	0
Bocashi (kg/ha)	0	510	0	0
Yaara Mila Complex(kg/ha)	12,5	0	12,5	0
Durasop Actibion N Plus (kg/ha)	12,5	0	12,5	0

El lisímetro empleado es una caja enterrada con cuatro células de carga (ver Fig. 1), que controlan el peso de una bandeja que contiene una porción de suelo y la planta a evaluar (lechuga). Adicionalmente incluye una quinta célula de carga para controlar el peso del agua de drenaje que se pierde por la parte baja de la bandeja. Esta célula de carga se conecta con un depósito de recogida de agua que se vacía periódicamente dependiendo de la cantidad de agua acumulada. Solamente se usó en el tratamiento T2. (Ver resultados y discusión).



Figura 1. Vistas en perspectiva del lisímetro empleado.

Adicionalmente se usaron sensores capacitivos de bajo coste (Fig. 2). Se trata de sondas capacitivas de dominio de frecuencia. Se conecta a una interfaz electrónica mediante cableado. El microcontrolador utilizado en estos experimentos fue un Mini PCB ArduinoPro, que funciona a 5 v y 16 MHz. Las mediciones de temperatura se realizaron utilizando una cámara de temperatura digital impermeable DS18B20, insertada a 3 cm en el suelo y a 20 cm. Este dispositivo se comunica con el microcontrolador a través del protocolo de cable único. El sistema incluye un cuadro IP56, la sonda capacitiva dominio de la frecuencia, sensor de temperatura DS18B20, amplificador operacional LM358, microcontrolador interfaces y electrónico. Se hizo un registro de cada 5 minutos durante el período experimental.

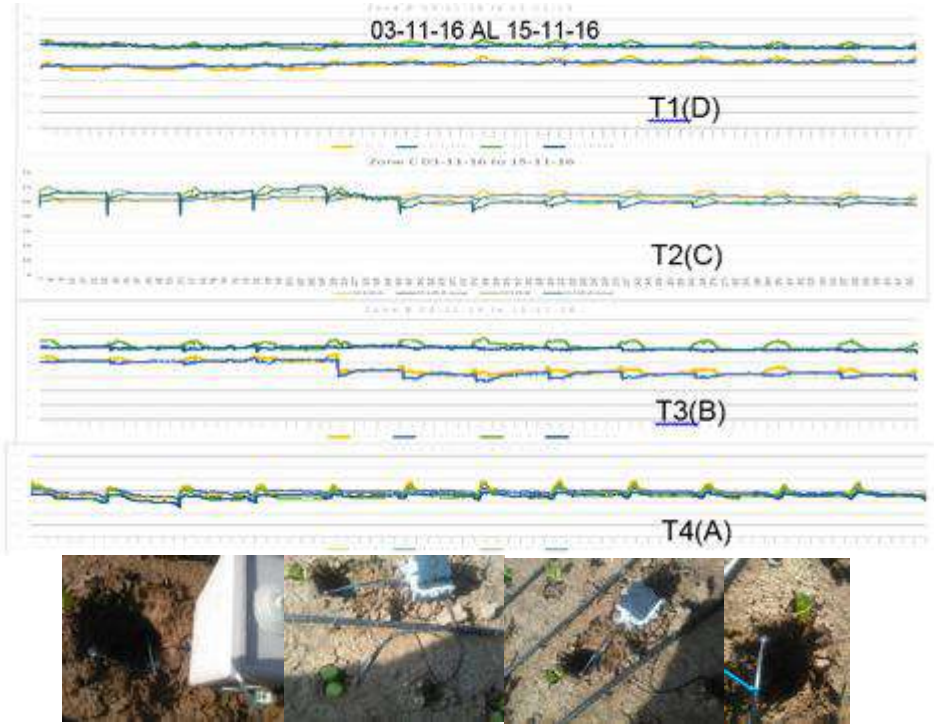


Figura 2. Resultados obtenidos con los sensores de humedad del suelo de bajo coste en los 4 tratamientos y aspectos de su instalación.

La localización del lisímetro y las sondas de humedad del suelo, así como los tensiómetros (watermark) se muestran en la figura 3.

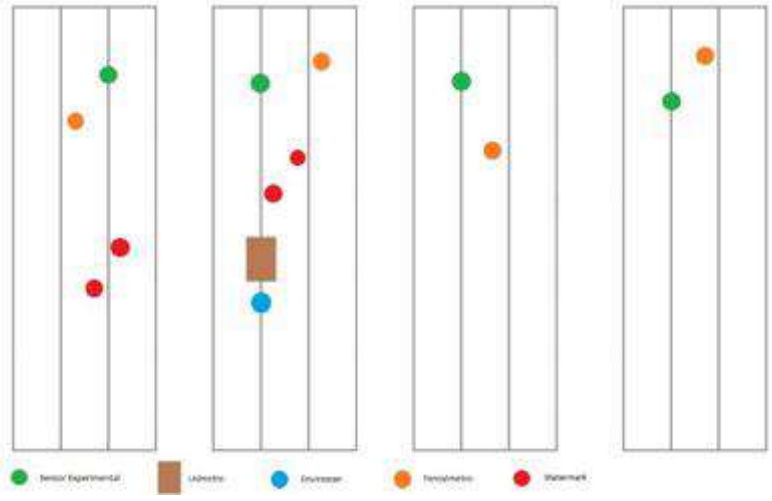


Figura 3. Localización en parcela de los distintos dispositivos: lisímetro, sensor capacitivo de humedad del suelo experimental, sensor capacitivo de humedad del suelo comercial (Enviroscan), tensiómetro (watermark). Se incluyen los 4 bloques empleados con los 4 tratamientos.

3. Resultados y discusión

Se muestra en la figura 4 la evolución del peso del lisímetro en un período temporal específico del experimento y se comparó con la cantidad de agua aplicada.



Figura 4. Algunos resultados obtenidos con el lisímetro de pesada con la evolución del peso de la bandeja.

Igualmente se muestra el resultado de las medidas de humedad del suelo de los sensores de humedad (Fig. 2). Se ve que hay una cierta correlación de medidas.

Para el seguimiento del patrón de humedad del cultivo en la zona radicular se instalaron cuatro sensores de humedad de bajo coste (uno por cada tratamiento). Se trata de sensores capacitivos dispuestos a 2 y 10 cm para controlar la humedad en continuo a lo largo del desarrollo del cultivo de la lechuga. Estos dispositivos incluyen sensores de temperatura del suelo. El valor de la temperatura del suelo es necesario para el calibrado la medida final de la humedad del suelo. Las medidas se registraron en un datalogger y se grabaron en un minidisco. Según se muestra en la Fig. 2, se registraron los episodios de riego a lo largo del período de cultivo y la variación de humedad en las dos profundidades citadas. Estas medidas se contrastaron con los aportes de agua medidos con contador. Adicionalmente permitieron establecer las cantidades de agua drenada para determinar el balance hídrico. Del mismo modo, se contrastaron las medidas estimadas del drenaje con las obtenidas mediante lisimetría de pesada. Aunque puntualmente dieron resultados similares, esta técnica debe contrastarse con más medidas en campo.

Las cantidades de agua registrada en el experimento se muestran en la tabla 2. Se concluye con que la adición de harina de pórfido tiene un efecto significativo en la retención de agua del suelo.

Tabla 2. Consumos de agua para el periodo experimental.

	T1	**T2**	**T3**	**T4**
Riego (mm)	91,2	96,3	102,8	109,0
Lluvia (mm)	63,4	63,4	63,4	63,4
Agua total (mm)	154,6	159,7	166,2	172,4
Agua total utilizada (mm)	92,6	99,0	99,6	103,2
Agua total drenada (mm)	61,3	60,0	66,7	69,1

4. Conclusiones

La metodología utilizada para la medida simultánea del balance hídrico se ha contrastado y es válida. Es necesario contrastar con más campañas.

La influencia de la enmienda en el crecimiento vegetativo no ha sido validada. No obstante, según las sondas de humedad del suelo, hay una diferencia en cuanto al movimiento de agua en el suelo en el T1 respecto a los demás tratamientos. Es posible que la harina de pórfido en combinación con el abono inorgánico mejore el movimiento del agua en el suelo y mejore el perfil de humedad.

5. Agradecimientos

Los autores del artículo expresan su agradecimiento a la empresa FULSAN, S.A. por su apoyo económico. Igualmente se muestran agradecidos a la empresa TELENATURA EBT, S.L. y Viveros Simón Cases, S.L. por su apoyo tecnológico y agronómico.

Referencias

1. Kayatz, B.; Harris, F.; Hillier, J.; Adhya, T.; Dalin, C.; Nayak, D.; Green, R. F.; Smith, P.; Dangour, A. D. "More crop per drop": Exploring India's cereal water use since 2005. The Science of the total environment, 2019, 673 (207-217).
2. Kambou, D ; Degre, A., Xanthoulis, D., Ouattara, K., Destain, J.P., Defoy, S., De L'escaille, D. Evaluation and Proposals for Improving Irrigation Performance Around Small Reservoirs in Burkina Faso. Journal of irrigation and drainage engineering, 2019, 145, 6, 05019004.
3. Welde, K., Gebremariam, H.L., Kahsay, K.D. Optimizing irrigation water levels to improve yield and water use efficiency of vegetables: case study of tomato. Sustainable water resources management, 2019, 5, 2 (737-742).
4. Hajdu, I., Yule, I., Bretherton, M., Singh, R., Hedley, C. Field performance assessment and calibration of multi-depth AquaCheck capacitance-based soil moisture probes under permanent pasture for hill country soils. Agricultural water management, 2019, 217 (332-345).
5. Zheng, Z.L., Wang, Z.J., Zhao, J.S., Zheng, H. Constrained Model Predictive Control Algorithm for Cascaded Irrigation Canals. Journal of irrigation and drainage engineering, 2019, 145, 6, 04019009.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Efecto de diferentes diseños de drenajes de filtros de arena en la obturación de goteros utilizando aguas residuales regeneradas

C. Solé-Torres[1], M. Duran-Ros[1], G. Arbat[1], J. Pujol[1], F. Ramírez de Cartagena[1], J. Puig-Bargués[1]

[1] Departamento de Ingeniería Química, Agraria y Tecnología Agroalimentaria, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Girona. C. de M. A. Capmany 61, 17003 Girona; carles.sole@udg.edu; miquel.duranros@udg.edu; gerard.arbat@udg.edu; joan.pujol@udg.edu; francisco.ramirez@udg.edu; jaume.puig@udg.edu

Resumen: Los filtros de arena son los que se recomiendan habitualmente cuando se utilizan aguas regeneradas en instalaciones de riego por goteo, si bien se desconoce el efecto de sus distintos diseños de drenaje en la prevención del atascamiento de los goteros. Por este motivo, en este trabajo se ha analizado el efecto en la obturación de goteros provocado por el uso de filtros de arena con distintos modelos de drenaje que operaron con agua residual regenerada durante 1000 h. Al inicio, mitad y final del experimento se determinó el caudal emitido de todos y cada uno de los 226 goteros que había en cada uno de los 12 laterales de riego. Los resultados indican que se produjo una reducción significativa ($p<0.05$) del caudal medido del 8% a las 500 h y del 11% a las 1000 h respecto al inicial. La posición del gotero también tuvo un efecto significativo a partir de las 500 h de operación. Los caudales de los goteros fueron significativamente inferiores ($p<0.05$) únicamente en los últimos 2 m de los laterales, hallándose los valores mínimos en los dos últimos goteros. El número de goteros totalmente obturados fue del 1.2% con el filtro de drenaje de medio poroso, del 1.0% con el drenaje de cúpulas insertadas y del 0.6% con el filtro de brazos colectores.

Palabras clave: riego por goteo, filtración, filtros granulares, atascamiento.

1. Introducción

El uso de aguas residuales regeneradas en agricultura resulta una alternativa viable para hacer frente a las cada vez más comunes situaciones de escasez de agua [1], a la vez que permite liberar aguas de mejor calidad para otros usos [2].

La mejor técnica para la aplicación en riego agrícola de las aguas residuales regeneradas desde un punto de vista sanitario y ambiental es el riego por goteo [3, 4], aunque esta tecnología presenta un problema importante en el atascamiento de los goteros [3, 5]. La obturación de los goteros depende de múltiples factores como el tipo de agua utilizada, el tipo de emisor, las condiciones de mantenimiento y el sistema de filtrado [6, 7]. Los goteros autocompensantes [8, 9], integrados [9] y los de caudales elevados [5, 10] son más resistentes a la obturación.

Existe un amplio consenso en que la filtración es una operación esencial para prevenir la obturación de los goteros [11], aunque no la consigue evitar completamente [12]. Los filtros de arena son los que ofrecen una elevada protección en las instalaciones de riego por goteo [13] ya que consiguen una reducción más eficaz de los sólidos en suspensión presentes en las aguas de riego [7], evitando mejor la obturación [6]. Algunos autores han estudiado la influencia del diseño del drenaje de los filtros de arena en la pérdida de carga [14, 15, 16], pero ninguno de ellos ha

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3311

analizado cómo el diseño del filtro afecta a la obturación de los goteros. Por otra parte, los filtros de arena tienen que someterse a contralavados periódicos para liberar las partículas retenidas en el medio si se quiere garantizar su buen funcionamiento [17].

Aunque los procesos de filtración y lavado han sido estudiados [18] pocos son los estudios centrados en intentar mejorar el diseño y funcionamiento de los filtros de arena. En este sentido, Bové et al. (2017) [19] diseñó un nuevo sistema de drenaje para reducir la pérdida de carga a través del lecho filtrante y mejorar la eficiencia de consumo tanto de agua como de energía.

El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de tres filtros de arena con diferentes diseños de drenaje (el prototipo diseñado por Bové et al. (2017) [19] y dos filtros comerciales) en la obturación de los goteros utilizando aguas residuales regeneradas.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño experimental

Se utilizó el agua residual regenerada de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Celrà (Girona). El sistema experimental consistió en tres filtros de arena con tres drenajes distintos: un filtro modelo FA1M (Lama, Sevilla, España) con drenaje de brazos colectores, otro modelo FA-F2-188 (Regaber, Parets del Vallès, España) con drenaje de cúpulas insertadas y el filtro experimental propuesto por Bové et al. (2017) [19] con drenaje de medio granular. La Figura 1 muestra el diseño de los tres drenajes utilizados.



Figura 1. Diseños de drenajes utilizados: medio poroso (A), cúpulas insertadas (B) y brazos colectores (C).

Todos los filtros fueron rellenados con arena silícea con un diámetro efectivo de 0.48 mm y un coeficiente de uniformidad de 1.73. Cada filtro tenía asociada una subunidad de riego, con 4 laterales de 90 m cada uno (Figura 2). Cada lateral tenía 226 emisores, con lo que por cada posición de gotero había 12 repeticiones (12 laterales). Sólo en la última posición había 3 goteros por subunidad (9 en total). Se utilizaron goteros autocompensantes Uniram TM AS 16010 (Netafim, Tel Aviv, Israel) de 2.3 l/h de caudal nominal, separados 0.4 m, con un rango de presiones de trabajo entre 50 y 400 kPa, y un coeficiente de variación de fabricación del 3%.

La instalación disponía de un sistema de impulsión gobernado por un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA), y un variador de frecuencia ajustaba el punto de funcionamiento de la bomba. El caudal de funcionamiento se determinó mediante un caudalímetro electromagnético, que disponía de un transmisor de impulsos con señal 4-20 mA que permitía conocer el caudal exacto de funcionamiento. El sistema experimental permitía sólo el funcionamiento de un filtro a la vez. Puesto que se filtraba más caudal de agua de la necesaria en la subunidad de riego, una válvula proporcional de tres vías conducía el caudal de agua filtrado sobrante hacia un tanque donde se almacenaba, para ser utilizado en los lavados. El agua se cloró después de ser filtrada hasta alcanzar de 2 ppm de cloro libre, valor que se incrementó

hasta los 4 ppm cuando se utilizaba para efectuar el lavado de los filtros. Los lavados se activaban cuando la caída de presión sobrepasaba los 50 kPa, y tenían una duración de 3 minutos.

Se instalaron sensores para medir la calidad del agua antes y después de ser filtrada. Los parámetros que se midieron antes del proceso de filtración fueron conductividad eléctrica (CE), pH, temperatura, oxígeno disuelto (OD) y turbidez. Los parámetros que se midieron después del proceso de filtración fueron oxígeno disuelto y turbidez.

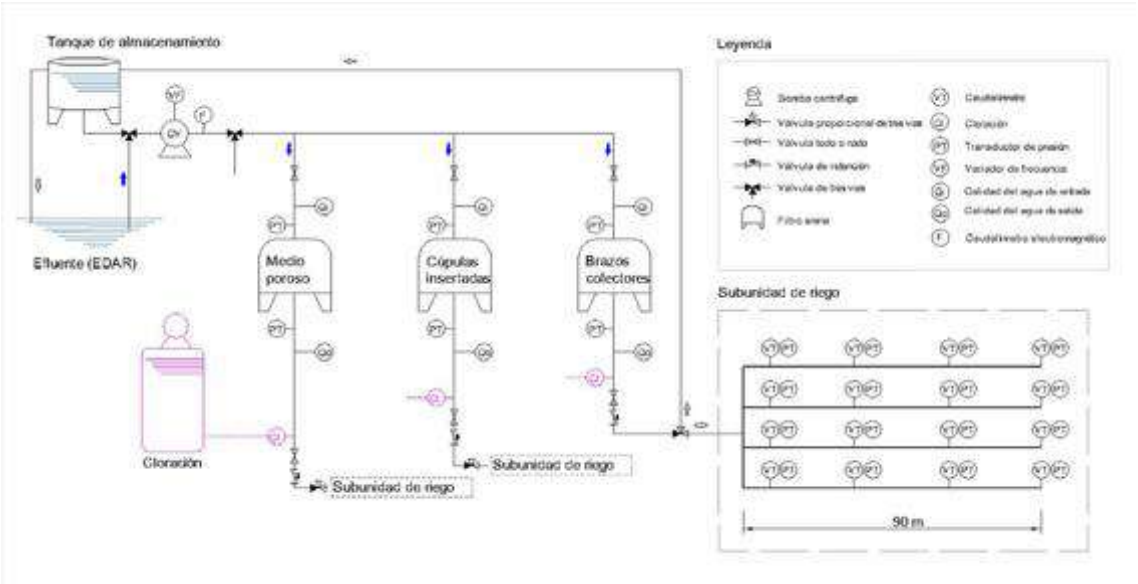


Figura 2. Esquema del diseño experimental.

2.2. Procedimiento operacional

El experimento se desarrolló a lo largo de 1000 h, durante las cuales se establecieron dos sesiones diarias de riego de 4 horas por filtro. Durante el experimento, se utilizaron dos alturas de lecho filtrante (20 y 30 cm) y dos velocidades de filtración (30 y 60 m/h) en cada filtro. Cada combinación de altura de lecho filtrante y velocidad de filtración se mantuvo durante 250 h en todos los filtros. Durante todo el ensayo, no se realizó ningún tipo de limpieza por arrastre de los sedimentos acumulados en los laterales.

2.3. Evaluación del filtro y los emisores

La eficiencia de reducción (E) de turbidez y oxígeno disuelto en los filtros fue calculada con la expresión:

$$E = \frac{No-N}{No} \times 100 \quad (1)$$

donde N_0 y N son los valores de dichos parámetros a la entrada y salida de los filtros, respectivamente.

Se midió el caudal de todos los emisores de las subunidades (un total de 2712 emisores) al inicio del experimento (0 h), a las 500 h y al final del experimento (1000 h), así como la presión en cuatro posiciones de cada lateral de riego (al inicio, a 1/3 de la longitud del lateral, a 2/3 y al final). Se pudo calcular así la uniformidad de distribución de presiones UP_{lp} [20] utilizando la expresión:

$$UPlq = \left(\frac{p25}{\bar{p}}\right)^{x} \times 100 \quad (2)$$

donde p_{25} es la media del 25% de las localizaciones con menor presión (kPa), $\bar{p}$ es la media de todas las presiones de todas las localizaciones muestreadas y x es el coeficiente de descarga.

Al final del ensayo, los emisores de las posiciones 1, 224, 225 y 226 del primer y segundo lateral se abrieron para realizar una inspección visual.

2.4. Características del agua residual entrante

La Tabla 1 muestra las medias de los parámetros de calidad del agua entrante durante todo el ensayo. Debido a la heterogeneidad del agua de la estación depuradora, existieron diferencias significativas (P<0.05) entre algunos de los parámetros de las aguas residuales utilizadas con los distintos filtros.

Tabla 1. Media y error estándar de los parámetros fisicoquímicos del efluente de entrada utilizado en los ensayos. Letras distintas indican que existen diferencias significativas (P<0.05) en cada parámetro.

Diseño del drenaje del filtro	pH (-)	Temperatura (ºC)	CE (dS/m)	DO (mg/l)	Turbidez (FNU)
Medio poroso	7.33 ± 0.02 b	20.61 ± 0.25 a	2.64 ± 0.03 a	3.27 ± 0.06 b	6.22 ± 0.16
Cúpulas insertadas	7.43 ± 0.02 a	20.12 ± 0.22 ab	2.46 ± 0.03 b	3.57 ± 0.07 a	5.82 ± 0.20
Brazos colectores	7.31 ± 0.02 b	19.68 ± 0.25 b	2.63 ± 0.03 a	3.28 ± 0.07 b	6.42 ± 0.20

2.5. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó el programa SPSS Statistics (IBM, New York, Estados Unidos). Para la diferenciación de medias, se utilizó el test de Tukey con un intervalo de confianza del 95%.

3. Resultados y discusión

3.1. Evaluación de los filtros

La Tabla 2 muestra las reducciones porcentuales de oxígeno disuelto y turbidez calculadas con la ecuación (1) para los distintos filtros ensayados.

Tabla 2. Media y error estándar de las reducciones de oxígeno disuelto y turbidez logrados por los distintos filtros (%). Resultados negativos indican un aumento del parámetro. Distintas letras indican que hubo diferencias significativas (P<0.05) en la reducción del parámetro.

Diseño del drenaje del filtro	Reducción (%)	
	Oxígeno disuelto	Turbidez
Medio poroso	-11.20 ± 2.63	26.29 ± 1.27 a
Cúpulas insertadas	-6.68 ± 2.05	18.53 ± 1.60 b
Brazos colectores	-11.03 ± 2.57	13.45 ± 1.78 b

El filtro con medio poroso mostró una reducción de turbidez (26.29%) significativamente mayor (P<0.05) que las conseguidas por el filtro de cúpulas insertadas (18.53%) y el de brazos colectores (13.45%). Las menores reducciones de turbidez obtenidas con respecto estudios anteriores [7, 18, 21, 22] podrían ser explicadas por los bajos niveles de turbidez del agua de entrada utilizada en el presente ensayo, y por la altura de lecho filtrante fijada en 0.30 m, ya que estaba limitada por el filtro de brazos colectores, cuya altura máxima era de 0.40 m.

El filtro con medio poroso obtuvo un mayor aumento de oxígeno disuelto (11.20%) que el filtro de brazos colectores (11.03%) y el filtro de cúpulas insertadas (6.68%), aunque sin que hubiera diferencias estadísticamente significativas entre ellas.

3.2. Distribución de la presión en los laterales.

El coeficiente de distribución de presiones fue superior al 90% a lo largo de todo el ensayo, por lo que se pudo considerar uniforme. Como el coeficiente de variación de fabricación de los goteros era inferior al 3%, las diferencias en el caudal de estos pudieron ser explicadas principalmente por la obturación de los emisores. No se observaron diferencias significativas entre los distintos valores de UP_{lp} entre laterales ni tampoco entre tiempos de muestreo, por lo que no hubo efecto de este factor a lo largo del experimento.

3.3. Evaluación de los goteros

El caudal de todos los emisores medido a las 0, 500 y 1000 h del ensayo se analizó estadísticamente, hallándose un efecto significativo de cada factor fijo (tiempo, posición del gotero y diseño del filtro) así como las interacciones de diseño y tiempo, diseño y posición y tiempo y posición (todas ellas con un $P<0.001$). En términos generales, se constató una caída del caudal de los goteros del 10.80% desde el momento inicial hasta el final del experimento (de 2.49 l/h de caudal medio al inicio hasta 2.22 l/h transcurridas 1000 h). Esta reducción de caudales a lo largo del tiempo debido a la incidencia de las obturaciones ha sido ampliamente observada por diversos autores [5, 7, 9, 21, 22].

3.3.1. Efecto del diseño del filtro y el tiempo de riego

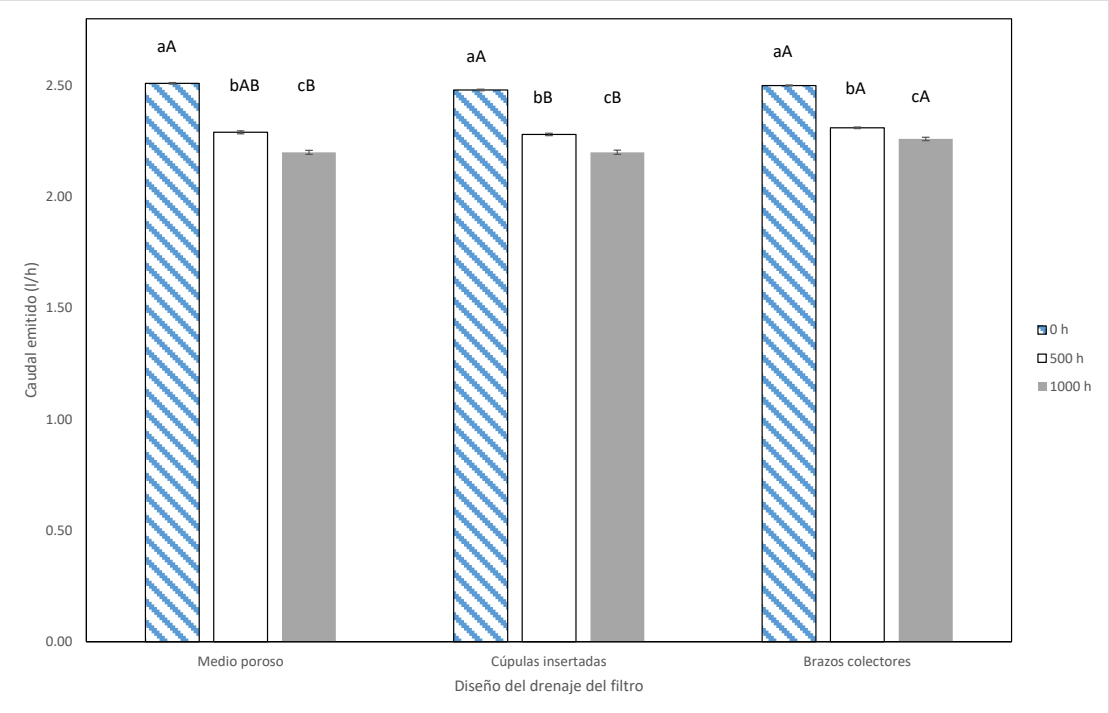


Figura 3. Caudal medio y error estándar (l/h) de todos los goteros para cada tipo de diseño de drenaje del filtro de arena, en los tres tiempos distintos de medición. Para cada diseño de drenaje, letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tiempos ($P<0.05$). Para cada tiempo medido, letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($P<0.05$) entre los diseños de filtros.

La Figura 3 muestra el caudal de los goteros en función del diseño del drenaje del filtro de arena y la duración del ensayo. Hubo una reducción significativa del caudal a lo largo del tiempo de funcionamiento para cada diseño, siendo menor en el filtro de brazos colectores (del 7.6% a las 500 h y del 9.6% a las 1000 h) frente a los 8.76 y 8.06 % obtenidos por el filtro de medio poroso y del 12.35 y 11.29 % por el filtro de cúpulas insertadas, a las 500 y 1000 h respectivamente. La reducción del caudal fue mayor en las primeras 500 h que en las siguientes 500, hecho también referenciado en la bibliografía [22]. Al principio del ensayo (0 h) no se encontraron diferencias significativas. Pasadas 500 h, el caudal de los goteros del filtro de brazos colectores fue significativamente mayor (2.31 l/h) que con el filtro de cúpulas insertadas (2.28 l/h) pero no que con el de medio poroso (2.29 l/h). Sin embargo, pasadas 1000 h, el caudal medio de los goteros del filtro de brazos colectores fue significativamente mayor (2.26 l/h) que el de medio poroso y cúpulas insertadas (ambos con 2.20 l/h). Asimismo, de promedio, estas diferencias sólo representaron el 3% del caudal de los emisores.

3.3.2. Efecto del diseño del drenaje del filtro y la posición del gotero.

La Figura 4 muestra los caudales respecto el diseño del filtro y la ubicación de los goteros. Para cada diseño de filtro, se hallaron diferencias significativas en los caudales, pero únicamente para los localizados al final del lateral. Tanto para el drenaje de medio poroso como para el de cúpulas insertadas, el caudal de los tres últimos goteros (últimos 1.2 m del lateral) fue significativamente ($P<0.05$) inferior que el de los goteros del resto del lateral (esto es, de las posiciones 1 a 222). En cambio, para el diseño de brazos colectores, sólo el caudal de los dos últimos emisores fue significativamente inferior al del resto. Para todos los tres diseños de drenajes estudiados, el último emisor obtuvo claramente el menor caudal medio.

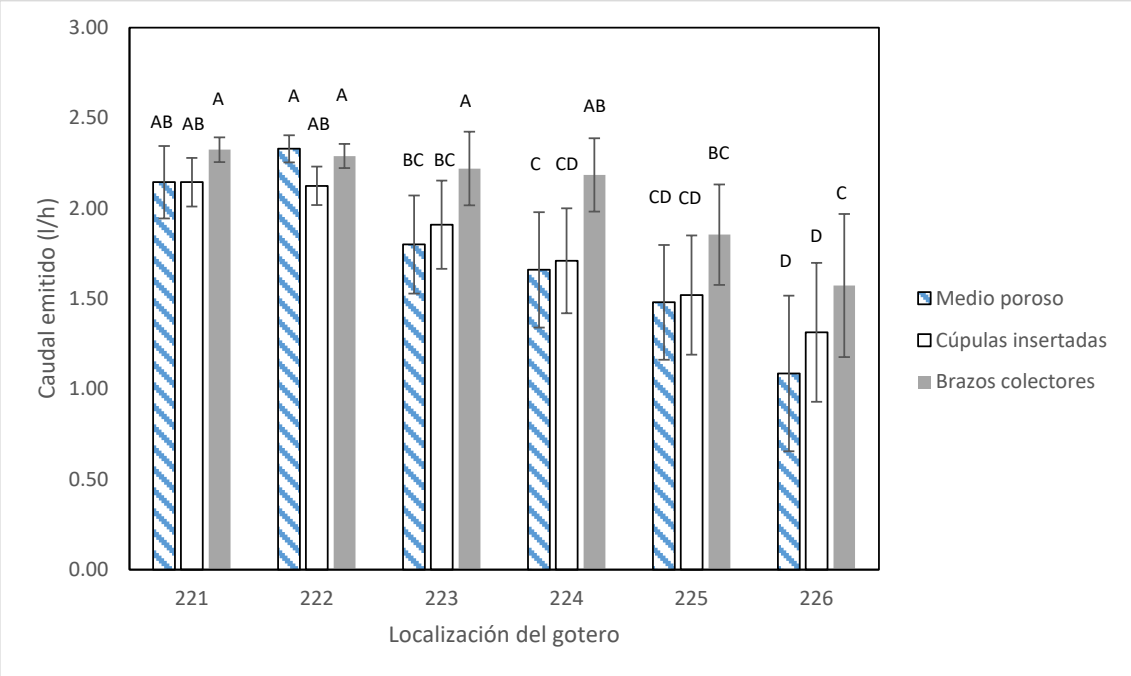


Figura 4. Media del caudal y error estándar (l/h) de los 6 últimos goteros del lateral para cada diseño de drenaje. Para cada diseño, letras distintas indican diferencias significativas ($P<0.05$) entre localizaciones.

Para cada localización de los goteros, únicamente se encontraron diferencias en el caudal emitido de 11 goteros entre diseños de filtros, representando el 5 % de los emisores de cada lateral. Además, las localizaciones fueron muy dispersas y no seguían ningún patrón.

3.3.3. Efecto del tiempo y la localización de los emisores

La interacción entre tiempo y ubicación del gotero resultó significativa (P<0.05). Al principio del ensayo, no hubo diferencias entre localizaciones (Figura 5), mientras que pasadas 500 h los tres últimos emisores (posiciones 224, 225 y 226) emitieron significativamente menor caudal que el resto de los goteros (1.83, 1.83 y 1.49 l/h, respectivamente). Al cabo de 1000 h, los cuatro últimos emisores (localizaciones 223, 224, 225 y 226) liberaron significativamente menor caudal (1.45, 1.22, 0.61 y 0.00 /h, respectivamente) que el resto de los goteros del lateral. El último gotero (posición 226) se encontró completamente obturado en todas las subunidades de riego.

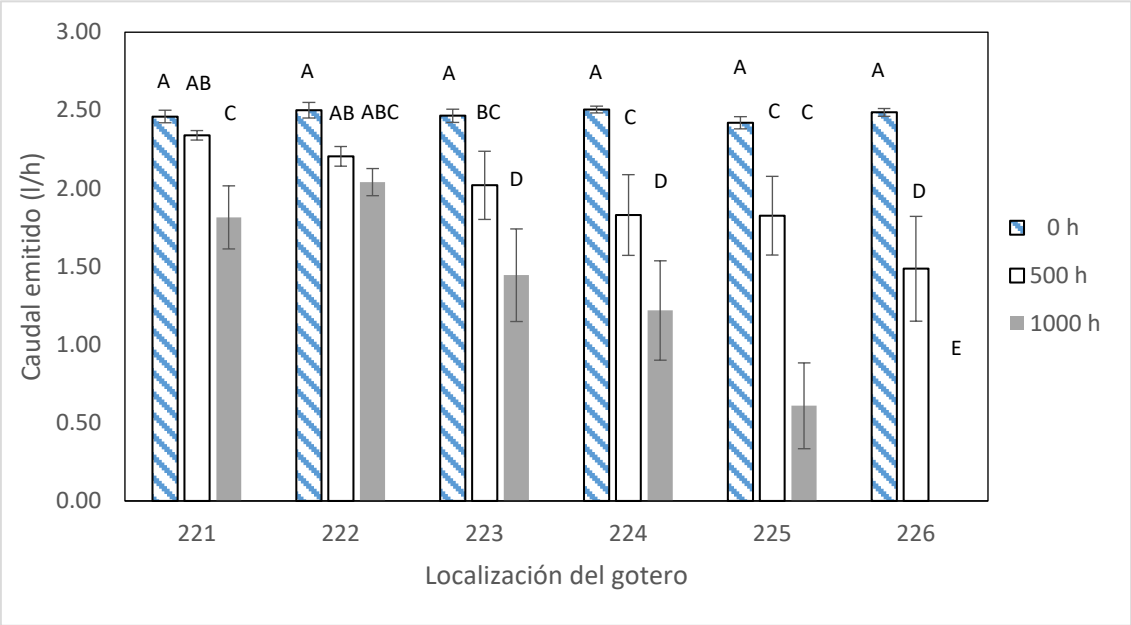


Figura 5. Medias del caudal y el error estándar (l/h) de los 6 últimos goteros, después de 500 y 1000 h de riego. Para cada tiempo medido, letras distintas indican diferencias significativas (P<0.05) entre localizaciones.

3.4. Goteros completamente obturados

A las 500 h de ensayo se encontraron 5 goteros completamente obturados en los laterales protegidos por el filtro del drenaje de medio poroso (0.56% del total), 2 para el de cúpulas insertadas (0.22% del total) y ninguno en el drenaje de brazos colectores. Transcurridas 1000 h, se observaron 10 goteros completamente obturados en los laterales protegidos por el drenaje de medio poroso (1.13% del total), 8 para el de cúpulas insertadas (0.91% del total) y 6 para el de brazos colectores (0.68% del total).

Analizando el porcentaje de goteros completamente obturados, se hallaron diferencias significativas entre tiempo, localización y ambos factores, pero no en el diseño del drenaje como factor simple ni en interacción entre tiempo y localización. Esta última afirmación significa que los diferentes diseños del filtro ensayados no afectan el porcentaje de los emisores completamente obturados. A las 500 h, hubo diferencias significativas en el porcentaje de goteros completamente obturados en las localizaciones 223, 224, 225 y 226 respecto el resto de los emisores (Figura 6). Pasadas 1000 h, en la localización 226 se observó significativamente más porcentaje de emisores completamente obturados que en la localización 225, que a su vez fue mayor que las

localizaciones 224 y 223 y con menor porcentaje de goteros completamente obturados estuvo la posición 222.

Todos los goteros completamente obturados se encontraron en posiciones del final del lateral. Son varios los autores que han observado la misma tendencia en las obturaciones de los emisores al final de los laterales [5, 8, 13, 22], que podrían atribuirse a la reducción del caudal del emisor al final del lateral [23] y a una mayor concentración de partículas en estas posiciones [22].

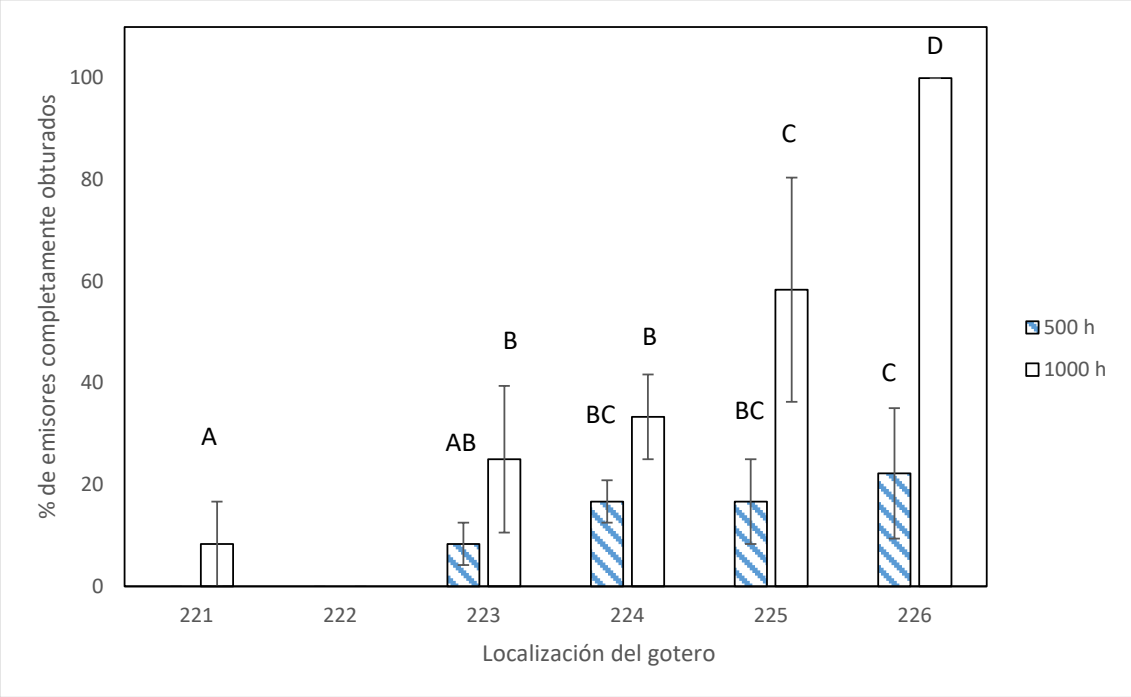


Figura 6. Porcentaje de goteros completamente obturados (%) por localización de los últimos emisores, después de 500 y 1000 h de ensayo. Para cada tiempo, diferentes letras significan diferencias significativas (P<0.05) entre localizaciones.

3.5. Observación de los goteros

Se observaron algunos goteros una vez finalizado el ensayo. Si bien no se encontraron deposiciones en los goteros ubicados al inicio del lateral (Fig. 7A) para ninguna subunidad de riego, se detectaron crecimientos de películas microbianas (*biofilm*) y sedimentos en los últimos goteros de todas las subunidades de riego (Fig. 7B), así como crecimiento de *biofilm* en el orificio de salida de los emisores (Fig. 7C), no determinándose diferencias visuales entre subunidades. Estos resultados concuerdan con los hallazgos de varios autores [5, 7, 8, 10].



Figura 7. Vista exterior de los goteros protegidos por el diseño de medio poroso en la primera localización (A) y en la última (B), y vista interior de este último emisor (C) pasadas las 1000 h de ensayo.

4. Conclusiones

El presente estudio fue llevado a cabo para determinar el efecto del diseño del drenaje de tres filtros de arena en la obturación de los goteros utilizando agua residual regenerada clorada. El tiempo de ensayo fue de 1000 h y la longitud de los laterales 90 m.

La obturación de los emisores fue debida a las interacciones entre diseño del drenaje, la localización de los emisores y el tiempo de riego. La localización de los goteros tuvo un efecto significativo sólo después de 500 h de riego, con caudales significativamente inferiores en los 3 últimos emisores, y después de 1000 h, con caudales significativamente inferiores en los 5 últimos. También se observó una reducción significativa del caudal de los emisores (del 9.60 al 12.35%) para todas las subunidades de riego después de 1000 h. Los goteros protegidos por el diseño de brazos colectores emitieron más caudal medio que los otros diseños, aunque no fue este el diseño de filtro que retuvo más turbidez.

Por otro lado, el porcentaje de goteros completamente obturados dependió de la interacción entre el tiempo de riego y la localización del gotero, sin que se hallasen diferencias significativas entre los diseños de drenajes.

Finalmente, el filtro con el drenaje de brazos colectores presentó menor obturación utilizando aguas residuales, aunque sólo después de 1000 h de riego. Para tiempos más cortos, la protección frente a la obturación no fue distinta entre los distintos filtros ensayados. Sería recomendable continuar estudiando si los diferentes diseños de drenajes tienen un efecto específico en cada uno de los agentes que participan en la obturación de los emisores.

5. Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Ministerio de Economía y Competitividad por su financiación a través del proyecto de invetigaciónAGL2015-63750-R. Carles Solé-Torres es el beneficiario de beca pre-doctoral IFUdG2016/72 concedida por la Universidad de Girona. Los autores también quieren agradecer al Ayuntamiento de Celrà por su ayuda en llevar a cabo este experimento.

Referencias

1. Asano T., Burton F.L., Leverenz H.L. Water reuse: issues, technologies and applications. 2007, McGraw Hill Inc., New York.
2. Lazarova V., Asano T. Challenges of sustainable irrigation with recycled water. In: Lazarova V., Bahri A., Water reuse for irrigation – Agriculture, landscape and Turf grass. 2005, CRC Press, Washington D.C., USA.
3. Bucks D.A., Nakayama F.S., Gilbert R.G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. Agric. Water Manage. 1979, 2 (2), 149–162.
4. World Health Organization WHO. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater, vol II. 2006, WHO Press, Geneva.
5. Ravina I., Paz E., Sofer Z., Marcu A., Shisha A., Sagi G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. Irrig. Sci. 1992, 13 (3), 129–139.
6. Capra A., Scicolone B. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. J. Clean. Prod. 2007, 15 (16), 1529–1534.
7. Duran-Ros M., Puig-Bargués J., Arbat G., Barragán J., Ramírez de Cartagena F. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents. Agric. Water Manage. 2009, 96 (10), 67–79.
8. Puig-Bargués J., Arbat G., Elbana M., Duran-Ros M., Barragán J., Ramírez de Cartagena F., Lamm F.R., Effect of flushing frequency on emitter clogging in microirrigation with effluents. Agric. Water Manage. 2010, 97, 883–891.
9. Pei Y.T., Li Y.K., Liu Y.Z., Zhou B., Shi Z., Jiang Y.G. Eight emitters clogging characteristics and its suitability evaluation under on-site reclaimed water drip irrigation. Irrig. Sci. 2014, 32(2), 141–157.
10. Trooien T.P., Lamm F.R., Stone L.R., Alam M., Rogers D.H., Clark G.A., Schlegel A.J. Subsurface drip irrigation using ivestock wastewater: dripline flow rates. Appl. Eng. Agric. 2000, 16 (5), 505–508.
11. Oron G., Shelef G. Turzynski, B. Trickle irrigation using treated wastewaters. J. Irrig. Drain. Div. 1979, 105 (IR2), 175–186.
12. Tajrishy M.A., Hills D.J., Tchobanoglous G. Pretreatment of secondary effluent for drip irrigation. J. Irrig. Drain. Engrg. 1994, 120 (4), 716–731.
13. Trooien T.P. Hills, D.J. Application of biological effluent. In: Lamm, F.R., Ayars, J.E., Nakayama, F.S. (Eds.), Microirrigation for Crop Production. Design, Operation, and Management. 2007, Elsevier, Amsterdam, pp. 329–356.
14. Mesquita M., Testezlaf R., Ramirez J. The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss. Agric. Water Manage. 2012, 115, 178-185.
15. Bové J., Arbat G., Pujol T., Duran-Ros M., Ramírez de Cartagena F., Velayos J., Puig-Bargués J. Reducing energy requirements for sand filtration in microirrigation: improving the underdrain and packing. Biosyst. Eng. 2015, 140, 67–78.
16. Pujol T., Arbat G., Bové J., Puig-Bargués J., Duran-Ros M., Velayos J., Ramírez de Cartagena F. Effects of the underdrain design on the pressure drop in sand filters. Biosyst. Eng. 2016, 150, 1-9.
17. Nakayama F.S., Boman B.J., Pitts D.J. Maintenance. In: Lamm, F.R., Ayars, J.E., Nakayama, F.S. (Eds.), Microirrigation for Crop Production. Design, Operation, and Management. 2007, Elsevier, Amsterdam, pp. 389–430.
18. Elbana M., Ramírez de Cartagena F., Puig-Bargués J. Effectiveness of sand media filters for removing turbidity and recovering dissolved oxygen from a reclaimed effluent used for micro-irrigation. Agric. Water Manage. 2012, 111, 27-33.

19. Bové J., Puig-Bargués J., Arbat G., Duran-Ros M., Pujol T., Pujol J., Ramírez de Cartagena, F. Development of a new underdrain for improving the efficiency of microirrigation sand media filters. Agric. Water Manage. 2017, 179, 296-305.
20. Bliesner R.D. Field evaluation of trickle irrigation efficiency, in: Proceedings of Water Management for Irrigation and Drainage ASCE. 1976, pp. 382–393.
21. Triphati V.K., Rajput T.B.S., Patel N. Performance of different filter combinations with surface and subsurface drip irrigation systems for utilizing municipal wastewater. Irrig. Sci. 2014, 32, 379-391.
22. Wu W.Y., Huang Y., Liu H.L., Yin S.Y., Niu Y. Reclaimed water filtration efficiency and drip irrigation emitter performance with different combinations of sand and disc filters. Irrig. and Drain. 2015, 64, 362-369.
23. Shannon W.M., James L.G., Basset D.L., Mih W.C. Sediment transport and deposition in trickle irrigation laterals. Trans. ASAE. 1982, 25 (1), 160–164.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Efecto de la altura de medio filtrante y la velocidad de filtración en el comportamiento de distintos modelos de filtro de arena en instalaciones de riego por goteo con aguas regeneradas

Carles Solé-Torres[1], Miquel Duran-Ros[1], Gerard Arbat[1], Joan Pujol[1], Francisco Ramírez de Cartagena[1], Jaume Puig-Bargués [1]

[1] Departamento de Ingeniería Química, Agraria y Tecnología Agroalimentaria, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Girona, C. de M. A. Capmany 61, 17003 Girona; carles.sole@udg.edu; miquel.duranros@udg.edu; gerard.arbat@udg.edu; joan.pujol@udg.edu; francisco.ramirez@udg.edu; jaume.puig@udg.edu

Resumen: Los filtros de arena son habitualmente utilizados en las instalaciones de riego por goteo para reducir la obturación de los goteros, siendo especialmente indicados cuando se utilizan aguas residuales regeneradas, aunque poco se conoce acerca de cuáles son sus condiciones operativas que permitan garantizar una buena calidad de filtrado y un bajo consumo energético. Por este motivo, en el presente trabajo se estudió, utilizando aguas residuales regeneradas, el comportamiento de tres modelos de filtro de arena con distintos diseños de drenaje operando con dos alturas de lecho filtrante (20 y 30 cm) y dos velocidades de filtración (30 y 60 m/h). Cada una de estas condiciones operativas se ensayó durante 250 h, registrándose los volúmenes filtrados y de lavado, las presiones y parámetros fisicoquímicos a la entrada y a la salida de los filtros y el consumo eléctrico de la bomba de la instalación. La reducción de turbidez en el proceso de filtración se vio afectada por la velocidad de filtración, siendo mayor con 30 m/h (34.2%) que con 60 m/h (11.3%). El drenaje con medio poroso presentó una reducción significativamente superior de turbidez (26.3%) respecto a los otros dos diseños, filtrando significativamente más volumen de agua por unidad de energía eléctrica consumida (8.4 m3/kWh).

Palabras clave: riego localizado, eficiencia de filtración, volumen filtrado, eficiencia energética, obturación.

1. Introducción

El uso de aguas residuales regeneradas en agricultura se ha convertido en una de las principales soluciones para aliviar la situación de escasez global de agua [1]. La mejor técnica para el uso de dichas aguas, desde un punto de vista sanitario y medioambiental, es el riego por goteo [2] aunque presenta un riesgo de obturación de los goteros [2, 3]. Para evitarlo, resulta imprescindible disponer de un sistema de filtrado [4, 5, 6], aunque no siempre evita completamente la aparición de obturaciones [7]. Los filtros de arena son los que ofrecen mejor protección [8] contra el atascamiento de los goteros [5, 6] ya que eliminan más eficazmente los sólidos en suspensión presentes en las aguas regeneradas [7, 9]. El proceso de filtración, y especialmente el de contralavado del filtro, requieren presiones de trabajo elevadas, por lo que los filtros juegan un papel importante en el consumo energético de los sistemas de riego por goteo [10], el cual se debería optimizar debido al incremento del coste de la energía [11].

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3310

La mejora del diseño de los filtros de arena puede reducir el consumo de energía e incrementar la eficiencia de filtración [12]. En los filtros de arena, la mayor parte de la pérdida de carga se localiza en los elementos auxiliares como el plato difusor y el sistema de drenaje [13]. Por su parte, Bové et al. (2017) [14] determinaron que mejorando el diseño del drenaje, se podía reducir significativamente la caída de presión en los filtros.

Aunque muchos estudios relacionan las características físicas del medio filtrante con la retención de sólidos, existe una falta de información sobre cómo algunas condiciones operativas de los filtros de arena, como la altura del medio filtrante y la velocidad de filtración, influyen en el proceso de filtración. Además, la reducción de la altura del medio de filtración implicaría una reducción del impacto ambiental [15].

El objetivo del presente estudio es analizar cómo afectan la altura del medio filtrante, la velocidad de filtración y tres diseños de drenaje distintos (el propuesto por Bové et al., 2017 [14] y otros dos de comerciales) tanto en la calidad de filtración, como en el consumo energético y de agua.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño experimental

Se utilizó el agua residual regenerada de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Celrà (Girona).

El sistema experimental consistió en tres filtros de arena con tres drenajes distintos: un filtro modelo FA1M (Lama, Sevilla, España) con drenaje de brazos colectores, otro modelo FA-F2-188 (Regaber, Parets del Vallès, España) con drenaje de cúpulas insertadas y el filtro experimental propuesto por Bové et al. (2017) [14] con drenaje de medio granular. La Figura 1 muestra el diseño de los tres drenajes utilizados mientras que la Tabla 1 muestra sus principales características.



Figura 1. Diseños de drenajes utilizados: medio poroso (A), cúpulas insertadas (B) y brazos colectores (C).

Tabla 1. Características de los drenajes utilizados en el ensayo.

Diseño del drenaje del filtro	Diámetro nominal del filtro (mm)	Superficie de filtración (m^2)	Caudal máximo filtrado (m^3/h)	Altura máxima del lecho filtrante (m)
Medio poroso	500	0.1960	20	0.70
Cúpulas insertadas	508	0.2026	18	0.69
Brazos colectores	500	0.1960	23	0.40

Todos los filtros fueron rellenados con arena silícea con un diámetro efectivo de 0.48 mm, coeficiente de uniformidad de 1.73, densidad real 2454 kg/m^3, densidad aparente 1509 kg/m^3 y porosidad de 0.39. Cada filtro tenía asociado una subunidad de riego, consistente en 4 laterales de 90 m cada uno.

El agua residual se bombeó de la estación depuradora hacia los filtros mediante un sistema de impulsión gobernado por un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA), y un variador de frecuencia que ajustaba el punto de funcionamiento de la bomba. El caudal de funcionamiento se midió con un caudalímetro electromagnético, que disponía de un transmisor de impulsos con señal 4-20 mA que permitía conocer el caudal exacto de funcionamiento. El sistema experimental permitía el funcionamiento de un único filtro a la vez. Debido a que en el filtro circulaba más caudal de agua del necesario en la subunidad de riego, una válvula proporcional de tres vías conducía el caudal de agua filtrado sobrante hacia un tanque donde se almacenaba, para posteriormente ser utilizada en los contralavados de los filtros. El agua se cloró después de pasar los filtros hasta alcanzar los 2 ppm de cloro libre, y hasta los 4 ppm cuando se utilizaba para el contralavado de los mismos. Los contralavados de los filtros, de 3 minutos de duración, se activaban cuando la pérdida de carga sobrepasaba los 50 kPa.

Se instalaron sensores para medir la calidad del agua antes y después de ser filtrada. Los parámetros que se midieron antes del proceso de filtración fueron conductividad eléctrica (CE), pH, temperatura, oxígeno disuelto (OD) y turbidez. Los parámetros que se determinaron después del proceso de filtración fueron únicamente el oxígeno disuelto y la turbidez.

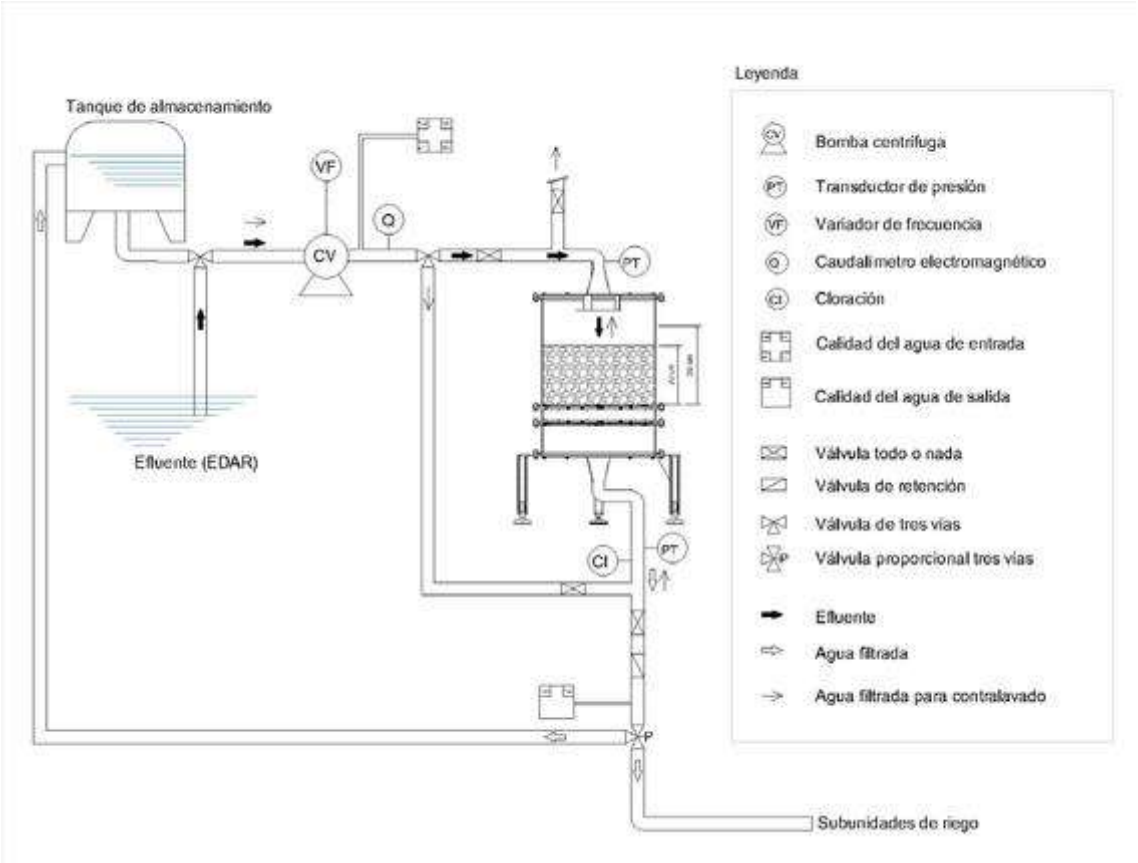


Figura 2. Esquema del diseño experimental. Para simplificar, sólo se representa un filtro.

2.2. Procedimiento operacional

Cada filtro se utilizó durante 1000 h. Se establecieron dos sesiones diarias de riego de 4 horas por filtro cada una. A lo largo de esas 1000 h, se ensayaron dos alturas de lecho filtrante (20 y 30 cm) y dos velocidades de filtración (30 y 60 m/h), lo que supuso un total de cuatro condiciones operativas distintas. Cada condición operativa fue probada durante 250 h para cada filtro. Las velocidades de filtración de 30 y 60 m/h correspondieron a caudales nominales de 6000 y 12000 l/h, respectivamente, con caudales de contralavado de 9000 y 15000 l/h, respectivamente. Puesto que el sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) implantado en la instalación [16] medía en tiempo real los niveles de turbidez del agua de entrada, se estableció que un sistema de alarma para detener el funcionamiento del sistema si se sobrepasaban las 20 FNU.

2.3. Caracterización del agua de entrada

Los parámetros fisicoquímicos fueron medidos y registrados cada minuto en el sistema SCADA indicado en la sección anterior. La Tabla 2 muestra los valores medios de cada parámetro del agua de entrada para cada condición operativa ensayada.

Tabla 2. Media y error estándar de los valores de entrada del efluente utilizado. Letras diferentes significan diferencias significativas (P<0.05) entre los valores de un mismo parámetro.

Altura lecho	Velocidad de filtración	Diseño del drenaje	Conductividad eléctrica	Oxígeno disuelto	pH	Temperatura	Turbidez
(m)	(m/h)		(dS/m)	(mg/l)	(-)	(ºC)	(FNU)
0.20	30	Medio poroso	2.68 ±1.24 abc	2.69 ±0.15 def	7.04 ±0.02 f	15.29 ±0.51 g	8.16 ±0.36 ab
		Cúpulas insertadas	2.90 ±0.79 a	3.07 ±0.11 cde	7.10 ±0.02 f	15.31±0.31 g	7.49 ±0.36 abc
		Brazos colectores	2.89 ±0.57 a	2.89 ±0.09 def	7.07 ±0.02 f	16.35 ±0.28 g	8.51 ±0.42 a
0.20	60	Medio poroso	2.79 ±0.40 ab	3.44 ±0.08 bcd	7.29 ±0.02 e	21.03 ±0.40 def	5.82 ±0.21 cd
		Cúpulas insertadas	2.18 ±0.71 de	4.27 ±0.11 a	7.71 ±0.02 a	24.01 ±0.21 ab	2.84 ±0.17 e
		Brazos colectores	2.54 ±0.29 bc	3.93 ±0.16 ab	7.52 ±0.02 b	25.02 ±0.11 a	3.50 ±0.30 e
0.30	30	Medio poroso	1.85 ±1.49 e	3.37 ±0.28 bcde	7.71 ±0.05 a	22.50 ±0.25 bcd	4.07 ±1.04 de
		Cúpulas insertadas	2.35 ±0.62 cd	2.66 ±0.20 ef	7.51 ±0.02 bc	23.17 ±0.11 b	7.35 ±0.91 abc
		Brazos colectores	2.66 ±0.42 abc	1.97 ±0.14 f	7.42 ±0.01cd	23.11 ±0.08 bc	5.91 ±0.31 cd
0.30	60	Medio poroso	2.58 ±0.48 abc	3.23 ±0.12 bcde	7.39 ±0.01 de	21.46 ±0.22 cde	6.29 ±0.23 bc
		Cúpulas insertadas	2.38 ±0.41 cd	3.45 ±0.13 bcd	7.44 ±0.01 bcd	20.04 ±0.17 ef	5.77 ±0.17 cd
		Brazos colectores	2.43 ±0.49 cd	3.79 ±0.10 abc	7.38 ±0.01 de	19.37 ±0.27 f	5.98 ±0.24 cd

Debido a la heterogeneidad del efluente utilizado a lo largo del ensayo, se observaron diferencias significativas para un mismo parámetro entre condiciones operativas y diseño del filtro. Sin embargo, no hubo diferencias significativas en las condiciones de 0.20 m de altura de lecho filtrante y 30 m/h de velocidad de filtración, ni en las de 0.30 m y 60 m/h, salvo en la temperatura en esta última condición.

2.4. Tratamiento de datos y análisis estadístico

Los datos de tiempo de filtración, caudal y volumen de filtración y lavado, presión a la entrada y salida del filtro, parámetros fisicoquímicos a la entrada y salida de los filtros, consumo eléctrico de filtración y lavado e inyección de cloro fueron medidos y registrados cada minuto por un sistema SCADA desarrollado previamente [16] y adaptado al presente ensayo.

La eficiencia de reducción (E) de turbidez y oxígeno disuelto se calculó con la expresión:

$$E = \frac{No-N}{No} \times 100 \quad (1)$$

donde N_0 y N son los valores de dichos parámetros a la entrada y salida de los filtros, respectivamente.

El volumen filtrado por unidad de consumo de energía eléctrica (m^3/kWh) fue calculado con la fórmula:

$$Veec = \frac{Vf}{EEf + EEb} \quad (2)$$

donde V_f es el volumen filtrado de cada ciclo de filtración (m^3) y EE_f y EE_b el consumo eléctrico durante un ciclo de filtración y lavado, respectivamente (kWh).

Se consideró un ciclo completo el tiempo comprendido entre dos lavados (desde el inicio de un lavado hasta terminar el proceso de filtración al llegar a una pérdida de carga de 50 kPa entre la presión inicial y final del filtro). Todos aquellos ciclos en los que no se alcanzaron los 50 kPa de caída de presión o en los que la toma de datos no fue fiable (debido, por ejemplo, a sensores descalibrados, realización de operaciones de mantenimiento, o con lavados ineficientes) se excluyeron del análisis de datos.

Para el análisis estadístico se utilizó el programa SPSS Statistics (IBM, New York, Estados Unidos). Para cada parámetro, el modelo utilizado incluyó como parámetros fijos el diseño del drenaje, la altura del medio filtrante y la velocidad de filtración. La turbidez de entrada fue tomada como covariable en el modelo cuando ésta tuvo efecto significativo. Para la diferenciación de medias, se utilizó el test de Tukey con un intervalo de confianza del 95%.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del volumen de agua y energía eléctrica consumida

La Tabla 3 muestra los valores medios del volumen de filtración y lavado, la ratio entre el volumen de contralavado y el volumen total, el consumo de energía eléctrica durante la filtración y contralavado, la ratio entre el consumo eléctrico de contralavado respecto el total y la ratio entre el volumen de agua en el proceso de filtración respecto al consumo de energía eléctrica total.

Tabla 3. Medias y error estándar de los volúmenes de agua y consumo de energía eléctrica para cada condición operativa.

Altura de lecho	Velocidad de filtración	Diseño del drenaje	Volumen filtrado por ciclo de filtración	Volumen de contralavado por ciclo de filtración	Ratio volumen lavado/Total ciclo	Consumo eléctrico filtración	Consumo eléctrico contralavado	Ratio consumo eléctrico contralavado/total	Volumen filtrado/Consumo eléctrico total ciclo
(m)	(m/h)		(m^3)	(m^3)	(%)	(kWh)	(kWh)	(%)	(m^3/kWh)
0.20	**30**	Medio poroso	31.04 ±4.84	0.45 ±0.003	1.76 ±0.27	3.14 ±0.41	0.02 ±0.001	0.78 ±0.11	8.70 ±0.04
		Cúpulas insertadas	17.51 ±1.64	0.45 ±0.003	3.21 ±0.35	2.07 ±0.19	0.02 ±0.001	1.12 ±0.12	8.35 ±0.10
		Brazos colectores	15.73 ±1.02	0.46 ±0.002	3.54 ±0.29	1.84 ±0.12	0.02 ±0.001	1.17 ±0.12	8.48 ±0.03
0.20	**60**	Medio poroso	36.43 ±3.30	0.77 ±0.003	5.14 ±1.17	4.18 ±0.39	0.04 ±0.001	2.94 ±0.94	8.51 ±0.10
		Cúpulas insertadas	54.19 ±5.26	0.77 ±0.007	2.37 ±0.39	6.17 ±0.60	0.04 ±0.001	0.96 ±0.15	8.70 ±0.07
		Brazos colectores	55.45 ±8.50	0.77 ±0.005	3.72 ±0.71	6.51 ±1.01	0.04 ±0.001	2.01 ±0.43	8.56 ±0.05
0.30	**30**	Medio poroso	92.12 ±21.53	0.45 ±0.002	1.76 ±1.18	10.76 ±2.50	0.01 ±0.002	0.40 ±0.24	8.50 ±0.05
		Cúpulas insertadas	39.82 ±4.89	0.45 ±0.002	2.60 ±0.53	4.81 ±0.59	0.02 ±0.001	0.90 ±0.20	8.22 ±0.04
		Brazos colectores	37.14 ±3.95	0.46 ±0.002	2.23 ±0.46	4.59 ±0.49	0.02 ±0.001	0.85 ±0.21	8.11 ±0.13
0.30	**60**	Medio poroso	33.10 ±2.57	0.68 ±0.017	2.97 ±0.27	4.08 ±0.32	0.04 ±0.001	1.40 ±0.10	8.01 ±0.10
		Cúpulas insertadas	24.22 ±1.40	0.75 ±0.008	4.14 ±0.23	3.00 ±0.17	0.05 ±0.001	2.15 ±0.13	7.94 ±0.04
		Brazos colectores	33.66 ±1.60	0.76 ±0.006	2.76 ±0.17	4.38 ±0.21	0.04 ±0.001	1.27 ±0.08	7.67 ±0.06

A velocidades de filtración altas (60 m/h) se filtró más volumen de agua y se consumió más energía eléctrica, excepto en las condiciones de 0.30 m y 60 m/h, donde los ciclos fueron cortos debido a que alcanzaban la consigna de pérdida de carga rápidamente. En general, con alturas de lecho filtrante de 0.20 m se filtró más volumen de agua por unidad de energía eléctrica consumida que con alturas de 0.30 m.

3.2. Efecto del diseño del drenaje y las condiciones operativas en la calidad del efluente

Las eficiencias de reducción del oxígeno disuelto (OD) y turbidez se calcularon mediante la ecuación (1) y fueron tratadas estadísticamente. Se halló un efecto significativo de la interacción entre el diseño del drenaje y la velocidad de filtración ($P<0.05$) en la reducción del oxígeno disuelto y una triple interacción de los tres factores en la reducción de turbidez ($P<0.001$).

Bajo velocidades de 30 m/h no hubo diferencias significativas ($P<0.05$) entre diseños de drenajes en la variación de oxígeno disuelto, aunque el diseño de brazos colectores obtuvo aumentos mayores. Sin embargo, para velocidades de 60 m/h, el incremento de OD fue significativamente mayor en el diseño de cúpulas insertadas (31.10%) que en el de medio poroso (11.22%) y el de brazos colectores (-3.52%).

En la reducción de turbidez, se detectó una interacción triple de los factores diseño del drenaje, altura del lecho filtrante y velocidad de filtración. Estos dos últimos factores fueron estudiados para cada diseño del drenaje (Figura 3).

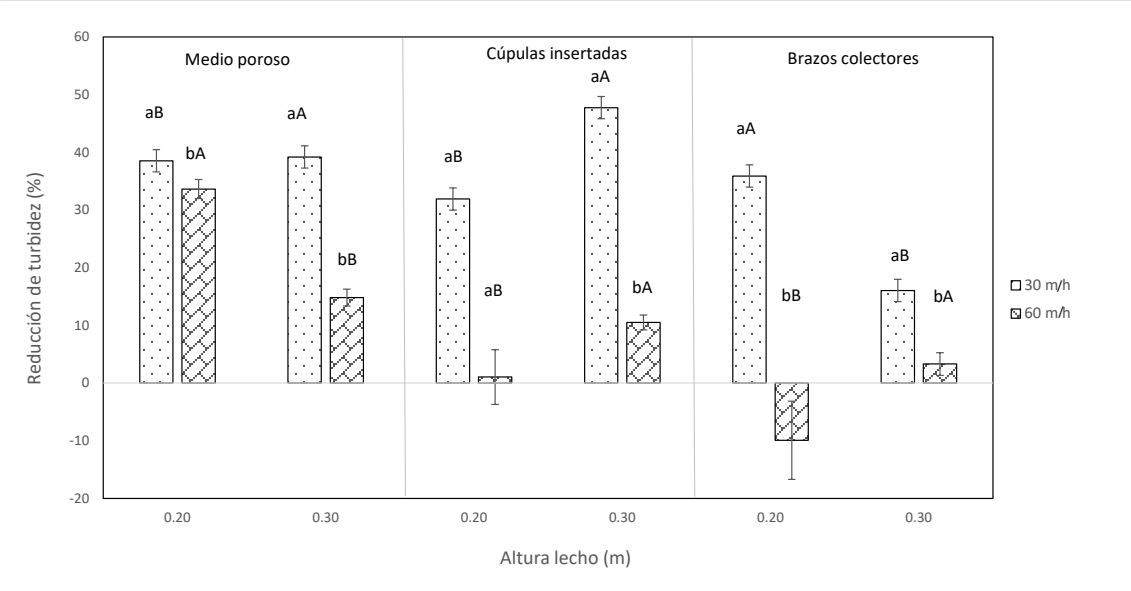


Figura 3. Interacciones entre altura del lecho filtrante y velocidades de filtración para cada diseño del drenaje, en los valores de reducción de turbidez. Para cada altura y diseño, letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($P<0.05$) entre velocidades. Para cada velocidad y diseño, diferentes mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($P<0.05$) entre alturas de lecho filtrante.

En general, el filtro con drenaje de medio poroso presentó una reducción mayor de la turbidez que los otros dos filtros para todas las condiciones operativas, excepto para una altura de lecho de 0.30 m y 30 m/h de velocidad de filtración, donde fue el diseño de cúpulas insertadas el que obtuvo una reducción mayor (47.74 % respecto 39.19 %). Para todos los diseños de drenajes, velocidades altas de filtración (60 m/h) presentaron reducciones de turbidez menores que con velocidades bajas (30 m/h). Sin embargo, no hubo un patrón de comportamiento tan claro por lo que a alturas de lecho filtrante se refiere. Algunos autores han observado reducciones mayores

de turbidez con velocidades bajas de filtración [17, 18], que con velocidades altas. Las reducciones de turbidez tienden a producirse en las primeras capas del lecho filtrante mientras que con velocidades inferiores este fenómeno no es tan evidente [18]. El diseño del drenaje también afecta al proceso de contralavado, que puede estar relacionado con la reducción de turbidez, ya que los drenajes son esenciales para garantizar la eliminación de las partículas retenidas durante el lavado [19].

3.3. Efecto del diseño del drenaje y las condiciones operativas en el consumo de agua y energía eléctrica.

El análisis de los datos de volumen utilizado en el proceso de filtración por unidad de energía eléctrica total utilizada en un ciclo de filtración halló interacciones significativas ($P<0.001$) entre los factores de altura del lecho filtrante y velocidad de filtración, y los de diseño del drenaje y velocidad de filtración ($P<0.001$).

En lo que a la interacción entre altura del lecho filtrante y velocidad de filtración se refiere, el volumen de agua filtrado por unidad de energía eléctrica consumida, bajo una misma velocidad, fue significativamente mayor con alturas de 0.20 que de 0.30 m (8.47 frente 8.21 m^3/kWh, respectivamente para 30 m/h; y 8.57 frente 7.87 m^3/kWh, respectivamente para 60 m/h). Sin embargo, no se encontraron diferencias entre velocidades para la altura de lecho de 0.20 m, pero sí para la altura de 0.30 m, siendo la ratio mayor con la velocidad de 30 m/h que con la de 60 m/h (8.21 ante 7.87 m^3/kWh).

En la Figura 4 se muestra la interacción entre la velocidad de filtración y el diseño del drenaje. Para velocidades de 30 m/h, el diseño de medio poroso filtró significativamente ($P<0.05$) más volumen de agua por unidad de energía eléctrica consumida (8.61 m^3/kWh) que el diseño de brazos colectores y el de cúpulas insertadas (8.33 y 8.27 m^3/kWh, respectivamente). Para velocidades de 60 m/h, los diseños de medio poroso y cúpulas insertadas presentaron una ratio superior (8.25 y 8.14 m^3/kWh, respectivamente) que el diseño de brazos colectores (7.88 m^3/kWh). Tanto el diseño de medio poroso como el de brazos colectores tuvieron una ratio mayor con velocidades de filtración de 30 m/h que con 60 m/h (8.61 frente 8.25 m^3/kWh para el medio poroso y 8.33 frente 7.88 m^3/kWh para el de brazos colectores).

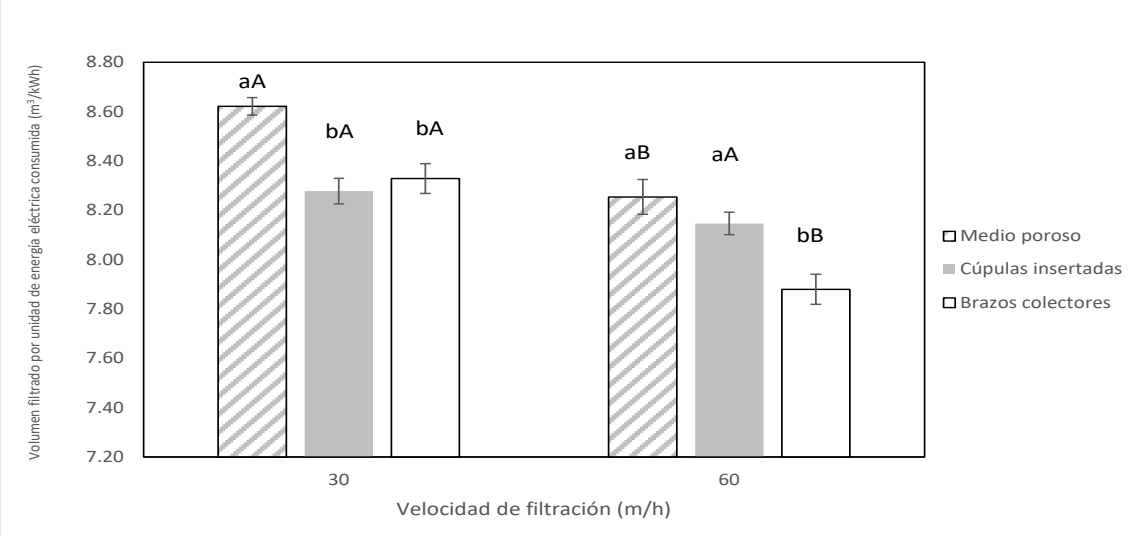


Figura 4. Interacciones entre velocidades de filtración y diseño del drenaje en el volumen de agua filtrada por unidad de consumo de energía eléctrica (m^3/kWh). Para cada velocidad de filtración, letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($P<0.05$) entre diseños de drenajes. Para cada diseño de drenaje, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($P<0.05$) entre velocidades de filtración.

Finalmente, los resultados del volumen utilizado en filtración por unidad de consumo de energía eléctrica concuerdan con los obtenidos en otros estudios [17], en donde el diseño de tres filtros de arena, diferentes condiciones operativas y el tamaño de arena utilizada como medio, tuvieron efecto en la caída de presión dentro del filtro. En dicho estudio, la caída de presión incrementó tanto para velocidades de filtración como para alturas de lecho mayores en todos los filtros testados, que fueron de características similares a los del presente ensayo.

4. Conclusiones

Las condiciones operativas y los distintos diseños del drenaje afectan a la calidad del efluente, al volumen de agua filtrada y al consumo energético eléctrico en los filtros de arena utilizados en sistemas de riego por goteo utilizando aguas residuales.

Se observó la existencia de una interacción triple entre el diseño del drenaje, la altura del lecho filtrante y la velocidad de filtración en la reducción de la turbidez conseguida por los filtros. Cada filtro presentó mayores reducciones de la turbidez a una velocidad de filtración de 30 m/h. Asimismo, el diseño del drenaje de medio poroso presentó reducciones de turbidez mayores que los otros dos diseños para todas las condiciones operativas ensayadas, excepto para la altura de lecho de 0.30 m y velocidad de filtración de 30 m/h, donde los niveles de entrada de turbidez para este diseño fueron muy bajos comparados con los que tuvieron los otros dos filtros.

Por otro lado, se filtró mayor volumen de agua por unidad de energía eléctrica consumida con una altura de lecho de 0.20 que con 0.30 m (8.53 frente 7.95 m^3/kWh), y bajo esta última altura, también fue mayor la ratio bajo 30 m/h que con 60 m/h (8.21 frente 7.87 m^3/kWh). El diseño de drenaje de medio poroso presentó valores significativamente superiores que los otros dos diseños para ambas velocidades de filtración, especialmente a una velocidad de filtrado de 30 m/h.

Finalmente, cuando se utilicen aguas residuales regeneradas con características similares a las de este ensayo, velocidades bajas de filtración proporcionan mayores reducciones de turbidez (34.17 % con 30 m/h respecto 11.27 % con 60 m/h) y más volumen de agua filtrada por unidad de energía eléctrica consumida (8.35 respecto 8.11 m^3/kWh). Asimismo, el diseño de medio poroso propuesto por Bové et al. (2017) [14] obtuvo una reducción media de turbidez superior (12.83%) que los otros dos diseños estudiados, ofreciendo una mayor protección a la obturación de los goteros, además de consumir un 2.77% menos de energía eléctrica respecto al diseño que mostró los valores más altos de consumo energético. La altura del lecho filtrante no mostró un patrón claro en cuanto a la reducción de turbidez, aunque alturas menores permitieron filtrar más volumen de agua por unidad de energía eléctrica consumida.

5. Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Ministerio de Economía y Competitividad por financiar el presente ensayo, incluido en el proyecto de investigación con referencia AGL2015-63750-R. Carles Solé-Torres es beneficiario de la beca pre-doctoral IFUdG2016/72 otorgada por la Universidad de Girona. Los autores también quieren agradecer al Municipio de Celrà su ayuda en la realización de este experimento.

Referencias

1. Asano T., Burton F.L., Leverenz H.L. Water reuse: issues, technologies and applications. 2007, McGraw Hill Inc, New York.
2. Bucks D.A., Nakayama F.S., Gilbert R.G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. Agric. Water Manage. 1979, 2 (2), 149–162.
3. Ravina I., Paz E., Sofer Z., Marcu A., Shisha A., Sagi G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. Irrig. Sci. 1992, 13 (3), 129–139.
4. Oron G., Shelef G., Turzynski B. Trickle irrigation using treated wastewaters. J. Irrig. Drain. Div., 1979, 105 (IR2), 175–186.

5. Capra A., Scicolone B. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. J. Clean Prod. 2007, 15 (16), 1529–1534.
6. Duran-Ros M., Puig-Bargués J., Arbat G., Barragán J., Ramírez de Cartagena F. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents. Agric. Water Manage. 2009, 96 (10), 67–79.
7. Tajrishy M.A., Hills D.J., Tchobanoglous G. Pretreatment of secondary effluent for drip irrigation. J. Irrig. Drain. Eng. 1994, 120 (4), 716–731.
8. Trooien T.P., Hills D.J. Application of biological effluent. In: Lamm, F.R., Ayars, J.E., Nakayama, F.S. (Eds.), Microirrigation for Crop Production. Design, Operation, and Management. 2007, Elsevier, Amsterdam, pp. 329-353.
9. Puig-Bargués J., Barragán J., Ramírez de Cartagena, F. Filtration of effluents for microirrigation systems. Trans. ASAE. 2005, 48(3): 968–978.
10. Bové J., Arbat G., Pujol T., Duran-Ros M., Ramírez de Cartagena F., Velayos J., Puig-Bargués J. Reducing energy requirements for sand filtration in microirrigation: improving the underdrain and packing. Biosyst. Eng. 2015, 140, 67–78.
11. Tarjuelo J.M., Rodríguez-Díaz J.A., Abadía R., Camacho E., Rocamora C., Moreno M.A. Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. Agric. Water Manage. 2015, 162, 67-77.
12. Burt C., Howes D. J., Freeman B. Public Interest Energy Research (PIER) Program. Final Project Report, Agriculture Water Energy Efficiency. 2011, California Energy Commission and Irrigation Training and Research Center, San Luis Obispo, California, 263 pp.
13. Arbat G., Pujol T., Puig-Bargués J., Duran-Ros M., Barragán J., Montoro L., Ramírez de Cartagena F. Using computational fluid dynamics to predict head losses in the auxiliary elements of a microirrigation sand filter. Trans. ASABE. 2011, 54(4), 1367 -1376.
14. Bové J., Puig-Bargués J., Arbat G., Duran-Ros M., Pujol T., Pujol J., Ramírez de Cartagena F. Development of a new underdrain for improving the efficiency of microirrigation sand media filters. Agric. Water Manage. 2017, 179, 296-305.
15. Bové J., Pujol J., Arbat G., Duran-Ros M., Ramírez de Cartagena F., Puig-Bargués J. Environmental assessment of underdrain designs for a sand media filter. Biosyst. Eng. 2018, 167, 126-136.
16. Duran-Ros M., Puig-Bargués J., Arbat G., Barragán J., Ramírez de Cartagena F. Definition of a SCADA system for a microirrigation network with effluents. Comput. Electron. Agric. 2008, 64 (2), 338-342.
17. Mesquita M., Testezlaf R., Ramirez J. The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss. Agric. Water Manage. 2012, 115, 178-185.
18. De Deus F.P., Testezlaf R., Mesquita M. Assessment methodology of backwashing in pressurized sand filters. Rev. Bras. Eng. Agr. Amb. 2016, 20 (7), 600-605.
19. Mesquita M. Desenvolvimento tecnológico de um filtro de areia para irrigação localizada. Tese de Doutorado. 2014, FEAGRI/UNICAMP, Campinas, 169 pp.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

El cultivo asociado de melón-caupí puede mejorar la producción del melón, la productividad del terreno y reducir el uso de fertilizantes

J.A. Acosta Avilés[1], V. Sánchez-Navarro[1], Ozbolat, O.[1], S. Martínez-Martínez[1], R. Zornoza[1]

[1] Universidad Politécnica de Cartagena. Área de Ingeniería Agroforestal (Departamento de Ingeniería Agronómica). Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena (Murcia); ja.acosta@upct.es

Resumen: El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes combinaciones de melón asociado con caupí en el rendimiento y calidad del melón. Bajo manejo ecológico, se compararon el monocultivo de melón con 3 sistemas de cultivo asociado melón-caupí intercalando filas en las proporciones 1:1, 2:1 y mixto (donde en una misma fila se alterna melón y caupí). En las parcelas de estudio se incorporaron residuos de leguminosas como abono verde y se disminuyó la fertilización en un 30% en los sistemas asociados. Todas las combinaciones de cultivos asociados aumentaron el rendimiento de melón entre un 34-70%, mientras que el rendimiento comercial fue entre un 40-80% superior en los sistemas asociados. No se observaron diferencias significativas en los parámetros de calidad del melón, a excepción del contenido de azúcar, que fue ligeramente superior en los melones cultivados en monocultivo. Los valores del LER fueron 1,82; 1,91 y 1,89 para los sistemas 1:1, 2:1 y mixto, respectivamente, destacando el aumento significativo en la productividad de la tierra cuando se intercala el melón con el caupí. Por lo tanto, la introducción de caupí en el cultivo asociado con melón resulta un sistema sostenible, con disminuciones en el uso de fertilizantes a la vez que se aumentaba tanto el rendimiento de melón como el LER, sin efectos negativos significativos en la calidad.

Palabras clave: *Cucumis melo*; *Vigna unguiculata*; cultivos asociados; manejo ecológico; rendimiento; productividad de la tierra

1. Introducción

La inclusión de leguminosas en sistemas de cultivos asociados puede ser una buena alternativa para incrementar tanto la fertilidad del suelo como el contenido de materia orgánica. Las leguminosas mejoran la fertilidad del suelo a través de la fijación biológica de nitrógeno, la cual se produce a través de la simbiosis entre leguminosas y bacterias rizosféricas, como son las α- y β-proteobacterias con la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico [1]. Además, el uso de leguminosas puede favorecer la acumulación de C y N en el suelo a través de la producción de biomasa subterránea, tipo y cantidad de exudados de raíces y la estimulación de microorganismos del suelo [2]. Todo ello, reduce la necesidad de aplicar grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados [3], favoreciendo indirectamente la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Finalmente, la introducción de leguminosas asociadas a otros cultivos proporciona otros efectos positivos, como inducir el crecimiento de microorganismos del suelo [4] o incluso reducir la necesidad de pesticidas debido a la diversificación de cultivos [5].

El caupí o judía de careta (*Vigna unguiculata* L. Walp) es una leguminosa de grano, nativa del sur de África, aunque es consumida ampliamente en todo el mundo [6]. Desde el punto de vista nutricional, el caupí es una fuente rica de proteínas, calorías, minerales y vitaminas y, por lo tanto,

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3436

se considera como un alimento con un alto valor nutricional [7]. Además, es una especie bien adaptada a ambientes estresantes asociados a altas temperaturas, sequías o baja fertilidad, por lo que se considera un cultivo alternativo adecuado en regiones áridas y semiáridas [8].

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes combinaciones de melón (*Cucumis melo*) asociado con caupí (*Vigna unguiculata*) en la producción y calidad de melón, y en el coeficiente de tierra equivalente (LER).

2. Materiales y métodos

Este estudio se realizó en el Campo de Cartagena, SE España, con clima mediterráneo semiárido, caracterizado por una temperatura media anual de 18°C y una precipitación anual inferior a 300 mm, teniendo una evapotranspiración anual de alrededor de 900 mm.

En este estudio se comparó un monocultivo de melón con diferentes sistemas de cultivo asociado melón-caupí en el verano de 2018: asociado en hileras en relación 1:1 (melón: caupí), asociado en hileras en relación 2:1 (melón:caupí) y cultivo mixtos (donde en una misma fila se alterna melón y caupí).

El experimento de campo se diseñó mediante bloques aleatorios con tres repeticiones, donde cada bloque tenía una superficie de 150 m2. El monocultivo de melón se realizó en un bloque separado del resto, a 200 m de distancia de los sistemas asociados para evitar la influencia de la atracción de insectos por el crecimiento del caupí. Las plántulas de melón se sembraron con una densidad de 0,4 plantas m-2, con una separación de 200 cm entre filas y 120 cm entre plantas en todas las parcelas (sistemas monocultivos y asociados). Las semillas de caupí se sembraron entre dos hileras de melón en los sistemas asociados, con un espacio de 100 cm entre las hileras de melón y caupí. En estos sistemas asociados (1:1 y 2:1), el caupí se separó 20 cm entre plantas en la misma fila. La densidad de las plantas fue de 2.5 plantas m-2 y 1.5 plantas m-2 en los sistemas asociados 1:1 y 2:1, respectivamente. En el sistema mixto, el caupí se sembró en todas las filas de melón, y entre dos plantas de melón, y por lo tanto en una densidad de 0,4 plantas m-2, con un espacio de 200 cm entre filas y 120 cm entre plantas. Por lo tanto, la densidad del melón fue la misma en los diferentes tratamientos, mientras que la densidad del caupí cambió.

Todos los cultivos fueron regados por goteo, aplicando 2600 m3/ha, y cultivados bajo manejo orgánico, el cual consistió en la aplicación de un fertilizante ecológico, NORGAN (3.7% N y 7% K2O), aplicando 3000 l/ha en monocultivo de melón y 2100 l/ha en los asociados/mixto. No se aplicaron herbicidas, mientras que los productos utilizados frente a plagas fueron Breaker, Pirecris, Elosal, y Amicos. En los sistemas asociados, redujimos la tasa de fertilizantes en un 30% en comparación con el monocultivo. Se incorporaron los residuos del cultivo en los sistemas asociados caupí-melón, con la intención de incorporar los residuos de la leguminosa. El laboreo que se realizó en el monocultivo fue laboreo convencional, mientras que en el asociado se realizó una labor superficial con rotavator (profundidad 15-20 cm).

El melón y el caupí se cosecharon simultáneamente del 31 de julio al 10 de agosto. La cosecha se realizó manualmente como tradicionalmente se realiza en el área de estudio, con el fin de evitar daños en los frutos.

Para calcular la relación de tierra equivalente, se estableció un monocultivo de caupí con 5 plantas m-2, y con un espacio de 100 cm entre filas y 20 cm entre plantas, el cual es el patrón tradicional de este cultivo.

3. Resultados y discusión

Los resultados indicaron que las distintas combinaciones de cultivos asociados melón-caupí aumentaron significativamente la producción del melón, el número de melones por hectárea y el peso promedio de los mismos (Figura 1).

La producción de melón aumentó entre un 34-70% en comparación con el monocultivo, mientras que la producción de frutos comercializables lo hizo entre el 40-80%. De este modo, el mejor sistema, desde el punto de vista de la producción, fue la configuración 2:1 y el sistema mixto, con valores de 24 759 kg ha^{-1} y 26 272 kg ha^{-1}, respectivamente (Figura 1). Los aumentos en la producción de los cultivos se asociaron con aumentos en el número de melones por planta y en su tamaño.

El número de melones por hectárea aumentó hasta los 6556, 7722 y 8278 en el sistema 1:1, en el sistema mixto y en el sistema 2:1, respectivamente, en comparación con los 5605 melones por hectárea en el monocultivo (Figura 1). Esto fue probablemente debido al incremento de los polinizadores en los sistemas asociados. De hecho, se observó que la floración del caupí atrajo una gran cantidad de insectos, muchos de los cuales eran polinizadores. La coincidencia en la floración del caupí con la floración del melón facilitó, de este modo, una mayor tasa de polinización de flores de melón, lo que contribuyó a aumentar el número de melones por planta.

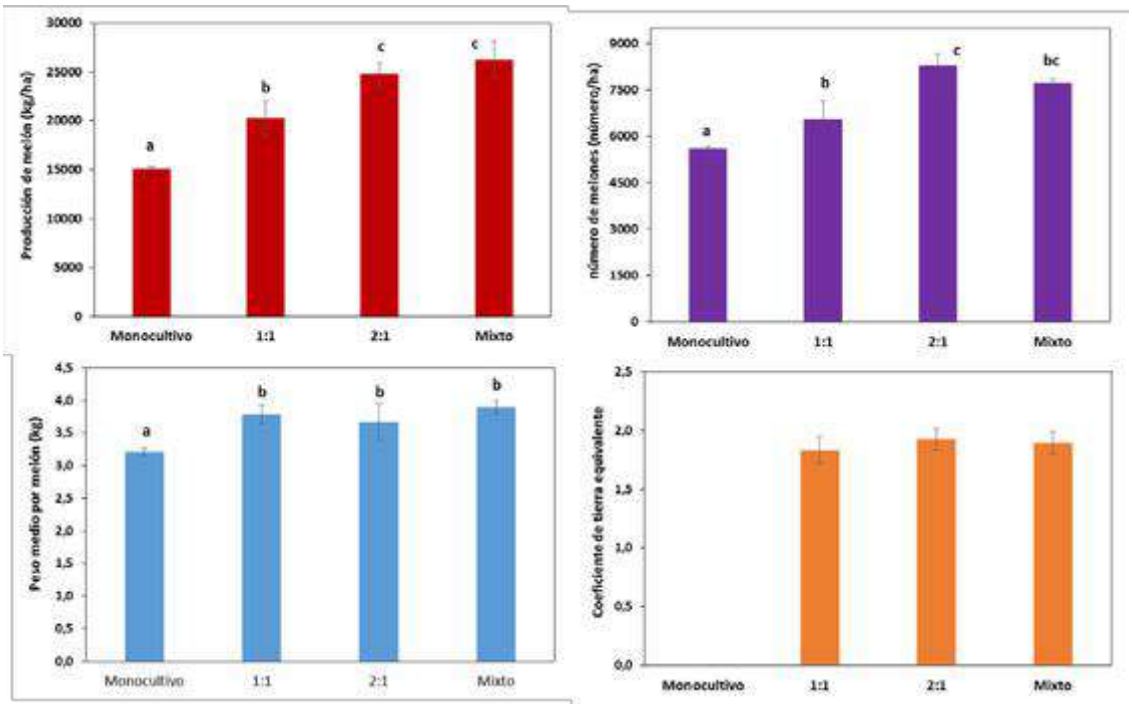


Figura 1. Producción de melón, número de melones, peso promedio de melón y relación de equivalencia de la tierra, de los sistemas de monocultivo e intercalados de melón bajo manejo orgánico. Las barras verticales indican error estándar. Las diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas (post hoc de Tukey $p < 0.05$).

De igual modo, el peso de los melones aumentó significativamente en comparación con el monocultivo (3,21 kg) en todos los sistemas diversificados sin diferencias significativas entre ellos, con valores que oscilan entre 3,70 y 3,90 kg (Figura 1). Esto podría atribuirse a que el cultivo de caupí tiene una rizosfera muy activa, con una intensa rizodeposición que activa las poblaciones microbianas, con una alta capacidad de movilizar nutrientes del suelo [9]. Además, el caupí también puede fijar nitrógeno atmosférico, lo que contribuye a aumentar la fertilidad del suelo. Estas características probablemente fueron responsables del aumento en el tamaño promedio de los melones en los sistemas asociados, ya que los nutrientes probablemente estaban más biodisponibles.

El coeficiente de tierra equivalente (LER) fue de 1,82; 1,91 y 1,89 para 1:1, 2:1 y cultivos asociados mixtos, respectivamente, destacando el aumento significativo en la productividad de

la tierra cuando se asocia el melón con el caupí. Esto fue debido tanto al aumento del rendimiento de melón en los sistemas de cultivo asociados, como a la producción adicional de caupí.

Finalmente, que no se observaron diferencias significativas en los parámetros de calidad del melón, excepto por el contenido de azúcar, que fue ligeramente mayor en los melones monocultivos (13,1 °Brix), en comparación con los sistemas asociados (12,4-12,6 °Brix).

4. Conclusiones

Este estudio permite afirmar que la introducción de caupí en cultivos asociados con melón aumenta la producción del cultivo principal, tanto el número de frutos y su tamaño de los mismos se vieron incrementados significativamente, esto fue principalmente debido a una mayor polinización de las flores de melón favorecida por la floración del caupí, la cual atrajo a un mayor número de insectos polinizadores. No obstante, en futuros ciclos se evaluará con mayor detalle la presencia de estos insectos beneficiosos con el fin de contrastar esta hipótesis con datos objetivos y cuantitativos.

De igual modo, la asociación melón-caupí permitió reducir el uso de insumos externos (30% la fertilización), al mismo tiempo que el coeficiente de tierra equivalente casi se duplicó, no observándose diferencias en la calidad de los frutos.

Por lo tanto, se puede concluir que la asociación melón-caupí podría ser una alternativa sostenible a los sistemas de producción tradicionales en monocultivo, lo cual será corroborado mediante la evaluación de varios ciclos de cultivo.

5. Agradecimientos

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) mediante el proyecto ASOCIAHORTUS (AGL2017-83975-R).

Referencias

1. Sawada H., Kuykendall L.D., Young J.M. Changing concepts in the systematics of bacterial nitrogen-fixing legume symbionts. The Journal of General and Applied Microbiology. 2003, 49, 155–179.
2. Drinkwater, L.E., Wagoner, P., Sarrantonio M. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. Nature. 1998, 396, 262–265.
3. St Luce M., Grant C.A., Zebarth B.J., Ziadi N., O´Donovan J.T., Blackshaw R.E., Harker K.N., Johnson E.N., Gan Y., Lafond G.P., May W.E., Khakbazan M., Smith E.G. Legumes can reduce economic optimum nitrogen rates and increase yields in a wheat-canola cropping sequence in western Canada. Field Crops Research, 2015, 179, 12–25.
4. Lupwayi N.Z., Kennedy A.C. Grain legumes in Northern Great plains: impacts on selected biological soil processes. Agronomy Journal 2007, 99, 1700–1709
5. Munier-Jolain N. The long-term impact of grain legumes on the environment: possibilities for reducing herbicides. Grain. Legumes. 2002, 36, 16–17.
6. Singh B.B. Cowpea: The Food Legume of the 21st Century. Crop Science Society of America. 2014.
7. Deshpande S.S. Food legumes in human nutrition: a personal perspective. Food Sciencie and Nutricion 1992, 32, 333–363.
8. Chikoye D., Abaidoo R., Fontem L.A. Response of weeds and soil microorganisms to imazaquin and pendimethalin in cowpea and soybean. Crop Protection 2014, 65, 168–172.
9. Sánchez-Navarro V., Zornoza R., Faz A., Fernández J.A. Comparing legumes for use in multiple cropping to enhance soil organic carbon, soil fertility, aggregates stability and vegetables yields under semiarid conditions. Science Horticulturae 2019, 246, 835-841.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Empleo simultáneo de la fotografía digital y datos de campo para el seguimiento del estado fenológico y el consumo hídrico en lechuga (*Lactuca Sativa* L CV Neruda) con distintos tratamientos de suelo

A. Fernández López[1], M. Soler-Méndez[2], J.M. Molina-Martínez[2], G. García Mateos[3], A. Ruiz-Canales[1]

[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández de Elche, Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO-UMH). Crtra. de Beniel, km 3,2. 03312 Orihuela (Alicante), Spain.
[2] Grupo de I+D+i de Ingeniería Agromótica y del Mar. UPCT. C/ del Ángel s/n. Ed. ELDI E1.06.30202 Cartagena (Murcia), Spain
[3] Departamento de Informática y Sistemas. Área de Lenguajes y Sistemas. Facultad de Informática. Universidad de Murcia. Campus de Espinardo, 30100 Murcia, Spain

Resumen: Se desarrollaron los ensayos en una parcela experimental de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO) de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH). Las diferencias entre tratamientos dependían de la adición de diferentes tipos de enmiendas y abonado en el suelo. Se escogió como cultivo de ensayo la lechuga (*Lactuca Sativa* L) pues tiene un ciclo corto y se pueden obtener resultados de una manera relativamente rápida y sencilla. Se realizó a lo largo de dos campañas un seguimiento de fotografías cenitales con cuatro repeticiones por tratamiento. Mediante la evolución de imágenes cenitales de las dos cosechas de lechugas se analizaron las imágenes 2D mediante software CAPS para calcular los diámetros de la planta y el porcentaje de cobertura vegetal (PGC) a lo largo del tiempo. Durante las tres campañas del experimento, además del cálculo de los diámetros, se midieron simultáneamente, la altura de la planta, la profundidad de la raíz y el peso de la cosecha. En la segunda campaña y desde la nascencia hasta mitad de campaña, el tratamiento T1 tiene valores de diámetro de planta superiores al resto. El T2 en todo momento está por debajo de los demás tratamientos. Se infiere la influencia de la adición de harina de pórfido en los primeros estadios de crecimiento. Esto se corrobora con los valores de altura de planta y no así con los valores de profundidad de raíz. Igualmente, en la segunda campaña y con las medidas de ejemplares a lo largo del experimento se diferencia el tratamiento T1 respecto al resto.

Palabras clave: PGC, consumo de agua en riego, CAPS, riego localizado, horticultura

1. Introducción

El conocimiento de las necesidades hídricas de los cultivos posibilita conseguir una gestión adecuada del agua de riego con la máxima eficiencia [1]. Mediante la estimación del balance hídrico a escala de cultivo se establece la demanda de agua a lo largo del ciclo de vida del cultivo [2]. Este balance se obtiene estimando las entradas y salidas de agua que se producen a escala del cultivo y añadiendo por riego las cantidades perdidas.

El empleo de imágenes de cobertura vegetal a la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos está basado en la determinación de la fracción de cobertura del dosel vegetal [3]. La fracción de cobertura vegetal (PGC) permite estimar las necesidades hídricas de los cultivos al

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3509

estar directamente relacionado con la evapotranspiración (ETc), que se relaciona con el coeficiente de cultivo (Kc) y la evapotranspiración de referencia (ETo) [4]. En lechuga, se establecieron métodos basados en el procesamiento digital de imágenes para estimar el coeficiente de cultivo a partir de fotografías digitales de la cobertura vegetal [5].

El objetivo del presente trabajo es el seguimiento del estado fenológico y el consumo hídrico de un cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L. cv. Neruda) con tres tipos de combinación de fertilizante y de enmienda del suelo. Para calcular la cubierta vegetal se empleó fotografía digital y técnicas de procesamiento digital de imágenes. Se simultanearon los datos de la fotografía digital con medidas de planta (altura de planta, profundidad radical), consumo hídrico (riego) y lluvia y peso de la cosecha.

2. Materiales y métodos

Se desarrollaron los ensayos durante dos campañas (del 03/10/2016 al 12/12/2016 y del 23/02/2017 al 04/05/2017) en una parcela experimental de 300 m^2 de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO) de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH). Se estudiaron cuatro tratamientos diferenciales respecto a las propiedades del suelo de cultivo. Los datos presentados en esta comunicación se incluyen dentro de un estudio más amplio que fue el estudio del efecto en las propiedades texturales y edáficas del suelo, así como sus efectos en la producción hortícola, de la adición de harina de roca de pórfido, material desarrollado por la empresa Fulsan, S.A., a un suelo agrícola. Se escogió como cultivo de estudio la lechuga (*Lactuca Sativa* L Neruda) pues tiene un ciclo corto y se obtienen resultados de una manera relativamente rápida y sencilla.

En el primer tratamiento (T1) se le añadió al suelo al inicio de la campaña una cantidad convenida de harina de pórfido y se aplicó junto con un abonado de fondo inorgánico. Durante las dos campañas de riego de los dos ciclos de cultivo se le aplicó al correspondiente sector (T1) de la plantación de lechuga, además de las correspondientes dosis de riego establecidas, un abonado inorgánico (fertirriego).

Para el segundo tratamiento (T2) se mezclaron harina de pórfido Fulsan y compost (Bocashi) con el suelo agrícola de la parcela experimental y esta mezcla constituyó un abonado de fondo orgánico. Durante las dos campañas de riego se le aplicó al correspondiente sector (T2) de la plantación de lechuga, además de las correspondientes dosis de riego establecidas, un fertirriego orgánico. El tratamiento T2 no recibió fertirriego inorgánico.

Para el tercer tratamiento (T3) no se añadió ninguna sustancia inicialmente al suelo agrícola. Durante las dos campañas de riego de los dos ciclos de cultivo se le aplicó al correspondiente sector (T3) de la plantación de lechuga, además de las correspondientes dosis de riego establecidas, un abonado inorgánico (fertirriego), como en el tratamiento T1.

Adicionalmente se consideró incluir un cuarto tratamiento control (T4) para compararlo con los tratamientos anteriores. A este último tratamiento no se añadió abonado de fondo ni se le añadió fertirriego.

Se realizaron a lo largo de las dos campañas un seguimiento de fotografías cenitales con cuatro repeticiones por tratamiento. Mediante la evolución de imágenes cenitales de las dos cosechas de lechugas se analizaron las imágenes 2D mediante software CAPS® para calcular los diámetros de la planta y el porcentaje de cobertura vegetal (PGC) a lo largo del tiempo (Fig. 1). El software citado permite diferenciar en una fotografía, la zona de tierra de la zona de planta. De este modo se delimita cada una de las zonas a la vez que se determinan las superficies ocupadas por cada zona.

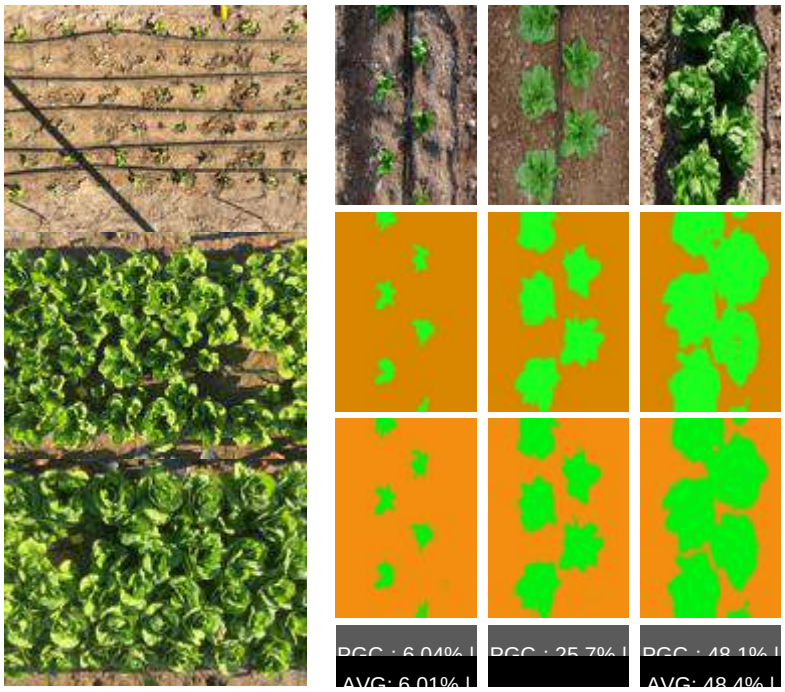


Figura 1. Metodología empleada para la determinación del porcentaje de cubierta sombreada mediante fotografía digital. A la izquierda las imágenes cenitales del marco de plantación en diferentes estados de crecimiento. A la derecha, mediante el software CAPS, se determina la zona correspondiente con la cubierta vegetal del cultivo de lechuga frente a la zona de tierra y elementos ajenos a la planta. Esta información se contrasta con los registros de los consumos de agua.

Durante las dos campañas del experimento, además del cálculo de los diámetros, se midieron en campo y en determinadas fechas, la altura de la planta, la profundidad de la raíz y el agua aplicada en riego y la lluvia. Simultáneamente se midió el peso de la cosecha en ambas campañas. Se muestran cada uno de los parámetros medidos en los apartados siguientes.

3. Resultados y discusión

En la segunda campaña y desde la nascencia hasta mitad de campaña, el tratamiento T1 tiene valores de diámetro de planta superiores al resto. El T2 en todo momento está por debajo de los demás tratamientos. Se puede inferir una cierta influencia de la adición de harina de pórfido en los primeros estadios de crecimiento. Esto se corrobora con los valores de altura de planta y no así con los valores de profundidad de raíz. Igualmente, en la segunda campaña y con las medidas de ejemplares a lo largo del experimento se diferencia el tratamiento T1 respecto al resto.

El peso medio de la cosecha (por planta) para la primera campaña fue el siguiente:
Tratamiento T1: 1,195 kg ± 0,303
Tratamiento T2: 1,014 kg ± 0,150
Tratamiento T3: 1,249 kg ± 0,259
Tratamiento T4: 1,077 kg ± 0,172
El peso medio de la cosecha para la segunda campaña fue el siguiente:
Tratamiento T1: 0,758 kg ± 0,192
Tratamiento T2: 0,788 kg ± 0,196
Tratamiento T3: 1,076 kg ± 0,222
Tratamiento T4: 0,896 kg ± 0,199

Según lo expuesto, la producción en la segunda campaña fue de menor cuantía, alrededor de un 3% menor.

Los valores de peso de cosecha (peso por planta) mostraron que en la primera cosecha se obtuvo el mayor peso en el tratamiento T3, seguido del tratamiento T1, T2 y T4.

Para la segunda cosecha, el mayor peso se dio en el tratamiento T3, seguido de T4, T2 y T1. Los valores de la segunda cosecha fueron un 3% menores.

Hay una cierta estabilización de la homogeneización del estado vegetativo respecto al riego en la segunda campaña, aunque los valores de cosecha han mostrado peores resultados. Puede que la influencia en los parámetros de cosecha se muestre en las siguientes cosechas ya que el suelo ha almacenado una serie de elementos y compuestos.

Primera campaña

Se muestra en la figura 2 la evolución del diámetro medio de la planta para la primera campaña. A lo largo de la primera campaña (del 03/10/2016 al 12/12/2016) los diámetros medios del T1 y T2 son inferiores al T3 y T4.

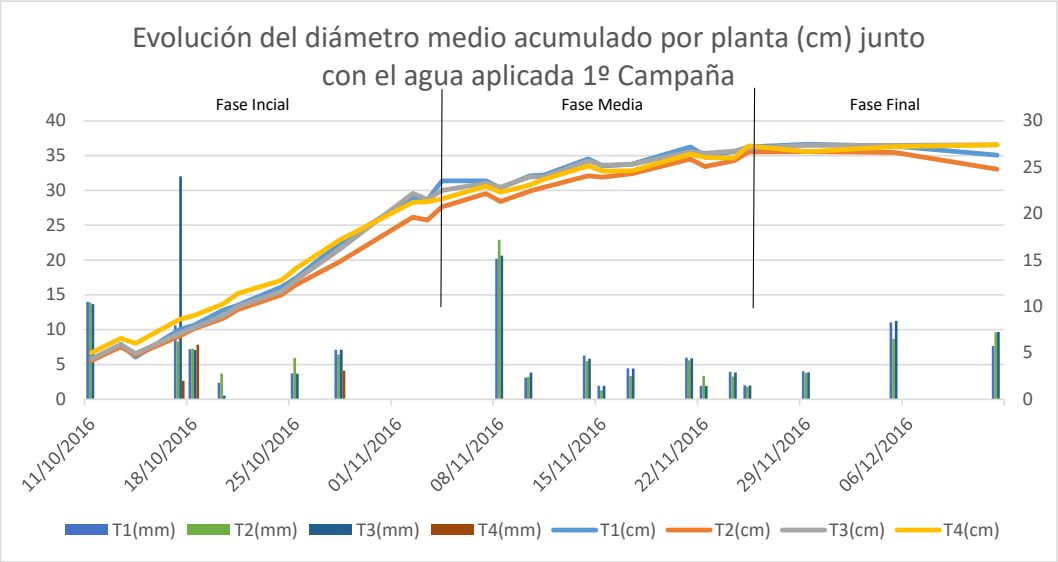


Figura 2. Comparativa de las medidas de diámetro medio mediante análisis de fotografía cenital para los cuatro tratamientos T1, T2, T3 y T4 durante la primera campaña (del 03/10/2016 al 12/12/2016). Se incluyen las cantidades de agua de riego aplicadas y lluvia caída.

Segunda campaña

En la figura 3 comienzan los tratamientos T1 y T2 a evolucionar con valores superiores a T3 y T4 pero a medida que avanza el experimento, el diámetro del T3 es superior al resto.

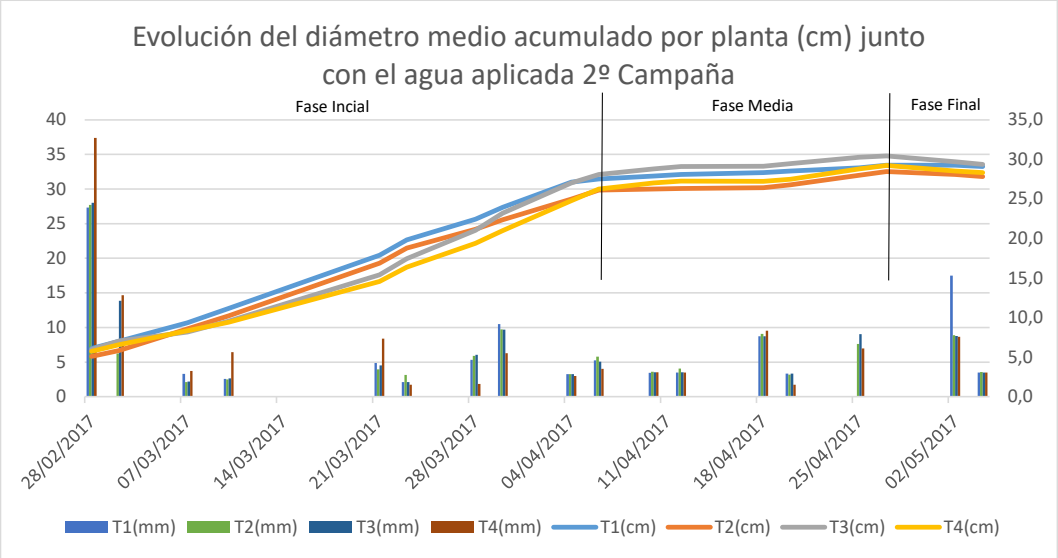


Figura 3. Comparativa de las medidas de diámetro medio mediante análisis de fotografía cenital para los cuatro tratamientos T1, T2, T3 y T4 durante la segunda campaña (del 23/02/2017 al 04/05/2017). Se incluyen las cantidades de agua de riego aplicada y lluvia caída.

Se muestra una cierta diferenciación en la segunda campaña a favor de los tratamientos T1 y T2 que al final del experimento no se da en el T2.

Los datos de la evolución de la altura de la planta se tomaron a lo largo del período experimental en determinadas fechas. Las figuras 4 y 5 reflejan la evolución de este parámetro medido directamente en campo.

Primera campaña

En la figura 4 se muestra que el tratamiento T1 tiene una altura mayor que el resto, pero el T2 se muestra en todo el período experimental por debajo del resto de tratamientos. T3 y T4 presentan valores intermedios.



Figura 4. Evolución de las medidas de la altura media de la planta en cm mediante medición directa en campo para los cuatro tratamientos T1, T2, T3 y T4 durante la primera campaña (del 03/10/2016 al 12/12/2016).

Segunda campaña

La evolución de las medidas de altura media de la planta durante la segunda campaña queda reflejada en la figura 5. En esta campaña, la tendencia de T1 y T2 ha sido superior a T3 y T4 desde el inicio hasta mitad de campaña. A partir de ese momento se invirtió la tendencia y los valores más elevados de altura media de planta correspondían a T3 y T4. Globalmente los valores han evolucionado de una manera similar en las dos campañas, aunque se hayan alcanzado algunos valores superiores puntuales en la segunda campaña.

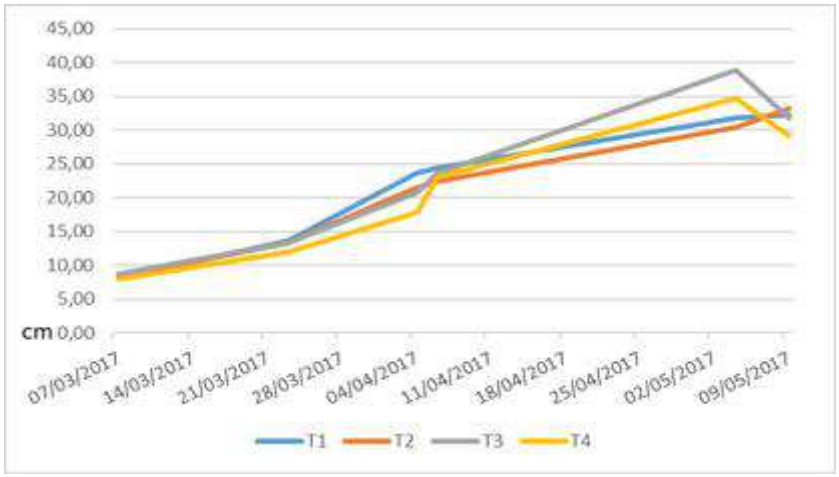


Figura 5. Evolución de las medidas de la altura media de la planta en cm mediante medición directa en campo para los cuatro tratamientos T1, T2, T3 y T4 durante la segunda campaña (del 23/02/2017 al 04/05/2017).

Los datos de la evolución de la profundidad de la raíz se midieron en campo a lo largo del período experimental. En las figuras 6 y 7 se muestran los resultados correspondientes.

Primera campaña

En la figura 6 se muestra que el tratamiento T1 y T2 tuvieron una tendencia a alcanzar mayores valores en la parte final del experimento, mientras que al principio ocuparon posiciones de menor valor.



Figura 6. Evolución de las medidas de la profundidad media de raíz en cm mediante medición directa en campo para los cuatro tratamientos T1, T2, T3 y T4 durante la primera campaña (del 03/10/2016 al 12/12/2016).

Segunda campaña

En la figura 7 se muestra que el tratamiento T1 y T2 tuvieron una tendencia a alcanzar mayores valores en la parte inicial del experimento, mientras que al final ocuparon las posiciones de menor valor.



Figura 7. Evolución de las medidas de la profundidad media de raíz en cm mediante medición directa en campo para los cuatro tratamientos T1, T2, T3 y T4 durante la segunda campaña (del 23/02/2017 al 04/05/2017).

4. Conclusiones

En la segunda campaña y desde la nascencia hasta mitad de campaña, el tratamiento T1 tiene valores de diámetro de planta superiores al resto. El T2 en todo momento está por debajo de los demás tratamientos. Se puede inferir una cierta influencia de la adición de harina de pórfido en los primeros estadios de crecimiento. Esto se corrobora con los valores de altura de planta y no así con los valores de profundidad de raíz. Igualmente, en la segunda campaña y con las medidas de ejemplares a lo largo del experimento se diferencia el tratamiento T1 respecto al resto.

Los valores de peso de cosecha (peso por planta) mostraron que en la primera cosecha se obtuvo el mayor peso en el tratamiento T3, seguido del tratamiento T1, T2 y T4.

Para la segunda cosecha, el mayor peso se dio en el tratamiento T3, seguido de T4, T2 y T1. Los valores de la segunda cosecha fueron un 3% menores.

Hay una cierta estabilización de la homogeneización del estado vegetativo respecto al riego en la segunda campaña, aunque los valores de cosecha han mostrado peores resultados. Puede que la influencia en los parámetros de cosecha se muestre en las siguientes cosechas ya que el suelo ha almacenado una serie de elementos y compuestos.

5. Agradecimientos

Los autores de la comunicación expresan su agradecimiento a la empresa FULSAN, S.A. por su apoyo económico. Igualmente se muestran agradecidos a la empresa TELENATURA EBT, S.L. y Viveros Simón Cases, S.L. por su apoyo tecnológico y agronómico.

Referencias

1. Novoa, V., Ahumada-Rudolph, R., Rojas, O., Saez, K., de la Barrera, F., Arumi, J.L. Understanding agricultural water footprint variability to improve water management in Chile. Science of the Total Environment, 2019, 670 (188-199).
2. Golzar, F., Heeren, N., Hellweg, S., Roshandel, R. A comparative study on the environmental impact of greenhouses: A probabilistic approach. The Science of the total environment, 2019, 675 (560-569).
3. Ilha, P., Rosso, S., Schiesari, L. Effects of deforestation on headwater stream fish assemblages in the Upper Xingu River Basin, Southeastern Amazonia. Neotropical Ichthyology, 2019, 17, 1, e180099.
4. Gong, X.W., Liu, H., Sun, J.S., Gao, Y., Zhang, H. Comparison of Shuttleworth-Wallace model and dual crop coefficient method for estimating evapotranspiration of tomato cultivated in a solar greenhouse. Agricultural Water Management, 2019, 217 (141-153).
5. Chávez Castillo, E., Paz Pellat, F., Bolaños González, M. A. Estimation of biomass and aerial cover using radiometry and field level digital imaging of grasslands and scrublands. Terra Latinoamericana, 2017, 35 (3), (247-257).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Estrategias para la búsqueda de bacterias degradadoras de atrazina en la laguna salada de Pétrola (SE Albacete)

Y. Espín[1], G. Sanz[1], N. Valiente[1], A. Menchén[1], M. Álvarez-Ortí[1], J.J. Gómez-Alday[1]

[1] Grupo de Hidrogeología, Sección de Biotecnología y Recursos Naturales del Instituto de Desarrollo Regional, Albacete (UCLM); manuel.alvarez@uclm.es

Resumen: El humedal salino de Pétrola, situado en un ambiente semiárido en el sureste de la provincia de Albacete (España), está sometida a múltiples entradas de contaminación entre las que destacan el nitrato, y la atrazina, un herbicida usado ampliamente en las prácticas agrícolas. Estas condiciones dan lugar a un ambiente extremo que propicia condiciones exclusivas capaces de albergar ciertos procesos redox mediados por extremófilos adaptados que ejercen un papel fundamental en la atenuación de la contaminación de origen urbano y agrícola existente. El objetivo de este trabajo es la búsqueda de microrganismos extremófilos implicados en la atenuación de contaminantes en la laguna de Pétrola, con especial atención en aquellos que puedan estar implicados en la biodegradación de la atrazina. El primer enfoque ha consistido en un análisis metagenómico de muestras de ADN extraídas de sedimentos de 7 puntos de la laguna. El segundo enfoque ha consistido en la búsqueda de bacterias degradadoras de atrazina, mediante la amplificación por PCR con cebadores complementarios a los genes involucrados en la ruta de degradación de este contaminante organoclorado. Como resultado, se ha detectado una gran diversidad de microorganismos extremófilos. Entre ellos, destaca el grupo relacionado con procesos de desnitrificación fototrófica.

Palabras clave: Atenuación de contaminantes; metagenómica; desnitrificación

1. Introducción

La atrazina (2-cloro-4-etilamina-6-isopropilamina-s-triazina) ha sido uno de los herbicidas más usados para el control de malas hierbas en muchos cultivos agrícolas, así como en ambientes urbanos y áreas recreativas [1-2]. La atrazina está clasificada como un disruptor endocrino que origina problemas reproductivos [3] y que puede afectar potencialmente a la salud humana, por lo que en algunos países europeos ya se ha prohibido su uso. Sin embargo, debido a su elevada movilidad y su larga vida media en los suelos, es posible encontrar atrazina y sus metabolitos tanto en aguas superficiales como aguas subterráneas y suelos incluso años después de su aplicación [4]. La Unión Europea establece un límite de atrazina en agua potable de 0,1 µg/L, por lo que es de vital importancia encontrar métodos para eliminar la atrazina de los ambientes acuáticos [5].

La laguna salada de Pétrola (SE Albacete) es uno de los ambientes salinos más representativos de la comunidad de Castilla-La Mancha. Esta laguna es el punto de descarga de una cuenca endorreica de alrededor de 42 km^2, ubicada en un ambiente semiárido, sujeta a una elevada presión antrópica originada por la actividad agrícola, ganadera y el vertido de aguas residuales que dan lugar a la acumulación de contaminantes [6]. Estos aportes, junto con la elevada salinidad de la laguna en la que se puede encontrar una conductividad de hasta 123.000

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3408

µS/cm, da lugar a la aparición de ambientes extremos propicios para albergar microorganismos adaptados que puedan llevar a cabo procesos redox relacionados con la atenuación de contaminantes.

La laguna de Pétrola ya se ha caracterizado en trabajos previos desde un punto de vista físico-químico y multi-isotópico [7-8]. Sin embargo, no existen datos en relación a los microorganismos que pueden estar involucrados en los procesos de atenuación de contaminantes, y en concreto de la atrazina que pueda permanecer de forma residual en los sedimentos de la laguna. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es la búsqueda de bacterias que puedan contribuir a la degradación de atrazina mediante dos estrategias distintas: una primera búsqueda mediante un análisis metagenómico que ofrezca una visión de las comunidades bacterianas presentes en los sedimentos de la laguna de Pétrola, y una segunda estrategia consistente en la amplificación mediante PCR de los genes involucrados en la ruta metabólica de degradación de la atrazina, que ofrezcan la evidencia de la existencia de microorganismos capaces de llevar a cabo esta ruta metabólica.

2. Materiales y métodos

2.1. Selección de muestras

La laguna de Pétrola ocupa la zona de descarga de una cuenca endorreica, con varios pequeños arroyos que descargan en la laguna con un patrón radial (Figura 1). En función de la presión de los distintos contaminantes y de las características de la laguna, se seleccionaron 7 puntos para la recogida de sedimentos (Tabla 1).

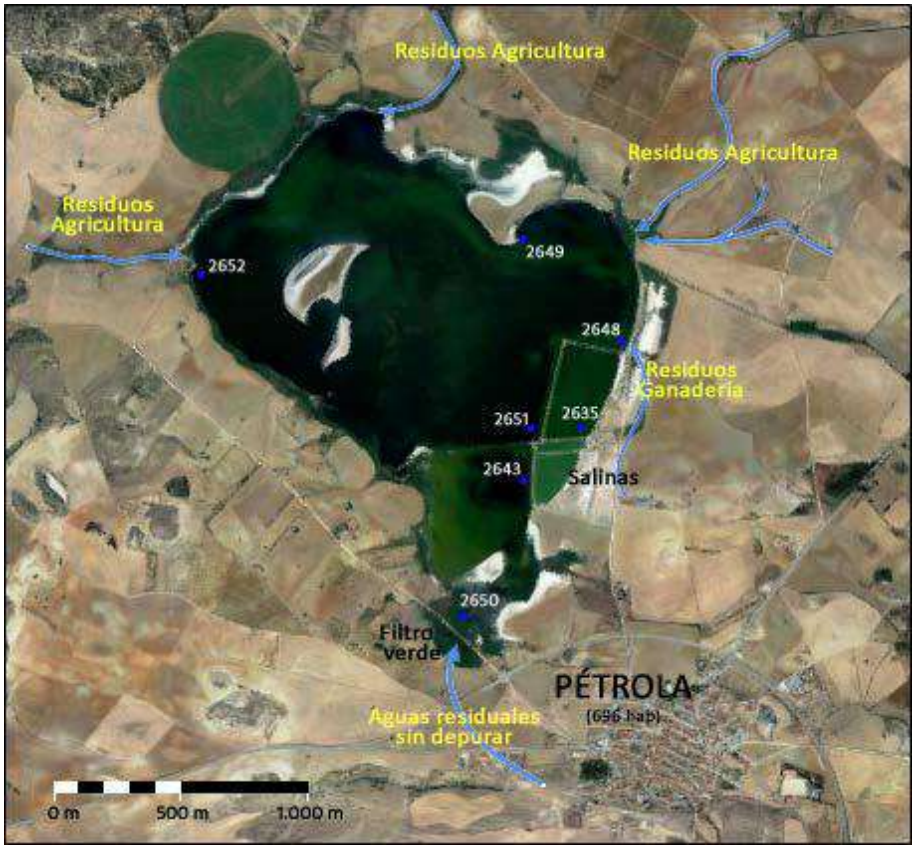


Figura 1. Esquema de los puntos de muestreo de sedimentos.

Tabla 1. Características de los puntos seleccionados para el muestreo

Punto	Principal fuente de contaminación
2635	Aislado de la laguna. Lugar usado como salina
2643	Aguas residuales, después de pasar por filtro verde
2648	Residuos de la agricultura, y de industria ganadera
2649	Residuos de la agricultura
2650	Aguas residuales sin tratamiento
2651	Punto control, alejado de las principales fuentes de contaminación
2652	Residuos de la agricultura

Los sedimentos se recogieron en tubos estériles, y se transportaron en condiciones de refrigeración hasta el laboratorio para la extracción inmediata del ADN genómico.

2.2. Extracción de ADN y análisis metagenómico

El ADN genómico se extrajo de los sedimentos mediante el kit NucleoSpin® Soil (Macherey-Nagel, Düren, Alemania), siguiendo las instrucciones del fabricante.

Posteriormente, el ADN genómico obtenido de los diferentes sedimentos se sometió a un análisis metagenómico mediante la amplificación y secuenciación de alto rendimiento de las regiones V3 y V4 del gen 16SrRNA (StabVida). Los resultados obtenidos se sometieron a un análisis mediante el software de análisis bioinformático QIIME2.

2.3. Amplificación mediante PCR

Para evaluar la presencia de bacterias degradadoras de atrazina, se realizó una PCR con el ADN genómico extraído de los diferentes sedimentos, con cebadores específicos para los genes involucrados en la degradación de atrazina [9]: Atrazina clorohidrolasa (AtzA), Hidroxidecloroatrazina etilaminohidrolasa (AtzB), N-Isopropilamelida Isopropilaminohidrolasa (AtzC). Las secuencias de estos cebadores fueron: AtzAF 5'-CCATGTGAACCAGATCCT-3'; AtzAR 5'-TGAAGCGTCCACATTACC-3'; AtzBF 5'-TCACCGGGGATGTCGCGGGC-3'; AtzBR 5'-CTCTCCCGCATGGCATCGGG-3'; AtzCF 5'-GCTCACATGCAGGTACTCCA-3'; AtzCR 5'-GTACCATATCACCGTTTGCCA-3'. Las condiciones de la PCR se variaron para optimizar el resultado. Los resultados de la amplificación se resolvieron en geles de agarosa al 2% teñidos con Red Safe.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis metagenómico

El análisis metagenómico de las muestras obtenidas permite la identificación y la caracterización de las comunidades bacterianas que habitan en los distintos sedimentos recogidos en la laguna de Pétrola. En los 7 sedimentos muestreados, se obtuvo una media de 633.902 lecturas de secuencias con una longitud de 300 pb. El análisis de estas secuencias dio como resultado la identificación de un número variable de OTUs (unidad taxonómica operativa) en función de la muestra de sedimento. El más variable fue el punto 2635, con 3024 OTUs, mientras que el menos variable fue el punto 2651, donde se identificaron únicamente 1393 OTUs.

En los resultados obtenidos se observa una amplia representación de microorganismos extremófilos, con patrones diferentes en función del punto seleccionado para el análisis (Figura 2).

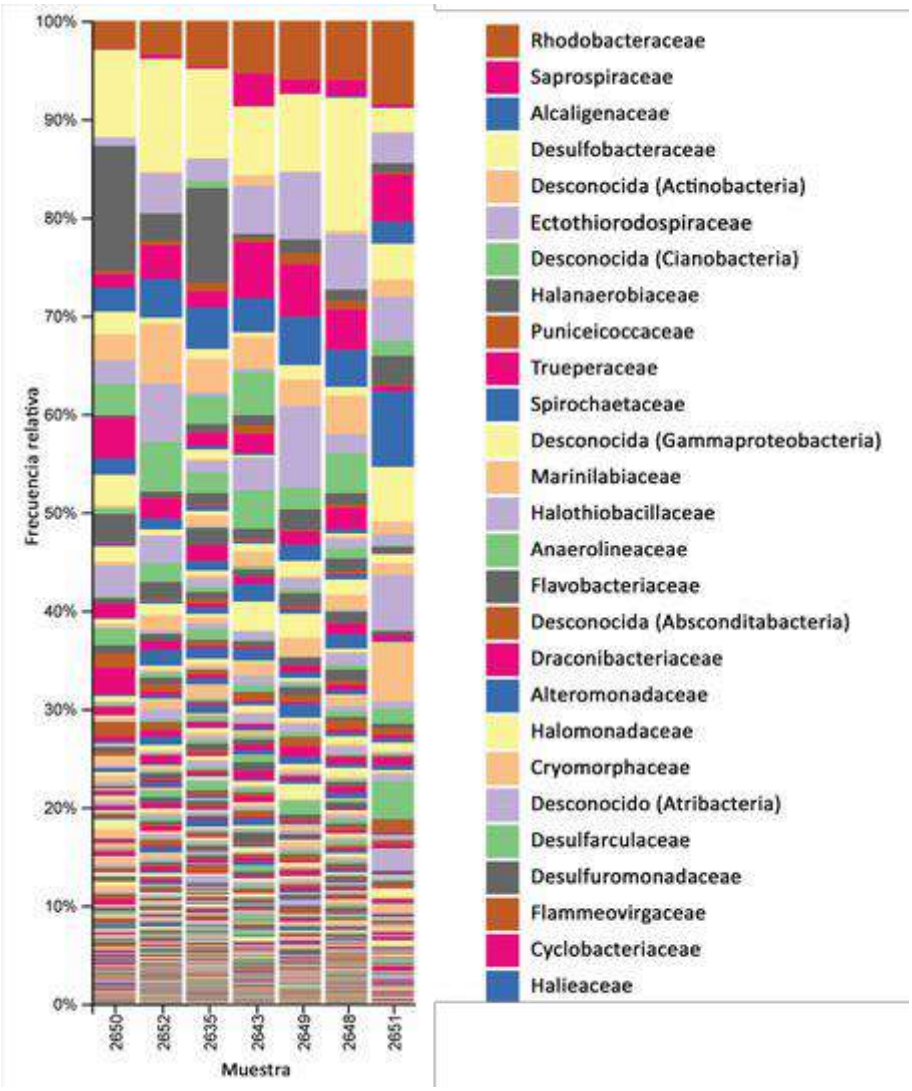


Figura 2. Distribución de familias en los sedimentos analizados. Se muestran los nombres de las familias que aparecen de forma mayoritaria.

En general, se aprecia la presencia de bacterias relacionadas con el reciclaje de nitrógeno, como es la familia *Ectothiorhodospiraceae*, que produce la desnitrificación autotrófica completa bajo condiciones halófilas [10]. Dentro de esta familia, es especialmente remarcable la presencia de bacterias del género *Thioalkalivibrio*, que suman el 7% del total de bacterias identificadas. Además, otros microorganismos como algunos miembros de la familia *Halomonadaceae*, presentes en todos los puntos analizados, pueden crecer anaeróbicamente usando el nitrato como aceptor de electrones y convirtiéndolo en nitrito. Otras familias relacionadas con el ciclo del nitrógeno aparecen en menor proporción, como pueden ser las familias *Nitrospinaceae* o *Pseudomonadaceae*. Dentro de estas últimas se encuadran bacterias del género *Pseudomonas*, en el que algunas cepas se han encontrado asociadas a la degradación de atrazina [9].

El análisis metagenómico mediante la secuenciación del gen 16S rRNA ofrece una visión descriptiva de las comunidades bacterianas presentes en los diferentes sedimentos analizados, que puede dar indicios sobre la presencia de microorganismos que estén desarrollando procesos metabólicos de atenuación de contaminantes, aunque para la búsqueda de microorganismos concretos será necesario emplear otro tipo de técnicas más resolutivas.

3.2. Amplificación mediante PCR

Para la búsqueda de microorganismos relacionados con la degradación de atrazina se puede intentar realizar una amplificación mediante PCR de los genes involucrados en la ruta de degradación de atrazina (Figura 3). En este caso se emplearon 3 juegos de cebadores, complementarios a los genes AtzA (atrazina clorohidrolasa), AtzB (Hidroxidecloroatrazina etilaminohidrolasa) y AtzC (N-Isopropilamelida Isopropilaminohidrolasa), que son los primeros pasos en la ruta de degradación, hasta la formación de cianurato.

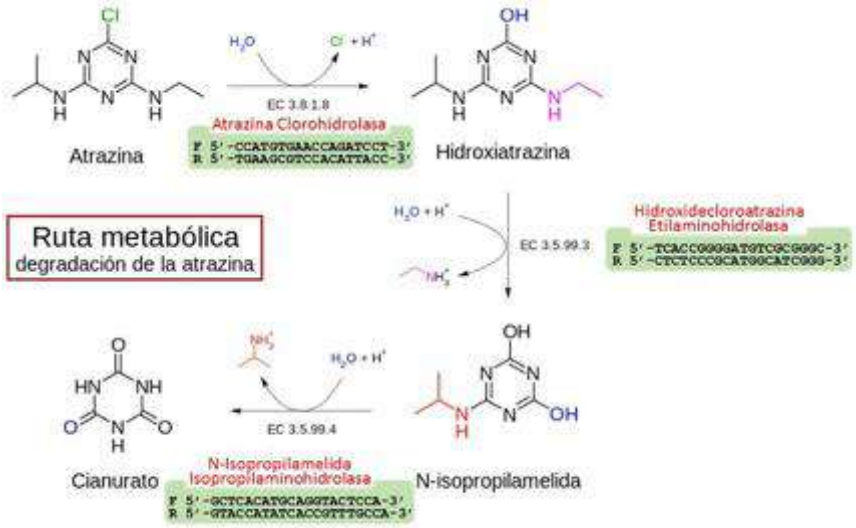


Figura 3. Ruta metabólica de degradación de la atrazina, con los cebadores empleados para la amplificación por PCR.

Los resultados obtenidos de la amplificación muestran distintos patrones en los sedimentos analizados (Figura 4). En algunos casos se observan bandas del tamaño adecuado, aunque deben ser verificadas mediante secuenciación, para asegurar que corresponden a los genes amplificados. En estos casos, será posible identificar la presencia de genes implicados en la degradación de la atrazina, si bien, será complicado la identificación del microorganismo debido a la alta conservación que presentan estos genes, por lo que no existen diferencias en la secuencia de ADN entre diferentes microorganismos.

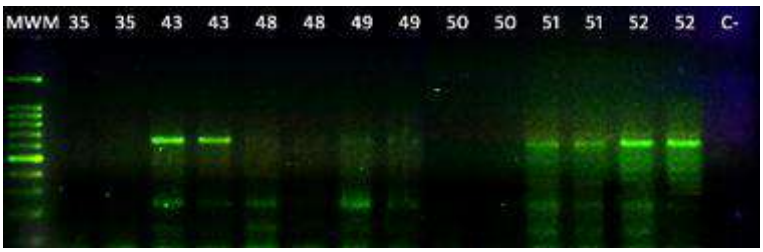


Figura 4. Ejemplo de amplificación con cebadores de AtzA. Las muestras se realizaron por duplicado.

En cualquier caso, los resultados obtenidos de la amplificación tampoco fueron concluyentes, puesto que no se observó el mismo patrón de bandas cuando se emplearon juegos diferentes de cebadores. Esto puede ser debido a la baja concentración de bacterias degradadoras de atrazina, que origina resultados poco repetitivos o ausencia de bandas amplificadas cuando se realiza la PCR. Para tener un resultado más concluyente será necesario

incrementar la concentración de bacterias degradadoras de atrazina mediante el crecimiento en medios de cultivo suplementados con atrazina.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en relación al análisis metagenómico de las muestras de sedimentos de la Laguna de Pétrola analizados ofrecen información acerca de la presencia de organismos extremófilos que pueden participar en procesos de atenuación de contaminantes. Muchos de ellos están relacionados con el ciclo del nitrógeno, con algunos casos que pueden ser candidatos a realizar procesos de degradación de atrazina.

La amplificación por PCR de los genes implicados en la ruta metabólica de la atrazina ofreció resultados poco concluyentes debido a la falta de un patrón similar en los sedimentos analizados cuando se emplearon juegos diferentes de cebadores. En cualquier caso, será necesario confirmar los resultados obtenidos y profundizar en la búsqueda de microorganismos relacionados con estos procesos de degradación de contaminantes.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación CGL2017-87216-C4-2-R del Programa Estatal de I+D+i (MINECO) y SBPLY/17/180501/000296 del Programa Regional de I+D+i de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.

Referencias

1. Mahía J., Martín A., Carballas T., Raviña M.D. Atrazine degradation and enzyme activities in an agricultural soil under two tillage systems. Science of the Total Environment. 2007, 378, 187-194.
2. Bastos A.C., Magan N. Trametes versicolor: potential for atrazine bioremediation in calcareous clay soil, under low water availability conditions. International Biodeterioration and Biodegradation. 2009, 63, 389-394.
3. Vimal D., Saini S., Kristipati R.R., Chowdhuri D.K. Atrazine or bisphenol A mediated negative modulation of mismatch repair gene, mlh1 leads to defective oogenesis and reduced female fertility in Drosophila melanogaster. Chemosphere. 2019, 225, 247-258.
4. Jiang Z., Zhang X., Wang Z., Cao B., Deng S., Bi M., Zhang Y. Enhanced biodegradation of atrazine by Arthrobacter sp. DNS10 during co-culture with a phosphorus solubilizing bacteria: Enterobacter sp. P1. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2019, 172, 159-166.
5. Hong Y., Peng J., Zhao X., Yan Y., Lai B., Yao G. Efficient degradation of atrazine by CoMgAl layered double oxides catalyzed peroxymonosulfate: Optimization, degradation pathways and mechanism. Chemical Engineering Journal. 2019, 370, 354-363.
6. Valiente N., Menchen A., Carrey R., Otero N., Soler A., Sanz D., Gómez-Alday J.J. Sulfur recycling processes in a eutrophic hypersaline system: Pétrola Lake (SE, Spain). Procedia Earth and Planetary Science. 2017, 17, 201-204.
7. Valiente N., Carrey R., Otero N., Gutiérrez-Villanueva M.A., Soler A., Sanz D., Castaño S., Gómez-Alday J.J. Tracing sulfate recycling in the hypersaline Pétrola Lake (SE Spain): A combined isotopic and microbiological approach. Chemical Geology. 2017, 473, 74-89.
8. Valiente N., Carrey R., Otero N., Soler A., Sanz D., Muñoz-Martín A., Jirsa F., Wanek W., Gómez-Alday J.J. A multi-isotopic approach to investigate the influence of land use on nitrate removal in a highly saline lake-aquifer system. Science of the Total Environment. 2018, 631-632, 649-659.
9. De Souza M.L., Wackett L.P., Boundy-Mills K.L., Mandelbaum R.T., Sadowsky M.J. Cloning, characterization, and expression of a gene region from Pseudomonas sp. strain ADP involved in the dechlorination of atrazine. Applied and Environmental Microbiology. 1995, 61, 3373-3378.
10. Sorokin D.Y., Tourova T.P., Sjollema T.P., Kuenen J.G. Thialkalivibrio nitratireducens sp. nov., a nitrate-reducing member of an autotrophic denitrifying consortium from a soda lake. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2003, 53, 1779-1783.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Evaluación agronómica del riego con agua marina desalinizada en cítricos. Resultados del primer año de ensayo

J. F. Maestre Valero[1], V. Martínez Alvarez[1], J.A. Acosta Avilés[1], S. Martínez-Martínez[1], F.J. Jodar Conesa[1], M. Soto García[1], B. Martin-Gorriz[1]

[1] Universidad Politécnica de Cartagena. Área de Ingeniería Agroforestal (Departamento de Ingeniería Agronómica). Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena (Murcia); josef.maestre@upct.es

Resumen: La escasez de agua y la creciente presión sobre los recursos hídricos en regiones semiáridas ha fomentado la utilización de recursos hídricos no convencionales, como es el agua marina desalinizada (AMD). El AMD es un recurso hídrico inagotable y no sujeto a variaciones climáticas, por lo que estratégicamente resulta idóneo para aumentar la disponibilidad de agua para riego en zonas costeras deficitarias. Sin embargo, el AMD presenta una elevada concentración de Na, Cl- y B y una baja concentración de Mg, Ca y SO42-. Los escasos estudios realizados hasta la fecha en Israel y España sobre pimiento, banana y tomate, ponen de manifiesto que el riego con AMD, si no se realiza de forma adecuada, puede producir problemas agronómicos y afectar a la productividad de los cultivos. Por el contrario, cuando el AMD se maneja de forma adecuada puede incrementar el rendimiento y la eficiencia del uso del agua. Actualmente no existe información referente al efecto del riego de cítricos con AMD. Por esta razón, este estudio presenta los resultados agronómicos del primer año de investigación sobre los efectos del riego de un huerto de mandarinos con AMD. Los resultados indican que, a pesar de que las concentraciones de Na y B en el agua de riego y en las hojas han alcanzado los umbrales citados como tóxicos en la bibliografía, no se han observado síntomas de fitotoxicidad por Na, Cl- o B en hoja. Además, tampoco se han observado diferencias significativas en rendimiento productivo, número de frutos y productividad del agua, lo que indica que hasta el momento el riego con AMD, bien gestionada, es una alternativa agronómicamente viable.

Palabras clave: Fitotoxicidad; Seguridad alimentaria; Recursos hídricos no convencionales; Productividad del agua.

1. Introducción

La agricultura es, con mucha diferencia, el mayor consumidor de agua dulce del planeta, con 2,7 x 106 hm3 que se utilizan anualmente para regar 324 x 106 ha. Este volumen de agua se ha triplicado desde 1950 para proporcionar alimentos a una población en continuo crecimiento; 9 billones de personas en 2050 [1]. Por otro lado, el cambio climático está reduciendo la disponibilidad de agua dulce, lo que aumenta la competencia por este recurso entre los diferentes usuarios y pone en riesgo la sostenibilidad de la agricultura de regadío. En este contexto, la desalinización de agua marina se presenta como una alternativa que, considerada como complemento a otros recursos hídricos, podría contribuir a garantizar la seguridad alimentaria y la estabilidad socioeconómica a largo plazo [2].

La composición del agua marina, con un 30,2% de Na y un 54,3 % de Cl^-, junto con los procesos de desalinización por osmosis inversa, hacen que el Agua Marina Desalinizada (AMD)

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3305

se caracterice por una escasa mineralización y un desequilibrio en su composición; *i.e.* alta concentración de Na y Cl^- y baja en Ca, Mg y SO_4^{2-} [2]. Esta singularidad química, si no se considera en el manejo del riego y la fertirrigación, puede conllevar pérdidas significativas tanto en producción como en calidad. Aunque son escasos los estudios que ponen de manifiesto las implicaciones agronómicas, positivas o negativas, del riego con AMD, algunos investigadores ya han obtenido, bajo un correcto manejo agronómico, incrementos del rendimiento de los cultivos y de la eficiencia del uso del agua [3] en pimiento, [4] en banana y [5] en tomate.

Con respecto a los cítricos, la información publicada sobre los efectos del riego con AMD a medio-largo plazo es actualmente escasa. La única referencia patente de riego de cítricos con AMD se recoge en [6] donde se indica que en un ensayo no publicado por los mismos autores se observó un incremento de producción del 10% y una reducción de gasto hídrico del 20%. [7] indicó que la concentración de B en las AMDs puede ser un factor limitante, especialmente para cultivos leñosos. Dada la relevancia de los cítricos en zonas como la Región de Murcia y la Comunidad Valenciana, donde este cultivo abarca una superficie de 192.717 ha, *i.e.* 40,6% del regadío y el 70,2% de los cultivos leñosos [8], es conveniente llevar a cabo investigaciones y obtener resultados fiables que pongan de manifiesto los efectos agronómicos del riego con AMD. En este sentido, el objetivo de este trabajo es presentar los resultados agronómicos del primer año de investigación sobre los efectos derivados del riego de cítricos con AMD.

2. Materiales y Métodos

2.1. Diseño experimental

El ensayo se ha realizado, entre nov-2017 y nov-2018, en un huerto comercial de 0,3 ha ubicado en el campo de Cartagena (Torre-Pacheco – Murcia), cultivado con árboles de mandarina (var. Safor) de 3 años (en 2017) injertados en patrón *Citrus Macrophylla* Wester. Se seleccionaron 144 árboles espaciados 3 m entre plantas y 5 m entre hileras. El diseño experimental fue al azar con cuatro bloques y cuatro subparcelas experimentales por bloque. La subparcela estándar estaba formada por doce árboles, distribuidos en tres filas adyacentes con cuatro árboles por fila. Los dos árboles centrales de la fila central se utilizaron para las mediciones y los otros diez árboles fueron árboles de guarda para eliminar los posibles efectos de borde. El sistema de riego consistió en un único lateral de goteo de polietileno diámetro 16 mm colocado al lado del tronco del árbol con 2 emisores autocompensantes por árbol de 4 l/h colocados a 0,75 m del tronco.

2.2. Programación y tratamientos de riego

Las dosis de riego se calcularon en base a la evapotranspiración diaria del cultivo (ETc) acumulada durante la semana anterior. Los valores diarios de ETc se estimaron multiplicando la evapotranspiración de referencia diaria, calculado con la metodología de Penman-Monteith, por los coeficientes de cultivo específicos del mes (Kc) [9]. Además, se usó un coeficiente de reducción (Kr = 0,5) para considerar la disminución de la ETc debido a la cobertura parcial del suelo por el dosel del cultivo (árboles jóvenes) [10].

Se realizaron 4 tratamientos de riego: (i) agua de la Comunidad de regantes del campo de Cartagena con CE = 1,66 ± 0,44 dS/m (CR), (ii) agua marina desalinizada procedente de la desaladora de Escombreras con CE = 0,97 ± 0,09 dS/m (DB), (iii) agua mezcla al 50% entre CR y DB con CE = 1,36 ± 0,23dS/m (AM) y (iv) agua procedente de la balsa de agricultor con CE = 1,82 ± 0,30 dS/m (AGR). Los volúmenes totales de agua aplicados se midieron con contadores volumétricos instalados en cada una de los tratamientos de riego. El riego fue controlado automáticamente por un programador de riego y electroválvulas. Todos los tratamientos recibieron las mismas cantidades de fertilizantes (174-98-220 kg/ha/año de N-P_2O_5-K_2O) aplicados mediante fertirrigación al objeto de evaluar correctamente los efectos del riego con AMD. Las

prácticas de control de plagas y la poda fueron las utilizadas comúnmente por los productores en el huerto.

2.3. Monitorización de datos

Calidad del agua

Con frecuencia mensual se recogió una muestra de agua de cada tratamiento, se almacenó a 5ºC y se envió al laboratorio para analizar tanto Na, K, Ca, B y Mg mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (Espectrómetro Agilent Technologies ICP-Masas. Modelo 7900, Estados Unidos), como Cl^-, NO_3^- y PO_4^{-3} mediante cromatografía iónica (Metrohm. Modelo 861, Suiza) y conductividad eléctrica del agua (CE_a) utilizando un conductímetro GLP 31 (Crison Instruments, España).

Humedad del suelo

En cada tratamiento se determinó el contenido de agua en el suelo a 25 cm y a 50 cm mediante sondas de humedad HydraProbe II (Stevenswater; USA). Los datos de humedad de suelo se registraron en un datalogger (Campbell CR1000; USA).

Elementos fitotóxicos en hoja

Con frecuencia mensual se seleccionaron por subparcela experimental veinte hojas de primavera de ramitas no fructíferas ubicadas en la parte central del árbol. Las hojas se enviaron al laboratorio para analizar macronutrientes, micronutrientes y, especialmente, elementos fitotóxicos, Na y B mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (Espectrómetro Agilent Technologies ICP-Masas. Modelo 7900, Estados Unidos), y Cl^- mediante cromatografía iónica (Metrohm. Modelo 861, Suiza).

Producción

Para los dos árboles centrales de cada subparcela experimental se determinó la producción (kg/árbol) y el número de frutos; en total 6 árboles por tratamiento. Además se determinó la productividad del agua de riego como el ratio entre producción y el agua aplicada (kg/m^3).

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el análisis de la varianza (ANOVA; SPSS Statistics v. 23 para Windows). La prueba HSD de Tukey ($P \leq 0.05$) se utilizó para identificar las diferencias significativas entre tratamientos.

3. Resultados y Discusión

3.1. Calidad del agua y humedad del suelo

El tratamiento DB presentó valores inferiores de CE_a, Ca y Mg que el agua CR, mientras que las concentraciones de B fueron sensiblemente superiores (Tabla 1). La elevada concentración de B en el AMD (aproximadamente 1 mg/L) viene marcada por el RD 140/2003 por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Las concentraciones de Na y B en el agua de riego superaron los umbrales a partir de los cuales es posible observar efectos perjudiciales sobre los cítricos [2,11]. Sin embargo, dichos efectos no se han observado durante el primer año de ensayo, circunstancia que se atribuye al corto periodo de experimentación.

Con respecto al contenido de humedad del suelo, los cuatro tratamientos se mantuvieron bien regados durante el ensayo y con una humedad próxima a la capacidad de campo (entre 250 y 350 mm/m) (datos no mostrados). Los registros frecuentes de los potenciales de tallo (datos no mostrados), medidos con una cámara de presión (modelo 3000; Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA, USA) indicaron el buen estado hídrico de las plantas.

Tabla 1. Análisis químico del agua de riego para los cuatro tratamientos de riego para el periodo de estudio. Los valores son promedios ± SE para n = 12 meses.

Desde nov 18 hasta nov 19		**CR**	**AM**	**DB**	**AGR**
pH		7,7±0,2	7,7±0,2	7,7±0,3	8,4±0,7
CE_a	**dS/m**	1,54±0,5	1,27±0,3	0,92±0,1	1,69±0,4
Ca	**mg/L**	62,7±12,6	45,5±9,6	28,0±12,2	60,4±18,1
Mg	**mg/L**	40,7±12,6	26,6±6,7	10,5±6,7	32,4±11,0
Na	**mg/L**	176,3±69,9	162,3±39,1	142,2±24,8	217,4±32,8
K	**mg/L**	10,4±3,2	9,2±2,5	7,1±1,6	12,1±9,9
B	**mg/L**	0,58±0,25	0,71±0,11	0,82±0,14	1,03±0,09
Cl^-	**mg/L**	269,8±109,0	247,7±63,9	227,8±44,1	348,2±61,0
SO_4^{-2}	**mg/L**	171,6±45,5	98,5±28,1	25,2±36,1	145,4±66,4
NO_3^-	**mg/L**	7,7±2,8	5,2±1,5	3,6±4,0	6,9±6,3
PO_4^{-3}	**mg/L**	5,3±5,4	2,5±1,0	LD<0,76	10,4±0,4
RAS_a	**[mmol/L]^{0,5}**	2,4±0,7	3,2±0,7	6,3±1,9	3,5±0,6
Umbral Máx Na	**mg/L**	100 [11]			
Umbral Máx Cl^-	**mg/L**	350 [12]			
Umbral Máx B	**mg/L**	0,5 [2]			

3.2. Elementos fitotóxicos en hoja

Durante el primer año de ensayo, no se detectaron diferencias significativas en las concentraciones de Na, Cl^- y B en hoja entre tratamientos (exceptuando algunos registros puntuales en el caso del Cl^-) (Figuras 1a, b, c). Es de destacar la notable variabilidad en los umbrales de toxicidad para Na, Cl^- y B publicados para los cítricos. Por ejemplo, [13] determinan el umbral máximo para Na en hoja en 1 g/kg en, mientras que [11] lo establecen entre 1,0 y 2,5 g/kg. En el caso del Cl^-, [13] establecen el umbral en 6 g/kg mientras que [11] lo establecen en 10 g/kg. En el caso del B, [13] y [11] lo establecen en 100 mg/kg mientras que [14] lo establecen en 250 mg/kg.

En este ensayo, la concentración de Na superó durante algunos meses el umbral inferior propuesto por [11] (Figura 1a) y la concentración de B superó durante todo el ensayo los niveles máximos de tolerancia a los umbrales reportados por [11] (Figura 1c). Sin embargo, la concentración de B no superó los niveles máximos de tolerancia propuestos por [14]. Con respecto a la concentración de Cl^- (Figura 1b), los niveles se mantuvieron en valores inferiores a los umbrales máximos para cítricos citados en la bibliografía [11,13]. Independientemente de estos umbrales, en el huerto no se detectó presencia de toxicidad a Na, Cl^- y B en el material vegetal. Esta circunstancia se asoció de nuevo al corto periodo de experimentación.

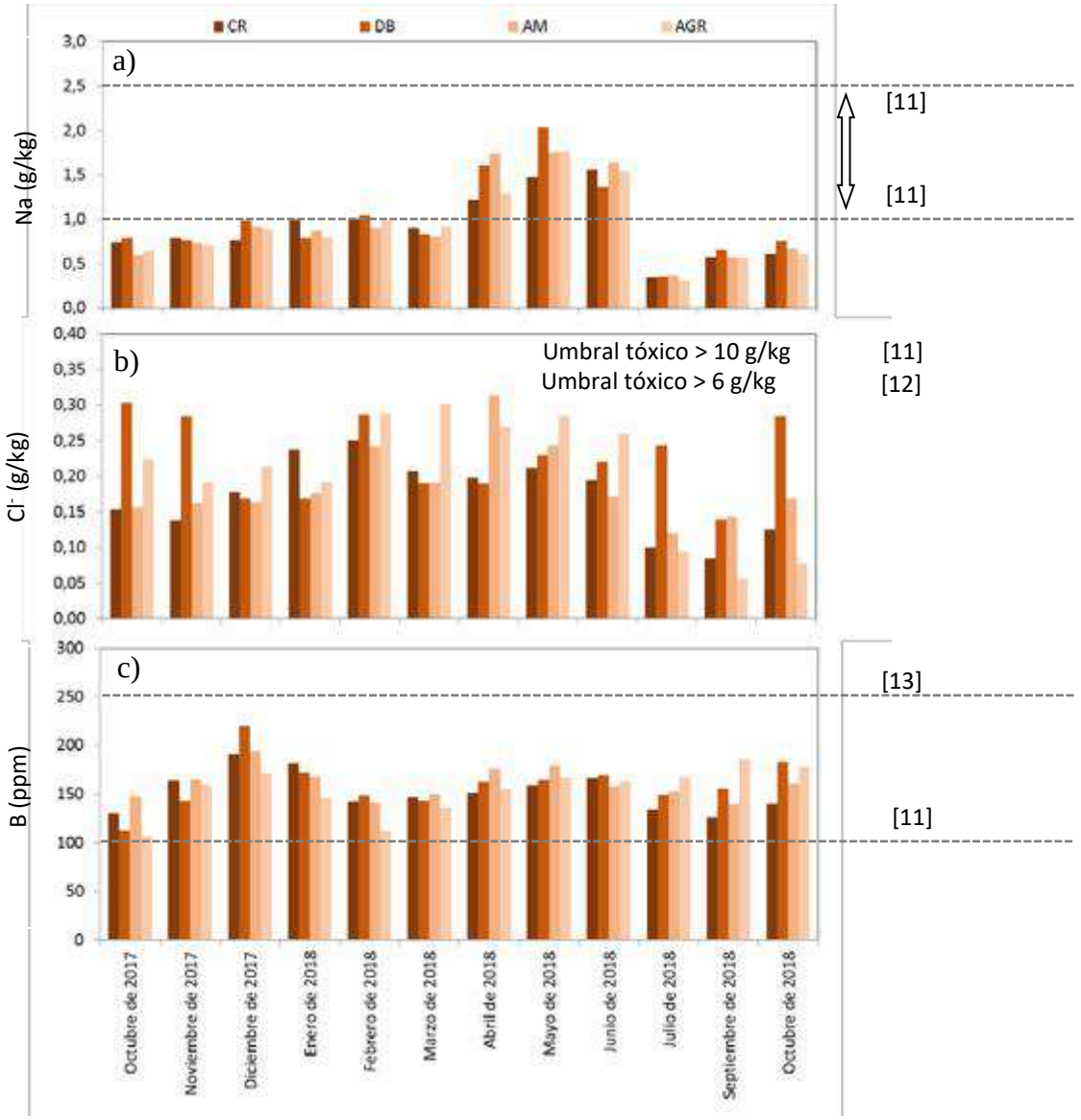


Figura 1. Concentraciones anuales promedio de Na, Cl^- y B en hoja para el año de ensayo en los cuatro tratamientos de riego. Cada columna representa el promedio de tres mediciones (una por réplica) tomadas en los seis árboles interiores por tratamiento.

3.3. Producción y número de frutos

Durante el primer año de ensayo no se han observado diferencias significativas en la producción, en la carga de frutos por árbol, ni en la productividad del agua (Tabla 2). Si bien es cierto, son árboles muy jóvenes (3 años en 2017) que se encuentran aún a un 5% de su rendimiento potencial. Además, esta circunstancia se explica principalmente por las grandes desviaciones estándar causadas por la juventud de los árboles, que para algunos valores representaron más del 100% de la media.

Tabla 2. Rendimiento productivo, número de frutos y productividad del agua para el año de ensayo para los cuatro tratamientos de riego realizados.

	CR	AM	DB	AGR
Rendimiento (kg/árbol)	1,3±1,9	4,9±4,2	3,1±1,4	4,9±3,9
Rendimiento (kg/m²árbol)	1,1±1,6	3,5±3,0	2,1±0,9	4,0±3,2
Número frutos/árbol	10,7±15,0	31,5±33,7	23,0±8,1	38,2±32,4
Número frutos/m²árbol	8,7±12,3	22,7±24,3	15,6±5,5	31,5±26,7
Productividad del agua (kg/m³)	0,4±0,5	1,3±1,1	0,9±0,4	1,3±1,0

4. Conclusiones

Las concentraciones de Na y B en el agua de riego y en hoja han alcanzado en todos los tratamientos los umbrales citados como tóxicos en la bibliografía, sin embargo, no se han observado síntomas de fitotoxicidad por Na, Cl o B en hoja, posiblemente justificado por la corta duración del periodo de ensayo. Además no se han observado diferencias significativas en rendimiento productivo, número de frutos y productividad del agua. La edad joven de los árboles, tres años al inicio del ensayo, ha derivado en una gran variabilidad de los resultados. Por lo tanto, se considera que los resultados obtenidos hasta el momento no son concluyentes y resulta por lo tanto necesario continuar con la investigación para obtener resultados a medio-largo plazo, donde se espera detectar y explicar las diferencias entre los distintos tratamientos.

5. Agradecimientos

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) mediante el proyecto RIDESOST (AGL2017-85857-C2-2-R). También se agradece la colaboración de la Catedra Trasvase y sostenibilidad – Jose Manuel Claver Valderas.

Referencias

1. AQUASTAT. 2014. FAO's global water information system, 2014,http://www.fao.org/nr/aquastat.
2. Martinez-Alvarez, V., González-Ortega, M.J., Martin-Gorriz, B., Soto-Garcia, M. and Maestre-Valero, J.F. 2017. The use of desalinated seawater for crop irrigation in the Segura River Basin (south-eastern Spain). Desalination, 422: 153-164.
3. Ben-Gal, A., Yermiyahu, U. and Cohen, S., 2009. Fertilization and Blending Alternatives for Irrigation with Desalinated Water. Journal of Environmental Quality, 38(2): 529-536.
4. Silber, A. et al., 2015. Irrigation with desalinated water: A step toward increasing water saving and crop yields. Water Resources Research, 51(1): 450-464.
5. Karami, S., Karami, E. and Zand-Parsa, S. 2017. Environmental and economic appraisal of agricultural water desalination use in South Iran: a comparative study of tomato production. Journal of Applied Water Engineering and Research, 5(2): 91-102.
6. Zarzo, D., Campos, E. and Terrero, P., 2013. Spanish experience in desalination for agriculture. Desalination and Water Treatment, 51(1-3): 53-66.
7. Maestre-Valero, J.F., Martinez-Alvarez, V., Gallego-Elvira, B., Martin-Gorriz, B. 2019. Aspectos agronómicos a considerar en el riego con agua marina desalinizada. En Congreso Nacional del agua - Innovación y Sostenibilidad. Orihuela, España, 167-188
8. ESYRCE (Encuesta de Superficies y Rendimientos de Cultivos), 2018. (Acceso marzo 2019).
9. Castel, J.R., Bautista, I., Ramos, C., Cruz, G. 1987. Evapotranspiration and irrigation efficiency of mature orange orchards in Valencia (Spain). Irrig and Drainage Systems. 3: 205–217.
10. Fereres, E., Castel, J. R. 1981. Drip Irrigation Management. Division of Agricultural Sciences, University of California, Leatlet 21259.

11. Grattan, S.R., Diaz, F.J., Pedrero, F. and Vivaldi, G.A. 2015. Assessing the suitability of saline wastewaters for irrigation of Citrus spp.: Emphasis on boron and specific-ion interactions. Agricultural Water Management, 157: 48-58.
12. Hanson, B., Grattan, S., Fulton, A. 2006. Agricultural Salinity and drainage. Water management series publication, 3375. 157 pp.
13. Romero-Trigueros, C. et al., 2014. Assessment of the viability of using saline reclaimed water in grapefruit in medium to long term. Spanish Journal of Agricultural Research, 12(4): 1137-1148.
14. Embleton, T.W., Jones, W.W., Labanauskas, C.K., Reuther, W. 1973. Leaf analysisas diagnostic tool and a guide to fertilization. In: Reuther, W. (Ed.), The CitrusIndustry, vol. 2, second ed. University of California, Berkeley, pp. 184–210, and Appendix I pp. 447–495.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Evaluación de diferentes sustancias químicas como repelentes del crecimiento radicular para su uso en mantas de riego subsuperficial

A. Aldaz Lusarreta (P)[1], Celia Ochoa Lizoain[2], R. Giménez Díaz[3], M.A. Campo Bescós[3]

[1] Investigadora, Universidad Pública de Navarra, Departamento de Ingeniería; alaitz.aldaz@unavarra.es
[2] Estudiante, Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural, Universidad Pública de Navarra; ochoa.106935@e.unavarra.es
[3] Profesor, Universidad Pública de Navarra, Departamento de Ingeniería; miguel.campo@unavarra.es rafael.gimenez@unavarra.es

Resumen. El riego por goteo subterráneo ha despertado en los últimos años gran interés en el sector de la jardinería, un claro ejemplo son las mantas de riego con tubería de goteros integrados. Pese a que los emisores están protegidos por la manta, se sigue manifestando la obturación de goteros por las raíces del cultivo. Una manera de paliar la obturación es utilizar sustancias químicas adheridas directamente en la manta que repelan el crecimiento radicular. La presente investigación tiene como principal objetivo evaluar las diferentes imprimaciones de sustancias químicas como repelente radicular en prototipos de mantas de riego subsuperficial confeccionadas a partir de material de geotextil reciclado (moquetas feriales). Las sustancias químicas utilizadas han sido; mezcla de látex con fécula de maíz, a diferentes concentraciones y nanopartículas. Se evalúan tres testigos: dos productos comerciales y uno sin añadir sustancias químicas. Para cada tratamiento se confecciona, a partir del material reciclable, una pequeña bolsa, se siembra una semilla de maíz en el interior y se entierra a ras del suelo. Una vez que la planta alcanza su madurez, la bolsa se desentierra y fotografía. Por último, se evalúa la cantidad de raíces que han atravesado las paredes de la misma mediante análisis de imágenes y técnicas estadísticas.

Palabras clave. Riego localizado, riego subsuperficial, sustancias antienraizamiento.

1. Introducción

El interés en la utilización de riego por goteo subterráneo ha ido incrementando en los últimos años, sobre todo en el sector de la jardinería. Este sistema de riego presenta como ventaja el mejor aprovechamiento del agua de riego y de los nutrientes aplicados en ésta, lo que deberá resultar en una mejor calidad de los productos agrícolas. (Ayars et al. 1999). A pesar de ello, tiene un principal inconveniente que es la obstrucción de los emisores situados en el tubo de riego, debido a la intrusión de las raíces en ellos.

Este incremento en la utilización del riego por goteo subterráneo, ha dado paso a una nueva tecnología que consiste en aplicar este sistema en mantas de riego, la cual se adopta como una posible solución para el problema de la obturación de los emisores. Este tipo de técnica se basa en introducir el tubo de riego, con los emisores integrados, en la manta del material correspondiente. Presenta diferentes ventajas como son el ahorro de agua, una distribución uniforme de la misma por toda la superficie de riego y un suministro directo a las raíces del cultivo, entre otras.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3406

Sin embargo, a pesar de que los emisores están protegidos por la manta, se sigue manifestando la principal limitación que presenta el riego localizado, y especialmente el subsuperficial sin manta. Es decir, la ocasional obturación de los goteros debido a su milimétrico tamaño. Pueden ser diversos factores los que provoquen dicha obstrucción; físicos: producidos por las raíces del cultivo que crecen y ciegan los emisores, y por la presencia de partículas sólidas, de origen orgánico (fitoplancton, algas, bacterias…) o inorgánico (arena, limo, arcilla…), que se encuentran en suspensión en el agua; químicos: precipitación de sales solubles, que proceden de agua o de fertilizantes, por evaporación del agua a la salida de los goteros; biológicos: acumulación de masas de macro y microorganismos (algas y bacterias) o por precipitados de óxidos de hierro y manganeso producidos por ciertas especies de bacterias (F. Martín de Santa Olalla y J. A. De Juan, 1993). Otras limitaciones añadidas a este sistema en mantas de riego son el elevado coste de las mismas, y el deterioro o la pérdida de la calidad del material enterrado.

Siendo la principal limitación del riego localizado y de las mantas de riego, la obstrucción de los emisores, existen diferentes formas de mitigar o moderar la intrusión de raíces en estos. Los goteros deben ser antisucción y tener una barrera física antirraíces.

Asimismo, igualmente importante, es realizar un adecuado manejo del riego. La frecuencia de riego es un factor fundamental para prevenir la intrusión radicular. El sistema radicular no invade emisores en suelos con un contenido de agua cerca de capacidad de campo (Coelho et al., 2007).

Otra manera de paliar la obturación, la estudiada en esta investigación, es adherir directamente sobre la manta (material textil) imprimaciones de sustancias químicas repelentes del crecimiento radicular. Éste no se ve afectado por dichas sustancias, de tal manera que se evita la invasión de raíces en los emisores.

Estas imprimaciones tienen dos principales inconvenientes, el impacto ambiental que pueden generar, tanto en el cultivo como en el medio, y el costo del material textil. Una posible alternativa para reducir el posible impacto ocasionado, es la utilización de imprimaciones naturales como puede ser la de fécula de maíz. A su vez, en relación al coste del material, este se puede reducir utilizando material reciclable.

Asimismo, los autores del presente estudio vienen investigando el uso de mantas de riego elaboradas a partir de material reciclable (moqueta ferial), pretendiendo así reducir el coste de las mismas y alargar la vida útil del material reciclado (Pérez, 2018, Ayudas para realizar proyectos de I+D convocatoria 2017, 2017). Un prototipo de los estudiados en las investigaciones precedentes, es el escogido como manta de riego de material reciclable para llevar a cabo la presente investigación.

Este aspecto cobra gran importancia teniendo en cuenta la problemática existente con respecto a la contaminación ambiental, y en concreto a la generación de plásticos. La producción global de plásticos ha aumentado de manera muy notable en los últimos 50 años, y en especial en las últimas décadas. Estos incrementos en la producción de residuos plásticos hacen que en 2015, en los océanos flotaran en torno a 5 billones de trozos de plástico. (FAO, 2015). Por tanto, se estima que en 2020 se superaren los 500 millones de toneladas anuales, lo que supondría un 900% más que los niveles de 1980. (Fernández, et al, 2019).

Por ello, es importante tener presente el concepto de Economía Circular. Este se apoya en los fundamentos de la escuela ecologista, y propone un cambio al paradigma "reducir, reutilizar y reciclar" por una transformación más profunda y duradera, que permita disminuir el impacto causado por las actividades humanas sobre el medio ambiente. Este modelo otorga al residuo un papel dominante y se sustenta en la reutilización inteligente del desperdicio, sea este de naturaleza orgánica o de origen tecnológico, en un modelo cíclico que imita a la naturaleza y se conecta con ella. Bajo este enfoque, el residuo pierde su condición de tal y se convierte en la materia prima o se transforma para formar parte de nuevos productos tecnológicos, con un mínimo gasto energético (Felber, 2011; Lett, 2014;).

La presente investigación tiene como principal objetivo evaluar las diferentes imprimaciones de sustancias químicas como repelente radicular en prototipos de mantas de riego subsuperficial confeccionadas a partir de material reciclable.

A lo largo del tiempo se han ido investigando diversos métodos para paliar dicha obstrucción. Unas de las sustancias químicas estudiadas con detalle ha sido la Trifluralina, materia activa de algunos herbicidas utilizados en agricultura. Su mecanismo de acción afecta a la división celular en los tejidos meristemáticos, inhibiendo la formación de nuevas células en la raíz y el tallo (Rodrigues, et al, 2010). Esto hace que se impida, o se reduzca, la intrusión de las raíces de los cultivos en los emisores de riego.

2. Materiales y métodos

2.1. Prototipos manta-imprimación a evaluar

Las sustancias químicas utilizadas en las imprimaciones han sido; mezcla de látex con fécula de maíz, a diferentes concentraciones ("E", "F" y "G") y nanopartículas. A modo de testigos se evalúan dos productos comerciales, Pendimetalina y Sulfato de Cobre. Además, se incorpora un tercer testigo el cual no ha sido sometido a envejecimiento, ni tampoco se le ha añadido ninguna imprimación.

A continuación, se muestran las formulaciones de cada una de las imprimaciones estudiadas:

Imprimación tipo "E":

- Almidón modificado < 4 %
- Conservante tipo HHT < 0,1 %
- Látex Vinílico < 25 %
- Conservante tipo MIT < 0,1 %
- Otros componentes: productos espesantes naturales, antiespumantes y aditivos en pequeñas dosificaciones

Imprimación tipo "F":

- Almidón modificado < 2,5 %
- Conservante tipo HHT < 0,08 %
- Látex Vinílico <2 6 %
- Conservante tipo MIT < 0,15 %
- Otros componentes: productos espesantes naturales, antiespumantes y aditivos en pequeñas dosificaciones

Imprimación tipo "G":

- Almidón modificado < 2 %
- Conservante tipo HHT < 0,06 %
- Látex Vinílico < 27 %
- Conservante tipo MIT < 0,2 %
- Otros componentes: productos espesantes naturales, antiespumantes y aditivos en pequeñas dosificaciones

Así pues, todas las sustancias han sido imprimadas sobre sendos prototipos de mantas de riego subsuperficial (ver Figura 1).

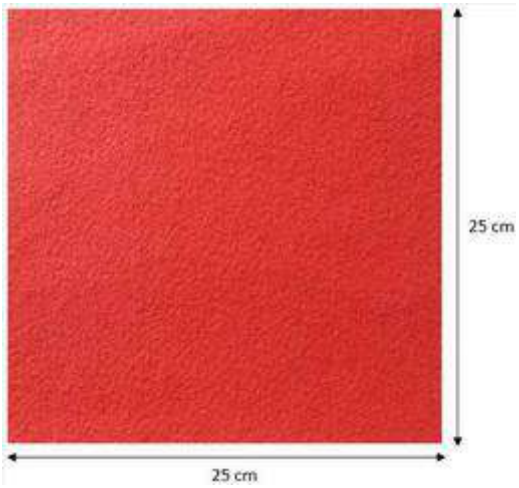


Figura 1. Prototipo de manta de riego de aproximadamente 25 x 25 cm.

Antes de comenzar con la experimentación en campo, con el fin de evaluar la posible atenuación del efecto como repelente radicular de cada imprimación por un uso continuado, se ha sometido a cada unidad manta-imprimación a un "envejecimiento" inducido. Esto último se ha llevado a cabo, sometiendo el material (manta-imprimación) a 100°C durante los diferentes periodos de tiempo, de tal manera de inducir 4 grados de deterioro o envejecimiento del material en cámaras (5, 10, 15 y 20 años). Todo este proceso se ha repetido, a su vez, en dos condiciones contrastantes de humedad: húmedo y seco (ver Figura 2).

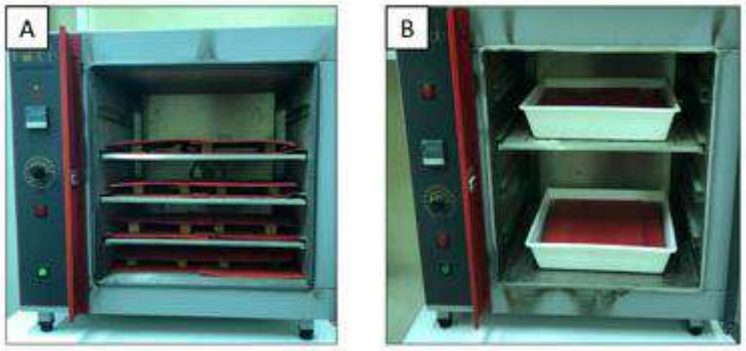


Figura 2. Muestras del material textil en cámaras bajo las condiciones de A) seco y B) sumergidas en agua.

2.2. Diseño experimental

La presente investigación no se ha realizado con mantas de riego subterráneas imprimadas. Si fuera así el ensayo, se cuantificarían las raíces que han atravesado la manta del exterior al interior donde se encuentra el tubo de riego. Sin embargo, en lugar de dicha metodología se han confeccionado sendos "sobres" a modo de macetas, cosidos a mano, con las diferentes imprimaciones a evaluar (ver Figura 3 y Figura 4).



Figura 3. Imagen de una de las muestras de material textil (polipropileno) tras realizar el cosido



Figura 4. Detalle del esquema general de la experimentación.

Como consecuencia de la combinación de las diferentes imprimaciones, con el tiempo de envejecimiento del material textil por temperatura y según si dicho envejecimiento se da en seco o en agua, surgen un total de 96 tratamientos diferentes a estudiar (ver Figura 5).

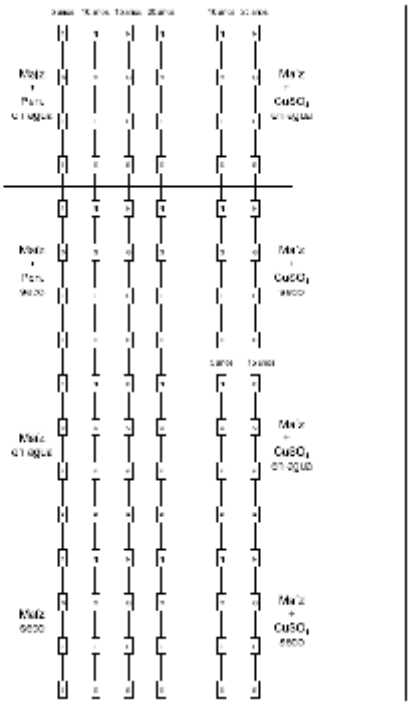


Figura 5. Esquema general del diseño experimental. Cada recuadro corresponde a un tratamiento.

Estos sobres se han rellenado con suelo a capacidad de campo el cual mediante un proceso de desmenuzado a mano pasa a ser tierra fina, con textura semejante a una cama de siembra. Esto permite un mayor contacto entre el suelo y la semilla, lo que facilita el desarrollo de la misma. Para poder ver el efecto que tienen las distintas imprimaciones, es necesario emplear un cultivo con raíces fuertes y rápido enraizamiento, por lo que se ha decidido sembrar maíz.

Antes de implantar los tratamientos en el suelo se debe llevar a cabo una preparación del terreno. En este caso, se remueve el suelo con un apero tradicional de labranza.

Una vez que el terreno ha sido preparado, se han abierto diferentes zanjas en el suelo con ayuda de una azada, en las que se entierran las macetas a ras de suelo (ver Figura 6). Asimismo, es importante compactar el suelo que linda con cada uno de los sobres, para facilitar el contacto entre ambos.



Figura 6. Imagen de una de las bolsas enterradas en el invernadero.

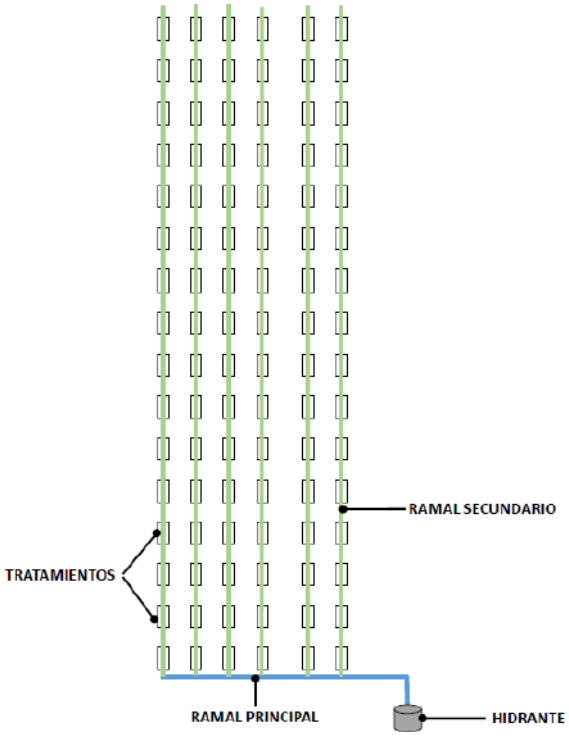


Figura 7. Esquema de la instalación del sistema de riego.

En lo referente al sistema de riego, se trata de una instalación sencilla (ver Figura 7) que presenta un ramal principal del cual salen otros seis ramales secundarios que alimentan cada uno de los tratamientos. El ramal principal está conectado a la bomba de salida, ubicada en el lateral derecho del mismo invernadero donde se desarrolla el ensayo, llevando un caudal de 2 l/h.

Para el correcto desarrollo del material vegetal, se han determinado las necesidades hídricas del cultivo y tras ello, se ha procedido a la obtención de los tiempos de riego para los meses de abril a septiembre.

2.3. Protocolo experimental

Una vez que la planta alcanza su madurez, la maceta se desentierra y fotografía la parte aérea de la planta (ver Figura 8) y se pesa todo el material vegetal extraído.



Figura 8. Ejemplo de toma de fotografía de la parte aérea de la planta de maíz.



Figura 9. Sobre con la parte radicular de la planta de maíz desenterrado.

Del mismo modo, la parte radicular de cada planta, es decir, el tocón, se desentierra con la maceta (ver Figura 9), y se pesa.

Posteriormente, se lleva a cabo la separación del tocón del sobre. Para ello, en primer lugar se elimina cuidadosamente con la ayuda de una espátula, la porción de suelo adherida a la parte exterior del sobre. Tras ello, mediante el empleo de un cúter, se descosen los laterales del sobre y se extrae el tocón del mismo (ver Figura 10). De esta manera, es posible observar claramente si las raíces han atravesado la moqueta (ver Figura 11).



Figura 10. El tocón una vez quitado el material textil.



Figura 11. Detalle de la bolsa tras haber descosido los laterales. Se observan las raíces que la han atravesado.

Finalmente, con todos los sobres limpios, se evalúa la superficie del sobre que está ocupada por las raíces y que han atravesado el material, para poder así valorar el efecto de las imprimaciones. A mayor superficie ocupada por las raíces, menor efecto de la imprimación aplicada. Esto se realiza mediante la toma de fotografías de cada uno de los tratamientos y su posterior análisis a través de la herramienta informática Qgis.

El estudio se ha llevado a cabo en las parcelas experimentales de la Finca de Prácticas de la Universidad Pública de Navarra (UPNA).

2.4. Análisis de datos. Processado de imágenes.

Tal y como se ha mencionado en el apartado anterior (ver arriba), el objetivo del procesado de imágenes es poder conocer la superficie radicular ocupada en cada uno de los tratamientos. Para ello, se ha decidido emplear el programa informático QGIS.

Así pues, los pasos clave para el análisis de imágenes son, en este orden, los siguientes:

(i) En primer lugar, se lleva a cabo la georrectificación de la imagen RGB, ya que la imagen obtenida no está tomada desde un ángulo totalmente perpendicular (ver *Figura 12A*),

(ii) Tras ello, se obtiene la imagen binaria, la cual permite identificar y cuantificar con claridad el total de las raíces presentes en la imagen (ver *Figura 12B)*.

(iii) Seguidamente, la imagen binaria es dividida en cinco profundidades diferentes:

- Profundidad 1: de 0 a 2,5 cm.
- Profundidad 2: de 2,5 a 5 cm.
- Profundidad 3: de 5 a 7,5 cm.
- Profundidad 4: de 7,5 a 10 cm.
- Profundidad 5: de 10 a 12,5 cm.

(iv) Finalmente, se determinan las variables estadísticas de media y desviación estándar, de cada una de las profundidades.

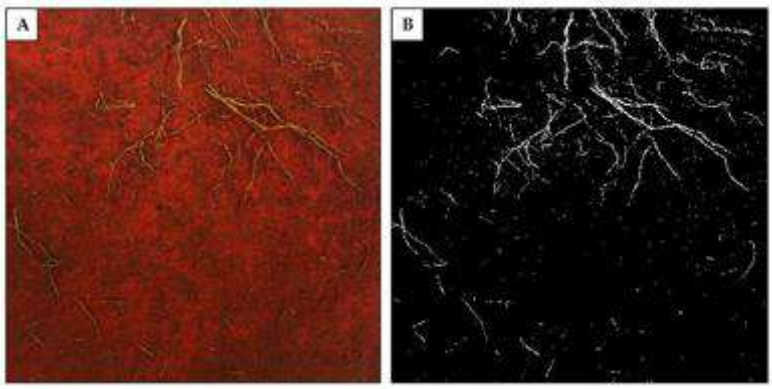


Figura 12. Ejemplo de las imágenes obtenidas durante su procesado en QGIS. A) Imagen tras la georreferenciación y B) Imagen binaria.

Se destaca que, con los datos estadísticos obtenidos tras el procesado de imágenes, se ha efectuado un análisis de la varianza (ANOVA) de los distintos factores, como son el envejecimiento del material, tanto por temperatura como por grado de humedad del mismo, las diferentes profundidades que se encuentran en cada sobre y las imprimaciones. Además, se ha hecho uso del test de Tukey para ver que imprimación es la que mayor efecto tiene a la hora de repeler el crecimiento radicular.

Es importante mencionar que, la investigación se ha basado en el supuesto de que el volumen ocupado por las raíces en cada tratamiento está linealmente relacionado con el número de raíces presentes en cada uno de ellos. Para poder conocer si esta hipótesis inicial es cierta, se ha cuantificado el número de raíces que han atravesado el sobre en un área conocida. Para ello, primeramente, se seleccionan 7 tratamientos con diferentes grados de densidad radicular, es decir: alta, media y baja. Después, se delimita un área de aproximadamente 7,6 x 7,6 cm en cada tratamiento. Tras ello, se fotografía el área marcada en el sobre y se realiza el mismo procesamiento de imagen de acuerda al protocolo descrito anteriormente (ver arriba). A continuación, se extraen cuidadosamente, empleado una pinza de laboratorio, las raíces contenidas en su interior y se contabilizan.

Una vez se ha cuantificado la superficie ocupada por las raíces en el área delimitada y se han contabilizado el número de raíces presentes en dicho área, se grafican los datos obtenidos y se comprueba si realmente existe un relación lineal entre ambos.

Finalmente, se desea mencionar que debido los diferentes periodos de deterioro o envejecimiento del material, no se han sembrado todos los sobres al mismo tiempo. Además, debido a las altas temperaturas que se han acumulado en los inverderos de la UPNA durante los meses de primavera y verano 2018, ha habido grandes problemas de germinación, provocando que los tratamientos no tengan la misma fecha de siembra. Tanto es así que, ha habido 4 tratamientos de los 96 en los que no se ha conseguido su germinación.

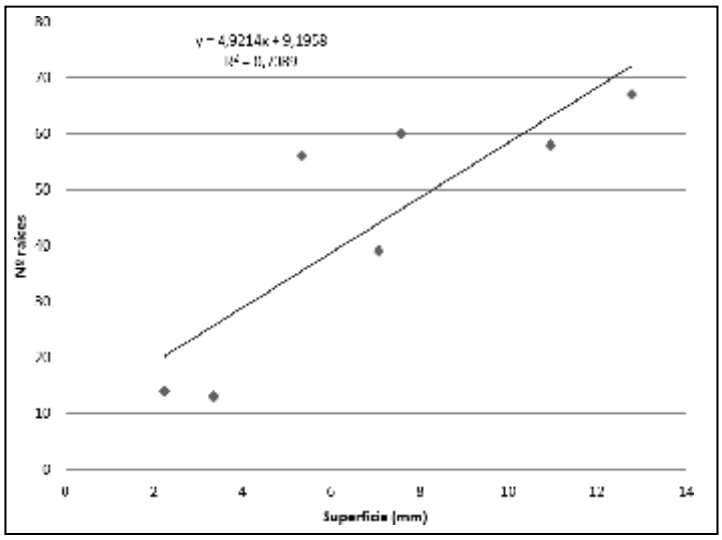
3. Resultados y discusión

Como ya se ha comentado, la investigación cuenta con dos imprimaciones a modo de testigos, que son la Pendimetalina y el Sulfato de Cobre. Observando los datos tanto de la superficie ocupada por raíces como el peso de los tocones de los tratamientos con Sulfato de Cobre, estos son notablemente menores que el resto de tratamientos. Esto sería debido a que la siembra de estos testigos fue más tardía que el resto de tratamientos y no a la acción repelente de la imprimación (ver Figura 13). Por tanto, se decide descartar el testigo con Sulfato de Cobre en nuestra evaluación.



Figura 13. Ejemplo del menor desarrollo radicular alcanzado por los tratamientos testigos con sulfato de cobre (derecha) con respecto a los restantes tratamientos (izquierda) debido a la siembra tardía de los primeros.

Otro punto importante a resaltar es que la hipótesis de que la superficie del material textil ocupada por las raíces es un buen estimador del número de raíces, es aceptable. Esto se aprecia en la Gráfica 1, donde se ve como la superficie ocupada por las raíces es directamente proporcional (función lineal) al número de las mismas.



Gráfica 1. Relación existente entre la superficie ocupada por las raíces y el número de las mismas.

Se comienza realizando un análisis de la varianza reagrupando todos los tratamientos según sólo el grado de humedecimiento en su preparación: "húmedo" y "seco". No se observan diferencias significativas entre las dos poblaciones (húmedo y seco) (ver Tabla 1).

Tabla 1. ANOVA de los tratamientos reagrupados en "húmedo" y "seco".

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0007	1,0	0,0007	2,9868	0,0846	3,8628
Dentro de los grupos	0,1052	438,0	0,0002			
Total	0,1059	439,0				

Así pues, se elige el grupo de tratamientos en húmedo ya que serían los más representativos de las condiciones de trabajo (mantas de riego subsuperficial).

A continuación, se continúa con el estudio realizando un análisis de la varianza discriminado por el grado de envejecimiento de la moqueta con la imprimación. En este caso, se hallan diferencias significativas entre las poblaciones de tratamientos (ver *Tabla 2*). Es por ello por lo que se realiza un test de Tukey para comparar los diferentes grados de envejecimiento (ver *Tabla 3*).

Tabla 2. ANOVA de los tratamientos discriminados por el grado de envejecimiento.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0006	3	0,0002	7,4906	0,0024	3,2389
Dentro de los grupos	0,0004	16	0,0000			
Total	0,0010	19				

Tabla 3. Test de Tukey de los tratamientos en función del grado de envejecimiento (5, 10, 15 y 20 años).

	5 AÑOS	10 AÑOS	15 AÑOS	20 AÑOS
5 AÑOS		0,0007*	0,0084*	0,01200
10 AÑOS			0,0092*	0,0127
15 AÑOS				0,0036*
20 AÑOS				

*Existen diferencias significativas.

Observando los datos obtenidos en el test de Tukey (ver Tabla 3) se percibe como no hay una tendencia sistemática de variación en los tratamientos de los diferentes años de envejecimiento.

Por tanto, se continúa el análisis con el grupo de tratamientos de menor deterioro inducido (5 años) ya que en la práctica la vida útil de las mantas de riego estaría también en este rango de tiempo.

Finalmente, se procede a evaluar el efecto de las diferentes imprimaciones (E, F, G, N, etc.) a partir de un ANOVA de dos factores; siendo el segundo factor la profundidad de enraizamiento (ver Tabla 4). Se observan diferencias significativas tanto entre columnas (imprimaciones) como entre filas (profundidad).

Tabla 4. ANOVA de dos factores: las imprimaciones y la profundidad.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas (PROFUNDIDAD)	0,0021	4	0,0005	3,3014	0,0246	2,7141
Columnas (TRATAMIENTOS)	0,0129	7	0,0018	11,8985	0,0000	2,3593
Error	0,0044	28	0,0002			
Total	0,0194	39				

Para finalizar con el estudio estadístico y poder estimar que imprimación es la que mejor efecto tiene sobre el crecimiento radicular, se elabora un test de Tukey en el cual se comparan los tratamientos de envejecimiento 5 años y húmedo y los datos correspondientes a la profundidad 3 (5-7,5 cm) (ver Tabla 5). La selección de esta profundidad se basa en el hecho de que el mayor crecimiento radicular en todos los tratamientos se ha observado precisamente en dicho rango de profundidad.

Tabla 5. Test de Tukey de los tratamientos "húmedos" y " 5 años".

	E	**F**	**G**	**N**	**Pen_E**	**Pen_F**	**Pen_G**	**Pen_N**
E		0,017	0,01	0,026	0,023	0,001	0,026	0,0313
F			0,007	0,008	0,006	0,016	0,009	0,0484*
G				0,016	0,013	0,009	0,016	0,0412*
N					0,003	0,025	0,0004	0,0568*
M+Pen_E						0,022	0,003	0,0542*
M+Pen_F							0,025	0,0324*
M+Pen_G								0,0171
M+Pen_N								

*Existen diferencias significativas.

Los resultados del test de Tukey (ver Tabla 5), muestran que los tratamientos con imprimación tipo "N" (nanopartículas) presentan un comportamiento superior, aunque no muy marcado, a su equivalente comercial. Las restantes imprimaciones (fécula de maíz + látex en diferentes concentraciones), no han mostrado un mejor comportamiento con respecto a sus respectivos testigos. Por lo tanto, se concluye que la imprimación N es la más efectiva como repelente radicular.

4. Conclusiones

El grado de obturación de emisores ubicados dentro de mantas de riego subsuperficial podría reducirse con imprimaciones de sustancias inocuas al medio ambiente que actúan como repelente radicular. Estas sustancias operarían al menos con la misma efectividad que la lograda con otros repelentes comerciales de síntesis, pero de posible impacto ambiental.

Los primeros resultados de la experimentación muestran que solamente los tratamientos con imprimación tipo "N" (nanopartículas) presentaron un comportamiento superior –aunque no muy marcado– a su equivalente comercial. Las restantes imprimaciones (fécula de maíz+ látex en diferentes concentraciones), no mostraron un mejor comportamiento con respecto a sus respectivos testigos.

La actuación del mejor prototipo de imprimación evaluado (tipo "N") podría incluso superarse usándose a mayores concentraciones. Se recomienda investigar esta posibilidad.

Esta imprimación mantendría su efecto repelente durante al menos la vida útil de la propia manta de riego (años).

Las imprimaciones que no superaron al testigo comercial, no son descartadas. Futuras investigaciones podrían demostrar que su limitado efecto repelente es, no obstante, suficiente para reducir el grado de obturación de los emisores a valores aceptables.

Se hace necesario investigar el grado de protección que la manta de riego per se – sólo como barrera física- ejerce sobre los emisores. De hecho, se ha incorporado recientemente a la presente experimentación un nuevo testigo sin imprimación ni tratamiento previo.

Se ha implementado con éxito una innovadora técnica semiautomática de conteo de raíces.

Referencias

1. Ayars, J.E., Phene, C.J, Hutmacher, R.B., Davis, K.R., Schoneman, R.A., Vail, S.S. y Mead R.M. (1999). Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years research at the Water Management Research Laboratory. Agric. Water Manage.
2. Ayudas para realizar proyectos de I+D convocatoria 2017. Proyectos en colaboración o de transferencia del conocimiento de Gobiernos de Navarra. 2017. HIDROCEL: 001-1365-2017-000182.
3. Coelho, R., Faria, L., y de Mélo, R. (2007). Obstrução de gotejadores autocompensantes enterrados na irrigação de citros causada por intrusão radicular obstruction of self-compensated emitters in subsurface drip citrus irrigation (root intrusion-sdi).
4. Felber, C. (2011). La Economía del Bien Común/ L'economía Bene Comune. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=U4tL4eS--XM
5. Fernández Izard, M., Escudero Bocos, C., Toril Moreno, R., Antolin García, T., García Valcárcel, C., Herranz Aparicio, G., Matesanz Miguel, I. y Moreno Rodríguez, A. (2019). Día mundial de la educación ambiental. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/pag-web/dia-mundial-ea-guia-recursos-2019_tcm30-375733.pdf [Accessed 13 May 2019].
6. Lett, L. A. (2014). Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular. Revista argentina de microbiología, 46(1), 1-2. Disponible en: file:///I:/TFM/Propuesta%20TFM/Artículo.pdf
7. Martin de Santa Olalla,F. y De Juan, J.A. 1993. Agronomia del riego. Mundi-Prensa, Madrid, p. 732.
8. Pérez, B. (2018). Evaluación de mantas de riego subsuperficial realizadas con material reciclado para su aplicación en cubiertas vegetales. Pamplona: Universidad Pública de Navarra.
9. Rodrigues, B. N., Lima, J. de, Yada, I. F. U., & Fornarolli, D. A. (2010). Influência da cobertura morta no comportamento do herbicida sulfentrazone. Planta Daninha, 17(3), 445–458. Disponible en: https://doi.org/10.1590/s0100-83581999000300011

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Evaluación de los efectos de la aplicación de biochar como enmienda orgánica en un cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor L.*) bajo condiciones de invernadero

M. Videgain[1], P. Marco[2], C. Martí[1], F.J. García-Ramos[1], J.J. Manyà[1], M.C. Jaizme-Vega[3]

[1] Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza; mvidegain@unizar.es
[2] Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón.
[3] Instituto Canario de Investigaciones Agrarias

Resumen: La aplicación como enmienda orgánica en el suelo de biochar procedente de sarmiento de vid (*Vitis vinifera* L.) supone una alternativa de gestión agrícola de interés. El comportamiento de este tipo de biochar en el suelo precisa de una mayor información que permita ajustar las condiciones de pirólisis con el objetivo de obtener un biochar de calidad. En este trabajo se ha desarrollado un ensayo agronómico con la finalidad de evaluar la influencia de la aplicación de este tipo de biochar sobre el sistema suelo-planta-microorganismos. Se ha establecido un diseño tri-factorial en bloques al azar teniendo en cuenta como factores la temperatura final de pirólisis (400 °C y 600 °C), la dosis de aplicación (20 t/ha y 40 t/ha) y la textura del sustrato (franco-arenosa y franco-arcillosa). El cultivo seleccionado ha sido sorgo (*Sorghum bicolor* L.) cuyo desarrollo y producción se han evaluado durante dos ciclos completos de cultivo. Como indicador biológico se han cuantificado algunas poblaciones microbianas. Se han observado diferencias significativas en el sustrato franco-arenoso: la aplicación de biochar producido a 400 °C ha incrementado significativamente la biomasa seca de las raíces de las plantas en la segunda cosecha (47,5% respecto al control). Además, en este mismo sustrato, la aplicación del biochar producido a 600 °C, independientemente de la dosis, ha incrementado el número de poblaciones de hongos filamentosos respecto al tratamiento control. Los microorganismos aeróbios mesófilos totales se incrementaron en ambos tipos de sustrato con la adición de biochar.

Palabras clave: pirólisis, sarmiento de vid, poblaciones microbianas.

1. Introducción

Existen diversas fuentes de materia orgánica para utilizar como enmiendas en suelos, entre ellas aparece el biochar. El término biochar se define como un material carbonoso obtenido a partir de biomasa mediante descomposición térmica a temperaturas relativamente bajas (< 700 °C) y baja o nula concentración de oxígeno, en un proceso conocido como pirólisis [1].

Algunos organismos internacionales que trabajan en la promoción de este material pirogénico, y científicos que trabajan en su estudio [2] proponen en su definición la particularidad de denominar al material pirolizado como biochar cuando su destino es la aplicación como enmienda orgánica de suelos y para el secuestro de carbono en los mismos, siendo estos últimos aspectos de gran importancia, ya que se descarta su uso como combustible.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3413

El uso de biochar supone una alternativa de gestión ambiental que está adquiriendo gran repercusión en los últimos años, ya que puede ser una vía de actuación simultánea en varios frentes: mejorar la productividad de suelos agrícolas, valorizar residuos y actuar como sumidero de CO_2. El biochar puede actuar como mejorante de suelos aumentando su fertilidad como consecuencia del aumento de la capacidad de intercambio catiónico de los mismos y del aumento del pH [3] en suelos ácidos. La utilización de biochar lleva asociados beneficios ambientales potenciales, gracias al aumento de la capacidad de retención de agua y de nutrientes y la consecuente mejora de la calidad del agua (reducción de lixiviados). El carbón vegetal obtenido mediante pirólisis es una sustancia estable rica en carbono, cuya aplicación en suelos comporta una retención o secuestro de carbono. Algunos autores se refieren al uso del biochar como una estrategia que implica un ciclo negativo de carbono y, por lo tanto, la vía más interesante para reducir las emisiones de CO_2 mediante el uso de biomasa [4,5].

El grado de conocimiento sobre el efecto del biochar en el sistema suelo-planta-microorganismos es muy reciente y los resultados consultados son muy variables y dependientes del tipo de experimento llevado a cabo.

Las propiedades finales del biochar dependen de las condiciones de trabajo del proceso de pirólisis (temperatura final de producción, presión y tiempo de residencia del gas en el interior del reactor) que su vez también tienen una influencia clara sobre el rendimiento del proceso [6—9]. Además de estas condiciones es necesario tener en cuenta el tipo de biomasa utilizada (composición, humedad y granulometría) [10,11], que además de influir sobre el propio proceso de pirólisis, tendrá un comportamiento muy diferente en el suelo como enmienda orgánica en función de sus características intrínsecas.

Con el objetivo de producir un biochar de calidad a partir de la revalorización de subproductos agrarios, en el Grupo de Investigación en Biochar de la Escuela Politécnica de Huesca se ha trabajado de forma experimental en la producción de biochar a partir de varios tipos de biomasa (restos de poda de viñedo, alperujo de oliva, cañote de maíz, paja de trigo, restos de poda de encina, entre otros). Debido al volumen de residuos que ofrece la poda del viñedo [12], así como la problemática de la aplicación directa al suelo en función de las condiciones de cada explotación [13], se ha considerado interesante profundizar en las posibilidades de su proceso de transformación en biochar, teniendo en cuenta la información existente sobre las condiciones de operación para este proceso pero atendiendo a la falta de información sobre sus efectos al ser aplicado al suelo.

El objetivo de este trabajo es evaluar los efectos de la aplicación de biochar de sarmiento de vid sobre el desarrollo de un cultivo de sorgo bajo condiciones controladas de invernadero tomando como indicador biológico el comportamiento de algunas comunidades microbianas del suelo.

2. Materiales y métodos

2.1. Recogida y caracterización de biomasa

El sarmiento utilizado para la producción de biochar procede de la poda invernal de plantas de vid (Vitis vinifera) y fue recogido en una parcela de una bodega de vino situada en la comarca del Somontano de Huesca, en el noreste de Aragón. La variedad de vid fue Cabernet Sauvignon en una etapa de máxima producción y un índice de Ravaz 6.

Una vez recolectada, la biomasa se almacenó en cajas de cartón para su transporte a laboratorio. Los sarmientos fueron seleccionados por su diámetro (entre 8,5 y 15,0 mm) y se cortaron con tijera de poda en piezas de aproximadamente 40 mm de longitud con la intención de maximizar la eficiencia del proceso de pirólisis (tanto el contenido de carbono fijo en el biochar como el rendimiento del proceso), relacionada con el tamaño de partícula inicial [14,15].

Tras un muestreo representativo de la biomasa se realizó el análisis inmediato siguiendo el procedimiento estandarizado ASTM (D3173 para la humedad, D3174 para las cenizas y D3175 para la materia volátil). El análisis elemental de la biomasa se realizó mediante un analizador elemental LECO micro CHNS en el laboratorio del Grupo de Procesos Termoquímicos de la Universidad de Zaragoza. Por último, la composición de la ceniza se analizó de acuerdo a la norma ASTM D4326-04 a través de fluorescencia de rayos X (XRF). La Tabla 1 refleja los resultados de la caracterización de la biomasa inicial.

Tabla 1. Análisis inmediato, elemental y XRF del sarmiento recolectado

Inmediato (% p/p)		**Elemental (% p/p en base seca y libre de cenizas)**	
Ceniza	2,46 ± 0,37	C	42,29 ± 0,49
Humedad	10,47 ± 0,13	H	5,24 ± 0,06
Volátiles	72,93 ± 1,64	N	13,52 ± 0,35
Carbono fijo	14,14 ± 1,38	O	38,96 ± 0,45
Compuestos inorgánicos (% p/p sobre cenizas)			
CaO	58,30	PbO	0,26
K2O	18,40	SnO2	0,26
SiO2	5,73	CuO	0,09
Fe2O3	3,51	MnO	0,53
Al2O3	2,57	ZnO	0,33
P2O5	1,24	SO3	0,60
MgO	6,66	Cl	0,47
TiO2	0,34		

2.2. Producción y caracterización de biochar

Los experimentos de pirólisis se llevaron a cabo en un reactor de lecho fijo a escala de laboratorio situado en la Escuela Politécnica Superior de Huesca. Los detalles sobre la configuración específica del reactor, el proceso de pirólisis y la metodología de análisis de los gases producto de la pirólisis pueden consultarse en publicaciones previas [10,16]. Se realizaron un total de 13 experimentos a dos temperaturas diferentes (400 — 600 °C) a presión atmosférica, con un caudal constante de 0,6 l min^{-1} de N_2 y un mismo tiempo de residencia del gas en el interior del reactor (180 s). En la Tabla 2 se detalla la producción de biochar total y el rendimiento medio de biomasa a biochar de los experimentos.

Tabla 2. Rendimiento medio del proceso de pirólisis en la producción de biochar a diferentes temperaturas (400 °C — B400 y 600 °C — B600)

Tipo de biochar	**Nº experimentos realizados**	**Temperatura de pirólisis (°C)**	**Total biomasa utilizada (g)**	**Total biochar producido (g)**	**Rendimiento medio biochar**
B400	8	400	2.536,52	959,63	0,38
B600	5	600	4.083,69	1.206,74	0,29

Se realizaron análisis inmediato y elemental sobre los diferentes tipos de biochar obtenido siguiendo las normas especificadas en el apartado anterior. Además, se enviaron muestras del producto final al Laboratorio Agroambiental del Gobierno de Aragón donde se realizaron los análisis de referencia para enmiendas orgánicas. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Análisis inmediato, elemental y nutrientes en los dos tipos de biochar (400°C — B400 y 600 °C — B600)

Inmediato (% p/p)			Elemental (% p/p en base seca y libre de cenizas)		
	B400	**B600**		**B400**	**B600**
Ceniza	6,45 ± 0,14	10,02 ± 0,81	C	71,54 ± 0,48	82,89 ± 0,33
Humedad	0,57 ± 0,22	3,05 ± 0,34	H	4,46 ± 0,19	1,95 ± 0,08
Volátiles	22,03 ± 0,01	2,39 ± 0,71	N	1,58 ± 0,10	1,52 ± 0,01
Carbono fijo	70,88 ± 6,45	84,54 ± 1,32	O	22,42 ± 0,77	13,63 ± 0,31

Nutrientes (análisis de referencia para abono orgánico)

Nutrientes principales	**Método**	**Unidad**	**Resultado**		**Nutrientes secundarios**	**Método**	**Unidad**	**Resultado**	
			B400	**B600**				**B400**	**B600**
Nitrógeno total Kjeldahl	MT-FER-001	% p/p	1,40	1,20	Calcio total (CaO)	ICP-OES	% p/p	2,90	3,80
Fósforo total (P_2O_5)	ULTRAV. VISIBLE	% p/p	2,08	2,45	Magnesio total (MgO)	ICP-OES	% p/p	0,68	0,79
Potasio total (K_2O)	ICP-OES	% p/p	1,70	2,10	Sodio total (Na_2O)	ICP-OES	mg/kg	850,00	540,00
Microelementos	**Método**	**Unidad**	**Resultado**		**Caract. Físico-químicas**	**Método**	**Unidad**	**Resultado**	
			B400	**B600**				**B400**	**B600**
Hierro total	ICP-OES	mg/kg	280	210	Mat. orgánica	Calcinación	% p/p	86,40	85,40
Cobre total	ICP-OES	mg/kg	43	38	Densidad aparente		g/cm³	0,33	0,40
Manganeso total	ICP-OES	mg/kg	100	102					
Cinc total	ICP-OES	mg/kg	145	135					

El biochar obtenido se procesó mecánicamente a través de un removedor manual diseñado específicamente para simular las condiciones de movimiento del producto en el sistema de distribución de una abonadora convencional. Como resultado de este proceso se obtuvieron diferentes fracciones de tamaños que se guardaron por separado para respetar, de una forma aproximada, los porcentajes obtenidos a la hora de aplicar el biochar en las macetas del ensayo.

La distribución media del tamaño del producto preparado para su aplicación en el ensayo se detalla en la Tabla 4:

Tabla 4. Distribución media del tamaño de partícula tras el procesado mecánico del biochar con removedor manual para las dos temperaturas de pirólisis

Fracción	B400 (%)	B600 (%)
< 2 mm	7	4
2 mm < x < 20 mm	24	19
20 mm < x 40 mm	43	55
≥ 40 mm	26	22

2.3. Selección, muestreo y caracterización de suelo para bioensayo

El suelo fue uno de los factores a tener en cuenta para evaluar la influencia del biochar sobre el cultivo, por lo que se seleccionaron suelos de dos parcelas distintas, ambas de manejo ecológico y con dos texturas diferentes. Se recogió una muestra compuesta de los primeros 30 cm en cada una de las parcelas y se secaron al aire en laboratorio. Se tomó una muestra

representativa de cada uno de ellos, y se realizó un análisis de fertilidad en un laboratorio acreditado. Por otra parte, también se realizó un análisis que permitió caracterizarlo biológicamente previamente al desarrollo del ensayo en invernadero.

La textura del suelo 1 resultó franco-arenosa (72,04% arena total, 17,68% limo y 10,28% arcilla) y la del suelo 2 franco-arcillosa (33,11% arena, 31,64% limo, 35,25% arcilla), lo que permitió establecer una diferencia importante en su comportamiento físico.

Se realizó una puesta a punto de la metodología de cultivo a través del seguimiento del crecimiento de plantas de cebada en ambos tipos de suelo tamizados a un tamaño inferior a 2 mm y mezclados con diferentes cantidades de gravilla fina esterilizada como sustrato inerte que permitiera evitar la compactación de los contenedores durante el ensayo. Para ambos suelos se optó por una mezcla 60% suelo + 40% gravilla fina que conformó el sustrato para el desarrollo del ensayo.

Los resultados del análisis de fertilidad físico-química de cada tipo de sustrato (suelo + gravilla) facilitados por el laboratorio externo se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados análisis de fertilidad de los sustratos utilizados en el ensayo (sustrato 1: suelo franco-arenoso + gravilla; sustrato 2: suelo franco-arcilloso 2 + gravilla)

Determinación realizada	Método	Unidad	Sustrato 1	Sustrato 2
pH al agua (1 : 2,5)	MT-SUE-007		8,0	8,2
Conductividad eléctrica (1 : 5)	Electrometría	dS/m	0,4	0,2
Materia orgánica oxidable	MT-SUE-002	g/100 g	2,81	1,74
Fósforo soluble (Olsen)	MT-SUE-003	mg/kg	29	17
Potasio soluble	MT-SUE-008	mg/kg	254	130
Magnesio	MT-SUE-008	mg/kg	124	194
Fósforo total (P2O5)	GRAVIMETRÍA	% p/p	< 0,38	< 0,38
Humedad retenida CC	GRAVIMETRÍA	% p/p	9,94	17,05
Humedad PMP	GRAVIMETRÍA	% p/p	4,53	6,83

Por otra parte el suelo se caracterizó biológicamente a traves del análisis cuantitativo de algunas poblaciones microbianas en el Centro de Investigaciones Agrarias y Tecnología Agroalimentaria de Aragón.

Para este análisis se siguieron las indicaciones dictadas por las normas que se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Grupos microbianos analizados en este estudio, normativa y metodología

Grupo microbiano	Metodología	Descripción
Preparación de muestras	ISO 6887-1:1999	Preparación de muestras, suspensiones iniciales y diluciones decimales para análisis microbiológico – Parte 1: Normas generales para la preparación de suspensiones iniciales y diluciones decimales.
Microorganismos aerobios mesófilos totales	ISO 4833:2013	Método de enumeración de microorganismos – Parte 2: Colonias a 30 °C mediante técnica de extensión en superficie.
Pseudomonas spp.	ISO 13720:21	Enumeración de presuntas Pseudomonas spp.
Medio almidón caseína [17]		Almidón, 10,0 g; Caseína, 0,3 g; KNO3, 2,0 g; NaCl, 2,0 g; K2HPO4, 2,0 g; MgSO4·7H2O, 0,05 g; CaCO3, 0,02 g; FeSO4·7H2O, 0,01 g; Agar, 15,0 g; Agua destilada, 1,0 l. Ajustar pH a 7,2. Técnica de recuento de colonias a 30 °C.
Mohos y Levaduras	ISO 21527-1:2008	Método para enumerar levaduras y mohos – Parte 1: técnica de recuento de colonias en productos con una actividad de agua mayor a 0,95.

Tomando una muestra representativa de cada tipo de suelo, cada unidad analítica (25 g) se colocó en una bolsa stomacher provista de filtro de celulosa. Para los grupos microbianos estudiados se utilizó, como diluyente de la unidad analítica, agua de peptona al 0,1% (Merck, Darmstadt, Alemania) y se homogeneizó en un Stomacher Lab-Blender Circulator 400 (Seward Laboratory, Londres, Inglaterra) durante dos minutos a 260 r.p.m.

Estos medios de cultivo se prepararon siguiendo las indicaciones de etiquetado de los medios y de la normativa ISO 11133-1:2009[13].

Las medias de los valores obtenidos para cada grupo microbiano y la desviación típica, con tres repeticiones de cada muestra, y realizando conteos a los 4 y 7 días desde su incubación se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores medios y desviación estándar del LogUFC/g para diferentes grupos microbianos en suelos de texturas diferentes (**S1**: suelo de textura franco-arenosa; **S2:** suelo de textura franco-arcillosa)

Grupo microbiano	Unidad	Sustrato 1	Sustrato 2
Aeróbios mesófilos totales	LogUFC/g	6,59 ± 0,90	7,08 ± 0,67
Mohos y levaduras	LogUFC/g	4,75 ± 0,65	4,71 ± 0,43
Fª Enterobacteriaceae	LogUFC/g	1,30 ± 0,30	1,90 ± 0,20
Gº Pseudomonas	LogUFC/g	5,74 ± 0,13	5,96 ± 0,34
Actinomicetos	LogUFC/g	6,08 ± 0,45	6,45 ± 0,27

Inicialmentea la carga microbiana total cultivable de los sustratos 1 y 2, es de 6,6 y 7,1 log UFC/g, respectivamente. Los recuentos más elevados en la rizosfera corresponden al Gº Pseudomonas y Actinomicetos con alrededor de 6 u.log, seguido de la micobiota con 4,1 log UFC/g.

Además de las comunidades microbianas descritas anteriormente, se preparó un medio selectivo para hongos del género *Trichoderma*, TSM (*Trichoderma Selective Medium*) [18], como otro indicador de la fertilidad biológica de los suelos, resultando positiva su presencia en ambos suelos.

2.4. Diseño experimental

En el mes de noviembre de 2017 se instaló el bioensayo en invernadero. El cultivo seleccionado fue sorgo (*Sorghum bicolor* L.) y se estableció un diseño tri-factorial en bloques al azar que constó de los siguientes factores como variables independientes:

Factor 1: tipo de sustrato (suelo franco-arenoso + gravilla fina **S1** y suelo franco-arcilloso + gravilla fina **S2**)

Factor 2: temperatura final de pirólisis del biochar utilizado (400 °C – **B1** y 600 °C – **B2**)

Factor 3: dosis de biochar aplicado (0 t/ha – **D0 Control**, 20 t/ha – **D1** y 40 t/ha – **D2**).

El número de réplicas para cada combinación de factores fue de 5, por lo que se sembraron un total de 50 contenedores.

2.5. Establecimiento y desarrollo del bioensayo

Para el establecimiento del bioensayo se utilizaron bandejas de polietileno con doce alveolos de 650 cm^3 de capacidad, 18 cm de profundidad y 64 cm^2 de superficie superior cada uno.

Los alveolos se rellenaron con la correspondiente mezcla de sustrato (suelo + gravilla) a la que se añadió de forma homogénea la cantidad correspondiente de biochar.

El cultivo seleccionado para el desarrollo del ensayo fue sorgo (*Sorghum bicolor* L.), se pregerminaron semillas no tratadas químicamente, previamente desinfectadas en solución de

lejía en agua caliente al 1% durante media hora. Tres semillas pregerminadas se coloraron en cada alveolo y se regaron de forma cuidadosa durante dos meses hasta que se realizó un aclareo que permitió mantener 1 planta/ alveolo.

El control de temperatura y humedad en el invernadero se realizó a través de una sonda de temperatura/humedad ambiental (HOBO Pro v2), que permitió ajustar las dosis y posturas de riego durante el ciclo del cultivo. Ambos tipos de suelo se regaron a capacidad de campo con distintas frecuencias de riego en función de la temperatura y la humedad registradas en el invernadero.

Durante los cuatro primeros meses de desarrollo las plantas fueron regadas únicamente con agua. En el cuarto mes se empezaron a notar síntomas de deficiencia de nutrientes por lo que se comenzó a regar con solución nutritiva de Hewitt [19].

El ensayo tuvo una duración de 13 meses en los que se completaron dos ciclos productivos completos, ya que una vez completado el primer ciclo (210 días desde siembra — D_{210}), las plantas de sorgo se cortaron a unos 2 cm de la superifice del sustrato y rebrotaron un total de 42 de las 50 plantas inicicales (se mantuvo un número mínimo de 3 réplicas para cada uno de los tratamientos), completando un nuevo ciclo de cultivo (390 días desde siembra — D_{390}).

2.6. Medidas realizadas

Tras completar ambos ciclos productivos, las plantas se cortaron y se tomaron las siguientes medidas:

- Peso fresco/ peso seco de la biomasa total (mediante secado en estufa hasta estabilización de peso a 70 °C). Se diferenció grano, parte aérea y sistema radicular; el dato referente al sistema radicular sólo en la segunda cosecha cuando se levantó por completo el ensayo.
- Tamaño de las plantas (altura desde base del tallo hasta inserción hoja bandera).
- Longitud hoja bandera (cuando la hubo).

Además de los parámetros anteriores, una vez levantado el ensayo se realizaron las siguientes medidas:

Parámetros biológicos:

- Análisis cuantitativo de poblaciones microbianas (metodología descrita en apartado 2.3).

2.7. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente mediante análisis multivariante y univariante combinado con el test de Tukey con un nivel de significación de 0,05. Se utilizó el programa IBM SPSS Statictics Versión 22.0.0.0.

3. Resultados y discusión

En este apartado se han sintetizado los principales resultados obtenidos de las medidas realizadas tras completar el segundo ciclo productivo del cultivo. Después de completar el primer ciclo (D_{210}), no se observaron diferencias significativas en los parámetros morfológicos y productivos analizados según el tratamiento (dosis y tipo de biochar) aplicado.

En este sentido, cabe destacar que en la mayoría de la bibliografía consultada (se citan sólo algunos ejemplos en este texto) [20,21,22] los efectos del biochar sobre el desarrollo del cultivo de sorgo o especies de crecimiento similar como el maíz, y sobre las propiedades del suelo se han visto reflejados en ensayos de mucha menor duración. Además, en el caso concreto de este estudio, por tratarse de un cultivo con capacidad de rebrote, las raíces del mismo han estado un tiempo más largo en contacto con la enmienda en el suelo, lo que resalta la necesidad de profundizar en las diferencias que pueden existir entre los espacios de tiempo a los que se somete a contacto con el biochar a determinados cultivos.

3.1. Parametros productivos

Los valores medios y el intervalo de confianza de los datos relativos a peso seco de la biomasa total producida (P_T), peso seco de la biomasa de la parte aérea (P_A), peso seco de grano (P_G) y peso seco de raíz (P_R) se muestran en la Figura 1 (a, b, c y d respectivamente). En las gráficas se observa la influencia del biochar y la dosis de aplicación combinando los efectos de ambas texturas de sustrato. Estos valores se han considerado interesantes entre las medidas realizadas al finalizar el ciclo del cultivo (D_{390}) ya que están relacionados directamente con el interés agronómico del cultivo, tanto desde el punto de vista de la producción de grano como de forraje o en el caso de la raíz, planteando el objetivo de producir una mayor cantidad de biomasa subterránea capaz de explorar un mayor volumen de suelo e incluso actuar en situaciones de sequía o compactación.

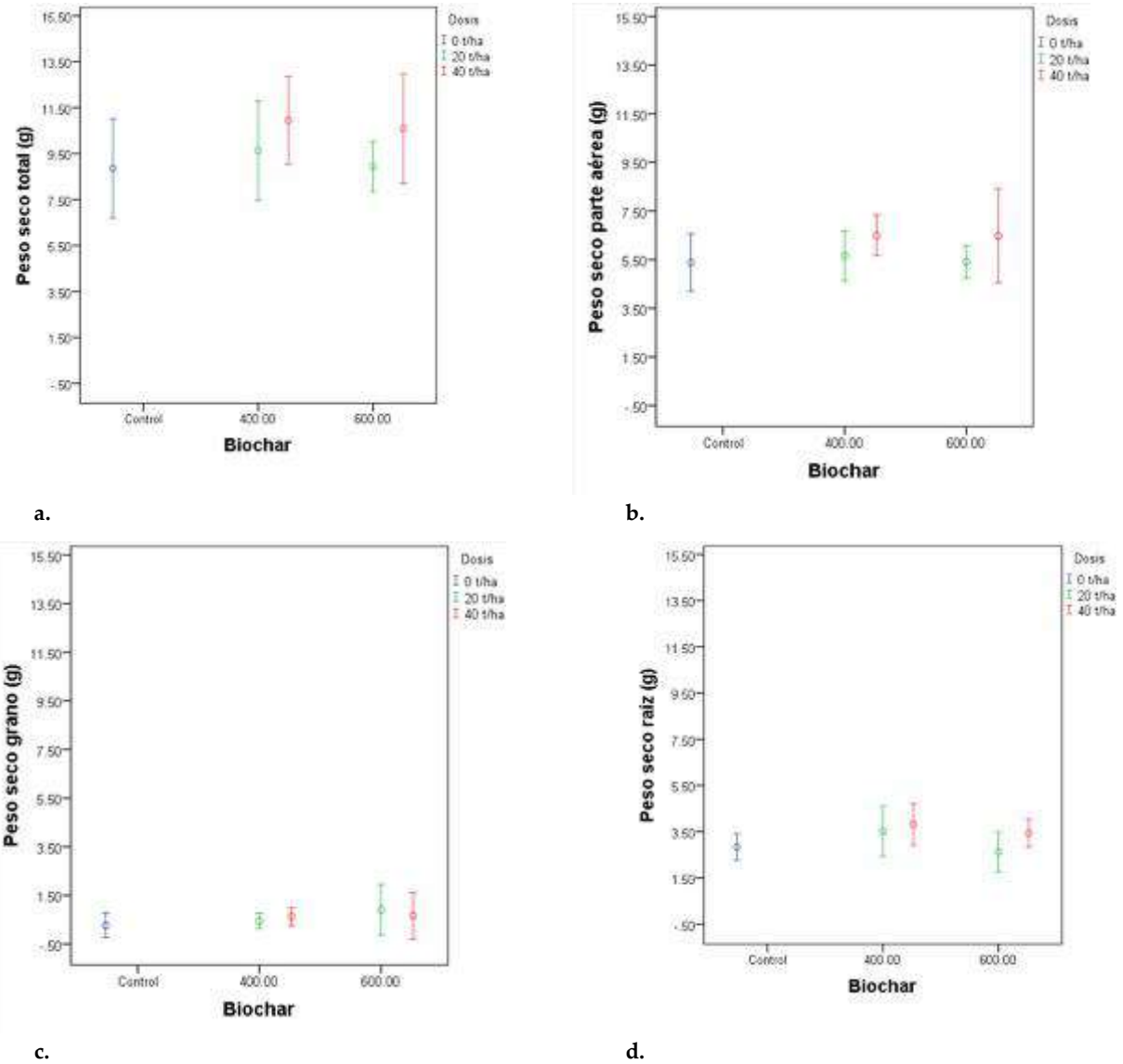


Figura 1. Valores medios e intervalo de confianza al 95% de los pesos secos generados por el cultivo bajo diferentes dosis de biochar a 400 °C y a 600 °C (**a:** peso seco total de la biomasa, **b:** peso seco total de la parte aérea, **c:** peso seco total de grano, **d:** peso seco total de la raíz)

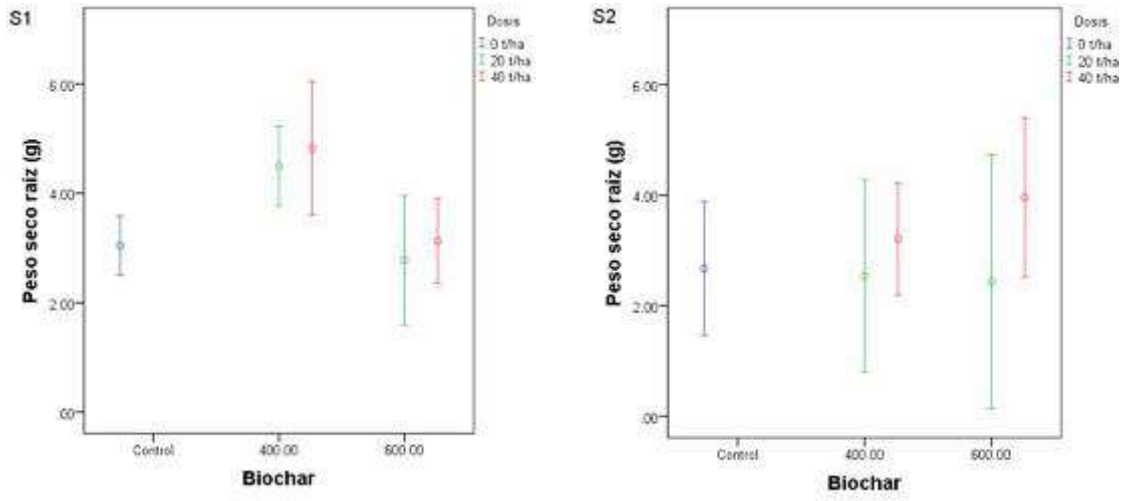
Los resultados del análisis multivariante de los datos anteriores se muestras en la Tabla 8. Se observa que el tipo de suelo es el factor fundamental que afecta significativamente a los valores obtenidos en peso seco total de las plantas, peso seco de la parte aérea y peso seco de la raíz.

Tabla 8. Resultados del análisis multivariante del efecto del tipo de suelo, tipo de biochar y dosis de aplicación sobre algunos parámetros productivos en un cultivo de sorgo bajo condiciones controladas. Nivel de significación $p \leq 0,05$

(**PT**: peso seco total; **PA**: peso seco parte aérea; **PG**: peso seco grano; **PR**: peso seco raíz)

Factor	Variable dependiente	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Biochar	PT	7,220	1	7,220	2,095	0,158
	PA	1,233	1	1,233	0,815	0,373
	PG	0,140	1	0,140	0,179	0,675
	PR	3,806	1	3,806	5,156	0,030
Sustrato	PT	97,984	1	97,984	28,430	0,000
	PA	27,973	1	27,973	18,499	0,000
	PG	3,227	1	3,227	4,125	0,051
	PR	4,194	1	4,194	5,682	0,023
Dosis	PT	19,520	1	19,520	5,664	0,023
	PA	6,471	1	6,471	4,279	0,047
	PG	0,023	1	0,023	0,029	0,865
	PR	4,104	1	4,104	5,561	0,025
Biochar*Sustrato	PT	8,953	1	8,953	2,598	0,117
	PA	0,063	1	0,063	0,042	0,839
	PG	0,142	1	0,142	0,182	0,673
	PR	8,218	1	8,218	11,134	0,002
Biochar*Dosis	PT	0,411	1	0,411	0,119	0,732
	PA	0,100	1	0,100	0,066	0,799
	PG	0,903	1	0,903	1,155	0,291
	PR	0,391	1	0,391	0,529	0,472
Sustrato*Dosis	PT	1,573	1	1,573	0,456	0,504
	PA	1,579	1	1,579	1,044	0,314
	PG	1,133	1	1,133	1,449	0,238
	PR	1,139	1	1,139	1,543	0,223
Biochar*Sustrato*Dosis	PT	2,523	1	2,523	0,732	0,399
	PA	2,136	1	2,136	1,413	0,243
	PG	0,509	1	0,509	0,651	0,426
	PR	0,344	1	0,344	0,466	0,500

A su vez se observan diferencias significativas derivadas del efecto de la aplicación de biochar sobre el peso de la raíz y de la dosis sobre el peso total de las plantas, el peso de la parte aérea y el peso de la raíz. En la Figura 2 (a y b) se observa el distinto comportamiento del desarrollo de la raíz en función del tipo de suelo, biochar y dosis siendo mucho más acusadas las diferencias en el sustrato franco-arenoso que en el franco-arcilloso.



a. **b.**

Figura 2. Valores medios e intervalo de confianza al 95% del peso seco total de la raíz generada por el cultivo diferentes dosis de biochar a 400 °C y a 600 °C (**a:** peso seco total de la raíz en el sustrato 1 (S1) de origen franco-arenoso, **b:** peso seco total de la raíz en el sustrato 2 (S2) de origen franco-arcilloso)

El análisis de datos univariante para cada tipo de suelo muestra diferencias significativas en el peso seco de la raíz para el caso del sustrato 1 de origen franco-arenoso con adición de biochar producido a 400°C, el peso seco de las raíces en este tratamiento se incrementó en un 47,5% respecto al tratamiento control. El análisis no muestra diferencias significativas (p = 0,817) en el caso del sustrato 2 de origen franco-arcilloso. Los resultados del análisis combinado con el test de Tukey para un nivel de significación p ≤ 0,05 se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados del análisis univariante del efecto del tipo de biochar sobre el peso seco de la raíz en un cultivo de sorgo bajo condiciones controladas bajo dos sustratos de cultivo diferentes. Nivel de significación p ≤ 0,05.

(**S1**: suelo franco-arenoso + gravilla; **S2**: suelo franco-arcilloso + gravilla; **B400**: biochar 400 °C; **B600**: biochar 600°C)

HSD Tukey	Biochar	Biochar	Diferencia de medias	Error estándar	Sig.	I.C. 95%	
						L.I	L.S
S1	Control	B400	-1,595	0,39492	0,002	-2,6029	-0,5871
		B600	0,0920	0,37275	0,967	-0,8593	1,0433
	B400	Control	1,5950	0,39492	0,002	0,5871	2,6029
		B600	1,6870	0,31050	0,000	0,8946	2,4794
	B600	Control	-0,0920	0,37275	0,967	-1,0433	0,8593
		B400	-1,6870	0,31050	0,000	-2,4794	-0,8946
S2	Control	B400	-0,2351	0,61616	0,923	-1,8077	1,3374
		B600	-0,4140	0,64684	0,800	-2,0648	1,2368
	B400	Control	0,2351	0,61616	0,923	-1,3374	1,8077
		B600	-0,1789	0,55671	0,945	-1,5997	1,2419
	B600	Control	0,4140	0,64684	0,800	-1,2368	2,0648
		B400	0,1789	0,55671	0,945	-1,2419	1,5997

La proliferación del volumen radicular observada en el sustrato franco-arenoso con la adición de biochar producido a 400°C coincide con los resultados observados en otros estudios [23,24] con biochar de distintos orígenes. Además, la tendencia creciente en el resto de parámetros productivos con la adición en dosis crecientes de biochar sugiere que el biochar producido a 400 °C podría tener efectos positivos mayores que el biochar producido a 600 °C en el desarrollo de las plantas en suelos franco-arenosos. Sin embargo, la ausencia de diferencias significativas para los parámetros estudiados en ambos tipos de sustrato (relacionadas con el vigor y la producción de biomasa total de las plantas) plantea la necesidad de estudiar en mayor profundidad las dosis de este tipo de biochar aplicadas al suelo, así como la necesidad de analizar a nivel práctico la dificultad de aplicar en un suelo dosis mayores a las planteadas (20 — 40 t/ha), ya que debido a la baja densidad aparente del producto podrían resultar poco razonables. Otro componente a tener en cuenta es la granulometría del biochar, ya que en este estudio se ha optado por una distribución de tamaños derivada de la aproximación a un proceso de aplicación real en parcela; con una distribución diferente de tamaños los resultados podrían variar y en ese sentido habría que profundizar en mayor medida en el efecto del procesado del biochar previo a su aplicación al suelo.

3.2. Poblaciones microbianas

Respecto al análisis cuantitativo de poblaciones microbianas, la Figura 3 muestra los valores medios de unidades formadoras de colonias y la desviación estándar de los grupos microbianos analizados para cada uno de los tratamientos.

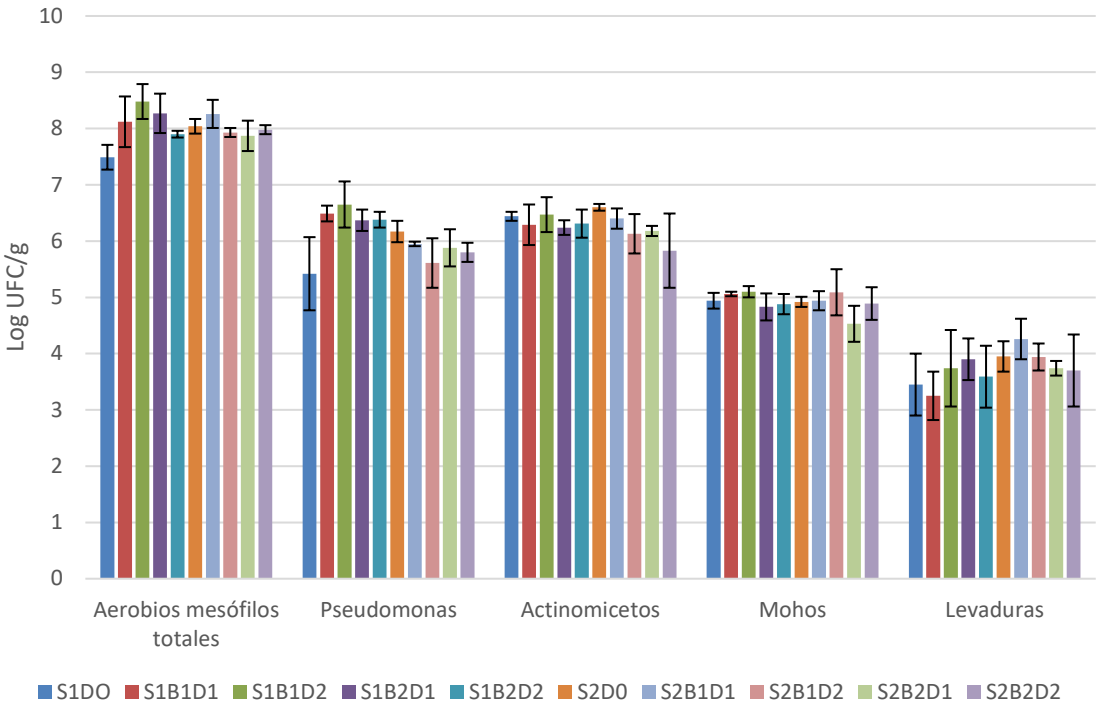


Figura 3. Valores medios de log. UFC y desviación estándar de diferentes grupos microbianos para cultivo de sorgo bajo diferentes dosis de biochar producido a dos temperaturas y dos tipos de sustrato (**S1**: sustrato 1 franco-arenoso; **S2**: sustrato 2 franco-arcilloso; **B1**: biochar 400 °C; **B2**: biochar 600°C; **D1**: dosis 10 t/ha; **D2**: dosis 40 t/ha)

Los recuentos telúricos de todos los grupos microbianos se han mantenido estables a lo largo del periodo de ensayo. Aunque la tendencia, ha sido a aumentar ligeramente, los recuentos obtenidos han sido inferiores a 1 u.log respecto al estado inicial. Si que es cierto, que especies microbianas específicas si que podrían ser mayoritarias debido a una mejor adaptación a las condiciones, suelo y sistema radicular, hecho que no se ha comprobado en este trabajo.

Los resultados obtenidos en los recuentos de estos 2 sustratos han resultado similares a los de otros autores, en el caso de los microorganismos aerobios mesófilos totales, 7,6 u.log/g [25]; y para la micobiota, 4,6 u.log/g [25] y 3,9 u.log/g [26].

Respecto a las diferencias entre tratamientos, la Tabla 10 muestra los resultados del análisis multivariante del efecto del tipo de sustrato, tipo de biochar y dosis de aplicación sobre el tamaño de algunas poblaciones microbianas.

Tabla 10. Resultados del análisis multivariante del efecto del tipo de suelo, tipo de biochar y dosis de aplicación sobre el tamaño de algunas poblaciones microbianas. Se muestran los factores en los que se observaron diferencias significativas. Nivel de significación $p \leq 0,05$

(**AMT**: aerobios mesófilos totales; **PS**: *Pseudomonas* sp.; **ACT**: actinomicetos; **M**: mohos; **L**: levaduras)

Factor	Variable dependiente	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Biochar	AMT	0,220	1	0,220	3,460	0,078
	PS	0,027	1	0,027	0,264	0,613
	ACT	0,204	1	0,204	2,211	0,153
	M	0,419	1	0,419	8,054	0,010
	L	0,023	1	0,023	0,113	0,740
Biochar*Sustrato*Dosis	AMT	0,505	1	0,505	7,922	0,011
	PS	0,063	1	0,063	0,608	0,445
	ACT	0,001	1	0,001	0,005	0,942
	M	0,016	1	0,016	0,298	0,591
	L	0,429	1	0,429	2,078	0,165

Se observan diferencias en el grupo de aeróbios mesófilos totales afectados significativamente ($p = 0,011$) por la combinación de los tres factores independientes, además el test de Tukey para este grupo detectó un incremento significativo ($p = 0,007$) por la adición de biochar, independientemente de la temperatura de producción y de la dosis de aplicación. El análisis univariante diferenciando ambos tipos de suelo, combinado con el test de Tukey, mostró que estas diferencias fueron significativas en ambos tipos de suelo.

Los hongos filamentosos o mohos se observan afectados significativamente ($p = 0,010$) por el tipo de biochar. El test de Tukey reflejó únicamente un incremento significativo ($p = 0.026$) con el biochar producido a 600 °C, independientemente de la dosis. El análisis univariante diferenciando por tipo de suelo permitió establecer que estas diferencias sólo se produjeron de forma significativa ($p = 0,031$) en el suelo franco-arenoso.

En el resto de grupos microbianos no se han podido determinar estas diferencias. Un estudio a más largo plazo, o en cultivos plurianuales podría determinar mejor como es la evolución de los diferentes grupos microbianos con estas mismas condiciones.

Además de la cuantificación de microorganismos expuesta en este estudio como indicador biológico se han realizado medidas de otros indicadores biológicos que permitirán complementar estos datos.

4. Conclusiones

En base a todo lo expuesto en el presente trabajo se plantean las siguientes conclusiones:

El sarmiento de viña se plantea como un recurso de interés para la producción de biochar, por la facilidad de transporte y procesado, la aptitud de su estructura en relación al proceso de pirólisis así como por sus características finales.

Los efectos del biochar, para las condiciones del ensayo planteado, han sido muy diferentes en función del tipo de suelo analizado, habiéndose constatado un mayor efecto sobre el desarrollo radicular en el tipo de sustrato que tenía como componente un suelo franco-arenoso. El tipo de biochar y dosis que han tenido unos efectos mayores sobre el desarrollo del cultivo ha sido el biochar producido a 400 °C, independientemente de la dosis aplicada. En base a lo anterior, se hace necesario ajustar en mayor medida las dosis de aplicación del biochar y la granulometría del mismo en el momento de su aplicación al suelo, ya que se ha observado una tendencia al incremento del desarrollo del cultivo relacionada con el incremento de la dosis para ambos tipos de suelo.

El tamaño de las poblaciones microbianas de microorganismos mesófilos totales y hongos filamentosos se ha visto incrementado con la adición de biochar. Sin embargo, la elección del análisis cuantitativo de poblaciones microbianas como indicador biológico en este estudio debe ser complementada con un mayor número de indicadores biológicos que puedan resultar más sensibles a la adición de biochar.

Referencias

1. García, C.; Rosas, J.G.; Sánchez, M.E., Pascual, J.A., Hernández, M.T. Cap. 8: Enmiendas orgánicas y de nueva generación: biochar y otras biomoléculas. En *De residuo a recurso: el camino hacia la sostenibilidad*. III. Recursos orgánicos. Aspectos agronómicos y medioambientales. Red española de compostaje. 2014, 182 pp.
2. Whitman, T., Lehmann, J. Biochar-One way forward for soil carbon in offset mechanisms in Africa? Environ. Sci. Policy 2009, 12, 1024 – 1027.
3. Lehmann, J., Gaunt, J., Rondon, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: a review. Mit. Adapt. Strateg. Glob. Chang. 2006, 11: 403-427.
4. Fowles, M. 2007. Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy. Biomass Bioenergy 2007, 31 (6), 426 – 432.
5. Gaunt, J.L., Lehmann, J. Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production. Environ. Sci. Technol. 2008, 42 (11), 4152 – 4158.
6. Méndez, A., Terradillos, M., Gascó, G. Physicochemical and agronomic properties of biochar from sewage sludge pyrolysed at different temperatures. J. Anal. Appl. Pyrolysis 2013, 102, 124 – 130.
7. Enders, A., Hanley, K., Whitman, T. Joseph, S., Lehman, J. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. Bioresour. Technol. 2012, 114, 644 – 653.
8. Manyà, J.J., Ortigosa, M.A., Laguarta, S., Manso, J.A. Experimental study on the effect of pyrolysis pressure, peak temperature, and particle size on the potential stability of vine shoots-derived biochar. Fuel 2014, 133, 163 – 172.
9. Antal, M.J., Allen, S.G., Dai, X., Shimizu, B., Tam, M.S., Gronli, M. Attainment of the theoretical yield of carbon from biomass. Ind. Eng. Chem. Res. 2000, 39, 4024 – 4031.
10. Manyà, J.J., Azuara, M., Manso, J.A. Biochar production through slow pyrolysis of different biomass materials: Seeking the best operating conditions. Biomass bioenergy 2018, 117, 115 – 123.
11. Zhao, L., Cao, X., Masek, O. Zimmerman, A. Heterogeneity of biochar properties as a function of the feedstock sources and production temperatures. J. Hazard. Mater. 2013, 256 – 257: 1 – 9.
12. Peralbo-Molina, A. Luque de Castro, M.D. Potential of residues from the Mediterranean agriculture and agrifood industry. Trends Food Sci. Technol. 2013, 32, 16 – 24.
13. Duca, D., Toscano, G., Pizzi, A., Rossini, G., Fabrizi, S. Lucesoli, G., Servili, A., Mancini, V., Romanazzi, G., Mengarelli, C. Evaluation of the characteristics of vineyard pruning residues for

energy applications: effect of different copper-based treatments. J. Agric. Eng. 2016, XLVII, 497, 22 – 27.

14. Demirbas, A. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. J. Anal. Appl. Pyrol. 2014, 72, 243 – 248.
15. Shen, J. Wang, X., García-Pérez, M., Mourant, D., Rhodes, M.J., Li, C. Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass. Fuel 2009, 88, 1810 – 1817.
16. Greco, G., Videgain, M., Di Stasi, C., González, B., Manyà, J.J. Evolution of the mass-loss rate during atmospheric and pressurized slow pyrolysis of wheat straw in a bench-scale reactor. J. Anal. Appl. Pyrol. 2018. 136, 18-26.
17. Kuster, E., Williams, S.T. Selection of media for isolation of Streptomycetes. Nature 1964, 202, 928 – 929.
18. Askew, D.J., Laing, M.D. An adapted selective medium for the cuantitative isolation of Trichoderma species. J. Plant Pathol. 1993, 42, 686 – 690.
19. Hewitt, E.J. Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. Technical communication. Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal. 1969, 22 (2ª edición revisada), 547 pp.
20. Brennan, A., Moreno, E., Alburquerque, J.A., Knapp, C.W., Switzer, C. Effects of biochar and activated carbon amendment on maize growth and the uptake and measured availability of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and potentially toxic elements (PTEs). Environ. Pollut. 2014, 193, 79 – 87.
21. Hairani, A., Osaki, M., Watanabe, T. Effect of biochar application on mineral and microbial properties of soils growing different plant species. J. Soil Sci. Plant Nutr. 2016, 62, 519-525.
22. Rafique, M., Sultan, T., Ortas, I., Chaudhary, H.J. Enhancement of maize plant growth with inoculation of phospate_slubilizing bacteria and biochar amendment in soil. J. Soil Sci. Plant Nutr. 2017, 63, 460-469.
23. Olmo, M., Villar, R., Salazar, P., Alburquerque, J.A. Changes in soil nutrient availability explain biochar´s impact on wheat root development. Plant Soil 2016, 399, 333 – 343.
24. Zhang, Y., Chen, H., Ji, G., Zhang, Y., Xiang, J., Anwar, S., Zhu, D. Effect of rice-straw application on rice (Oryza sativa L.) root growth and nitrogen utilization in acidified paddy soil. Int. J. Agric. Biol. 2018, 20, 11, 2529 – 2536.
25. Arif, M.S., Riaz, M., Shahzad, S.M., Yasmeen, T., Ashraf, M., Siddique, M., Mubarik, M.S., Bragazza, L. & Buttler, A. Fresh and composted industrial sludge restore soil functions in surface soil of degraded agricultural land. Sci. Total Environ. 2018, 619-620, 517-527.
26. Saravanakumara, K., Kathiresana, K., MubarakAlib, D., Kayalvizhia, K., Rajendranc, N., Hemalathab, S. & Chend, J. Soil-microbial communities indexing from mangroves rhizosphere and barren sandy habitats. Physiol. Mol. Plant Pathol. 2018, 104, 58-68.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Evaluación de prototipos de jardines verticales confeccionados a partir de material reciclable

Aldaz Lusarreta, A. (P) [1], Campo Bescós, M.A.[2], Giménez Díaz, R.[2]

[1] Investigadora, Universidad Pública de Navarra, Departamento de Ingeniería; alaitz.aldaz@unavarra.es
[2] Profesor, Universidad Pública de Navarra, Departamento de Ingeniería; miguel.campo@unavarra.es, rafael.gimenez@unavarra.es

Resumen. El uso de materiales plásticos ha aumentado en la última década, y consecuentemente, el volumen de sus residuos, generando graves daños medioambientales. Una manera de paliar este problema sería prolongando la vida útil de estos materiales y por tanto, disminuyendo la generación de residuos. Se ha pensado que las moquetas feriales podrían reutilizarse, en riego localizado, a modo de mantas de exudación –y soporte de plantas– para la instalación de jardines verticales. El objetivo del presente trabajo es la construcción y la evaluación de prototipos de jardines verticales a partir de mantas de polipropileno recicladas de moquetas feriales. Se confeccionan tres prototipos de jardines verticales de 1 m². El primero está confeccionado con una manta de polipropileno, mientras que el segundo presenta una malla de polipropileno con desechos textiles. El tercer jardín está constituido por una manta de polipropileno con lana de roca. Se definen cinco tratamientos, empleando lechugas como material vegetal. Tres tratamientos corresponden a cada uno de los prototipos y llevan riego por goteo de 1 l/h. Los dos restantes tratamientos se emplean a modo de testigos. El grado de desarrollo de las plantas se estudia partir de imágenes multiespectrales de las cuales se obtiene el Índice NDVI.

Palabras clave. Riego localizado, Jardín vertical, NDVI.

1. Introducción

El uso de materiales plásticos está cada vez más extendido, sus aplicaciones y combinaciones con otros materiales y compuestos, han aumentado exponencialmente en la última década, lo que conlleva un incremento del volumen de residuos. Éstos se acumulan en grandes cantidades (se estima que un total de 80 millones de toneladas se encuentran flotando en los Océanos Atlántico y Pacífico) y permanecen en el medio ambiente durante varias generaciones. Es así que una mala gestión de dichos residuos puede generar graves daños medioambientales (FAO, 2011, Pérez, 2018).

La UE no contempla específicamente los residuos de plásticos, sino que se tratan como una parte de los flujos generales de residuos, sin que se valoren sus características particulares. Este tipo de residuos ya no debe entenderse como un mero desecho, sino como un recurso y pueden ofrecer soluciones en situaciones de escasez de materias primas (Europea, 2014).

Una manera de paliar, al menos en parte, este importante problema sería prolongando la vida útil de estos materiales -a través de su reutilización con diversos fines- y por tanto, disminuyendo la generación de residuos (Pérez, 2018).

En España se generan grandes cantidades de residuos procedentes de moquetas feriales una vez acabada su vida útil. Estos tejidos, sobre todo las moquetas feriales, se elaboran generalmente

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3407

a partir de polipropileno; polímero termoplástico, parcialmente cristalino, que se obtiene de la polimerización del propileno, un subproducto gaseoso de la refinación del petróleo (Petroquim, s.f.).

Se ha pensado que las moquetas feriales de descarte podrían reutilizarse, en riego localizado, a modo de mantas de exudación –y soporte de plantas– para la instalación de jardines verticales.

Fue a partir de finales de los años noventa cuándo empezaron a surgir en el mercado nuevas tecnologías de riego, en una búsqueda por mejorar la eficiencia, reduciendo los consumos y en pro de una búsqueda alternativa a los sistemas convencionales de riego por aspersión (Pérez, 2018).

El objetivo del presente trabajo es la construcción y la evaluación de prototipos de jardines verticales a partir de mantas de polipropileno recicladas de moquetas feriales.

2. Materiales y métodos

2.1. Jardines verticales. Elaboración y caracterización.

Se han confeccionado tres prototipos de jardines verticales de 1 m^2 cada uno (ver Figura 1). El primer jardín está constituido por una manta de polipropileno con lana de roca (ver Figura 2A), mientras que el segundo presenta una senda manta de polipropileno (ver Figura 2B). En cambio, el tercer jardín está confeccionado con una malla de polipropileno con desechos textiles (ver Figura 2C). En los tres jardines se empleó lana de roca como sustrato para las plantas.

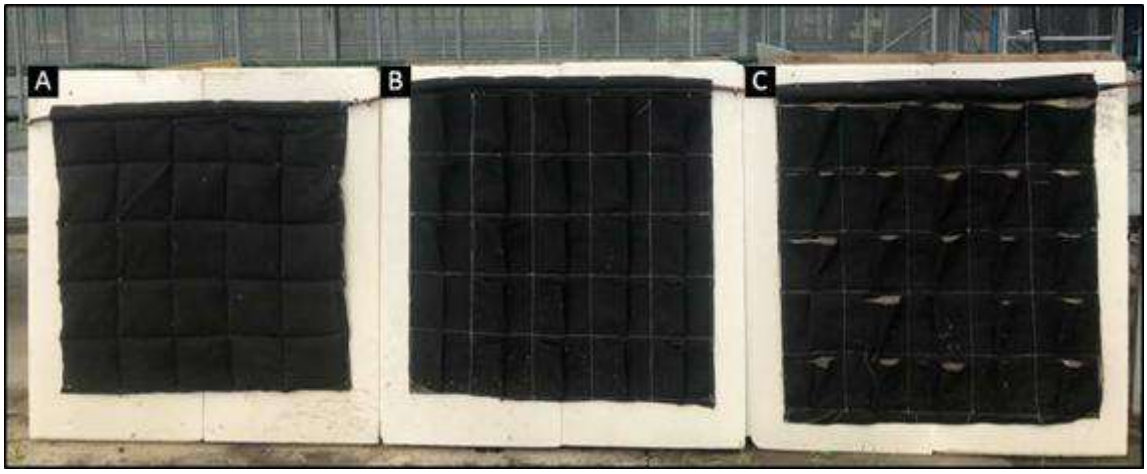


Figura 1. Experimentación con jardines verticales, A) malla de polipropileno con lana de roca, B) malla de polipropileno de y C) malla de polipropileno con desechos textiles.



Figura 2. Detalle del material en experimentación con jardines verticales, A) malla de polipropileno con lana de roca, B) malla de polipropileno y C) malla de polipropileno con desechos textiles.

Antes de comenzar con la experimentación en campo, para conocer la frecuencia y tiempo de riego en cada prototipo se han realizado sendas pruebas de absorción y movimiento de agua en laboratorio. Cabe destacar que, durante la realización de estas pruebas preliminares se observa que la distribución de agua en los jardines no es homogénea. Tanto es así que, se decide complementar las pruebas con la toma de medidas de humedad en cada uno de los bolsillos que conforman las mantas, mediante el empleo de sondas de humedad EC-5 (marca comercial Meter Group - Decagon Devices Inc.) (ver Figura 3).

La sonda EC-5 mide la humedad del suelo y tiene un volumen de medida de 0,3 l y está diseñada para todo tipo de aplicaciones en campo y laboratorio. Asimismo, se trata de un sensor capacitivo del tipo FDR (Frequency Domain Reflectrometry, Reflectometría en el dominio de la frecuencia) que miden la constante dieléctrica o permitividad del suelo para calcular su contenido de humedad. La fracción volumétrica del suelo ocupada por agua tiene una enorme influencia en la permitividad dieléctrica del suelo ya que su valor dieléctrico (80) es mucho mayor que el de los otros constituyentes del suelo (suelo mineral 4; materia orgánica, 4; aire,1). Por este motivo, cuando la cantidad de agua del suelo varia, la sonda EC-5 detecta y miden esta variación y la relacionan directamente con el cambio en el contenido de agua – VWC (Decagon Devices, Inc., 2016).



Figura 3. Sondas de humedad EC-5 (marca comercial Meter Group - Decagon Devices Inc).

Estas pruebas se realizaron tras la aplicación de un riego debido ser la condición más alta de humedad.

2.2. Sitio experimental y definición de tratamientos

El ensayo se lleva a cabo en la finca de prácticas de la Universidad Pública de Navarra (UPNA) bajo invernadero. Se han definido cinco tratamientos diferentes, empleándose en todos ellos lechugas como material vegetal. Tres tratamientos corresponden a cada uno de los prototipos. Estos tratamientos llevan riego por goteo suministrado mediante un tubo de exudación colocado en el borde superior de la estructura, que cuenta con un par de emisores de riego por goteo de 1 l/h (ver Figura 4). Los dos restantes tratamientos se emplean a modo de testigos. Ambos se evalúan en macetas, con tres repeticiones cada uno de ellos y bajo riego por aspersión. En el primero se ha utilizado como sustrato lana de roca; mientras que el segundo testigo se desarrolla en sustrato de turba negra (ver Figura 5).

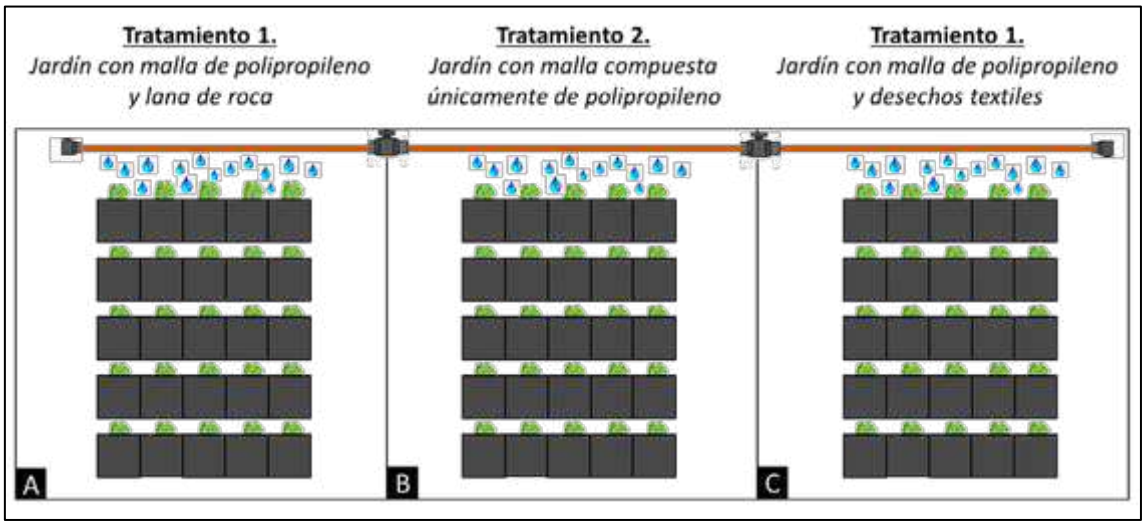


Figura 4. Esquema general de los 3 tratamientos correspondientes a cada tipo de jardín.

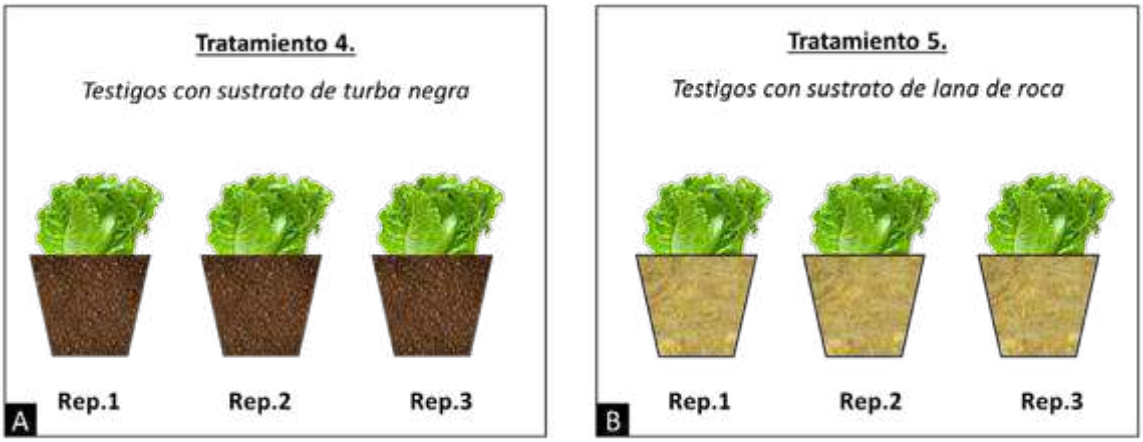


Figura 5. Esquema general de los tratamientos testigo; A) Sustrato turba negra y B) Sustrato lana de roca.

Cabe destacar que los tubos exudantes que se han empleado en la presente investigación se han confeccionado de manera manual. Así pues, para la fabricación de estos tubos se utiliza como base un tubo de riego convencional de goteo, el cual es cubierto por una camisa compuesta por las siguientes capas:

- En primer lugar, una capa de difusión del agua expulsada por el gotero (porción de plástico micro-perforado que envuelve el gotero).
- A continuación, una capa de tejido de polipropileno que distribuye el agua a lo largo de toda la tubería.
- Finalmente, se procede al recubrimiento exterior con film plástico retráctil micro-perforado.

El grado de desarrollo de las plantas en los diferentes tratamientos se determina a partir de imágenes multiespectrales (sensor Sequoia) de las cuales se obtiene el Índice de vegetación NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), indicador de la actividad fotosintética de las mismas (ver *Ecuación 1*).

Los índices de vegetación son parámetros calculados a partir de los valores de reflectividad de un píxel a distintas longitudes de onda, que pretenden extraer de éstos la información relacionada

con la vegetación, minimizando la influencia de la cubierta del suelo y de las condiciones atmosféricas (Rouse *et al.*, 1974).

El fundamento de los índices de vegetación se basa en la relación que hay entre la reflectividad del infra rojo cercano (IRC) y el rojo (R). Si hay un fuerte contraste entre la banda roja y la del IRC, la vegetación es sana, mientras que, si el contraste es menor, la vegetación está sometida a estrés. El objetivo de los NDIV es obtener en una única imagen, valores altamente correlacionados con parámetros agronómicos como el Kc, siendo (Rouse *et al.*, 1974):

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Asimismo, también se ha realizado el pesaje de cada plántula una vez finalizado el ensayo.

3. Resultados y discusión

Los datos de humedad obtenidos en cada uno de los bolsillos que conforman el jardín durante la caracterización de los mismos, aparecen representados en la Figura 6. Estos datos se han categorizado en una gama de tonalidades azules, en la que a mayor intensidad de azul mayor contenido de humedad.

En las Figuras 7 y 8, se recogen los resultados correspondientes al NDVI en cada bolsillo. En este caso, se ha empleado una gama de colores que va desde rojo hasta verde, siendo el color rojo el valor 0 y el verde el valor 1 de NDVI.

Asimismo, los pesajes obtenidos en las plantas de lechuga en cada uno de los jardines se muestran en la Figura 9. Una vez más, se ha utilizado una gama de tonalidades, esta vez morados, para presentar los resultados, indicando también el gramaje de cada planta. Cuanto mayor es la intensidad de morado, mayor gramaje.

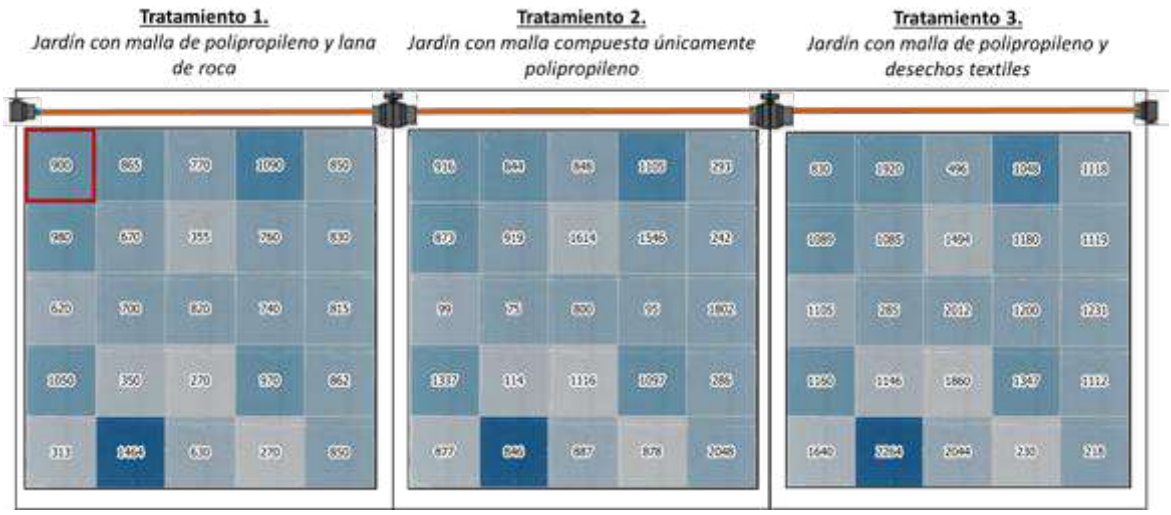


Figura 6. Valores crudos de humedad en mV recogidos por las sondas durante la caracterización de los jardines verticales.

Cada cuadrícula corresponde a un bolsillo. Por ejemplo, la cuadricula destacada, corresponde a la destacada en la *Figura 6*, *7* y 8.

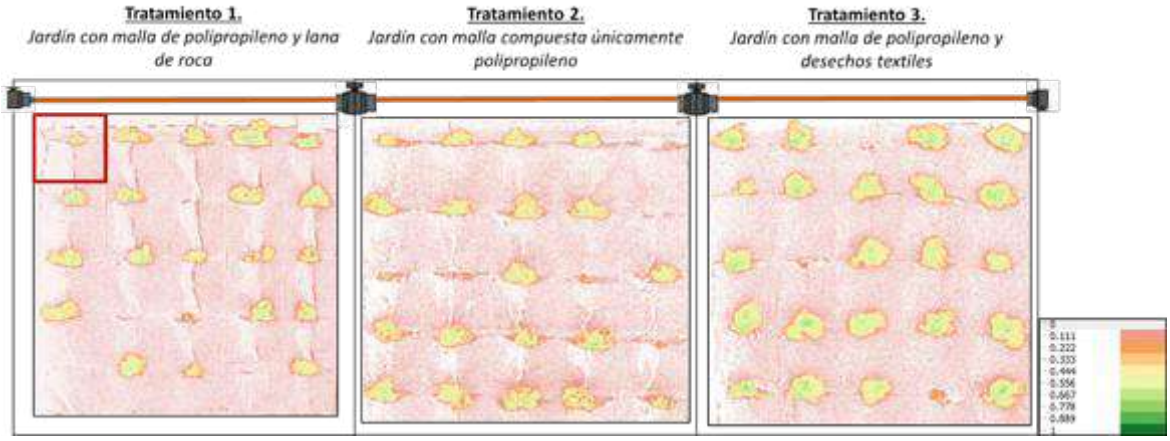


Figura 7. Valores de NDVI al inicio de la experimentación.

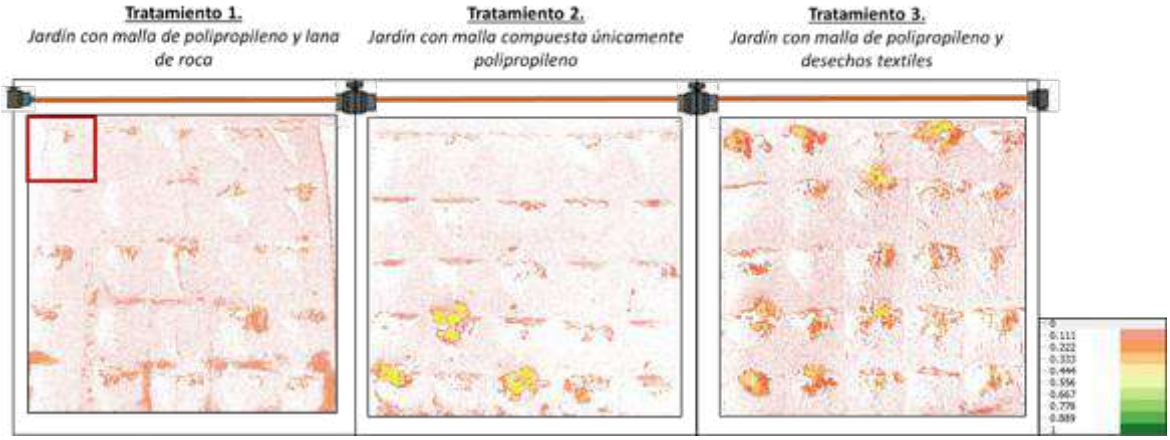


Figura 8. Valores de NDVI al final de la experimentación.



Figura 9. Valores de los pesos, en gramos, obtenidos tras la experimentación de los jardines vertical

Una vez analizados todos los resultados, se ha visto que los tres jardines presentan una gran heterogeneidad en la distribución de humedad de los mismos, lo cual ha condicionado el desarrollo de las plantas de lechuga a lo largo de la experimentación.

Con todo esto, pese a que ninguno de los tres jardines ha mostrado un comportamiento homogéneo en la distribución de humedad y por tanto en el crecimiento de las plantas, teniendo en cuenta los datos de humedad, valor de NDVI y gramaje, se han clasificado de la siguiente manera los tres jardines de mejor a peor comportamiento (ver Figura 10):

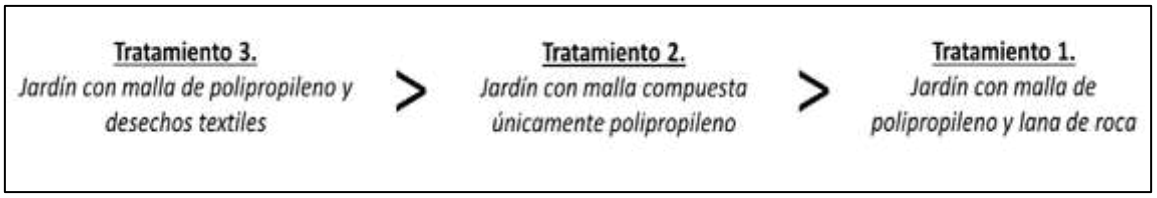


Figura 10. Orden decreciente de los jardines según contenido de humedad, valor del NDVI y gramaje.

4. Conclusiones

Ante los primeros resultados obtenidos y con la configuración analizada, los jardines no han tenido un comportamiento óptimo para el desarrollo de las plantas, debido a la falta de homogeneidad en la distribución de agua de riego a lo largo de toda la superficie.

Referencias

1. Europea, D. o. (2014). Residuos plásticos en el medio ambiente. Resolución del Pralamento Europeo de 14 de enero de 2014, sobre estrategia europea frente a los residuos plásticos en el medio ambiente (2013/2113(INI),2016/C-482/09.
2. Disponible en: https://eurlex.europa.eu/legalcontent/ES/TXT/?uri=CELEX%3A52014IP0016
3. Decagon Devices, Inc. (2016). EC-5 Soil Moisture Sensor. Operator's Manual. 2325 NE Hopkins Court Pullman WA 99163. Disponible en. https://drive.google.com/drive/folders/0B4_J8C5LNE-CbmNqNGNRLU1DQ3M
4. FAO. (2011). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. Obtenido de http://www.fao.org/3/b-i1688s.pdf
5. Pérez, B. (2018). Evaluación de mantas de riego subsuperficial realizadas con material reciclado para su aplicación en cubiertas vegetales. Pamplona: Universidad Pública de Navarra.
6. Petroquim. (s.f.). PETROQUIM Tecnología y servicio en polipropileno. (POLIPROPILENO, Productor) Recuperado el Julio de 2018, de http://www.petroquim.cl/que-es-el-polipropileno/
7. Rouse Jr, J., Haas, R., Schell, J., y Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. NASA Special Publication.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Evaluación de sondas capacitivas comerciales y bajo coste para estimar la humedad

Iban Iturria[1], Maider López[1], Unai Gómez[1], Miguel A. Campo-Bescós[2], Rafael Giménez[2], Jesús Alvarez-Mozos[2], Camilo Robles[2]

[1] Investigador, Universidad Pública de Navarra, Departamento de Ingeniería; iban.iturria@unavarra.es
[2] Profesor, Universidad Pública de Navarra, Departamento de Ingeniería; miguel.campo@unavarra.es

Resumen: La agricultura de regadío es una de las actividades que más agua utiliza, de hecho, según indica la ONU, el 70% del agua dulce disponible es utilizada por este sector. Esto convierte al regadío en uno de los ámbitos donde mayor esfuerzo se debe de realizar para optimizar el uso de los recursos hídricos. Uno de los elementos que proporciona información valiosa para ayudar a ajustar la dosis y frecuencia de riego son los sensores para medir el contenido de agua en el suelo. Si bien existe una amplia variedad de productos/dispositivos en el mercado dedicados a esta labor, su coste supone una limitación para su uso extensivo. Por el contrario, debido a su sencillo funcionamiento y facilidad de implementación las sondas capacitivas se presentan como una adecuada alternativa. A días de hoy, existen sondas de bajo coste procedentes del mundo aficionado (maker), sin embargo, todavía no se dispone de una adecuada evaluación.En este trabajo se ha llevado a cabo una evaluación de 24 sondas de humedad de suelo de reconocidas casas comerciales y prototipos de sondas de bajo coste, con un doble objetivo: por un lado, evaluar la calibración de cada una de las sondas en suelos de textura contrastante, y por otro lado determinar el volumen explorado por cada una de ellas. La calibración de cada sonda, se han realizado en tres suelos de clases texturales contrastantes y en un amplio rango de humedad. Mediciones directas de la humedad del suelo fueron tomadas como valores de referencia. Se ha evaluado asimismo el volumen efectivo de medición de cada sonda. Los primeros resultados indican, que existen diferencias significativas en el comportamiento de las sondas dependiendo de los tipos de suelo analizados, así como en el volumen de suelo explorado por cada una de ellas.

Palabras clave: Sensores, sondas de humedad, volumen explorado, riego.

1. Introducción

La agricultura de regadío es una de las actividades que más agua dulce utiliza 70% según la ONU [1]. Esto la convierte en la actividad principal en la que se pueden tomar medidas para minimizar el desperdicio de este recurso. Además, la creciente presión de los mercados ha hecho que la agricultura tenga que maximizar el rendimiento que se obtiene de cada cultivo, por lo que este ahorro de agua no es un tema exclusivamente medioambiental, sino que se está convirtiendo en una necesidad para la sostenibilidad económica de algunos regadíos. Por ello además de utilizar sistemas de riego más eficientes (como puede ser el goteo), se utilizan métodos de estimación de necesidades de riego de tal forma que se minimiza la utilización del agua al optimo requerido por los cultivos.

El consumo o necesidades de agua que demanda un cultivo, se conocen por el concepto de evapotranspiración. Éste hace referencia al agua que utiliza un cultivo como suma de la

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3443

transpiración de la planta en su actividad y de la evaporación del propio suelo. Dado que ambos fenómenos ocurren simultáneamente es muy difícil determinarlos por separado y se aúnan en uno solo. La evapotranspiración está fuertemente ligada a fenómenos meteorológicos y es por eso que existen numerosas técnicas para su determinación, uno de los modelos más utilizados es el de Penman-Monteith [2]. Estos métodos permiten determinar las necesidades puntuales de agua respecto a una fecha, estimar la cantidad de agua teórica que se ha perdido en un periodo de tiempo (diario o semanal) y finalmente aportar esa cantidad de agua a posteriori.

La medición continua de la humedad del suelo es una variable importante debido a que permite conocer la disponibilidad del agua por cultivos [3] y permite realizar una gestión integral del riego [4], siendo una variable hidrológica y climática fundamental [5]. Hay multitud de productos/dispositivos que pueden ser utilizados con esta función. Se pueden clasificar por las diferentes tecnologías que utilizan. Así nos encontramos los métodos más tradicionales como el de tacto [6] o el método gravimétrico/volumétrico, hasta la aparición de sondas de neutrones [7], sondas que miden la constante dieléctrica del suelo como las Time Domain Reflectometry (TDR) [8], [9], sondas capacitivas/FDR [10],[11] o las que estiman la resistencia del medio al paso eléctrico como las sondas resistivas [12]. La tecnología ha ido evolucionando con la aparición de otras tecnologías como Dual-Probe Heat-Pulse (DPHP)[13], Time Domain Transmission (TDT) [14] o Coaxial Impedance Dielectric Reflectometry. Además, los métodos pueden ser destructivos (e.g. el método gravimétrico) o no destructivos (e.g. el TDR).

De los métodos anteriormente citados, los más utilizados en la actualidad son los que utilizan dispositivos electrónicos para estimar la humedad del suelo, especialmente sondas TDR y sondas FDR. Esto es debido a que estas tecnologías permiten conocer en tiempo real el estado hídrico del suelo y actuar en consecuencia más rápidamente.

Existe una amplia gama de sondas en el mercado, pero su coste supone una limitación para su uso extensivo. Por este motivo, debido a su sencillo funcionamiento y facilidad de implementación las sondas capacitivas se presentan como una alternativa cada vez más común y asequible, muchas de ellas procedentes del mundo aficionado (maker). Pero estas últimas todavía no han recibido la adecuada evaluación, lo que genera incertidumbre en la calidad de los datos recogidos.

En este trabajo se ha llevado a cabo una evaluación de 24 sondas de humedad de suelo de reconocidas casas comerciales y prototipos de sondas de bajo coste. El objetivo del mismo es, por un lado, evaluar la calibración de cada una de las sondas en suelos de textura contrastante, y por otro lado determinar el volumen explorado por cada una de ellas.

2. Materiales y métodos

2.1. Suelos

Los suelos utilizados para realizar el ensayo han sido 3. Las clases texturales son: Franco Arcillosa, Franca y Arenosa Tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje de arena, limo y arcilla para cada suelo utilizado.

	Suelo 1	**Suelo 2**	**Suelo 3**
Arena Gruesa (USDA)	7,5	80,9	27,4
Arena Fina (USDA)	14,6	12,8	20,1
Limos Gruesos (USDA)	18,1	2,3	12,7
Limos Finos (USDA)	29,2	1,0	19,4
Arena	22,1	93,7	47,5
Limo	47,3	3,3	32,1
Arcillas	30,6	3,0	20,4
Clasificación textural	Franco Arcillosa	Arenosa	Franca

2.2. Sondas de humedad

En el estudio se han utilizado 24 sondas de humedad (Tabla 2), tratando de recoger prácticamente la totalidad de las sondas disponibles a día de hoy. Dada la amplia variedad de sensores ha sido necesario emplear tres modelos de registradores (dataloggers) para recoger los datos.

Los registros de las sondas de humedad de bajo coste (I2C Capacitive Soil Moisture, Temperature and EC sensor (TINOVI), WaterScout (Spectrum), DF robot (DFrobot), SoilWatch 10 (Pinotech), Vegetronix VH400 y Chirp.) han sido realizados utilizando una placa Arduino UNO.

Las sondas de Decagon han sido utilizadas a través del datalogger em50 que permite obtener las lecturas tanto crudas como transformadas a contenido volumétrico de agua (VWC). En este caso se ha utilizado el software ECH2O Utility para programar el datalogger.

El resto de sondas han sido conectadas a un datalogger CR10X de CampbellScientific mediante el protocolo de comunicación SDI-12. Para programar el datalogger CR10X se han utilizado los programas PC200W y ShortCut.

Debido a que muchas de las sondas disponen de varios sensores de humedad, en este trabajo tan solo se ha evaluado un sensor por sonda.

Tabla 2. Sondas de humedad evaluadas.

Nombre	Casa Comercial COMERCIAL	Datalogger	Tipo
Soil Watch 10	Pino-Tech	Arduino	Capacitiva
10HS	Decagon	Decagon	Capacitiva
5TE	Decagon	Decagon	Capacitiva
EC 5	Decagon	Decagon	Capacitiva
TEROS 12	Decagon	Decagon	Capacitiva
GS 1	Decagon	Decagon	Capacitiva
Vegetronix VH400	Vegetronix	Arduino	TDR
Chirp	Wemakethings	Arduino	Capacitiva
DF robot	DF robot	Arduino	Capacitiva
Hydra-Probe II	Stevens	CR10X	Coaxial Impedance Dielectric Reflectometry
Drill & Drop Probe, 60cm TriSCAN, SDI-12	Sentek	CR10X	FDR
Drill & Drop Probe, 60 cm Moisture, SDI-12	Sentek	CR10X	FDR
HydraSCOUT 700mm	HSTI	CR10X	FDR
Sub-Surface Probe	AQUACHECK	CR10X	FDR
Classic Probe	AQUACHECK	CR10X	FDR
I2C Capacitive Soil Moisture sensor	TINOVI	Arduino	Capacitiva
TEROS 10	Decagon	Decagon	Capacitiva
CS655	Campbell Scientific	CR10X	Capacitiva
HD3910.1	Delta ohm	CR10X	Capacitiva
HD3910.2	Delta ohm	CR10X	Capacitiva
GroPoint Profile	GroPoint	CR10X	TDT 5
GroPoint Lite	GroPoint	CR10X	TDT5
GroPoint Pro	GroPoint	CR10X	TDT5
WaterScout	Spectrum	Arduino	Capacitiva

2.3. Ecuaciones de calibración

La metodología empleada de referencia para evaluar los ensayos es el método gravimétrico, es decir, después de realizar la medición con una sonda de humedad, se extrae una muestra y se pesa antes y después de secarla en una estufa durante 24h a 105ºC. De esta forma se cuantifica el agua perdida durante el proceso de secado y se determina la cantidad de humedad de la muestra inicial. Así se obtiene el contenido volumétrico de agua real frente al estimado por las diferentes sondas. Se han realizado 6-5 (por disponibilidad) mediciones en suelo arenoso, 7 mediciones en suelo arcilloso y 5 mediciones en suelo franco con diferentes contenidos de humedad con todas las sondas. En todos los casos el rango de humedades fue entre 0 y 30%.

Dado que la cantidad de sondas a utilizar es considerablemente grande, se ha establecido un procedimiento a seguir para realizar los ensayos.

Para tener suelo suficiente como para obtener una muestra por sonda, se obtiene un volumen de 10 litros del suelo seco de interés y se almacena en un recipiente. Esta muestra se humecta con la cantidad de agua pertinente para cada ensayo. Posteriormente, se retiran 5L del recipiente inicial al recipiente de ensayos (recipiente graduado), se compacta la muestra a la densidad deseada con ayuda de una balanza y después se realiza la medición con la sonda. Posteriormente, se extrae una muestra para determinar su humedad por gravimetría y finalmente, se vierte el suelo nuevamente al recipiente de 10 litros y se mezcla para homogeneizarlo.

Este proceso se ha repetido para cada una de las sondas utilizadas y ha sido realizado para cada una de las humedades correspondientes en los 3 suelos estudiados.

Con los datos de humedad y las lecturas de las sondas se ha obtenido una ecuación de calibración para cada sonda. Debido a que la cantidad de mediciones/muestras obtenidas en cada tipo de suelo es reducida, como primer paso se ha procedido a realizar un ajuste lineal.

$$y = ax + b$$

Donde:

y = contenido volumétrico real
x = Lectura de la sonda
a = pendiente
b = punto de intercepción en la ordenada o intercepto

El objetivo de la calibración es obtener los valores de pendiente e intercepto de la ecuación de tal forma que se obtenga una recta capaz de relacionar los valores de las lecturas con la humedad del suelo determinada.

Para evaluar la precisión de cada sonda se ha obtenido el error cuadrático medio y el coeficiente de determinación de cada una de las ecuaciones de calibración.

2.4. Volumen explorado por cada sensor

El volumen explorado para cada sonda se ha caracterizado registrando lecturas mientras las sondas se aproximan de un medio con una constante dielectrica contrastante [15], en este caso aire y agua, realizando las medidas en las dos direcciones (agua-aire, aire-agua). Se han realizado medidas de forma continua para determinar el punto en el que cambia esta medida y se ha anotado la distancia desde un punto identificable en la propia sonda (este punto varía de una sonda a otra, por la diferente morfología que tienen). Este proceso se ha realizado en todas las posiciones posibles con cada sonda, de tal forma que al final del proceso es posible aproximar el volumen explorado por cada una de ellas.

Para poder realizar una medición precisa se ha utilizado una plataforma con un soporte vertical calibrado (con marcas métricas) y un mecanismo para controlar el desplazamiento de forma precisa de cada una de las sondas evaluadas. En la base de la plataforma se ha colocado

un cubo con agua, de tal forma que se ha tomado como punto de referencia la altura determinada por la lámina de agua.

Algunas de las sondas de bajo coste, no contaban con el aislamiento necesario para ser sumergidas en agua, es por ello que ha sido necesario proporcionarles un aislamiento de forma manual. Para ello se ha utilizado silicona en cinta, cinta aislante y finalmente se ha recubierto de plástico termo retráctil. El correcto funcionamiento de las sondas ha sido verificado después de realizar el proceso de aislamiento, comparando las mediciones de antes y después de ser sumergidas en agua.

A la hora de realizar el cálculo de volumen explorado, se ha tenido en cuenta que la superficie generada por los ejes perpendiculares a la sonda forma una elipse (Figura 1), pudiendo estar desplazado el centro del eje central de la sonda. Obteniendo el producto de dicha superficie y la distancia vertical explorada por las sondas se ha obtenido el volumen explorado.

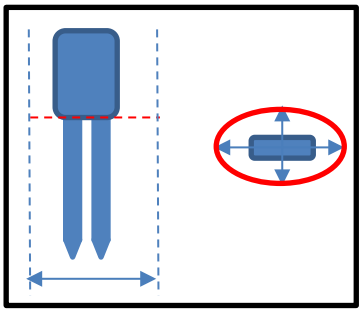


Figura 1. Esquema del cálculo del volumen explorado por las sondas.

3. Resultados y discusión

3.1. Ecuaciones de calibración

En la Figura 2 se presenta para cada sonda de humedad el RMSE de la ecuación de calibración por separado para cada tipo de suelo y de forma agrupada para todos los dados disponibles (general).

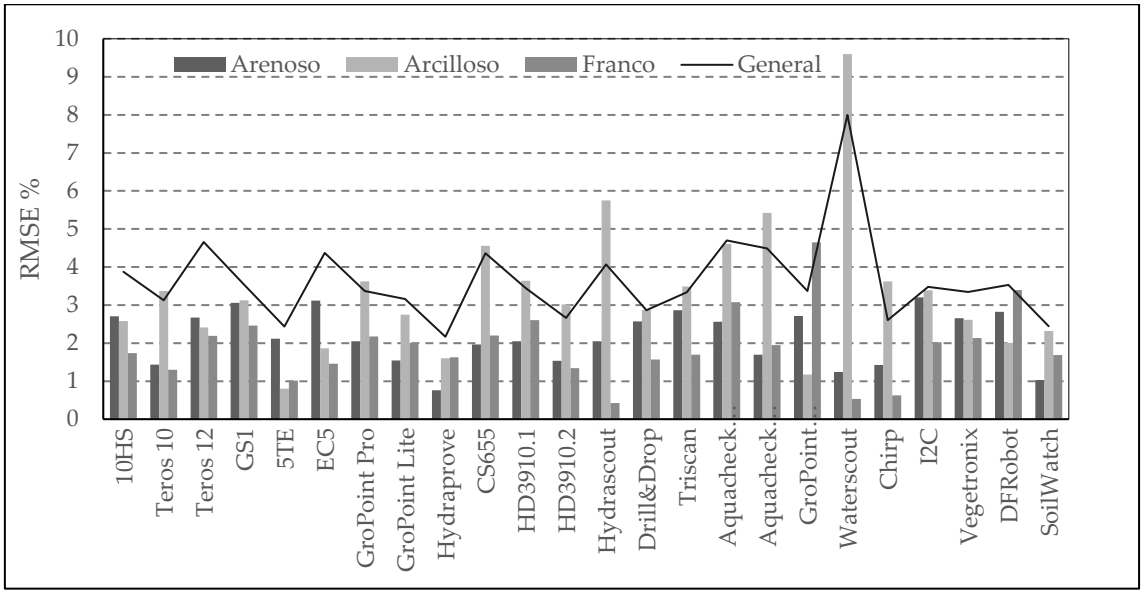


Figura 2. Comparación de errores para la calibración de cada suelo y sonda.

Como se puede apreciar en la Figura 2, en la columna correspondiente al suelo arenoso, la sonda cuya calibración obtiene mejores resultados es la Hydraprobe II con un RMSE inferior a 0,6% siendo seguido por las sondas SoilWatch y Waterscout con un error cuadrático medio entre 1-1.5%. Se puede apreciar que las calibraciones realizadas para las sondas low-cost tienen buena precisión en suelos arenosos exceptuando la sonda I2C.

En el suelo de textura arcillosa la precisión general de las calibraciones baja, siendo la 5TE la que mejores resultados obtiene, seguido de la GroPoint Profile. Además, se muestra gran variabilidad entre los errores cometidos por unas sondas y otras. Ocurre algo similar en el ensayo realizado por [16] apreciando un menor ajuste en suelos con mayor contenido en arcilla frente a suelos de otras clases texturales.

El ajuste de las sondas ha sido superior en el suelo de clase textural franca, se percibe que la precisión general de las calibraciones mejora, exceptuando GroPoint y DFRobot, el RMSE es inferior del 3%. Destacan principalmente la Hydrascout (0.43%) y la Chrip (0.69%).

En la calibración general de las sondas se puede observar que en general la ecuación que mejor se ajusta a cualquier tipo de suelo es la Hydraprobe II de Stevens con un RMSE de 2,17%.

3.2. Volumen explorado por sonda

En la Figura 3 se muestra el volumen explorado por cada uno de los sensores de las sondas evaluadas en el estudio. Los resultados muestran que hay diferencias superiores a 1000 cm3 de volumen explorado entre las sondas evaluadas. Según los ensayos realizados se puede apreciar que la sonda que más volumen explora es la Hydrascout (1309,65 cm3), seguido del resto de sondas de tipo cilíndrico que por su longitud permiten explorar un mayor volumen de suelo. Resulta interesante la observación de que las sondas de bajo coste tienden a explorar un menor volumen que las demás, siendo la Vegetronix la que menos volumen explora (0.09 cm3).

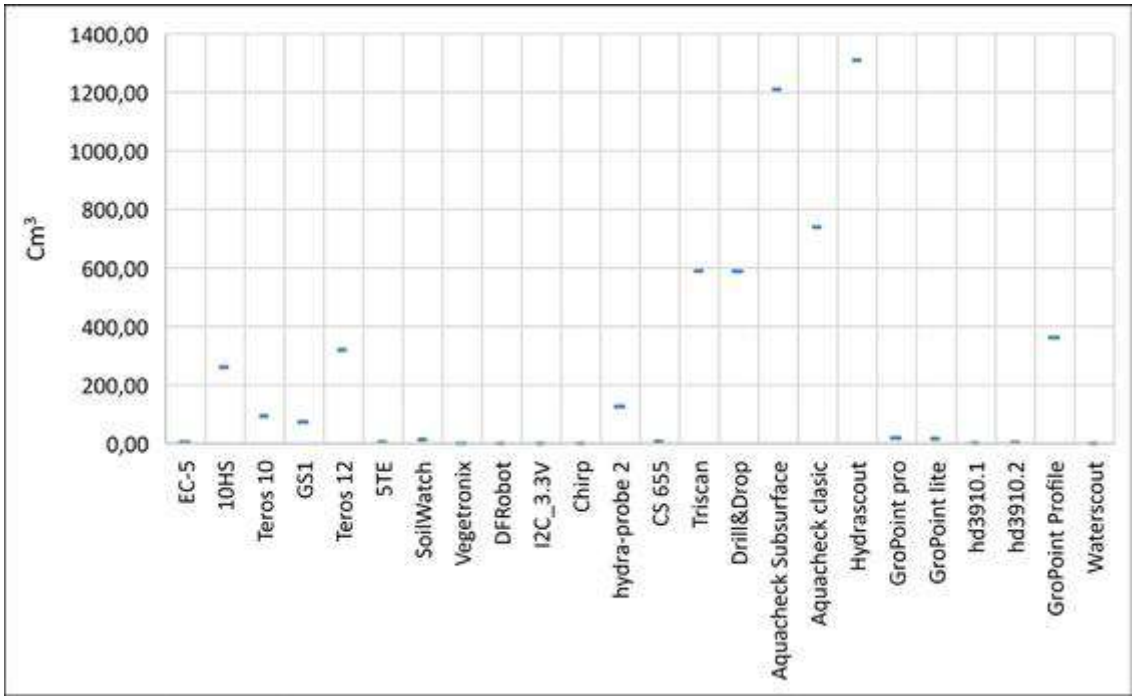


Figura 3. Volumen explorado por cada sonda en cm3.

4. Conclusiones

De forma preliminar, en el presente estudio se puede concluir que las sondas evaluadas en los 3 suelos contrastantes poseen calibraciones dispares lo que hace necesario una calibración específica para cada tipo de suelo si se desea obtener resultados fiables.

Las sondas evaluadas en condiciones de laboratorio poseen errores por tipo de suelo diferentes. Los resultados preliminares muestran que existen diferencias en la media de los errores cuadráticos medios de las sondas en función de la clase textural del suelo del ensayo. Así, el suelo franco es la textura que presenta menores errores, seguido del arenoso y finalmente el arcilloso del mismo modo que a [16]. Es por ello por lo que se considera el más favorable para determinar el contenido volumétrico de agua. En el caso de desear analizar otro tipo de textura puede ser interesante escoger un tipo de sonda dependiendo del modelo que mejor se adapte a la textura.

No se han detectado diferencias significativas en la precisión de las medidas entre sondas low cost y sondas de un precio más elevado. Los resultados obtenidos con las sondas low cost han presentado unos errores cuadráticos medios muy similares a las sondas de mayor coste, aunque bien es cierto, que estos resultados corresponden a ensayos realizados en laboratorio y es posible que el comportamiento de estas sondas se vea alterado en condiciones de campo donde varibales como la temperatura y la presencia de sales puede afectar a la fiabilidad de la lectura [17].

Del estudio del volumen de suelo explorado se puede concluir que las sondas de bajo coste exploran un volumen más reducido que sus competidoras comerciales de amplia difusión. Esta es la principal limitación que se ha encontrado en este tipo de sondas a excepción de la SoilWatch de Pinotech.

Referencias

1. ONU, “Agua y saneamiento - Desarrollo Sostenible,” 2019. [Online]. Available: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/. [Accessed: 15-May-2019].
2. R. G. Allen, L. Pereira, D. Raes, and M. Smith, “Evapotranspiración del cultivo: Guias para la determinación de agua de los cultivos.,” *Fao*, vol. 56, p. 297, 2006.
3. J. Mzezewa, E. T. Gwata, and L. D. van Rensburg, “Yield and seasonal water productivity of sunflower as affected by tillage and cropping systems under dryland conditions in the Limpopo Province of South Africa,” *Agric. Water Manag.*, vol. 98, no. 10, pp. 1641–1648, 2011.
4. F. Kizito *et al.*, “Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor,” *J. Hydrol.*, vol. 352, no. 3–4, pp. 367–378, May 2008.
5. H. Mittelbach, I. Lehner, and S. I. Seneviratne, “Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland,” *J. Hydrol.*, vol. 430–431, pp. 39–49, Apr. 2012.
6. J. Singh *et al.*, “Performance assessment of factory and field calibrations for electromagnetic sensors in a loam soil,” *Agric. Water Manag.*, vol. 196, pp. 87–98, Jan. 2018.
7. S. L. S.U., D. N. Singh, and M. Shojaei Baghini, “A critical review of soil moisture measurement,” *Measurement*, vol. 54, pp. 92–105, Aug. 2014.
8. J. P. Walker, G. R. Willgoose, and J. D. Kalma, “In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques,” *J. Hydrol.*, vol. 293, no. 1–4, pp. 85–99, Jun. 2004.
9. G. Clarke Topp and W. D. Reynolds, “Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil,” *Soil Tillage Res.*, vol. 47, no. 1–2, pp. 125–132, Jun. 1998.
10. Z. A. Bello, C. M. Tfwala, and L. D. van Rensburg, “Evaluation of newly developed capacitance probes for continuous soil water measurement,” *Geoderma*, vol. 345, no. March, pp. 104–113, 2019.
11. H. R. Bogena, J. A. Huisman, C. Oberdörster, and H. Vereecken, “Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications,” *J. Hydrol.*, vol. 344, no. 1–2, pp. 32–42, Sep. 2007.
12. H. Kalita, V. S. Palaparthy, M. S. Baghini, and M. Aslam, “Graphene quantum dot soil moisture sensor,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 233, pp. 582–590, Oct. 2016.

13. G. Ravazzani, "Open hardware portable dual-probe heat-pulse sensor for measuring soil thermal properties and water content," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 133, pp. 9–14, Feb. 2017.
14. J. M. Blonquist, S. B. Jones, and D. A. Robinson, "A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics," *J. Hydrol.*, vol. 314, no. 1–4, pp. 235–245, Nov. 2005.
15. H. J. F. Benninga *et al.*, "The Raam regional soil moisture monitoring network in the Netherlands," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 10, no. 1, pp. 61–79, Jan. 2018.
16. J. L. Varble and J. L. Chávez, "Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado," *Agric. Water Manag.*, vol. 101, no. 1, pp. 93–106, Dec. 2011.
17. C. M. TFWALA, L. D. van RENSBURG, Z. A. BELLO, and P. C. ZIETSMAN, "Laboratory vs. Field Calibration of HydraSCOUT Probes for Soil Water Measurement," *Pedosphere*, vol. 29, no. 1, pp. 132–136, 2019.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Evolución de prototipos de depósitos de drenaje para lisímetros de pesada

Juan Antonio Nicolás-Cuevas[1], Dolores Parras-Burgos[2], Laura Ávila-Dávila[3], Manuel Soler-Méndez[4], Julián González-Trinidad[3], José Miguel Molina-Martínez[4]

[1] Departamento de Estructuras y Construcción. Universidad Politécnica de Cartagena. C/ Doctor Fleming, s/n, 30202 Cartagena; juan.nicolas@upct.es
[2] Departamento de Expresión Gráfica. Universidad Politécnica de Cartagena. C/ Doctor Fleming, s/n, 30202 Cartagena; dolores.parras@upct.es
[3] Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus UAZ Siglo XXI, Carretera Zacatecas-Guadalajara Km. 6, Ejido la Escondida, 98160 Zacatecas, México; laura_14avila@uaz.edu.mx; jgonza@uaz.edu.mx
[4] Grupo de I+D+i Ingeniería Agromótica y del Mar. Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Ángel s/n Ed. ELDI, 30202 Cartagena, España; manuel.ia@agrosolmen.es; josem.molina@upct.es

Resumen: Los prototipos de lisímetros de pesada (LP1, LP2, LP3 y LP4) permiten determinar la evapotranspiración de los cultivos a partir del balance hídrico obtenido de la variación del peso del recipiente de cultivo y del peso del depósito de drenaje. En el modelo LP1 la solución elegida para el depósito consistió en medir el peso del agua percolada procedente del recipiente de cultivo mediante un depósito cilíndrico de 5,36 litros de capacidad (diámetro 210 mm x 155 mm de altura) con una célula de carga de 10 kg. En los modelos LP2 y LP3, se aumentó la capacidad del depósito de drenaje a 7,77 litros (diámetro 300 mm x 110 mm de altura), con una célula de carga de 10 kg. La altura total de los modelos LP1, LP2 y LP3 se fue reduciendo de 155 mm a 110 mm. En el modelo LP4, el diseño del depósito de drenaje varió sustancialmente, optándose por un diseño rectangular que, con una capacidad de 7,2 litros (360 x 160 x 125 mm), permitió mejorar la compacidad del conjunto manteniendo la resolución deseada para una célula de carga de 10 kg. La evolución del diseño del depósito de drenaje en los diversos modelos permitió ir reduciendo la altura total de los prototipos de lisímetros de pesada facilitando su instalación y montaje. Por tanto, se puede destacar la importancia que tiene el diseño del depósito de drenaje en la precisión del lisímetro de pesada, en las que el volumen de agua de cada depósito y las células de carga condicionan la resolución obtenida.

Palabras clave: volumen infiltrado, evolución de diseño. percolación

1. Introducción

La estimación del consumo de agua de un cultivo es importante para determinar la cantidad de agua que se requiere para obtener la mayor productividad, existen algunas metodologías para monitorear esta, los lisímetros de pesada son modelos precisos y fiables para determinarla [1]. Estos dispositivos contienen un volumen de suelo aislado hidrológicamente circundante, por lo cual es posible controlar y medir los diferentes términos que intervienen en el balance hídrico [2].

Estos dispositivos permiten entender el ciclo del movimiento del agua en el suelo, desde el punto de vista continuo, repetitivo y secuencial. Una vez que entra el agua al suelo, en forma de

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3450

riego o lluvia, ésta puede ser perdida por evapotranspiración o drenada hacia capas inferiores, permaneciendo como reserva hídrica [3].

Por lo tanto, estos dispositivos pueden ser utilizados para el cálculo de la precipitación, evaporación y drenaje de forma precisa, por medio de las variaciones del peso registrados por la entrada y salida de agua [4]. Por medio de un depósito de drenaje, que almacene el volumen del agua infiltrada a través del perfil del suelo confinado, es posible medir las pérdidas ocasionadas por la percolación profunda [5].

Los prototipos de lisímetros de pesada (LP1, LP2, LP3 y LP4) desarrollados por el grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar de la Universidad Politécnica de Cartagena cuentan con dicho depósito de drenaje lo que permite conocer con precisión el volumen infiltrado.

La presente comunicación muestra la evolución que ha tenido el depósito de drenaje a lo largo de los diferentes prototipos desarrollados. Con el último diseño se consiguió mejor precisión de medición del volumen de agua y un modelo de lisímetro de pesada más compacto.

2. Materiales y métodos

El depósito de drenaje está situado debajo del recipiente del cultivo, por lo que el agua lixiviada procedente de dicho recipiente pasa por un filtro de decantación para reducir el contenido de finos que pudieran pasar a través de la lámina geotextil situada en el fondo. Esta agua llega al depósito de drenaje que cuelga de una célula de carga de la estructura principal. Con este sistema de pesaje se mide cualquier alteración en el volumen contenido en el depósito [4] (Fig. 1). El programa de diseño asistido por ordenador que se ha utilizado, tanto en el modelado 3D de todos los componentes como en los análisis estructurales realizados, ha sido SolidWorks 2016.

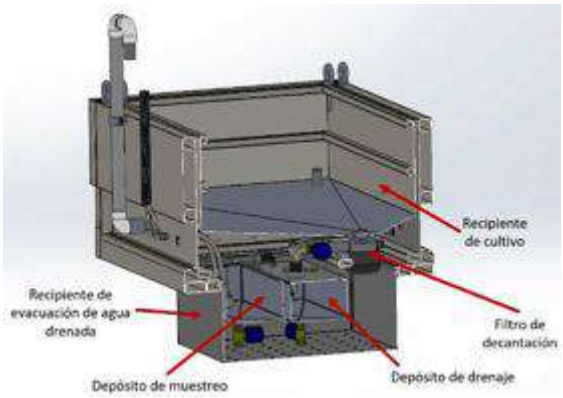


Figura 1. Sección de un lisímetro de pesada.

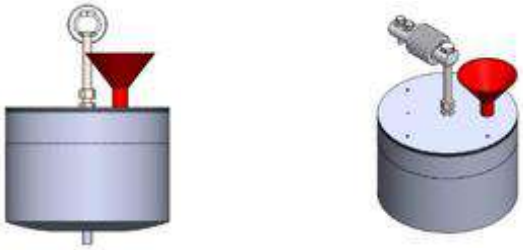
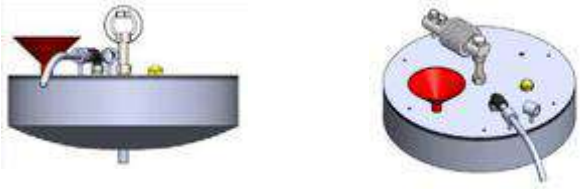
El diseño del depósito de drenaje ha ido evolucionando según se ha ido optimizando el diseño del lisímetro de pesada en cada uno de los modelos. Además, para su dimensionamiento se han tenido en cuenta también otros aspectos igualmente importantes: una textura de tipo arenoso (poca capacidad de retención de agua), las dimensiones del recipiente del cultivo (las cuales son establecidas por el tipo de cultivo a analizar) y, la intensidad y duración de un evento de lluvia de la región.

Por otro lado, se realizó un análisis estructural estático del depósito para determinar las tensiones y las deformaciones que se producen en las paredes del depósito de drenaje, estudiando el efecto de la presión hidrostática del agua sobre él.

3. Resultados y discusión

En la tabla 1 se muestran cada uno de los depósitos de drenaje diseñados teniendo en cuenta el modelo de lisímetro de pesada en el que va montado, y sus dimensiones características:

Tabla 1. Modelos del depósito de drenaje

Modelo	Diseño	Dimensiones
LP-1		Ø 210 mm por 155 mm de altura
LP-2		Ø 300 mm por 110 mm de altura
LP-3		Ø 300 mm por 110 mm de altura
LP-4		160x360x125 mm

La primera propuesta del depósito de drenaje fue un depósito cilíndrico para el modelo LP-1 (Tabla 1). Tras comprobar la evolución del lisímetro de pesada en campo, se optó por la reducción de sus dimensiones y hacerlo más compacto, resultando en los modelos LP-2 y LP-3 un depósito de mayor volumen de almacenamiento, compensado con mayor diámetro y menor altura. Adicionalmente, al LP-3 le fue agregado un depósito para el muestro del agua drenada, así que para el diseño del modelo LP-4 se tuvo que cambiar la forma del depósito de drenaje a uno rectangular, esto permitió mejor aprovechamiento del espacio debajo del recipiente de cultivo y con la misma capacidad de almacenamiento de agua drenada.

En todos los modelos, el depósito de cultivo es sostenido por una célula de carga de 10 Kg, por lo que el volumen de agua no puede ser mayor a los 10.000 g. Además, cuentan con un embudo para recolectar cada gota que drena por gravedad del recipiente de cultivo y una electroválvula para vaciar su contenido cuando se ha alcanzado el nivel máximo establecido. Las capacidades máximas de cada depósito de drenaje son 5,36 l para LP-1, 7,77 l para LP-2 y LP-3, y 7,2 l para LP-4.

La Figura 2 muestra una vista de perfil del prototipo LP-1 donde es posible ver el recorrido del agua desde el recipiente del cultivo hasta el depósito de drenaje, y los detalles de los

accesorios con los que cuenta. El agua drenada primero pasa por una malla de filtrado y después por acción de la gravedad es recolectada en el depósito de drenaje.

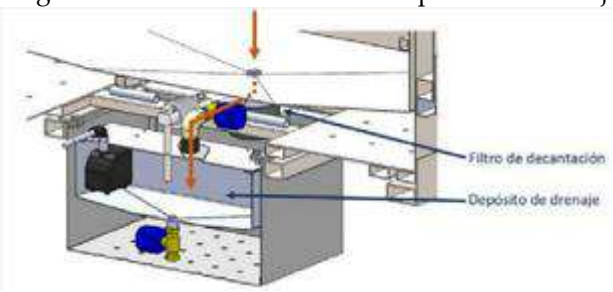


Figura 2. Conducción del agua drenada del recipiente de cultivo al depósito de drenaje [1].

Para la construcción de los depósitos de drenaje se han utilizado chapas de acero inoxidable AISI 304 de espesor 2 mm. Con SolidWorks Simulation se debe verificar que las deformaciones del depósito no interfieren con los demás componentes, asegurando el adecuado funcionamiento del sistema de pesada. Los resultados de los análisis y simulaciones realizadas indican que las deformaciones de cada uno de los recipientes no superan las holguras fijadas entre ellos bajo las diferentes situaciones de carga consideradas (Fig. 3).

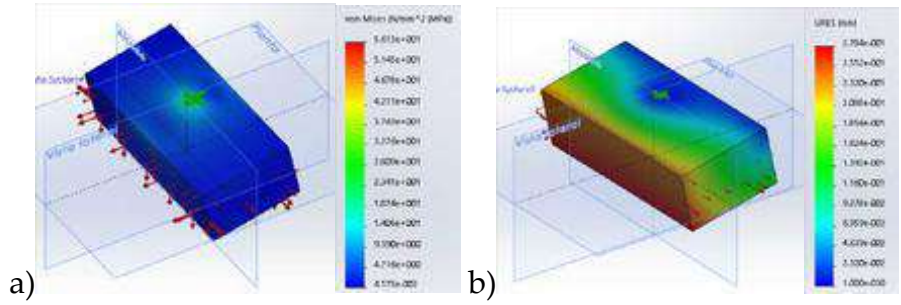


Figura 3. Simulación con SolidWorks del depósito de drenaje del modelo LP-4: a) Tensiones de Von Mises y b) Desplazamientos [1].

A continuación, se muestra el registro de la variación de peso en el depósito de drenaje durante varios eventos de lluvia. Se puede apreciar el aumento de peso debido a la lluvia (datos registrados cada minuto), al igual que el vaciado del mismo que ocurre en cuestión de minutos (Fig. 4).

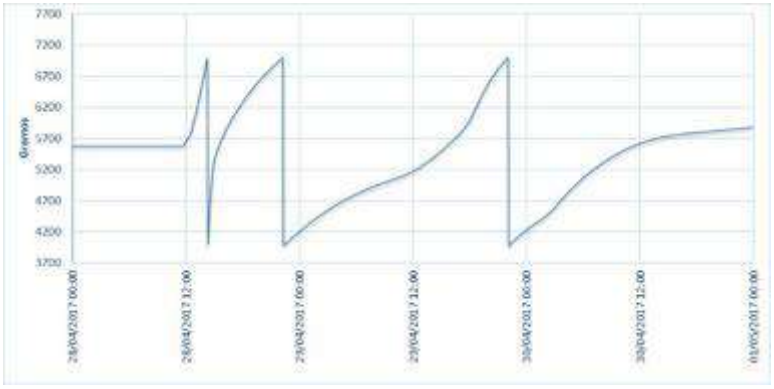


Figura 4. Registro de la variación del peso del depósito de drenaje (prototipo LP-1).

4. Conclusiones

La evolución del diseño del depósito de drenaje en los diversos modelos permitió ir reduciendo la altura total de los prototipos de lisímetros de pesada facilitando su instalación y montaje. La reducción de altura del depósito de drenaje ayudó a aprovechar mejor el espacio e introducir un recipiente de muestro, una ventana de inspección, un filtro de decantación, entre otros. El último modelo, LP-4, es un lisímetro de pesada transportable y optimizado con respecto a los anteriores. Los depósitos de drenaje de todos los prototipos diseñados y construidos han tenido un buen comportamiento a lo largo de los diferentes experimentos en campo a los que han sido sometidos. Los eventos extraordinarios de drenaje ocasionados por lluvias de larga duración son almacenados de manera exitosa. Esto es logrado ya que el orificio inferior del recipiente de cultivo es cerrado cuando el drenaje del depósito comienza, el cual tarda un par de minutos en vaciarse, por lo que rápidamente puede volver a almacenar agua.

5. Agradecimientos

Al Proyecto de Investigación y Desarrollo con referencia IDI-20190146, titulado "Desarrollo e implantación de un equipo de ferticontrol por lisimetría de pesada para uso en agricultura intensiva", en colaboración con la empresa AGROSOLMEN, S.L., cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Operativo Plurirregional de España 2014-2020. Por último, al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) México por el apoyo de la Beca de Movilidad para estancias en el extranjero.

Referencias

1. Nicolás-Cuevas J.A., Parras-Burgos D., Ruiz-Peñalver L., Ruiz-Canales A. y Molina-Martínez J.M. Diseño del proceso de muestreo. Análisis estructural del depósito de drenaje y del recipiente de evacuación del agua drenada en un lisímetro de pesada compacto. III Symposium Nacional y I Ibérico de Ingeniería Hortícola, 2018.
2. Parras-Burgos D., Nicolás-Cuevas J.A., Ruiz-Canales A. y Molina-Martínez J.M. Evolución del diseño de prototipo de lisímetro de pesada para cultivos hortícolas. III Symposium Nacional y I Ibérico de Ingeniería Hortícola, 2018.
3. Nicolás-Cuevas J.A., Parras-Burgos D., Ruiz-Peñalver L., Ruiz-Canales A. y Molina-Martínez J.M. Influencia de diferentes filtros y geotextiles en el proceso de infiltración del agua en un lisímetro de pesada compacto. III Symposium Nacional y I Ibérico de Ingeniería Hortícola, 2018.
4. Mariano, D. D. C., Faria, R. T. D., Freitas, P. S. L. D., Lena, B. P., & Johann, A. L. Construction and calibration of a bar weighing lysimeter. Acta Scientiarum. Agronomy, 37(3), 271-278. 2015.
5. Nicolás-Cuevas J.A., Parras-Burgos D., Ruiz-Peñalver L. y Molina-Martínez J.M. Diseño y modelado grafico 3D de un lisímetro de pesada de bajo coste. IX Congreso Ibérico de AgroIngeniería. Bragança, Portugal. 4 a 6 de septiembre, 2017.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Fitorremediación de aguas residuales industriales en humedales artificiales para uso agrícola

A. García-Valero[1], S. Martínez-Martínez, M.A. Terrero, A. Faz, M.A. Muñoz, M. Gómez-Garrido, J.A. Acosta

[1] Grupo de Investigación Gestión, Aprovechamiento y Recuperación de Suelos y Aguas, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII 48, 30203 Cartagena, España; amalia.garcia@upct.es

Resumen: La regeneración de aguas en áreas de escasez y déficit hídrico es una práctica extendida que complementa los procesos físicos y químicos propios de las plantas de tratamiento con otras tecnologías que permiten su reutilización. En este estudio, fue utilizado un sistema de fitorremediación para mejorar el tratamiento de aguas residuales industriales. Se trata de un humedal artificial horizontal de flujo subsuperficial. *Phragmites australis*, el carrizo común, fue la especie vegetal seleccionada por su habilidad para adaptarse al clima y por su capacidad de absorber contaminantes. Las concentraciones de nitrógeno Kjeldahl (NK), fósforo (P), boro (B) y cromo (Cr) en agua fueron analizadas y se calcularon las eficiencias. Además, la capacidad de absorción de las plantas fue analizada en las partes aérea y radicular. Los resultados del estudio mostraron que los niveles de contaminantes en agua fueron reducidos para ambos tiempos de retención hidráulicos (TRHs), siendo más efectivo para TRH = 3 días con eficiencias de remoción de 9,8, 78, 13 y 36 % para NK, P, B y Cr, respectivamente. Sin embargo, las eficiencias de absorción por *P.australis* en la parte aérea para NK, P y B fueron mayores a los 7 días. Por el contrario, el Cr fue retenido mayormente a los 3 días. Por lo tanto, *P.australis* es una especie fitoextractora ideal, que combinada con humedales artificiales reduce considerablemente los contaminantes en aguas residuales.

Palabras clave: *Phragmites australis*; biofiltro; contaminación; curtiduría; depuración

1. Introducción

La generación de aguas residuales se ha visto acentuada debido al incremento de la actividad industrial como consecuencia del crecimiento económico. Es por ello que la reutilización del agua es una parte operativa clave en la mayoría de los procesos industriales [1]. Las aguas residuales industriales representan una gran proporción de la contaminación en los sistemas de agua dulce y están reguladas en todo el mundo [2]. A medida que aumenta la demanda de agua dulce, también aumenta su escasez, por lo que la disminución de agua dulce se agrava aún más debido a la descarga de aguas residuales industriales no tratadas y/o tratadas inadecuadamente, generando un riesgo que puede repercutir en la producción de alimentos, dificulta la expansión industrial y aumenta los riesgos para la salud humana y ambiental [3]. La curtiduría representa una industria de gran relevancia y requiere que durante la ejecución de cada una de sus operaciones se lleve a cabo un elevado control para evitar posibles impactos ambientales que puedan originar la contaminación del aire y del agua [4].

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3439

Debido a la gran cantidad de productos químicos contaminantes y residuos biológicos durante su proceso de producción, las aguas residuales de la industria del cuero deben tratarse de manera efectiva. El tratamiento de aguas residuales ha evolucionado como consecuencia de las crecientes presiones sobre los recursos hídricos y las preocupaciones sobre cómo encontrar nuevos recursos capaces de ayudar a alcanzar el equilibrio entre la demanda y la oferta [1].

La protección del medio ambiente es una preocupación importante en todo el mundo [5], por lo que ha habido un profundo interés en varias técnicas de tratamiento para aguas residuales industriales [6]. El tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales es un proceso biotecnológico que se ha utilizado durante más de cinco décadas. Los humedales artificiales son sistemas que se han diseñado y construido para imitar procesos que ocurren en humedales naturales, pero lo hacen dentro de un ambiente más controlado [7]. Además, son sistemas con reducidos costos operativos y de mantenimiento [8] capaces de reducir los contaminantes cuando reciben las aguas residuales y purificarlas [9]. El humedal artificial es una tecnología potencial de tratamiento natural para aguas residuales industriales debido a que permite la eliminación de metales pesados [10] sin consumo de energía para su operación, pues utilizan la combinación de plantas, microorganismos y sustratos que juntos promueven una purificación eficiente [11].

Numerosos estudios han evaluado el rendimiento del tratamiento de los humedales con y sin vegetación, y se ha podido concluir que el rendimiento de los humedales es mejor cuando las plantas están presentes. El uso de la fitorremediación para mejorar el tratamiento de aguas residuales industriales es un nuevo concepto de tecnología que se puede aplicar a varios tipos de flujos de aguas residuales [12]. Además, la selección de las especies vegetales para humedales artificiales requiere una cuidadosa consideración, ya que la vegetación debe ser capaz de sobrevivir a los efectos tóxicos potenciales de las aguas residuales y su variabilidad. El carrizo común, *Phragmites australis* (*P. australis*), se utiliza en todo el mundo para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales en humedales artificiales [13]. *P. australis* es la macrófita más estudiada cuya función en los humedales artificiales es crear condiciones adecuadas para la eliminación de contaminantes mediante la absorción de nutrientes y contaminantes [7]. El objetivo de este trabajo fue evaluar un sistema de tratamiento compuesto por un humedal artificial plantado con *P.australis* para la reducción de contaminantes presentes en aguas residuales industriales procedentes de la curtiduría.

2. Materiales y métodos

2.1. Localización

Este estudio fue llevado a cabo en Lorca, Región de Murcia, España (Figura 1), específicamente en "Finca Las Minas" (37º 41' 54'' N, 1º 43' 19'' W) donde un humedal artificial fue instalado. El agua residual sometida a depuración en el humedal artificial procedía de una Estación Depuradora de Aguas Residuales Industriales cuya principal actividad es la curtiduría.



Figura 1. Localización del estudio.

2.2. Diseño experimental

El sistema de purificación consistió en un humedal artificial de flujo horizontal subsuperfical que trabajó en paralelo y estuvo compuesto por tres celdas (Figura 2) de 27 m de largo por 2,5 m de ancho y con una pendiente de sección transversal del 1%; la profundidad de cada celda se mantuvo en 1 m. Cada una de las celdas estaba constituida por grava gruesa procedente de rocas calizas compuestas por carbonatos hidratados en el fondo (80 cm) y arena lavada en la superficie (20 cm), y plantadas con *P. australis* como especie fitoextractora (Figura 3) con una densidad de 10 plantas por m². Los tiempos de retención hidráulica (TRH) en el humedal fueron de 3 y 7 días. Tres ciclos fueron realizados por cada TRH y las muestras fueron recogidas a la entrada y a la salida de cada celda por triplicado. Además, se tomaron muestras control de planta antes del paso del agua industrial por el humedal.

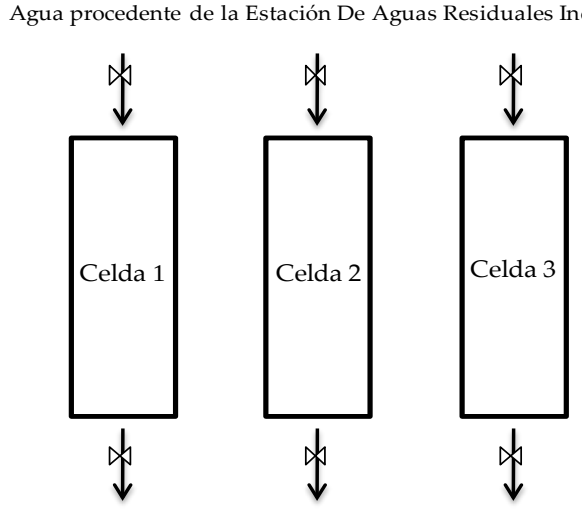


Figura 2. Sistema de tratamiento con humedal artificial compuesto por tres celdas.

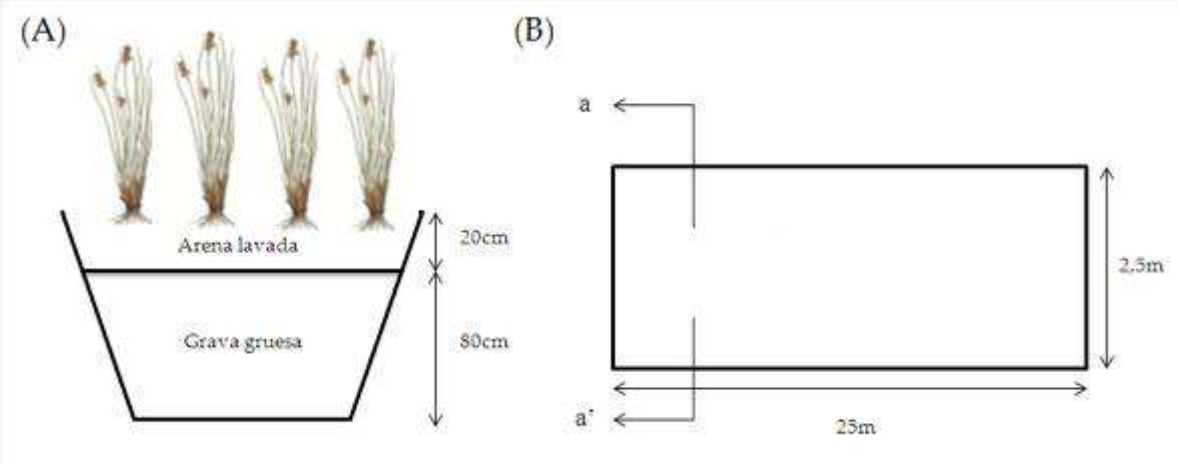


Figura 3. Sección (A) y vista en planta (B) de cada celda del humedal.

2.3. Métodos analíticos

Las muestras de agua depurada en el humedal artificial fueron recogidas tras 3 y 7 días de tiempo de retención. Los análisis químicos del agua proveniente de la estación de tratamiento y el agua una vez tratada en el humedal fueron llevados a cabo en el laboratorio. El Nitrógeno Total (NT) fue determinado mediante el método Kjeldahl [14]; el fósforo (P) fue designado fotométricamente con azul de molibdeno después de la hidrólisis ácida y la oxidación a 120 ºC (Macherey-Nagel GmbH & Co. KG. Nanocolor Test; ref 985 055); y las concentraciones de boro (B) y cromo (Cr) fueron determinadas usando ICP-MS (Espectrometría de Masas por Inducción de Plasma) tras la filtración de las muestras (0.45 μm).

Las muestras de *P. australis* fueron recogidas al mismo tiempo que las muestras de agua depurada. Las plantas fueron lavadas con agua desionizada y separadas la parte aérea de la radicular. El Nitrógeno Total (NT) fue determinado mediante el método Kjeldahl [14]; el fósforo (P) fue cuantificado de acuerdo al método de Watanabe y Olsen [15]; y las concentraciones de boro (B) y cromo (Cr) fueron determinadas usando ICP-MS (Espectrometría de Masas por Inducción de Plasma) tras la mineralización de la planta.

3. Resultados y discusión

3.1. Eficiencias de depuración en agua

La eficiencia total de depuración del sistema de tratamiento para TRH = 3 fue de 9,6, 77,7, 13,4 y 36,3% para NT, P, B y Cr, respectivamente. Sin embargo, TRH = 7 tuvo una eficiencia menor, siendo 1,4, 66,4, 10,8 y 23,5% (Figura 4). Los principales mecanismos para la eliminación del fósforo en los humedales son la adsorción en el sustrato y la precipitación química con calcio, hierro, aluminio o materia orgánica [16]. Algunos autores observaron reducciones en los contenidos de Cr en las aguas residuales tratadas en humedales artificiales con *P. australis* [17]. Varios estudios han demostrado que los humedales tienen un potencial considerable para eliminar B de las aguas residuales y se ha demostrado que las plantas y los sustratos tienen una fuerte capacidad de eliminación de B del agua contaminada [18]. Además, ha sido corroborado que el sistema permite la acumulación de metales tanto en los sustratos como en la vegetación incluida en el biofiltro [10].

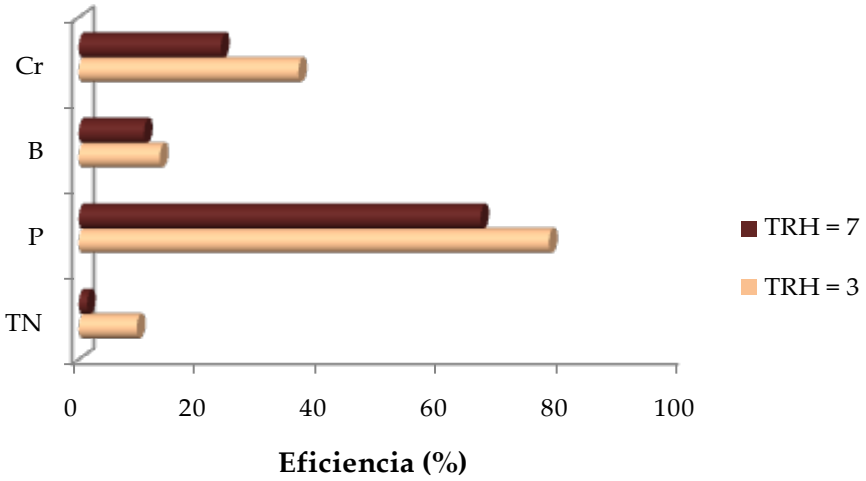


Figura 4. Eficiencia de purificación en agua.

3.2. Capacidad de absorción por Phragmites australis

La concentración de nitrógeno total en *P. australis* fue de 809 mg Kg^{-1} en la parte aérea y 762 mg Kg^{-1} en la parte radicular. Cuando las aguas residuales se retuvieron en el humedal durante 3 días, las plantas acumularon 2091 y 1312 mg Kg^{-1} de N en la parte aérea y de la raíz, respectivamente. Valores de 2516 y 1756 mg Kg^{-1} de N fueron obtenidos en la parte aérea y radicular cuando el agua permaneció 7 días en el humedal. Un comportamiento similar fue observado con el P al registrarse valores de 4816 y 1676 mg Kg^{-1} en la parte aérea y radicular durante 7 días. *P. australis* no obtuvo una absorción considerable de boro. En la planta control la concentración de Cr fue de de 5,4 mg Kg^{-1}, sin embargo, para TRH = 3 se obtuvo una concentración de 13,4 mg Kg^{-1} en la parte aérea (Figura 5).

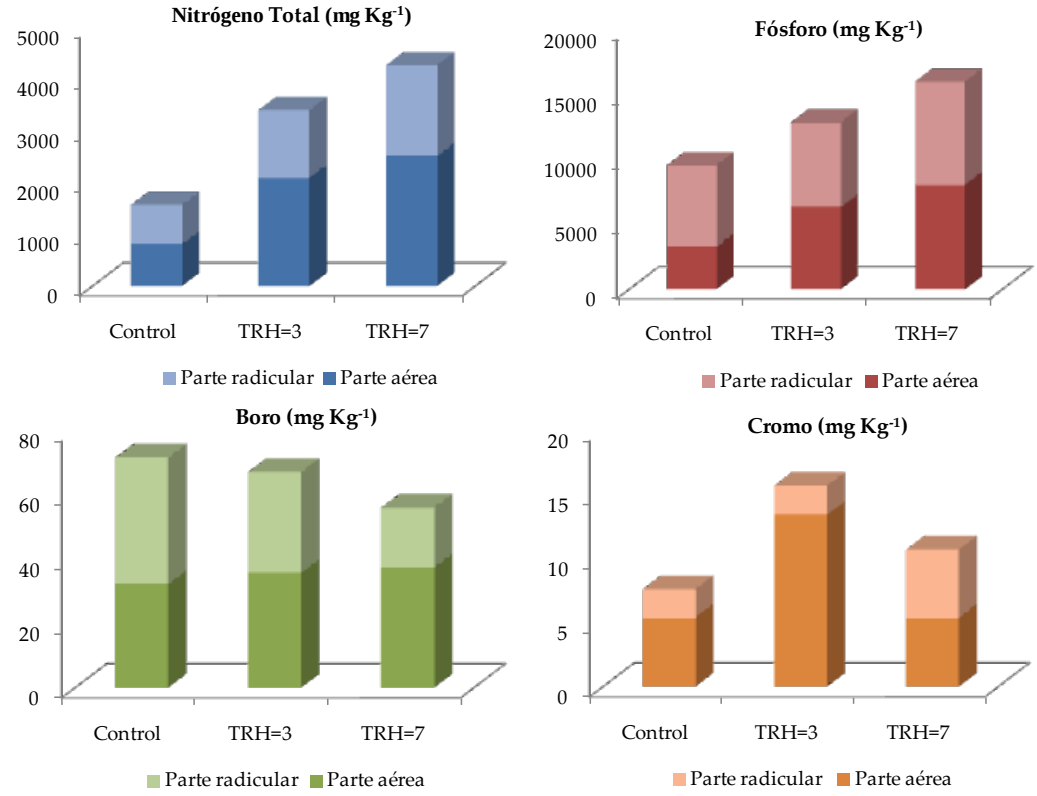


Figura 5. Concentración de NT, P, B y Cr en P.australis.

Los humedales plantados pueden asimilar una gran cantidad de metales pesados y desempeñan un papel importante en la purificación de aguas residuales [19]. En general, se acepta que las funciones principales de las plantas en los humedales artificiales son crear condiciones adecuadas para la eliminación de contaminantes, aunque a veces el papel directo de las plantas se limita a la absorción de nutrientes y metales pesados. *P. australis* tiene una alta capacidad para absorber contaminantes y los contenidos en la raíz son más altos que la parte aérea. Sin embargo, otros autores han establecido que la cantidad de metales pesados acumulados en la parte aérea representa solo una pequeña fracción. En la actualidad hay un gran campo de conocimiento que descubrir acerca de la acumulación de contaminantes en tejidos, es decir, las condiciones que promoverían la absorción de contaminantes y la posterior translocación a la biomasa de la planta [7].

4. Conclusiones

La utilización de macrófitas acuáticas en humedales artificiales como sistema de tratamiento de aguas residuales tiene bajo coste y presenta una adecuada alternativa de tratamiento de efluentes industriales. Los resultados de este estudio ponen de manifiesto que el tiempo de retención hidráulico óptimo es de 3 días. *P. australis* mostró su capacidad de absorber y almacenar nutrientes debido a que es capaz de absorber NT, P, B y Cr tanto en la parte aérea como en la radicular, siendo un ideal fitoextractor que combinado con el humedal artificial reduce considerablemente la carga contaminante del agua residual.

Por tanto, el humedal artificial fue apropiado para la reducción de contaminantes del agua residual industrial cuya principal actividad es la curtiduría.

Con el fin de establecer mejoras en futuras investigaciones, sería ideal utilizar otras nuevas especies macrófitas para el tratamiento de aguas. Estas plantas deberán presentar una elevada biomasa aérea, e incluso, una alta superficie radicular debido a que estas características biológicas favorecen un área para retener y adsorber nutrientes. Además, un nuevo tiempo de retención hidráulico podría ser investigado.

Referencias

1. Salgot M. and Folch M. Wastewater treatment and water reuse. J. Environ. Sci. Health. 2018, 2, 64-74.
2. Raper E., Stephenson T., Anderson D.R., Fisher R., Soares A. Industrial wastewater treatment through bioagmentation. Process Saf. Environ. 2018, 118, 178-187.
3. Swain A.K., Sahoo A., Jena H.M., Patra H. Industrial wastewater treatment by Aerobic Inverse Fluideized Bed Biofilm Reactors (AIFBBRs): A review. J. Water Process Eng. 2018, 23, 61-74.
4. Nacer D.W., Al-Sa'ed R.M., Siebel M.A. Reducing the environmental impact of the unhairinga liming process in the leather tanning industry. J. Cleaner Prod. 2006, 14, 65-74.
5. Crudu M., Deselnicu V., Deselnicu D.C., Albu L. Valorization of titanium metal wastes as tanning agent used in leather industry. Waste Manage. 2014, 34, 1806-1814.
6. Gerek E.E., Yilmaz S., Koparal A.S., Gerek, N. Combined energy and removal efficiency of electrochemical wastewater treatment for leather industry. J. Water Process Eng.2017, xxx, xxx-xxx (in press).
7. Vymazal J. and Brezinová T. Accumulation of heavy metals in aboveground biomass of Phragmites australis in horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment: A review. Chem. Eng. J. 2016, 290, 232-242.
8. Luna-Pabello V.M. and Aburto-Catañeda S. Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. 2014, 17(1), 32-55.
9. Di Luca G.A., Maine M.A., Mufarrege M.M., Hadad H.R., Pedro M.C., Sánchez G.C. Phosphorus distribution pattern in sediments of natural and constructed wetlands. Ecol. Eng. 2017, 108, 227-233.

10. Gill L.W., Brian Casey P.R., Higgins M.P., Johnston P.M. Long term heavy metal removal by a constructed wetland treating rainfall runoff from a motorway. Sci. Total Environ. 2017, 301-602, 32-44.
11. Irwin N.B., Irwin E.G., Martin J.F., Aracena P. Constructed wetlands for water quality improvements: Benefit transfer analysis from Ohio. J. Environ. Manage. 2018, 206, 1063-1071.
12. Riggio V.A., Ruffino B., Campo G., Comino E., Comoglio C., Zanetti M. Constructed wetlands for the reuse of industrial wastewater: A case-study. J. Cleaner Prod. 2018, 171, 723-732.
13. Mulkeen C.J., Williams C.D., Gormally M.J., Healy M.G. Seasonal patterns of metals and nutrients in Phragmites australis (Cav.) Trin. Ex Steudel in a constructed wetland in the west of Ireland. Ecol. Eng. 2017, 107, 192-197.
14. Duchaufour P. Precis de Pedologie. Paris:Masson. EEC. (1991). Council Directive of 12 December 1991 Concerning the Protection of Waters Against Pollution by Nitrates from Agriculture Sources (91/676/ EEC). 1970.
15. Watanabe F.S., Olsen S.R. Test of ascorbic acid method for determining phosphorous in water and NaHCO3 extracts from soil. Soil Science Society of America Proceedings. 1965, 677-678.
16. Healy M.G. and O'Flynn C.F. The performance of constructed wetlands treating primary, secondary and dairy soiled water in Ireland (a review). J. Environ. Manage. 2011, 92, 2348-2354.
17. Kucuk O.S., Sengul F., Kapdan I.K. Removal of ammonia from tannery effluents in a red bed constructed wetland. Water Scie. Technol. 2003, 48, 179-186.
18. Yildirim K., Kasim G.C. Phytoremediation potential of poplar and willow species in small scale constructed wetland for boron removal. Chemosphere. 2018, 194, 722-736.
19. Zhang S., Bai J., Wang W., Huang L., Zhang G., Wang D. Heavy metal contents and transfer capacities of Phragmites australis and Suaeda salsa in the Yellow River Delta, China. Phys. Chem. Earth. 2018, 104, 3-8.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Gestión del agua marina desalinizada en parcela: adaptación de la fertirrigación y uso conjunto con otras fuentes de agua

V. Martínez-Alvarez[1], J. F. Maestre-Valero[1], B. Martin-Gorriz[1], B. Gallego Elvira[1]

[1] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena, España; victoriano.martinez@upct.es

Resumen: El riego agrícola con Agua Marina Desalinizada (AMD) se ha desarrollado en la última década en el sureste español e Israel. El AMD. Desde el punto de vista agronómico, el AMD se caracteriza por su escasa mineralización y el desequilibrio en su composición, ya que tiene alta concentración de Na^{+}, Cl^{-} y B^{3+}, y baja concentración en Ca^{2+}, Mg^{2+} y $SO4^{2-}$. Esta singularidad, si no es considerada en el manejo del riego y la fertirrigación, puede llevar a pérdidas en la producción y la calidad de la cosecha. Para evitar estos problemas hay que hacer una adecuada gestión del AMD en parcela, especialmente orientada a adecuar su composición a la necesidad de nutrientes de los cultivos, siendo necesario adaptar los programas de fertirrigación y utilizar posibles mezclas con otras fuentes de agua que puedan aportar Ca^{2+}, Mg^{2+} y $SO4^{2-}$. En este trabajo se comparan las necesidades de fertirrigación de varios cultivos característicos del sureste español cultivos, bajo sus condiciones de cultivo en el Campo de Cartagena, considerando tres posibles escenarios de suministro de agua: 100% del riego con agua del trasvase Tajo-Segura, 100% del riego con AMD, y mezcla al 50% de ambas fuentes de agua. Los resultados del estudio ponen de manifiesto que la incorporación de AMD al riego hace necesario adaptar los programas de fertirrigación con el fin de compensar su baja mineralización, especialmente en cultivos sin suelo (en sustrato e hidropónico). El coste de esta adaptación es relativamente pequeño en comparación con el incremento de coste del agua de riego. Para algunos cultivos, la suma de ambos incrementos puede hacer peligrar su viabilidad económica, ya que incrementa notablemente los costes anuales de operación.

Palabras clave: riego, calidad del agua, fertilización, cotes de producción, sureste español.

1. Introducción

La incorporación de agua marina desalinizada (AMD) al sureste español es la principal estrategia recogida en la planificación hídrica española con el fin de hacer frente al déficit estructural de agua, que afecta principalmente al regadío. La revisión de las principales experiencias de riego agrícola con agua desalinizada pone de manifiesto que en numerosos países con clima árido o semiárido, y que además disponen de una agricultura altamente tecnificada, la desalinización de aguas salobres representa una fuente de agua suplementaria desde hace varias décadas. Sin embargo, el riego agrícola con suministros basados en AMD solo se encuentra documentado en España e Israel, y en la última década [1].

En general, la principal ventaja del AMD es su condición de recurso hídrico inagotable y no sujeto a variaciones climáticas, por lo que estratégicamente resulta idóneo para aumentar la disponibilidad de recursos hídricos para riego agrícola en zonas deficitarias. Como principal inconveniente persiste el elevado consumo energético asociado a su producción, generando un

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3320

coste del agua producto elevado y un nivel de emisiones de gases de efecto invernadero que dificulta las políticas demandadas para el control del cambio climático.

La osmosis inversa se ha generalizado como la tecnología de referencia para la desalinización de agua marina. El AMD resultante presenta una conductividad de 350-600 μScm^{-1}, rango muy adecuado para el riego agrícola. Sin embargo, desde el punto de vista agronómico, el AMD también se caracteriza por su escasa mineralización y el desequilibrio en su composición, ya que tiene alta concentración de Na^+ y Cl^- y baja concentración en Ca^{2+}, Mg^{2+} y $SO4^{2-}$. Esta singularidad, si no es considerada en el manejo del riego y la fertirrigación, puede llevar a pérdidas significativas en producción y calidad, como ponen de manifiesto varios estudios en cultivos regados únicamente con aguas desalinizadas en Israel [2, 3, 4]. En estas experiencias se han detectado problemas agronómicos que pueden afectar a la productividad de los cultivos, a los costes de fertirrigación y a la conservación de los suelos agrícolas, aspectos del riego con AMD que deben investigarse y analizarse para garantizar su viabilidad económica en el corto plazo y su sostenibilidad ambiental en el medio-largo plazo.

Una de las principales inquietudes en relación al uso del AMD en riego agrícola es su baja concentración de nutrientes esencial como Ca^{2+}, Mg^{2+} y SO_4^{2-}. Las aguas naturales y los suelos del sureste español generalmente proporcionan cantidades suficientes de estos nutrientes como para desestimar la necesidad de incorporarlos en los programas de fertilización. Sin embargo, como se pone de manifiesto en la Tabla 1, la concentración de Ca^{2+}, Mg^{2+} y SO_4^{2-} en el AMD es marcadamente inferior, ya que el proceso de osmosis inversa no solo separa las sales perjudiciales, sino también aquellas necesarias para el desarrollo de los cultivos. Por lo tanto, si queremos evitar carencias nutricionales que afecten a la producción, resulta necesario adaptar los programas de fertirrigación para proporcionar las cantidades requeridas de estos nutrientes, con el consiguiente incremento de coste en fertilizantes. En este sentido, Ben-Gal *et al.* [3] indicaron que para un cultivo de pimiento en invernadero en Israel se producía un incremento del coste de fertilización cuando se empleaba AMD para el riego de 0,50 $/m^3$ por los motivos expuestos, lo que representa un preocupante incremento de 3500 $/ha de cultivo.

Tabla 1. Composición química del AMD de las 4 grandes planta desaladoras que actualmente suministran a la agricultura de la cuenca del Segura. Se incluyen también los valores del trasvase Tajo-Segura y del agua subterránea en el Campo de Cartagena.

Parámetro	Plantas desaladoras				Agua del Acueducto Tajo-Segura	Agua Subterránea
	Torrevieja	Águilas	Escombreras	Valdelentisco		
EC (dS m^{-1})	0.46	0.48±0.08	0.54	0.54±0.15	0.85±0.05	4.51±0.98
Ca^{2+} (mg L^{-1})	29	14.9±2.4	20	15.6±1.8	94.6±4.0	229.5±39.3
Mg^{2+} (mg L^{-1})	4.3	1.4±0.5	2.4	2.1±1.1	41.7±1.1	99±17
SO_4^{2-} (mg L^{-1})	6.6	-	4.0	-	-	980±364
Cl^- (mg L^{-1})	147	140±30	140	182±47	57±23	972±608
Na^+ (mg L^{-1})	86	76±14	88	115±18	51±9	573±153
B^{3+} (mg L^{-1})	0.56	0..85±0.16	0.9	0.92±0.14	0.13±0.06	1.36±0.54

Fuente: [5]

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es determinar, de forma analítica, el efecto de la sustitución de las aguas de riego tradicionales por AMD en el coste de fertilización de los cultivos. Para ello se determinarán y comparan las necesidades de fertirrigación de tres cultivos bajo distintos sistemas productivos característicos del sureste español (lechuga Little Gem en sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique); lechuga Little Gem en suelo; limonero fino en marco tradicional; pimiento dulce en invernadero en sistema hidropónico; y pimiento dulce en invernadero en suelo). Se considerarán tres posibles escenarios de suministro de agua: 100% del riego con agua del trasvase Tajo-Segura, 100% del riego con AMD, y mezcla al 50% de ambas fuentes de agua. La última opción se considera dado que la mezcla del AMD con otras fuentes es la alternativa de gestión más recomendada [6].

El estudio se enmarca en la comarca agrícola del Campo de Cartagena (sureste de España) por ser la región donde se está produciendo un mayor aporte de AMD para riego [5]. Por este motivo, todos los condicionantes del estudio (composición química de las aguas, prácticas de cultivo, costes de cultivo, producciones, etc.) son los característicos de esta zona.

El análisis de los escenarios de cultivo y suministro planteados, junto con los costes de fertilizantes propios de la zona de estudio, aportará información suficientemente representativa de las necesidades de adaptación de la fertirrigación cuando se emplea AMD para riego, así como de su impacto económico bajo condiciones de cultivo características del sureste español.

3. Materiales y métodos

3.1. Datos de cultivo y necesidades de fertilización

Uno de los condicionantes para la selección de cultivos y sistemas de producción ha sido disponer de suficiente información secundaria sobre los mismos para poder analizar el impacto económico de la adaptación del programa de fertirrigación a los distintos escenarios de suministro de agua de riego considerados.

Los datos económicos que caracterizan a los cultivos de lechuga Little Gem en sistema hidropónico NFT y en suelo se han obtenido de un trabajo previo de los autores [7]. Las recomendaciones de fertilización en suelo (N-P_2O_5-K_2O-CaO-MgO en kg/ha; 60-50-116-19-10) han sido tomadas de Rincón [8] mientras que la solución nutritiva ideal para el caso de hidropónico NFT ha sido proporcionada por agricultores con experiencia en este tipo de cultivo (NO^{3-} - H_2PO^{4-} - SO_4^{-2} - HCO_3^- - NH_4^+ - K^+ - Ca^{+2} - Mg^{+2} en mmol/L; 11,0 - 1,0 – 2,5 – 0,5 – 1 – 7,4 – 4,4 – 1,2).

En el caso de limonero fino en marco tradicional (7x6 = 238 árboles/ha), tanto la caracterización económica del cultivo como las recomendaciones de fertilización se han obtenido de [9].

Finalmente, la solución nutritiva ideal para el cultivo del pimiento dulce en invernadero con sistema hidropónico (NO_3^- - H_2PO^{4-} - SO_4^{-2} - HCO_3^- - NH_4^+ - K^+ - Ca^{+2} - Mg^{+2} en mmol/L; 14 - 1,7 – 2,0 – 0,5 – 0,5 – 5,9 – 5,0 – 2,5) o sobre suelo (N-P_2O_5-K_2O-CaO-MgO en kg/ha; 280-100-460-110-170) se han obtenido de Reche [10], mientras que los datos económicos son los proporcionados por ECREA [11].

3.2. Caracterización química de los suministros de agua de riego

Se dispone de dos fuentes de suministro de agua de riego. La primera es la proporcionada por la Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena, cuyo origen proviene mayoritariamente del trasvase Tajo-Segura. La segunda es la proporcionada por la planta desaladora de Escombreras, cuya producción actual (≈21 hm^3/año) se dedica prácticamente en su totalidad al riego de cultivos en el Campo de Cartagena. La composición química característica

de estas fuentes se ha obtenido mediante análisis agronómicos de calidad de agua de riego y es la recogida en la Tabla 1. La calidad de agua considerada para el escenario de mezcla al 50% de AMD y agua del trasvase Tajo-Segura es la correspondiente a los valores medios de cada uno de los componentes químicos considerados. El precio del agua suministrada por la Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena es de 0,15 €, mientras que el correspondiente al AMD es de 0,50 €.

3.3. Precio de los fertilizantes

Los precios de los fertilizantes considerados en el análisis son los valores medios proporcionados por tres empresas distribuidoras de agroquímicos en la zona de estudio para el año 2018, y se recogen en la Tabla 2.

Tabla 2. Precio de los fertilizantes considerados en el estudio

Fertilizante		Precio (€/kg)
Ácido Fosfórico	H_3PO_4	0,644
Ácido Nítrico	HNO_3	0,442
Nitrato Potásico	KNO_3	1,075
Nitrato Amónico	NH_4NO_3	0,357
Sulfato Amónico	$(NH_4)_2SO_4$	0,252
Sulfato Potásico	K_2SO_4	0,714
Sulfato Magnésico	$MgSO_4$	0,690
Fosfato monoamónico	$NH_4H_2PO_4$	1,029
Fosfato monopotásico	KH_2PO_4	1,457
Nitrato Magnésico	$Mg(NO_3)_2$	0,617
Nitrato Cálcico	$Ca(NO_3)_2$	0,440
Complejos mezcla de microelementos	Fe, Zn, Cu, B, Mn y Mo	8,235

3.4. Ajuste de los programas de fertirrigación

La metodología aplicada para el ajuste de los programas de fertirrigación en cada escenario de riego ha sido la habitual en el cálculo de soluciones nutritivas en cultivos en suelo y sin suelo [12]. Por lo general, en cultivos sin suelo, se ha seguido el procedimiento de cálculo descrito por Sonnenveld [13].

Una vez ajustados los programas de fertirrigación, se ha determinado la dosificación de fertilizantes. Finalmente, a partir de las dosificaciones consideradas y del volumen anual de riego se obtienen las cantidades a aportar de cada fertilizante.

Las soluciones adoptadas han sido contrastadas con un panel de agricultores especializados en cada cultivo que, en base a su experiencia, han confirmado la representatividad de las mismas en cada escenario de suministro de agua de riego.

4. Resultados y discusión

4.1. Lechuga Little Gem en sistema hidropónico NFT

Para el estudio de este sistema productivo se ha considerado el análisis de una campaña completa, en la que se producen 9 ciclos de cultivo al año, con una densidad de plantación de 165.000 lechugas/ha. El consumo hídrico es de 750 m^3/ha-ciclo, representando un total de 6750 m^3/ha-año. La Tabla 3 sintetiza el consumo de fertilizantes para cada escenario, así como el coste asociado de los mismos. También se incluye el incremento del coste de fertilización en cada escenario, así como el incremento de coste por fertilización y uso de AMD.

Teniendo en cuenta que los costes de operación anuales del cultivo de lechuga Little Gem en sistema hidropónico NFT ascienden a 96.607 €/ha (Maestre-Valero et al., 2018), el incremento de costes de fertilización al reemplazar el 100% de agua de riego con AMD únicamente representa un 1,6% de los mismos, mientras que el incremento de coste por fertilización y agua de riego asciende al 4,1%. En el caso de reemplazar solamente el 50%, estos incrementos serían del 0,3% y 1,6% respectivamente.

Tabla 3. Cantidades de fertilizantes, agua de riego aplicada y costes para lechuga Little Gem en sistema hidropónico NFT

Fertilizante (kg/año)	E1: 0% AMD	E2: 50% AMD	E3: 100% AMD
Ácido Fosfórico	945,0	945,0	0,0
Ácido Nítrico	1401,7	551,2	488,2
Nitrato Potásico	2784,2	2286,1	1774,3
Nitrato Amónico	534,6	534,6	0
Sulfato Amónico	0	0	0
Sulfato Potásico	1905,9	2329,5	2764,8
Sulfato Magnésico	0	515,3	1845,4
Fosfato monoamónico	0	0	776,2
Fosfato monopotásico	0	0	0,0
Nitrato Magnésico	0	0	0,0
Nitrato Cálcico	3003,4	4330,2	5671,6
Microelementos	168,7	168,7	168,7
Coste Fertilización (€/año)	8481,7	8812,3	10052,5
Δ Coste Fert. (€/año)	-	330,6	1570,7
Coste Fert + Agua (€/año)	9494,2	11006,1	13423,5
Δ Coste Fert. + Agua (€/año)	-	1511,9	3929,3

4.2. Lechuga Little Gem en suelo

Para este caso se ha considerado el manejo habitual en el Campo de Cartagena, que consiste en producir dos ciclos de lechuga de otoño-invierno en cada campaña. La densidad de plantación es de 155.000 lechugas/ha. El consumo hídrico es de 1850 m3/ha·ciclo, representando un total de 3700 m^3/ha·año. La Tabla 4 sintetiza los resultados para cada escenario de riego considerado.

Teniendo en cuenta que los costes de operación anuales del cultivo de lechuga Little Gem en suelo ascienden a 18.360 €/ha [7], el incremento de costes de fertilización al reemplazar el 100% de agua de riego con AMD sólo representa un 1,0% de los mismos, mientras que el incremento de coste por fertilización y agua de riego asciende al 8,1%. En el caso de reemplazar solamente el 50%, estos incrementos serían del 0,0% y 3,5% respectivamente.

4.3. Limonero Fino en marco tradicional

Se ha considerado una plantación de limonero "fino 95" (Citrus limon L. Burm F.) sobre sobre Citrus macrophylla, con un marco de plantación tradicional de 7 x 6 m, lo que supone 238 árboles/ha. La producción característica de este sistema de cultivo en la zona de estudio es de 45.000 kg/ha, mientras que el consumo de agua de riego es de 6000 m^3/ha-año. La Tabla 5 sintetiza los resultados para cada escenario considerado.

Los costes de operación anuales del cultivo de limón asciende a 5.551 €/ha [14], por lo que el incremento de costes de fertilización en el escenario 3 (100% AMD) representa un 1,0% de los mismos, mientras que el incremento de coste por fertilización y agua de riego asciende al 38,8%. En el caso de reemplazar solamente el 50%, los incrementos serían del 0,0% y 18,9% respectivamente.

Tabla 4. Cantidades de fertilizantes, agua de riego aplicada y costes para lechuga Little Gem en suelo

Fertilizante (kg/año)	E1: 0% AMD	E2: 50% AMD	E3: 100% AMD
Ácido Fosfórico	0	0	0
Ácido Nítrico	0	0	0
Nitrato Potásico	336,6	336,6	321,7
Nitrato Amónico	213,1	216,0	155,1
Sulfato Amónico	0	0	0
Sulfato Potásico	0	0	0
Sulfato Magnésico	0	0	227,8
Fosfato monoamónico	0	0	0
Fosfato monopotásico	191,3	191,3	191,3
Nitrato Magnésico	0	0	0
Nitrato Cálcico	0	0	151,8
Microelementos	37,0	37,0	37,0
Coste Fertilización (€/año)	1021,3	1022,4	1208,5
Δ Coste Fert. (€/año)	-	1,1	187,2
Coste Fert + Agua (€/año)	1576,3	2224,9	3058,5
Δ Coste Fert. + Agua (€/año)	-	648,6	1482,2

Tabla 5. Cantidades de fertilizantes, agua de riego aplicada y costes para Limonero Fino en marco tradicional.

Fertilizante (kg/año)	E1: 0% AMD	E2: 50% AMD	E3: 100% AMD
Ácido Fosfórico	122,6	122,6	122,6
Ácido Nítrico	0	0	0
Nitrato Potásico	242,6	242,6	233,5
Nitrato Amónico	444,4	444,4	427,2
Sulfato Amónico	0	0	0
Sulfato Potásico	0	0	0
Sulfato Magnésico	0	0	59,1
Fosfato monoamónico	0	0	0
Fosfato monopotásico	0	0	0
Nitrato Magnésico	0	0	0
Nitrato Cálcico	0	0	63,5
Microelementos	17,0	17,0	16,9
Coste Fertilización (€/año)	638,0	638,0	690,8
Δ Coste Fert. (€/año)	-	0	52,8
Coste Fert + Agua (€/año)	1538,0	2588,0	3690,8
Δ Coste Fert. + Agua (€/año)	-	1050,0	2152,8

4.4. Pimiento dulce en invernadero con sistema hidropónico

Las técnicas de producción de pimiento en invernadero difieren muchos entre regiones. Así, en Almería, donde existen unas 8.000 ha de invernadero de pimiento, se realizan cultivos de otoño (Agosto-Febrero). Sin embargo, en el campo de Cartagena, donde se cultivan cerca de 1400 ha de pimiento, se realizan cultivos de primavera (Noviembre-Julio). Para este último caso, la densidad de plantación habitual es de 25.000 plantas/ha, dando lugar a producciones características en torno a los 80.000 kg/ha, con consumos de agua de riego cercanos a los 9000 m^3/ha. Los resultados obtenidos bajo este escenario se sintetizan en la Tabla 6.

Los costes de operación anuales del cultivo de para pimiento en sustrato de coco en el Campo de Cartagena asciende a 74.244 €/ha [14], por lo que el incremento de costes de fertilización en el escenario 3 (100% AMD) representa un 4,7% de los mismos, mientras que el incremento de coste por fertilización y agua de riego asciende al 9,0%. En el caso de reemplazar solamente el 50% del suministro por AMD, los incrementos serían del 2,0% en el coste de fertilizantes y del 4,1% en el coste por fertilización y agua de riego.

Tabla 6. Cantidades de fertilizantes, agua de riego aplicada y costes para pimiento dulce con sistema hidropónico

Fertilizante (kg/año)	E1: 0% AMD	E2: 50% AMD	E3: 100% AMD
Ácido Fosfórico	2142,0	2142,0	781,2
Ácido Nítrico	1134,0	0	0
Nitrato Potásico	4513,1	4467,6	3475,8
Nitrato Amónico	352,8	352,8	352,8
Sulfato Amónico	0	0	0
Sulfato Potásico	0	0	0
Sulfato Magnésico	0	2527,0	5098,4
Fosfato monoamónico	0	0	0
Fosfato monopotásico	0	0	1322,8
Nitrato Magnésico	1868,4	1084,1	253,7
Nitrato Cálcico	5171,0	6940,0	8728,5
Microelementos	225,0	225,0	225,0
Coste Fertilización (€/año)	12.136,4	13.625,4	15.659,6
Δ Coste Fert. (€/año)	-	1489,0	3523,2
Coste Fert + Agua (€/año)	13.486,4	16.550,4	20.159,6
Δ Coste Fert. + Agua (€/año)	-	3064,0	6673,2

4.5. Pimiento dulce en invernadero sobre suelo

Se trata de un sistema productivo similar al anterior, pero que se desarrolla directamente sobre suelo en lugar de sustrato. Las producciones suelen ser ligeramente inferiores para similares densidades de cultivo y dosis de riego. Los resultados obtenidos bajo este escenario se sintetizan en la Tabla 7.

Tabla 7. Cantidades de fertilizantes, agua de riego aplicada y costes para pimiento dulce sobre suelo

Fertilizante (kg/año)	E1: 0% AMD	E2: 50% AMD	E3: 100% AMD
Ácido Fosfórico	0	0	0
Ácido Nítrico	0,0	0	0
Nitrato Potásico	773,4	764,3	755,2
Nitrato Amónico	324,0	180,0	25,2
Sulfato Amónico	0	0	0
Sulfato Potásico	0	0	0
Sulfato Magnésico	0	0	0
Fosfato monoamónico	0	0	0
Fosfato monopotásico	189,8	189,8	189,8
Nitrato Magnésico	230,6	461,3	692,0
Nitrato Cálcico	233,2	408,2	622,0
Microelementos	90,0	90,0	90,0
Coste Fertilización (€/año)	2209,5	2367,5	2538,9
Δ Coste Fert. (€/año)	-	158,0	329,4
Coste Fert + Agua (€/año)	3559,5	5292,5	7038,9
Δ Coste Fert. + Agua (€/año)	-	1733,1	3479,4

Según el ECREA [11] los costes de operación anuales (costes directos + mano de obra + costes indirectos) del pimiento dulce en invernadero sobre suelo asciende a 30.799 €/ha. Por tanto, el incremento de costes de fertilización en el escenario 3 (100% AMD) representa un 1,1% de los costes anuales de operación, mientras que el incremento de coste por fertilización y agua de riego asciende al 11,3%. En el caso de reemplazar solamente el 50% del suministro por AMD, los incrementos serían del 0,5% en el coste de fertilizantes y del 5,6% en el coste por fertilización y agua de riego.

5. Discusión y Conclusiones

Tanto el agua de riego proveniente del trasvase Tajo-Segura y como de la planta desalinizadora carece de contenidos significativos de N, P y K, por lo que las necesidades de estos nutrientes tienen que ser suministradas con independencia del origen del agua. Sin embargo, el agua del trasvase Tajo-Segura aporta importantes dosis de Ca^{2+} y Mg^{2+}, que suelen ser suficiente en el caso de cultivos en suelo, y que reducen considerablemente el aporte de los mismos en el caso de los cultivos hidropónicos. Además, el micronutriente boro es abundante en el AMD, por lo que debería suprimirse en los programas de fertirrigación para evitar problemas de fitotoxicidad en cultivos sensibles.

La Figura 1 muestra que el incremento de los costes de fertilización al reemplazar el 100% de agua de riego con AMD es significativo en los cultivos hidropónicos (1500-3500 €/ha·año) y muy reducido en los cultivos sobre suelo (50-330 €/ha·año). Sin embargo, cuando se relativizan estos costes al compararlos con los costes anuales de operación del cultivo, se pone de manifiesto que, con la excepción del cultivo hidropónico de pimiento, el incremento representa sólo entre el 1 y el 2% de dichos costes. La Figura 1 también muestra que el incremento de los costes de agua al reemplazar el 100% de agua de riego con AMD se encuentra entre 1000 y 3000 €/ha·año. Este incremento puede representar un porcentaje importante de los costes anuales de operación del cultivo, como ocurre en el caso del limonero (38%).

La Figura 2 muestra que el incremento del coste total al reemplazar el 100% es más importante en valor absoluto para los cultivos hidropónicos, pero en valor relativo se sitúa entre el 5 y el 10% para todos los cultivos, con la excepción del limonero, donde alcanza el 39%.

Finalmente, se puede concluir que la incorporación de AMD al riego hace necesario adaptar los programas de fertirrigación con el fin de compensar su baja mineralización, especialmente en cultivos sin suelo (en sustrato e hidropónico). El coste de esta adaptación es relativamente pequeño en comparación con el incremento de coste del agua de riego. Para algunos cultivos, la suma de ambos incrementos puede hacer peligrar su viabilidad económica, ya que incrementa notablemente los costes anuales de operación.

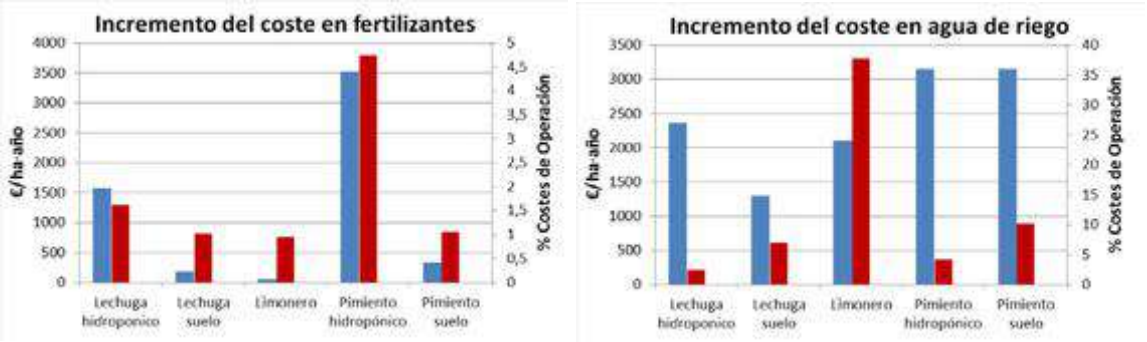


Figura 1. Incrementos de los costes de fertilización (Izda.) y del agua de riego (Dcha.) al reemplazar el 100% de agua de riego con AMD.

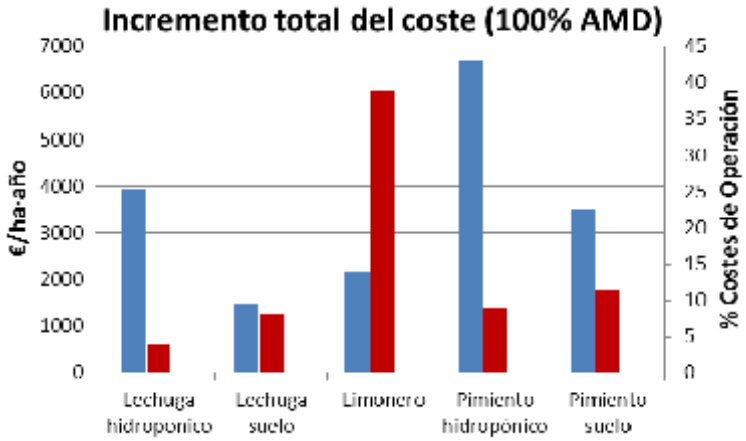


Figura 2. Incremento del coste total de operación al reemplazar el 100% de agua de riego con AMD.

6. Agradecimientos

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a (1) la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) mediante el proyecto RIDESOST (AGL2017-85857-C2-2-R), y (2) la financiación del Proyecto Europeo LIFE DESEACROP (LIFE16-ENV-ES-000341). También se agradece la colaboración de la Catedra Trasvase y Sostenibilidad – Jose Manuel Claver Valderas.

Referencias

1. Martínez-Alvarez V., Martin-Gorriz B., Soto-García M. Seawater desalination for crop irrigation — A review of current experiences and revealed key issues. Desalination. 2016, 381, 58–70.
2. Yermiyahu U., Tal A., Ben-Gal A., Bar-Tal A., Tarchitzky J., Lahav O. Rethinking desalinated water quality and agriculture. Science. 2007, 318, 920–921.
3. Ben-Gal A., Yermiyahu U., Cohen S. Fertilization and blending alternatives for irrigation with desalinated water. J. Environ. Qual. 2009, 38, 529–536.
4. Bar-Tal A., Yermiyahu U., Ben-Gal A., Schwartz A., Faingold I., Seligmann R. Optimization of calcium and magnesium concentrations for fertigation of tomato with desalinated water. Isr. J. Plant Sci. 2017, DOI: 10.1080/07929978.2017.1288466.
5. Martínez-Alvarez V., González-Ortega M.J., Martin-Gorriz B., Soto-García B., Maestre-Valero J.F. The use of desalinated seawater for crop irrigation in the Segura River Basin (south-eastern Spain). Desalination. 2017, 422, 153–164.
6. Avni N., Eben-Chaime M., Oron G. Optimizing desalinated sea water blending with other sources to meet magnesium requirements for potable and irrigation waters. Water Research. 2013, 47, 2164-2176.
7. Maestre-Valero J.F., Martín-Górriz B., Soto García M., Martínez-Mate M.A., Martínez Alvarez V. Producing lettuce in soil-based or in soilless outdoor systems. Which is more economically profitable? Agric Water Manag. 2018, 206, 48-55.
8. Rincón L. Requerimientos de nutrientes en fertirrigación de lechugas especiales y minilechugas. Vida Rural. 2008, 266, 56 – 60.
9. García, J. Análisis del sector del limonero y evaluación económica de su cultivo. Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario. Murcia, 2014, 142 pp.
10. Reche J. Cultivo del pimiento Dulce en invernadero. Consejería de Agricultura y Pesca de ANDALUCIA. Sevilla, 2010, 291 pp.
11. ECREA. Estudios de Costes y Rentas de las Explotaciones Agrarias. Resultados técnico-económicos. Cultivos hortícolas Andalucía, Castilla y León, Castilla-La Mancha, Extremadura, Murcia y Comunidad Valenciana. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, 2014, 57 pp.

12. Santos B., Ríos D. Cálculo de Soluciones Nutritivas En suelo y sin suelo. Servicio de Agricultura y Desarrollo Rural. Cabildo Insular de Tenerife. Tenerife, 2016, 111 pp.
Sonnenveld C., Straver N. Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates. Voedingsoplossingen glastuinbouw nº 8. Glasshouse Crops Research Station. Naaldwijk, 1994, 45 pp.
13. García, J. Análisis del sector del limonero y evaluación económica de su cultivo. Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario. Murcia, 2014, 142 pp.
14. López-Marín J., Angosto J.L., González A. El cultivo de pimientos en el campo de Cartagena. 2014, https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/130710josefalopezpimientocartagenao

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Implementación de depósitos de muestreo en lisímetros de pesada y sus necesidades.

Juan Antonio Nicolás-Cuevas[1], Dolores Parras-Burgos[2], Laura Ávila-Dávila[3], Manuel Soler-Méndez[3], Leandro Ruiz-Peñalver[4], José Miguel Molina-Martínez[3]

[1] Departamento de Estructuras y Construcción. Universidad Politécnica de Cartagena. C/ Doctor Fleming, s/n, 30202 Cartagena; juan.nicolas@upct.es
[2] Departamento de Expresión Gráfica. Universidad Politécnica de Cartagena. C/ Doctor Fleming, s/n, 30202 Cartagena; dolores.parras@upct.es
[3] Grupo de I+D+i Ingeniería Agromótica y del Mar. Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Ángel s/n Ed. ELDI, 30202 Cartagena, España; laura_14avila@uaz.edu.mx; manuel.ia@agrosolmen.es; josem.molina@upct.es
[4] Departamento de Tecnología Naval, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII 52, 30203 Cartagena, España; leandro.ruiz@upct.es

Resumen: Durante el desarrollo de varios prototipos lisímetros de pesada se requirió la necesidad de introducir en su diseño un depósito de muestreo del agua percolada para la extracción de muestras con el fin de ser analizadas. Asimismo, se estimó conveniente la incorporación de sensores en el depósito de muestreo que permitieran obtener directamente las características del agua drenada y su monitorización para la supervisión remota del cultivo. El principal inconveniente para su diseño fue resolver los recorridos en el espacio interior configurado por el recipiente de cultivo y el cajón exterior, y la separación de los flujos del agua drenada hacia el depósito de drenaje y el depósito de muestreo manteniendo la compacidad del sistema. Los prototipos de lisímetros de pesada más evolucionados permitieron, a través de dos salidas exteriores, recoger muestras del agua o introducir agua destilada para su limpieza, de forma independiente a la supervisión remota.

Palabras clave: balance de nutrientes, suelo

1. Introducción

Los lisímetros de pesada por sus características, porción de suelo aislado hidrológicamente del suelo circundante, permiten hacer una de las estimaciones más precisas del requerimiento hídrico del cultivo, conociendo las variables de entrada y de salida de agua [1-3]. Con esto puede ser logrado un riego eficiente, el cual es esencial para facilitar el consumo de nutrientes y el buen crecimiento del cultivo, ya que la planta transporta desde sus raíces hasta sus hojas los nutrientes por medio del agua para el consumo de ambos [4].

Estos dispositivos también permiten hacer un balance de nutrientes, diferencia de nutrientes que entran y salen en un determinado espacio y tiempo a nivel de la zona de raíces del cultivo [5], por medio de un monitoreo continuo del suelo. Además, esto es vital en cultivos sensibles a la salinidad para lograr una detección oportuna de la acumulación de sales en la zona de raíces y pueda ser reducida aplicando más agua de la que necesita el cultivo [4]. Otro factor a monitorear es el pH del suelo, que afecta en la disponibilidad de nutrientes para la planta, sustancias tóxicas, actividad de poblaciones microbianas, entre otros [6].

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3449

En la presente comunicación, se muestra la evolución del diseño del recipiente de muestreo en los lisímetros de pesada diseñados por el grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, destinados para uso en campo con cultivos hortícolas y sus adecuaciones para el análisis del agua drenada.

2. Materiales y métodos

En los diferentes modelos de lisímetros de pesada, diseñados por el Grupo de Investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar de la Universidad Politécnica de Cartagena, se fue viendo la necesidad de analizar el agua drenada por el sistema planta-suelo. En los dos primeros prototipos diseñados (LP-1 y LP-2) el agua drenada era expulsada directamente al subsuelo. En los posteriores diseños (LP-3, LP-4 y LP-5), ante la necesidad de obtener muestras del agua lixiviada para su posterior análisis, fue agregado un depósito de muestreo (Figura 1). El dimensionamiento de este depósito fue evolucionando en cada uno de los prototipos por motivos de optimización del lisímetro de pesada, tanto en tamaño como en disposición de sus componentes. El volumen de partida de este depósito fue aproximadamente de 5 litros, teniendo en cuenta para su dimensionamiento el volumen requerido para el análisis de agua para cada prueba y el volumen necesario para el funcionamiento de la bomba.

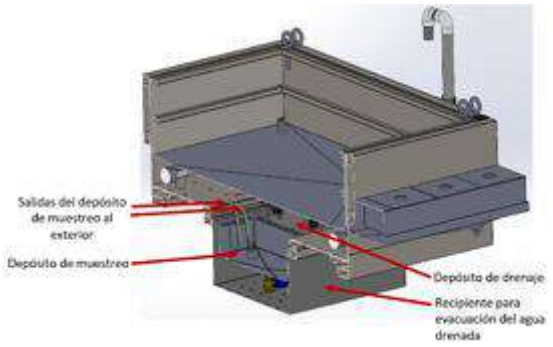


Figura 1. Sección de un lisímetro de pesada.

Al depósito de muestreo le fueron anexadas también dos sondas: una para el cálculo de la conductividad eléctrica, que sirve para medir el contenido de sales; y otra, para medir el pH en tiempo real del agua drenada. Conociendo ambos valores, es posible saber que tratamiento es necesario emplear para mejorar las propiedades químicas del suelo como, por ejemplo, aplicar materia orgánica para proteger el suelo contra cambios rápidos de acidez, alcalinidad y salinidad, y aplicación de cal en suelos ácidos para mantener un pH neutro, entre otros [4].

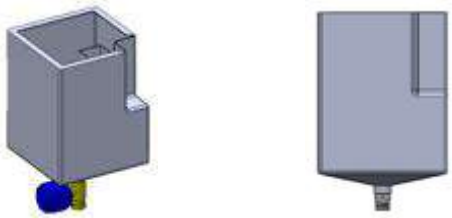
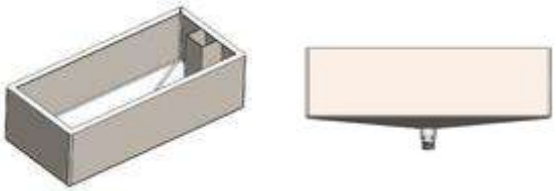
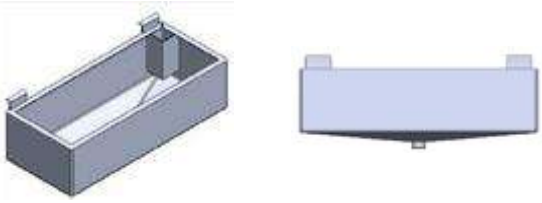
La adquisición de todos estos datos ayuda a obtener un balance de nutrientes por la diferencia de las entradas dadas por la cantidad de fertilizante o abonos orgánicos aplicados y su concentración de nutrientes, y las salidas obtenidas del análisis del agua almacenada en el depósito de muestreo.

Para el diseño del lisímetro de pesada y de cada uno de los componentes descritos se ha utilizado el programa de diseño asistido por ordenador SolidWorks 2016, tanto para el modelado 3D como para los análisis estructurales realizados necesarios para su validación.

3. Resultados y discusión

A continuación, se muestra la evolución del depósito de muestreo en los diferentes lisímetros de pesada diseñados, teniendo en cuenta que se introdujo este tipo de depósitos a partir del modelo LP-3 (Tabla 1). El volumen del depósito pasó de 5 a 6 litros en cada uno de los modelos, y la forma se fue adaptando a las distintas configuraciones que iba adoptando el lisímetro.

Tabla 1. Depósitos de muestro de los diferentes lisímetros de pesada.

Modelo	Diseño en 3D	Dimensiones
LP-3		160 X 160 X 200 mm
LP-4		160 X 350 X 100 mm
LP-5		160 X 379 X 100 mm

Los resultados de los análisis y simulaciones realizadas con SolidWorks Simulation indican que las deformaciones de cada uno de los recipientes no superan las holguras fijadas entre ellos bajo las diferentes situaciones de carga consideradas con relación al recipiente para evacuación del agua drenada donde se ubican (Figura 2). Para la construcción de los depósitos de muestreo se han utilizado chapas de acero inoxidable AISI 304 de espesor 2 mm.

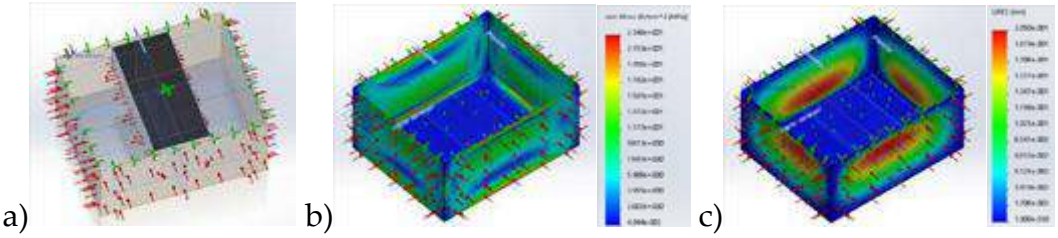


Figura 2. a) Cargas y condiciones de contorno consideradas sobre el recipiente para evacuación de agua drenada, b) Tensiones de Von Mises, y c) Desplazamientos [7].

La variante de la forma del depósito de muestreo es debido a la compactación que fueron sufriendo los diferentes lisímetros de pesada para mejorar su portabilidad. El principal inconveniente para su diseño fue resolver los recorridos en el espacio interior configurado por el recipiente de cultivo y el cajón exterior, y la separación de los flujos del agua drenada hacia el depósito de drenaje y el depósito de muestreo manteniendo la compacidad del sistema. La Figura 3, muestra el recorrido de la conducción del agua drenada hasta el depósito de muestras.

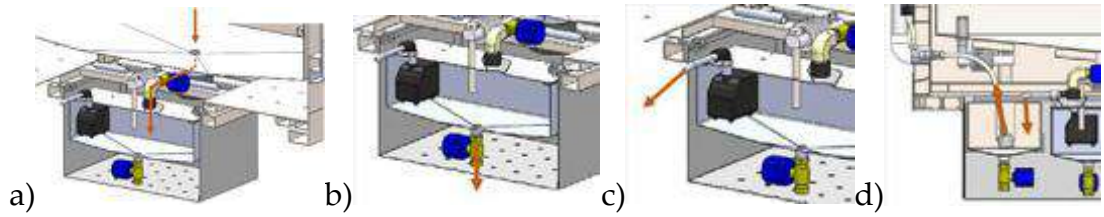


Figura 3. a) Agua lixiviada del recipiente de cultivo al depósito de drenaje, b) Evacuación directa del depósito de drenaje al recipiente para evacuación de agua drenada, c) Salida de agua del recipiente de drenaje a través de la bomba, y d) Entrada de agua del depósito de drenaje al depósito de muestreo y salida del agua para toma de muestras.

Las dimensiones del depósito de muestreo se tuvieron que adecuar: al espacio disponible, al volumen de muestreo necesario para realizar el análisis de nutrientes (pH y conductividad eléctrica), al volumen mínimo necesario para el funcionamiento de la bomba (para la extracción de muestras) y los sensores necesarios que se utilizan para análisis parciales in situ del agua drenada. A través de dos salidas exteriores, se recogen las muestras del agua o se introduce agua destilada para la limpieza del depósito de muestreo y no alterar el agua entre cada toma de muestra, de forma independiente a la supervisión remota. Además, cuenta con dos sensores de nivel, uno de ellos activa la electroválvula del depósito de drenaje para el llenado cuando se ha alcanzado el nivel de agua mínimo establecido y el otro sensor activa el vaciado del depósito de muestreo cuando se ha alcanzado el nivel máximo. En la Figura 4, se pueden apreciar estos detalles en uno de los prototipos fabricados e instalados en campo.



Figura 4. Depósito de muestreo con detalles instalado en campo.

4. Conclusiones

Los depósitos de muestreo que incluyen los lisímetros de pesada desarrollados en el grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar permiten hacer balances de los nutrientes actuales, por lo tanto, conocer el estado de aprovechamiento de consumo que tiene el cultivo. Ayudará a prevenir una baja productividad del cultivo o baja fertilidad del suelo debido a una disminución de nutrientes, y bajas eficiencias en el uso del fertilizante por el uso excesivo del mismo que puede ocasionar problemas ambientales. Además, de detectar problemas de salinidad y pH en el suelo por medio de sensores de conductividad eléctrica dentro del depósito de muestro. Gracias a la evolución que ha ido sufriendo este depósito en cada uno de los lisímetros de pesada diseñados se ha obtenido un modelo más optimizado y adecuado a las necesidades funcionales definidas en su proceso.

5. Agradecimientos

Al Proyecto de Investigación y Desarrollo con referencia IDI-20190146, titulado "Desarrollo e implantación de un equipo de ferticontrol por lisimetría de pesada para uso en agricultura intensiva", en colaboración con la empresa AGROSOLMEN, S.L., cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Operativo Plurirregional de España 2014-2020.

Referencias

1. Nicolás-Cuevas J.A., Parras-Burgos D., Ruiz-Peñalver L., Molina-Martínez J.M. Diseño y modelado gráfico 3D de un lisímetro de pesada de bajo coste. IX Congreso Ibérico de Agroingeniería. Braganca, Portugal, 4-6 septiembre 2017.
2. Parras-Burgos D., Nicolás-Cuevas J.A., Ruiz-Peñalver L., Molina-Martínez J.M. Evolución del diseño de prototipos de lisímetros de pesada enterrados para cultivos hortícolas. III Symposium Nacional y I Ibérico de Ingeniería Hortícola, 2018.
3. Vera-Repullo J.A., Ruiz-Peñalver L., Jiménez-Buendía M., Rosillo J.J., Molina-Martínez J.M. Software for the automatic control of irrigation using weighing-drainage lysimeters. Agricultural Water Management. 2015, 151, 4-12.
4. Ali M.H. Fundamentals of Irrigation and On-farm Water Management. 2010, 1. Springer.
5. García, Fernando. Balance de nutrientes y necesidades de fertilización del cultivo de trigo 1. 1ª Jornada de Trigo de la Región Centro Córdoba, Argentina, 30-31 marzo 2019, 1-7.
6. Ibarra-Castillo D., Ruiz-Corral J.A., González-Eguiarte D.R., Flores-Garnica J.G., Díaz-Padilla G.D. Distribución espacial de lo suelo agrícolas de Zapopan, Jalisco, México. Agri. Téc. Méx. 2009, 34 (3), 267-276.
7. Nicolás-Cuevas J.A., Parras-Burgos D., Ruiz-Peñalver L., Ruiz-Canales A. y Molina-Martínez J.M. Influencia de diferentes filtros y geotextiles en el proceso de infiltración del agua en un lisímetro de pesada compacto. III Symposium Nacional y I Ibérico de Ingeniería Hortícola, 2018.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Influencia de diferentes manejos ecológicos y de las rotaciones en el suelo, así como su repercusión en el control de malas hierbas y en el rendimiento del cultivo

M.I. González-Barragán[1], R. Rodrigo[1], I. Guerrero[1], J.F. Rodrigo[2]

[1] Esc. Univ. Ingeniería Agrícola INEA. Universidad Pontificia Comillas; isabel.gonzalez@inea.edu.es
[2] Colaboración independiente; juanfernandorodrigo@gmail.com

Resumen: La producción ecológica en extensivo está limitada por el difícil control de las malas hierbas y por unos menores rendimientos derivados principalmente de la no fertilización nitrogenada química. Por ello la investigación y experimentación en este campo debe de ser en este sentido conseguir un manejo en ecológico eficiente en la lucha con las arvenses y competitivo en el aporte de nutrientes naturales al cultivo. Los biofertilizantes son productos que tratan de favorecer a los microorganismos benéficos del suelo, en especial bacterias y/o hongos, que viven asociados o en simbiosis con las plantas y ayudan de manera natural a su nutrición y crecimiento, además de ser mejoradores de suelo. Para realizar este ensayo se diseñó un split-plot que fue implantado en la campaña 2017-2018 en una finca ecológica de Valladolid. Está formado por tres repeticiones, siendo el factor principal el tipo de manejo (5 tipos de bioestimulantes más testigo) y el subfactor la rotación de cultivos (4 rotaciones). El objetivo es valorar la influencia de los diferentes bioestimulantes y las distintas rotaciones en la evolución del suelo, en el control/aparición de vegetación adventicia y en la respuesta del cultivo. El ensayo está compuesto por setenta y dos parcelas elementales de 8,4 m (ancho) por 15m (largo) sobre las que se rotarán diferentes cultivos de secano (Trigo, Guisante, Avena, Lenteja, Garbanzo, Espelta, Veza, Cebada, Kamut, Centeno) y se aplicarán 5 bioestimulantes diferentes (dos de ellos con potasio, otro con hierro, un potenciador de la micorrización y un estimulador del enraizamiento, además del manejo testigo sin fertilización). Los muestreos se realizan en campo, en laboratorio y a través de teledetección con imágenes espectrales. Por ser primer año de ensayo no puede hablarse de resultados sino de observaciones para comenzar este estudio. Se han analizado datos referentes al suelo, cultivo y a la vegetación arvense, obteniéndose los siguientes resultados: -En cuanto a la evolución del suelo y al rendimiento del cultivo no se ha observado influencia del tratamiento sobre las parcelas testigo. Es lógico que sea así puesto que es el primer año del ensayo. -La vegetación arvense, por el contrario, sí mostró diferencias respecto al manejo y, por supuesto, al cultivo.

Palabras clave: Garbanzo, Trigo, Malas hierbas, Teledetección, Bioestimulantes.

1. Introducción

Cultivar en extensivo y en ecológico es muy complicado. Hay muchas variables que no se conocen. Por ello hay muy pocos agricultores que se aventuren a producir en ecológico y cuando lo hacen se encuentran con el problema de las malas hierbas. Con el proyecto se pretende obtener

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3701

conocimiento para que, combinando la rotación perfecta con la fertilización adecuada, conseguir buenas producciones.

Es momento de introducir cultivos nuevos (Espelta y Kamut) y evaluar su posibilidad real de cultivo en nuestras condiciones edafoclimáticas. Si sus resultados fueran positivos, el impacto en la agricultura sería muy importante, puesto que permitiría la diversificación de cultivos por un lado y por otro el poder trabajar con especies muy rústicas (característica requeridas por nuestro clima y por la agricultura ecológica).

Las técnicas de teledetección pueden aportar información de toda una superficie de cultivo. Relacionar las medidas de campo puntuales con las imágenes permite dar una mayor robustez a los resultados y conclusiones obtenidas durante la investigación. Pero para ello es necesario poner a punto una metodología para la utilización de imágenes de satélite en el seguimiento de los cultivos y la vegetación arvense.

La bioquímica foliar (en particular el contenido de clorofila) es clave en la productividad de la planta y desempeña un papel crucial en la fotosíntesis y en el funcionamiento de la planta [1]. Los datos de teledetección pueden proporcionar información específica del contenido en clorofila como aproximación al de nitrógeno (N) del cultivo para ayudar a los agricultores con información útil y precisa de sus cultivos [2,3]. Un ejemplo de aplicación, fue la utilización de imágenes de Sentinel-2 para predecir el rendimiento de patatas [4] en diferentes campos regados con pivot. En otra [5], integraron los datos de Sentinel-2 en un sistema continuo desarrollado para clasificar los tipos de cultivos y evaluar la producción agrícola.

Objetivos:

-Valorar la influencia de diferentes biofertilizantes y rotaciones en la evolución del suelo en agricultura ecológica así como en el control/aparición de vegetación adventicia y en la respuesta del cultivo.

-Puesta a punto de la metodología para la utilización de imágenes de satélite en el seguimiento de los cultivos y la vegetación arvense a nivel experimental.

2. Materiales y métodos

2.1. Localización y condiciones de clima y suelo

El ensayo se localiza en la finca ecológica INEA, a las afueras del término municipal de Valladolid, en la zona sur de la ciudad, a orillas del río Pisuerga.

Se trata de un clima mediterráneo, con pluviometría moderada-baja (400-500mm/año) con veranos secos, inviernos fríos y con una oscilación térmica acusada.

2.2. Diseño experimental

El diseño experimental es un split-plot. Formado por tres repeticiones, siendo el factor principal el fertilizante (5 más testigo) y el subfactor la rotación de cultivos (4 rotaciones).

El ensayo está compuesto por 72 parcelas elementales de 8,4 m (ancho) por 15 m (largo) sobre las que se rotarán diferentes cultivos y se aplicarán los diferentes manejos (fertilizantes bioestimulantes), divididas en 3 bloques (I, II y III), siendo cada uno de los cuales una repetición, tal y como se puede observar en la figura siguiente.

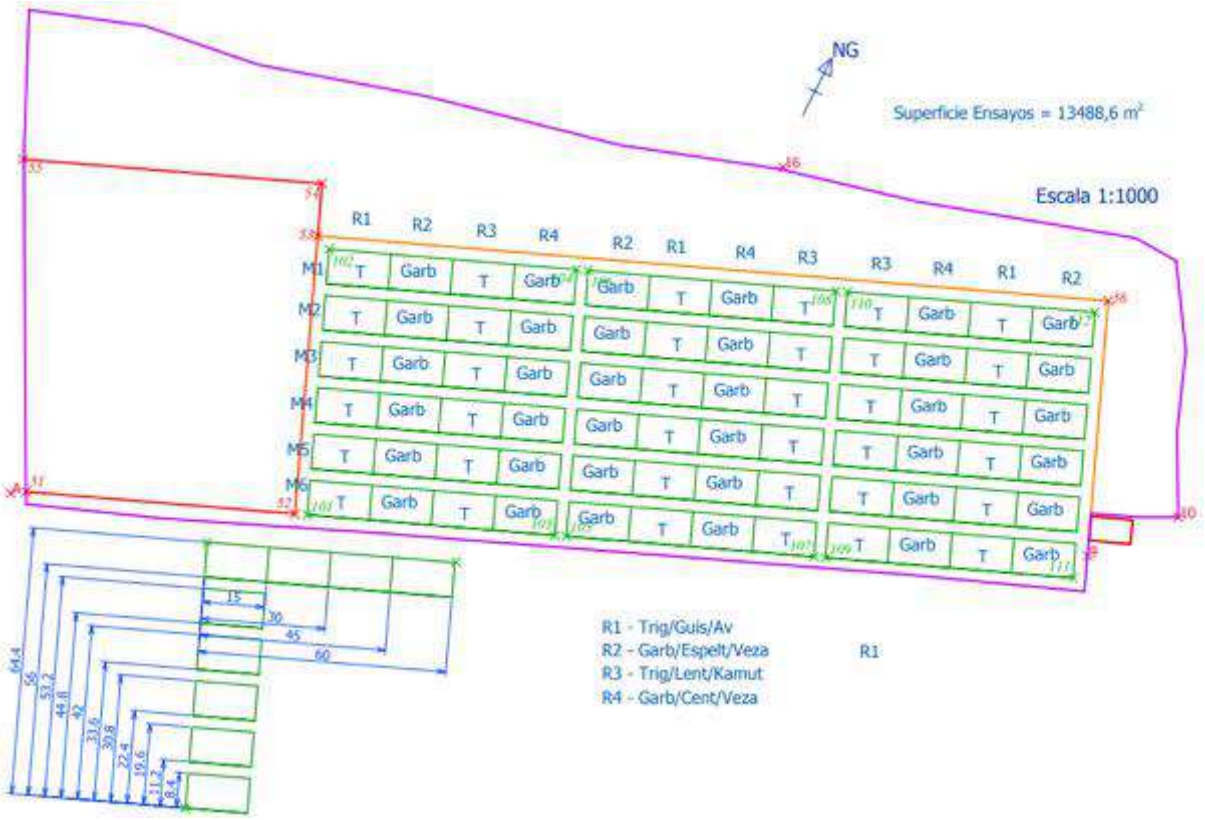


Figura 1. Esquema de las diferentes parcelas elementales del ensayo: Bioestimulantes: M1: abono inorg. potásico, M2: bioest. con K, M3: testigo, M4: potenciador de la micorrización, M5: estimulador del enraizamiento y M6: bioest. con Fe.Rotaciones: R1: Trigo/Guisante/Avena/Lenteja, R2: Garbanzo/Espelta/Veza/Cebada, R3: Trigo/Lenteja/Kamut/Guisante, R4: Garbanzo/Centeno/Veza/Kamut

Con el ensayo se trata de evaluar la influencia de diferentes tipos de bioestimulantes y distintas rotaciones en el control/aparición de vegetación adventicia y en la respuesta del cultivo.

Se ha diseñado con cultivos de secano para que su validez sea más amplia en la región.

2.3. Toma de datos

Para evaluar la evolución de los suelos se analiza en laboratorio una muestra de suelo de cada una de las microparcelas a 30 cm de profundidad en el momento inmediato a la cosecha.

La densidad de malas hierbas se ha medido con un marco de 1metro cuadrado lanzándolo de forma aleatoria dos veces en cada microparcelas y haciendo recuento del número de plantas de malas hierbas contenidas en él. Este conteo se ha realizado en los estados fenológicos de encañado, espigado y previo a la cosecha.

En cuanto al rendimiento del cultivo, se analizó en el momento de la cosecha tomando datos del peso por unidad de superficie, peso específico y humedad del grano.

2.4. Teledetección:

La misión Sentinel-2 es una misión de observación de la Tierra del programa europeo Copernicus y la Agencia Espacial Europea (ESA), en la que diferentes satélites de la misión (Sentinel-2A (2015) y Sentinel-2B (2017)) toman imágenes de la superficie de la Tierra en diferentes bandas espectrales y con una resolución temporal que se ha reducido al orden de, aproximadamente, 5 días, dependiendo de la latitud. Sentinel-2A lleva un instrumento multiespectral (MSI) y las imágenes proporcionadas por Sentinel-2A están disponibles

públicamente de forma gratuita. Tienen 13 bandas espectrales con una resolución espacial de 10m (dependiendo de la banda). Dichas resoluciones espaciales y temporales, y la disponibilidad de imágenes gratuitas, hacen que Sentinel 2 sea muy atractivo para el monitoreo de cultivos en el marco de la agricultura de precisión basada en mapas.

3. Resultados y discusión

Por ser el primer año de ensayo, tanto cultivo como suelo y banco de semillas conservan la inercia de los manejos anteriores. Se han recogido datos y se ha tratado estadísticamente para poder proporcionar los siguientes resultados.

Obviamente estos resultados no son válidos para poder obtener conclusiones ya que, se trata del primer año de ensayo y son necesarias más campañas para poder obtener conclusiones significativas.

Respecto a la evolución del suelo, como era predecible, en un solo años de aplicación de biofertilizantes no se han observado diferencias entre los diferentes tratamientos. Esta característica se irá midiendo a lo largo de las diferentes campañas y contrastando con esta primera.

3.1. Rendimiento del cultivo

Se realizó un análisis estadístico de los resultados obtenidos en la cosecha sobre: peso en campo, peso específico y humedad del grano. Se hicieron análisis de varianza Anova y separación de medias aplicando el test de Duncan utilizando niveles de significación de 0,05.

Se observó que el tipo de bioestimulante no influyó en los parámetros medidos en la cosecha del garbanzo, sin embargo, sí que lo hizo en el peso específico del trigo. En este caso los manejos M1, M2 y M6, no difirieron del testigo (M3) pero tuvieron un peso específico significativamente mayor que los bioestimulantes M4 y M5.

Tabla 1. Características en cosecha. Separación de medias para los cultivos ensayados.

	Peso	Humedad	Peso específico		Peso	Humedad	Peso específico
Garbanzo				*Trigo*			
M1	A	A	A	M1	A	A	A
M2	A	A	A	M2	A	A	A
M3	A	A	A	M3	A	A	AB
M4	A	A	A	M4	A	A	B
M5	A	A	A	M5	A	A	B
M6	A	A	A	M6	A	A	A

Las Distintas letras dentro de una misma variable son significativamente diferentes para α=0,05 (Duncan).

No obstante, no hay que olvidar que estos resultados pertenecen a un primer año de ensayo, que hay que contrastar con resultados de campañas posteriores.

3.2. Arvenses

Se analiza estadísticamente mediante ANOVA de dos factores, la diferencia de densidad aparente de plantas silvestres en las parcelas considerando, tanto que han sido sometidas a distintos tratamientos de fertilización, como los dos cultivos que se han sembrado. Para este análisis, se han asignado 5 niveles de densidad creciente de plantas silvestres por conteo directo en las parcelas.

El conteo de malas hierbas se ha realizado en los estados fenológicos de encañado, espigado y previo a la cosecha obteniéndose en los tres casos idéntica separación de medias.

Al considerar ambos factores, se observan diferencias significativas entre las parcelas, tanto en función del cultivo, como del tratamiento de fertilización. La significación en el caso del factor cultivo es un resultado esperable, teniendo en cuenta las diferentes capacidades de competencia de ambos cultivos, que crean condiciones diferentes para la proliferación de malas hierbas, siendo estas más abundantes en el cultivo del garbanzo.

En el caso de los tratamientos de fertilización, la significación parece deberse principalmente al aumento en densidad de arvenses en las parcelas con tratamiento 4 en los dos cultivos. La interacción entre ambos factores arrojó un resultado no significativo.

Tabla 2. Densidad de malas hierbas. Separación de medias según rotación y fertilización utilizada.

	Densidad malas hierbas		Densidad malas hierbas
Rotación		*Bioestimulantes*	
R1	B	M1	B
R2	A	M2	B
R3	B	M3	B
R4	A	M4	A
		M5	B
		M6	B

Las Distintas letras dentro de una misma variable son significativamente diferentes para α=0,05 (Duncan).



Figura 2. Malas hierbas en ensayos de trigo y garbanzo

3.3. Desarrollo de la metodología para seguimiento vegetativo de las parcelas de ensayo:

Sin duda, el resultado más importante de este primer año de ensayo, ha sido la puesta a punto de la metodología para la utilización de imágenes de satélite en el seguimiento de los cultivos y la vegetación arvense.

En este primer año de proyecto se está estableciendo la metodología de trabajo que implemente al tratamiento estadístico de los datos estudiados (análisis de suelos y foliares), las imágenes de satélite de Sentinel 2A, de las que se extrae información de vigor, y correlacionar los índices de vigor con el rendimiento real para propósitos de predicción.

Tener mapas de vigor con cierta frecuencia le daría al agricultor o asesor la oportunidad de seguir el desarrollo del cultivo, tomar decisiones de manejo (es decir, riego, fertilización y protección del cultivo), tener una retroalimentación de las operaciones realizadas y predecir los rendimientos. Eso será abordado en trabajos futuros.

Adquisición y procesamiento de datos multiespectrales.

Para este trabajo preliminar, solo se usaron 4 bandas de 10 m de resolución: azul (490 nm), verde (560 nm), rojo (665 nm) y NIR (842 nm). A partir de las bandas de reflectancia BOA (parte inferior de la atmósfera) visibles e infrarrojas, se calcula el índice de vegetación NDVI que da cuenta del vigor de un cultivo:

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{Red}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{Red}}$$

Se descargaron todas las imágenes de Sentinel 2 desde la siembra hasta la cosecha del área de estudio. Tras realizar un visionado y discriminar aquellas que estaban afectadas de nubosidad, y por lo tanto invalidadas para realizar un óptimo seguimiento de los ensayos, quedando así un total de 24 días con imágenes válidas, entre el 1 de octubre de 2017 hasta el 1 de octubre de 2018.

En la siguiente imagen se muestra toda la información de la que disponemos una vez calculado el índice NDVI para cada día válido, libre de nubes, de nuestra zona de estudio. Con una paleta de colores podemos elegir la combinación de colores con la que realizar un mejor visionado de la evolución del NDVI.

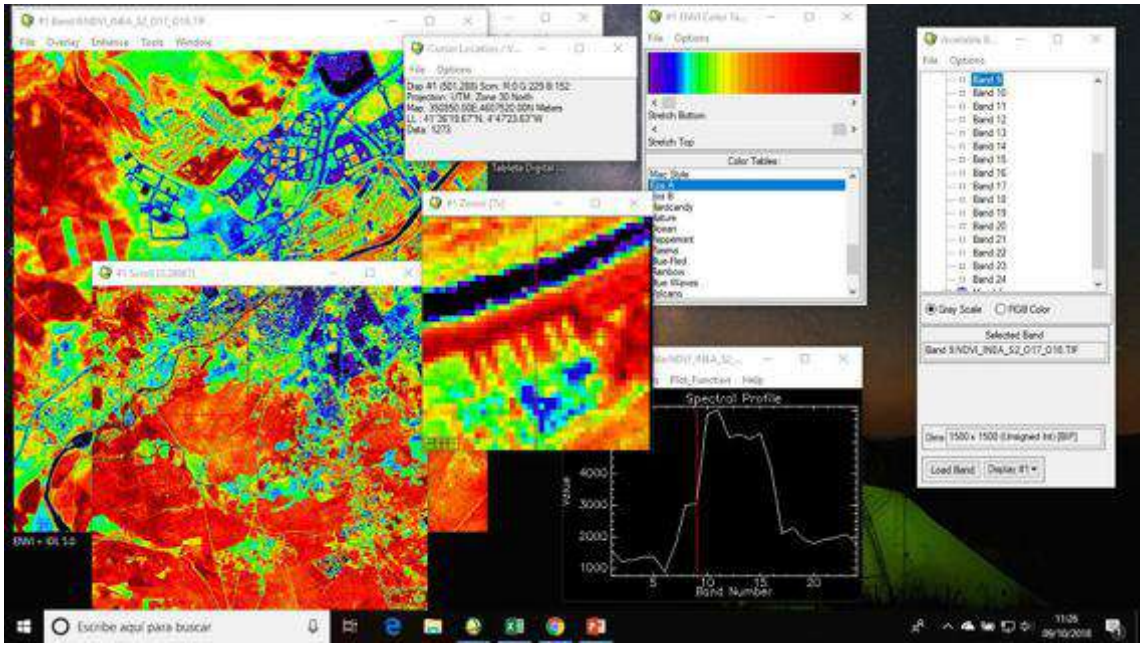


Figura 4. Análisis de imágenes de satélite.

A cada imagen de NDVI de cada día válido (con una imagen zoom y scroll del área de estudio), hay que añadir, una gráfica que da la evolución del NDVI de cada pixel (10x10 m) a lo largo de todos los días (en nuestro caso 24 días). Además, cada imagen ofrece la posibilidad de obtener las coordenadas geográficas de cada punto, así como el valor específico de NDVI en cada pixel.

En este primer año de ensayos se está realizando un visionado manual de las imágenes de vigor día a día y se compara con el resto de datos. Al mismo tiempo se está elaborando un procedimiento automático que recoja en una hoja de cálculo todos los datos de los que se dispone para cada ensayo (conteo de arvenses, análisis en laboratorio de foliares y suelo e índice NDVI) y que un algoritmo específico permita comparar los resultados obtenidos en cada parcela del ensayo en los próximos años de manera automática, comparando los diferentes tratamientos en ecológico y las rotaciones de suelo con el fin de distinguir la mejor combinación si lo hubiera.

4. Conclusiones

Por ser la primera anualidad del ensayo no puede hablarse aun de conclusiones. Simplemente es importante dejar registradas las primeras observaciones y resultados (comentados en el apartado anterior) para contrastarlas con las de las siguientes campañas.

Referencias

1. Houborg, R., Fisher, J.B., Skidmore, A.K. Advances in remote sensing og vegetation function traits. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2015, 43, 1-6.
2. Van Evert, F.K., Booji, R., Jukema, J.N., ten Berge, H.F.M., Uenk, D., Meurs, E.J.J.B., van Geel, W.C.A., Wijnholds, K.H., Slabbekoorn, J.J.H. Using crop reflectance to determine sidedress N rate in potato saves N and maintains yield. Eur. J. Agron. 2012, 43, 58-67
3. Elarab, M., Ticlavilca, A.M., Torres-Rua, A.F., Maslova, I., McKee, M. Estimating chlorophyll with termal and broadband multispectral high resolution imagery from an unmanned aerial system using relevance vector machines for precisiónagricultura. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2015, 43, 32-42.
4. Al-Gaadi, K.A., Hassaballa, A.A., Tola, E., Kayad, A.G., Madugundu, R., Alblewi, B., et al. 2016. Prediction of potato crop yield using precisiónagricultura techniques. PlOS ONE 11 (9).
5. Klug, P., Schlenz, F., Hank, T., Migdall, S., Weib, I., Danner, M. et al. 2016. Implementation of Sentinel-2ª data in the M4Land system for the generation of continuous informationproducts in agricultura. In. Living PlanetSyposium. SP:-740. EuropeanSpace Agency.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Modelação da rega deficitária em vinha com o MOHID-Land

L. Simionesei[1], T.B. Ramos[1], Ana R. Oliveira[1], N. Grosso[2], D. Petit[3], R. Neves[1]

[1] MARETEC, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal; lucian.simionesei@tecnico.ulisboa.pt
[2] DEIMOS Engenharia SA, Avenida Dom João II, Nº 41, 10, 1998-023 Lisboa.
[3] DEIMOS Space UK Ltd., Building R103, Fermi Ave OX11 0QR, Reino Unido.

Resumo: A modelação do balanço de água no solo desempenha hoje um papel fundamental ao nível da otimização das práticas de rega, ajudando a definir, com rigor, os calendários de rega em função das necessidades hídricas das culturas, das propriedades hidráulicas do solo e das características dos equipamentos. No entanto, para tal, é necessário que o modelo seja previamente calibrado e validado para que as suas previsões sejam confiáveis. Este trabalho tem como objectivo simular a dinâmica da água do solo numa vinha regada na região do Ribatejo, sul de Portugal. Durante dois anos (2017-2018), procedeu-se à monitorização das dotações aplicadas, do teor de água no solo a diferentes profundidades até 0.80 m e do desenvolvimento vegetativo da vinha a partir de imagens de satélite. A calibração/validação das simulações do teor de água no solo produziram uma raiz do quadrado médio dos resíduos entre 0.029 e 0.033 m^3 m^{-3} e uma eficiência do modelo entre 0.425 e 0.706. O desempenho do MOHID-Land foi considerado, portanto, bastante aceitável, servindo este trabalho de referência ao sistema de apoio à decisão IrrigaSys, que serve diversos regantes na região, com recomendações semanais de quanto e quando regar.

Palavras-chave: Teor de água no solo, modelação, deteção remota, gestão da rega.

1. Introdução

Outrora considerada uma cultura de sequeiro, a rega da vinha é hoje indispensável para colmatar as necessidades hídricas das plantas, nomeadamente nas suas fases mais sensíveis, como são os períodos de pré-maturação e maturação da uva, com melhoria acrescida na quantidade e qualidade da uva produzida [1]. Na condução da rega são geralmente adotadas estratégias deficitárias tendo em conta a maior tolerância de determinadas fases do desenvolvimento da cultura ao stress hídrico, promovendo o desenvolvimento de um maior número de frutos bem como dos seus teores de açúcar e compostos fenólicos, mas que dependem fundamentalmente das características do produto a atingir [2].

Por outro lado, uma gestão eficiente da rega requer a monitorização detalhada do balanço da água do solo. Os modelos mecanísticos como o MOHID-Land [3] são hoje usados em diversos sistemas de apoio à decisão à rega [4, 5], complementado a informação dada pelos sensores de humidade, com o objectivo de aumentar a eficiência do uso da água. Porém, estes modelos são mais complexos que os modelos semi-empíricos usados tradicionalmente na gestão da rega, sendo dinâmica da água no solo descrita através da equação de Richards. É fundamental, portanto, o conhecimento detalhado das propriedades hidráulicas do solo, nomeadamente, a curva de retenção de água no solo ($\theta(h)$) e a curva da condutividade hidráulica ($K(h)$), o que nem sempre é possível. Por essa razão, é imperativo que estes modelos

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3373

sejam sujeitos previamente a um processo de calibração e validação para que as suas previsões sejam confiáveis.

Neste trabalho, descreve-se uma aplicação do modelo MOHID-Land para o cálculo do balanço de água no solo de uma vinha regada na região do Ribatejo. Os resultados do processo de calibração serão depois usados no sistema IrrigaSys [5] para apoio à rega na vinha, na região.

2. Materiais e métodos

2.1. Descrição da área de estudo

Este estudo foi realizado na vinha da Adega do Catapereiro, Companhia das Lezírias, Samora Correia, Portugal (38.808044º N, 8.899858º W) entre Janeiro de 2017 e Outubro de 2018. O clima na região está classificado como sub-húmido seco, com verões quentes e secos e invernos suaves com chuvas irregulares. A temperatura média anual é de 16.8°C, enquanto que a precipitação média anual chega aos 669 mm, concentrada sobretudo entre os meses de Outubro e Abril. O solo está classificado como Fluvisolo Háplico [6], de textura franco-arenosa.

A parcela objeto de estudo, a "vinha do mel", ocupa cerca de 14 ha num total de 130 ha cobertos por vinha. A "vinha do mel" apresenta um compasso de 2.8 m na entrelinha por 1.0 m na linha, sendo regada por um sistema gota-a-gota. As práticas de gestão, incluindo a fertilização e a rega, foram realizadas de acordo com as práticas seguidas pela Companhia das Lezírias. Durante 2017, a dotação de rega aplicada totalizou 358 mm, enquanto que a precipitação líquida perfez 527 mm. Durante 2018, a dotação de rega somou 242 mm, enquanto que a precipitação líquida chegou aos 370 mm. A dotação aplicada por evento de rega variou entre os 3 e os 5 mm.

O teor de água no solo foi medido continuamente, às profundidades de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 cm, através de duas sondas de capacitância EnviroPro MT (MAIT Industries, Austrália). A dotação aplicada em cada evento foi monitorizada com um caudalímetro instalado no tubo de rega. A informação meteorológica foi obtida a partir da estação da Figueirinha localizada nas proximidades e incluiu os valores horários da precipitação (mm), temperatura do ar (ºC), radiação global (W m^{-2}), humidade relativa (%) e velocidade do vento (m s^{-1}). O índice de área foliar (LAI, m^2 m^{-2}) foi monitorizado a partir de imagens do satélite Landsat 8. Em 2017, foram extraídas 16 imagens entre os meses de Janeiro e Novembro em que a cobertura com nuvens era inferior a 10%. Em 2018, foram apenas extraídas 10 imagens. Os valores de reflectância de cada imagem foram primeiramente corrigidos para eliminação do efeito da atmosfera e em função do ângulo solar. O LAI foi depois obtido através da seguinte função [7]:

$$\mathrm{LAI} = -\frac{1}{a_2}\ln\left(\frac{a_0 - \mathrm{SAVI}}{a_1}\right) \quad (1)$$

onde SAVI corresponde ao "Soil Adjusted Vegetation Index" dado por:

$$\mathrm{SAVI} = \frac{(\rho_{850} - \rho_{650}) * 1.5}{\rho_{850} + \rho_{650} + 0.5} \quad (2)$$

e a_0=0.82, a_1=0.82, a_2=0.6 são parâmetros empíricos.

2.2. O Modelo MOHID-Land

O MOHID-Land é um modelo físico, distribuído, onde os fluxos de água em condições não saturadas são calculados, usando um método de volumes finitos, através da equação de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial z} - K(h)\right] - S(z,t) \quad (3)$$

em que θ é o teor volumétrico de água no solo (L^3 L^{-3}), t é o tempo (T), z é a coordenada espacial vertical (L), h é a pressão efectiva de água no solo (L), K é a condutividade hidráulica (L T^{-1}) e S é o termo usado para contabilizar a água do solo extraída pelas raízes das plantas (L^3 L^{-3} T^{-1}). As

propriedades hidráulicas do solo, necessárias à resolução da equação anterior, são descritas pelas equações de Mualem-van Genuchten [8]:

$$S_e(h) = \frac{\theta(h)-\theta_r}{\theta_s-\theta_r} = \frac{1}{(1+|\alpha h|^{\eta})^{m}} \quad (4)$$

$$K(h) = K_s S_e^{\ell}\left[1-\left(1-S_e^{1/m}\right)^{m}\right]^{2} \quad (5)$$

em que S_e é a saturação efectiva ($L^3\ L^{-3}$), θ_r e θ_s correspondem ao teor de água residual e na saturação, respectivamente ($L^3\ L^{-3}$), α (L^{-1}) e η (-) são parâmetros empíricos, m=1–1/η, e ℓ é um parâmetro empírico relacionado com a conectividade/tortuosidade do meio poroso.

O termo S, introduzido na Eq. (1) para contabilizar a extracção de água do solo pelas raízes das plantas, é calculado segundo uma abordagem macroscópica [9], em que a transpiração potencial (T_p, $L\ T^{-1}$) é distribuída linearmente pela zona radical através da função $T_P(z)$ e pode ser diminuída pela ocorrência de condições de stress, nomeadamente o stress hídrico. Para tal, a evapotranspiração cultural (ET_c, $L\ T^{-1}$) é primeiro obtida pelo produto da evapotranspiração de referência (ET_o, $L\ T^{-1}$) e o respetivo coeficiente cultural (K_c) [10] e depois fracionada em T_P e evaporação potencial (E_p, $L\ T^{-1}$) em função do LAI [11]:

$$T_p = ET_c\left(1-e^{(-\lambda LAI)}\right) \quad (6)$$

$$E_p = ET_c - T_p \quad (7)$$

em que λ é o coeficiente de extinção da atenuação da radiação dentro da canópia das plantas (-). A transpiração real (T_a, $L\ T^{-1}$) é obtida através da integração da função $T_P(z)$ e limitada, de acordo com o modelo proposto por Feddes et al. [9], pela resposta da planta a diferentes condições de h. Este modelo considera que a extração de água pelas plantas iguala as condições potenciais entre as pressões efetivas h_2 e h_3, decrescendo linearmente quando $h>h_2$ e $h<h_3$ ou tornando-se nula quando $h<h_4$ ou $h>h_1$ (números subscritos de 1 a 4 correspondem a diferentes limites de pressão efectiva de água no solo). Já a evaporação real (E_a, $L\ T^{-1}$) é obtida através da limitação da E_P a um determinado potencial mátrico [12].

O LAI evolui ao longo do ciclo da cultura e depende das unidades de calor necessárias para a planta atingir a maturidade (PHU) e das condições de stress a que as plantas estão sujeitas [13]. Durante as fases iniciais de desenvolvimento da cultura (fase inicial e fase de desenvolvimento rápido), o aumento diário do LAI é função da fração do LAI máximo da planta (LAI_{max}, $m^2\ m^{-2}$) que, em condições potenciais, será atingida durante essa fase ($frLAI_{max,\ ini}$) e das condições de stress. Durante a fase média de desenvolvimento, o LAI é considerado constante, enquanto que na fase de senescência, o LAI diminui em função do LAI_{max}, das PHU e do stress da cultura.

2.3. Implementação, calibração e validação do modelo

A simulação decorreu de Janeiro de 2017 a Outubro de 2018. O perfil do solo foi definido com 2 m de profundidade, dividido em 2 camadas de solo de acordo com os limites apresentados na Tabela 1. O domínio da simulação foi representado por uma coluna vertical discretizada em 20 células, cada uma dela com 1 m de largura, 1 m de comprimento e espessura variável (0.05 m na célula superior a 0.3 m na inferior). A condição de fronteira superior foi definida pela E_P e T_P e pelos fluxos de rega e precipitação. Os valores de ET_c foram calculados através do produto dos valores da ET_o pelos respectivos K_c em cada fase de desenvolvimento da cultura. Foram assim considerados valores de K_c de 0.3, 0.7 e 0.45 para as fases inicial, média e final do desenvolvimento da cultura, respectivamente. Estes valores foram retirados de Allen et al. [10] e correspondem aos valores padrão de K_c para a vinha nas regiões de clima Mediterrânico. O valor K_c para a fase inicial foi depois ajustado para a frequência dos eventos de precipitação e dotação da rega, enquanto os valores de K_c para as fases média e final da cultura foram ajustados para as condições climatéricas locais (velocidade do vento e humidade relativa médias) e altura das plantas [10]. A

condição de fronteira inferior foi definida como drenagem livre. As reduções na extração de água pelas raízes foram calculadas considerando os seguintes parâmetros: h_1 = -10, h_2 = -25, h_3 = -1000, h_4 = -18000 cm [14].

Tabela 1. Parâmetros hidráulicos do solo.

Profundidade (m)	**0-0.25**	**0.25-0.45**
Teor de água residual θ_r ($m^3\ m^{-3}$)	0.065	0.065
Teor de água na saturação θ_s ($m^3\ m^{-3}$)	0.500	0.450
Parâmetro empírico α (m^{-1})	38	25
Parâmetro empírico η (-)	1.35	1.35
Parâmetro da conectividade/tortuosidade do meio poroso ℓ (-)	-1	-1
Condutividade hidráulica saturada K_s ($m\ s^{-1}$)	$8.23E^{-05}$	$3.23E^{-05}$

A calibração e validação do modelo foram realizadas durante os anos de 2017 e 2018, respectivamente, seguindo o procedimento descrito em Ramos et al. [4] As propriedades hidráulicas do solo (Tabela 1) e os parâmetros da cultura (Tabela 2) foram assim ajustados por tentativa e erro de modo a diminuir os desvios entre as simulações do modelo e os valores observados do teor de água no solo e LAI. Primeiro, os parâmetros hidráulicos do solo foram definidos de acordo com os valores médios propostos por Carsel e Parish [15] para cada classe de textura do solo. Os parâmetros θ_s, α, η e K_s foram então modificados de modo a reduzir o desvio entre os teores de água no solo observados e os simulados. O parâmetro θ_r não foi modificado dada a sua pouca influência nas simulações do teor de água no solo. O parâmetro ℓ foi definido como -1.0, conforme o proposto por Schaap & Leij [16]. Os parâmetros da cultura foram, em seguida, ajustados, a partir dos valores padrão do modelo para a vinha [13], até que o desvio entre os LAI simulados e os obtidos por deteção remota fosse minimizado. Os parâmetros calibrados foram então validados durante o ano de 2018.

Tabela 2. Parâmetros do desenvolvimento da cultura.

Parâmetro	**Valor**
Temperatura ótima para o crescimento das plantas, T_{opt} (ºC)	20.0
Temperatura mínima para o crescimento das plantas, T_{base} (ºC)	11.0
Eficiência do uso da radiação da cultura, RUE [(kg ha^{-1}) (MJ m^{-2})$^{-1}$]	30
Unidades de calor totais para a planta atingir a maturidade, PHU (ºC)	2800
Fração das PHU no fim da fase 1 (fase inicial da cultura), $fr_{PHU,init}$ (-)	0.05
Fração das PHU no fim da fase 2 (fase de crescimento rápido), $fr_{PHU,dev}$ (-)	0.10
Fração das PHU para o ínicio do declínio do LAI, $fr_{PHU,sen}$ (-)	0.20
Índice de Área Foliar máximo, LAI_{max} ($m^2\ m^{-2}$)	1.1
Índice de Área Foliar na fase de dormência, LAI_{dorm} ($m^2\ m^{-2}$)	0.5
Fração do LAI_{max} no fim da fase 1 (fase inicial da cultura), $fr_{LAImax,ini}$ (-)	0.35
Fração do LAI_{max} no fim da fase 2 (fase de crescimento rápido), $fr_{LAImax,dev}$ (-)	0.55
Altura da planta máxima, $h_{c,max}$ (m)	1.5
Profundidade máxima das raízes, $Z_{root,max}$ (m)	0.8
Coeficiente de radiação líquida (-)	0.463
Coeficiente de radiação fotossinteticamente ativa (-)	0.650

2.4. Indicadores estatísticos

Os indicadores estatísticos adotados para comparar os resultados das simulações do MOHID-Land com os valores observados do teor de água no solo e LAI foram: o erro médio (EM); a raiz do quadrado médio dos resíduos (RMSE); a RMSE normalizada (NRMSE); e a

eficiência do modelo (EF). Os valores de ME próximos de zero indicam ausência de desvio. Os valores de RMSE e NRMSE próximos de zero indicam pequenos erros de estimativa e boas previsões de modelos [17, 18]. Valores de EF próximos de um indicam que a variância dos resíduos é muito menor do que a variância dos dados observados, portanto, as previsões do modelo são boas. Pelo contrário, quando a EF está muito próxima de zero ou negativa, não há ganho no uso do modelo [19].

3. Resultados e discussão

3.1. Teor de água no solo

A Figura 1 apresenta as medições do teor de água no solo às profundidades entre os 10 e os 80 cm e compara esses valores com as simulações do modelo MOHID-Land durante os anos de 2017 e 2018. Os eventos de precipitação, mais do que a rega, provocaram geralmente um rápido aumento do teor de água no solo nas camadas superficiais, diminuindo depois gradualmente devido à redistribuição da água, à extracção de água pelas plantas e à evaporação do solo. Nas camadas mais profundas, o efeito da rega também foi pouco notório, com os teores de água no solo a variarem pouco e sobretudo com a precipitação, mas menos que nas camadas mais à superfície.

A Tabela 3 apresenta os indicadores estatísticos obtidos após a comparação dos valores medidos e simulados pelo modelo. Durante a calibração (2017), o erro das estimativas foi relativamente pequeno, produzindo um RMSE de 0.033 m^3 m^{-3} e um NRMSE de 0.016. O modelo sobrestimou os valores observados em 11.25%, enquanto que a EF foi aceitável (0.425). Para o período de validação (2018), os erros das estimativas mantiveram-se na mesma ordem de grandeza dos obtidos durante a calibração do modelo (RMSE = 0.029 m^3 m^{-3}; NRMSE = 0.012), o modelo subestimou os dados observados em 3.25%, enquanto que a EF aumentou consideravelmente (EF = 0.706). Considerou-se, assim, que o modelo MOHID-Land conseguiu reproduzir com sucesso os valores do teor de água no solo observados na rega da vinha durante dois anos, apresentando indicadores estatísticos semelhantes aos obtidos noutras aplicações do mesmo género [4, 20, 21].

Tabela 3. Indicadores estatísticos durante a calibração (2017) e validação (2018) do modelo.

Indicador	Teor de água no solo		Índice de Área Foliar	
	2017	**2018**	**2017**	**2018**
R^2	0.800	0.853	0.846	0.896
RMSE	0.033	0.029	0.139	0.125
NRMSE	0.016	0.012	0.206	0.210
PBIAS (%)	-11.25	3.25	-4.22	7.10
NSE	0.425	0.706	0.365	0.602

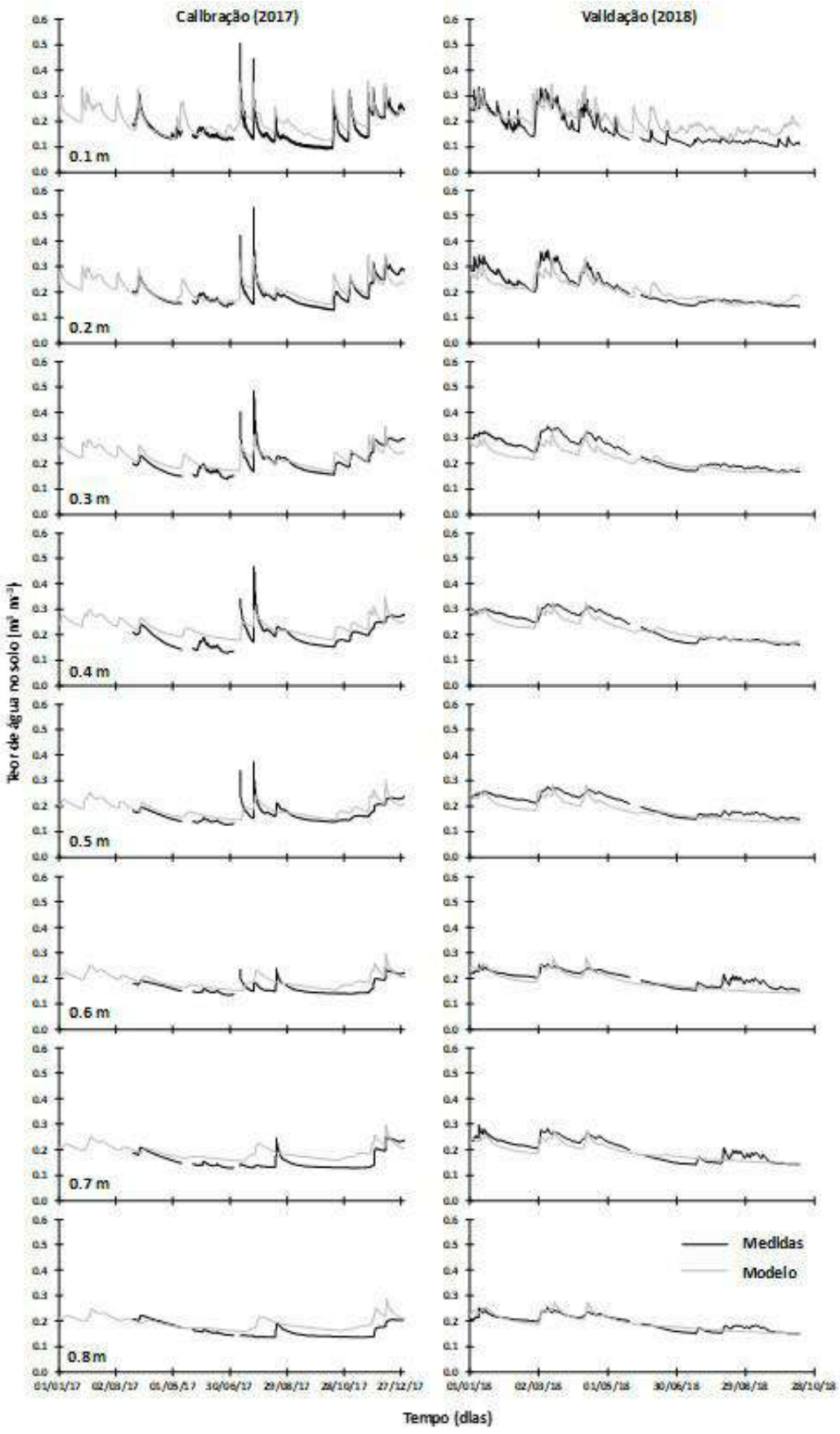


Figura 1. Evolução do teor de água no solo.

3.2. Evolução do índice de área foliar

No modelo MOHID-Land, a partição da ET_c em T_p e E_p é feita em função do LAI, pelo que a sua avaliação deve ser o mais correta possível para garantir que as estimativas do balanço de água no solo sejam confiáveis. Segundo os valores derivados a partir das imagens de satélite, o LAI da cultura começou a aumentar a partir de Março/Abril, atingindo um máximo de cerca de 1.0-1.2 m^2 m^{-2} no final de Maio, princípio de Junho. A partir daí, os valores de LAI desceram gradualmente até à perda total das folhas em Outubro/Novembro. Durante a calibração (2017), o RMSE e o NRMSE obtidos por comparação dos valores simulados com os obtidos por deteção remota foram de 0.139 m^2 m^{-2} e 0.206, respectivamente (Tabela 3). O modelo sobrestimou o LAI em 4.22%, enquanto a EF foi de 0.365. Durante a validação (2018), o RMSE foi de 0.125 m^2 m^{-2}, o NRMSE foi de 0.210, o PBIAS foi de 7.098% revelando alguma subestimação dos valores obtidos por deteção remota e a EF foi de 0.602. O ajustamento do modelo foi, portanto, aceitável, embora os indicadores estatísticos sejam inferiores ao obtidos por Ramos et al. [4, 20] para a cultura do milho. Neste caso, os valores de LAI foram medidos diretamente no campo e não derivados das imagens de satélite, o que poderá justificar o pior ajustamento aqui conseguido.

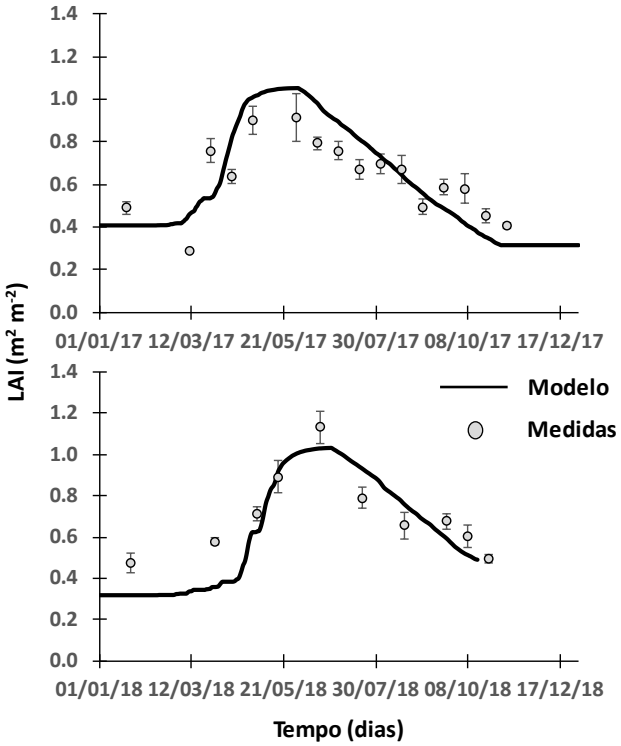


Figura 2. Evolução do Índice de Área Foliar (LAI).

3.3. Balanço de água no solo

A Tabela 4 apresenta o balanço hídrico para 2017 e 2018, anos em que a T_a somou 166 e 112 mm, respectivamente. O stress hídrico, dado por $1 - T_a/T_p$, variou entre 5 e 8% durante os meses de rega (Abril a Outubro), tratando-se portanto de um défice imposto bastante moderado. Por outro lado, os valores de E_a totalizaram 453 e 295 mm durante os anos de 2017 e 2018, respectivamente. Estes valores podem ser considerados como bastante altos, sendo em parte explicados pelo facto de que a evaporação do solo pode representar uma fração importante da ET_c nas culturas permanentes, onde uma grande fração da superfície do solo é exposta à radiação solar [22, 23]. Por outro lado, no MOHID-Land, a E_a é calculada a partir de uma pressão limite de água no solo, imposta aos valores de E_p. Trata-se, portanto, de uma versão

simplificada, baseada no método de duas fases, usado por Allen et al. [10] para o cálculo da E_a, o que poderá também dar origem a alguma sobrestimação desta componente do balanço hídrico. A Tabela 4 apresenta também valores bastante elevados de percolação, totalizando 287 e 330 mm, respectivamente, obtidos fundamentalmente durante os períodos que sucederam aos eventos de precipitação.

Tabela 4. Balanço de água no solo.

Componentes (mm)	2017	2018
Entradas:		
Precipitação	527	370
Rega	358	242
Ascensão capilar	0	0
Δ armazenamento	21	125
Saídas:		
Escoamento Superficial	0	0
Evaporação real	453	295
Transpiração real	166	112
Percolação	287	330

4. Conclusões

O modelo MOHID-Land consegui reproduzir com sucesso os valores medidos do teor de água no solo ao longo dos anos de 2017 e 2018. Os valores reais da transpiração na vinha variaram entre 112 e 166 mm, com a rega aplicada a induzir um stress hídrico entre 5 e 8%. Já os valores da evaporação real totalizaram 453 e 295 mm nos anos de 2017 e 2018, podendo estar algo sobrestimados dada a formulação simplificada do modelo no cálculo deste parâmetro. No entanto, no geral, o desempenho do MOHID-Land na modelação da dinâmica da água no solo numa cultura permanente como a vinha pode ser considerado bastante aceitável, servindo este trabalho de referência ao sistema de apoio à decisão IrrigaSys, que serve diversos regantes na região, com recomendações semanais de quanto e quando regar.

5. Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do Projecto WATER4EVER "Optimizing water use in agriculture to preserve soil and water resources" (WaterJPI/0010/2016), financiado pela Water Joint Programming Initiative, Water Challenges for a Changing World, ERA-NET Cofund WATERWORKS 2015 da Comissão Europeia. O MARETEC foi financiado pelo projecto UID/EEA/50009/2019 da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT). T.B. Ramos foi financiado pelo bolsa SFRH/BPD/110655/2015 da FCT.

Referências

1. COTR. "Benchmarking" na Rega e Boas Praticas de Gestão da Rega da Vinha. Centro Operativo e Tecnológico do Regadio, Beja, 2009.
2. Fandiño, M.; Cancela, J.J.; Rey, B.J.; Martínez, E.M.; Rosa, R.G.; Pereira, L.S. Using the dual-Kc approach to model evapotranspiration of Albariño vineyards (Vitis vinifera L. cv. Albariño) with consideration of active ground cover. Agric. Water Manag. 112, 75-87.
3. Trancoso, A.R.; Braunschweig, F.; Chambel Leitão, P.; Obermann, M.; Neves, R. An advanced modelling tool for simulating complex river systems. Sci. Total Environ. 2009, 407, 3004–3016.
4. Ramos, T.B.; Simionesei, L.; Jauch, E.; Almeida, C.; Neves, R. Modelling soil water and maize growth dynamics influenced by shallow groundwater conditions in the Sorraia Valley region, Portugal. Agric. Water Manag. 2017, 185, 27–42.
5. Simionesei, L.; Ramos, T.B.; Palma; J.; Oliveira; A.R.; Neves, R. O sistema IrrigaSys de apoio à gestão da rega no Vale do Sorraia. X Congresso de AgroEngenharia, Huesca, 2019.

6. FAO. World Reference Base for Soil Resources. A Framework for International Classification, Correlation and Communication; World Soil Resources Report 103; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2006.
7. Ritcher, R.; Schäpfer, D. Atmospheric/topographic Correction for Satellite Imagery – ATCOR2/3. User Guide, Version 9.0.2, 2016.
8. Van Genuchten, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 1980, 44, 892–898.
9. Feddes, R.A.; Kowalik, P.J.; Zaradny, H. Simulation of Field Water Use and Crop Yield; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 1978.
10. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements; Irrigation & Drainage Paper 56; FAO: Rome, Italy, 1998.
11. Ritchie, J.T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resour. Res. 1972, 8, 1204–1213.
12. American Society of Civil Engineers (ASCE). Hydrology Handbook Task Committee on Hydrology Handbook; II Series, GB 661.2. H93; ASCE: Reston, VA, USA, 1996; pp. 96–104.
13. Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.;Williams, J.R. Soil and Water Assessment Tool; Theoretical Documentation; Version 2009; Texas Water Resources Institute; Technical Report No. 406; Texas A&M University System: College Station, TX, USA, 2011.
14. Wesseling, J.G.; Elbers, J.A.; Kabat, P.; van den Broek, B.J. SWATRE: Instructions for Input Report; Winand Staring Centre: Wageningen, The Netherlands, 1991.
15. Carsel, R.F.; Parrish, R.S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resour. Res. 1988, 24, 755–769.
16. Schaap, M.G.; Leij, F.J. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem–van Genuchten model. Soil Sci. Soc. Am J. 2000, 64, 843–851.
17. Legates, D.R.; McCabe, G.J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resour Res. 1999, 35, 233–241. 45
18. Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D.; Veith, T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transaction of the ASABE: St. Joseph, MI, USA, 2007; Volume 50, pp. 885–900. 45
19. Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. J. Hydrol. 1970, 10, 282–290.
20. Ramos, T.B.; Simionesei, L.; Oliveira, A.R.; Darouich, H.; Neves, R. Assessing the impact of LAI data assimilation on simulations of the soil water balance and maize development using MOHID-Land. Water 2018, 10, 1367.
21. Simionesei, L.; Ramos, T.B.; Oliveira, A.R.; Jongen, M.; Darouich, H.;Weber, K.; Proença, V.; Domingos, T.; Neves, R. Modeling soil water dynamics and pasture growth in the montado ecosystem using MOHID-Land. Water 2018, 10, 489.
22. Villalobos, F.J.; Orgaz, F.; Testi, L.; Fereres, E. Measurement and modeling of evapotranspiration of olive (*Olea europaea* L.) orchards. Eur. J. Agron. 2000, 13, 155–163.
23. Testi, L.; Villalobos, F.J.; Orgaz, F. Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. Agric. Forest Meteorol. 2004, 121, 1–18.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Nitratos en aguas subterráneas de acuíferos del Somontano occidental de la Hoya de Huesca

R. Zufiaurre[1], J.A. Cuchí[2].

[1] Departamento de Química Analítica. Escuela Politécnica Superior de Huesca; zufi@unizar.es
[2] Área de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior de Huesca; cuchi@unizar.es

Resumen: La presencia de elevados niveles de nitratos, derivados de actividades agropecuarias, en aguas subterráneas, es tema de preocupación por sus repercusiones sanitarias y ambientales. El problema es complejo y requiere estudios detallados. El presente trabajo se centra en el acuífero de Huesca, de modestas dimensiones, que se extiende desde el pie del Prepirineo y descarga al sur de la ciudad homónima. Se trata de un acuífero libre, de unos 80 km² de extensión, a poca profundidad de la superficie utilizada fundamentalmente para cebada y en menor medida, regadíos tradicionales y zonas urbanas. Volumen del acuífero y tiempos de residencia son también reducidos. El problema de la presencia de nitratos por encima de los 50 mg/l es conocido desde 1990, estimándose que proceden de fundamentalmente del abonado del cereal de invierno. Estudios más recientes han puesto de manifiesto que los niveles de nitrato en el acuífero son mayores en la zona de secano que bajo la zona regada. La comunicación resume el actual estado se la cuestión sobre este problema.

Palabras clave: Contaminación difusa, zonas vulnerables, actividad agropecuaria, fertilización, Huesca.

1. Introducción

La presencia de elevados niveles de nitratos en aguas subterráneas es tema de preocupación en la Unión Europea, plasmada en la Directiva 91/676/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura y enhttp://ec.europa.eu/environment/water/water-nitrates/index_en.html.

El problema también existe en España, donde se asocia a zonas de cultivo en regadío. Ver por ejemplo [1,2]. Lo mismo sucede a nivel aragonés: [3,4,5,6,7]. Estudios prospectivos [8] sugieren que el problema se puede incrementar por las características de los acuíferos. En el Somontano de Huesca, varias localidades que se abastecen de manantiales presentan, en sus aguas de bebida, valores de nitrato superando los 50 mgl^{-1}. Los primeros datos se deben a análisis farmacéuticos, no publicados. Estudios posteriores [9,10,11] asociaron esos valores con aguas subterráneas de acuíferos bajo zonas agrarias en cultivos de cereal de invierno. En este sentido, la Orden de 19 de julio de 2004, del departamento de Agricultura y Alimentación declara zona vulnerable a los sectores oeste y centro del Acuífero de Apiés, englobando las parcelas de regadío de Alerre, Banastás, Chimillas, Igriés, Nueno, Huesca, Quicena y Tierz. Por Orden de 11 de Diciembre de 2008, del Consejero de Agricultura y Alimentación (BOA del 02/01/2009) se mantienen las parcelas de Alerre, Banariés y Huesca y se excluyen las de Banastás, Chimillas, Igriés, Nueno y Quicena del acuífero 090.055 (Hoya de Huesca). La Orden de 10 de septiembre de 2013 (BOA de 09 de octubre) mantienen como zona vulnerable las parcelas agrícolas de regadío y añade las de secano en los términos municipales y agregados de Alerre,

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3514

Apiés, Banariés, Bellestar del Flumen, Cuarte, Huesca y Tabernas del Isuela. Además añade, entre otros los de Aniés, Banastás, Chimillas, Esquedas, La Sotonera; Lierta, Lupiñén-Ortilla, Ortilla, Plasencia del Monte y Quinzano. La información pública de Orden en 2018 (accedido en mayo de 2019) mantiene las masas de agua subterránea: 090.054 Saso de Bolea–Ayerbe y 090.055 Hoya de Huesca Se mantienen como zona vulnerable las parcelas agrícolas, según el SIGPAC, de los términos municipales de Alerre, Banastás, Chimillas, Huesca, La Sotonera, Lupiñén-Ortilla. Se incluyen como zona vulnerable los términos municipales de Ayerbe y Loscorrales en la masa de agua 090.055 (Sasos de Bolea-Ayerbe). Esto obliga al cumplimiento del Código de Buenas Prácticas Agrarias, para la percepción de las ayudas agroambientales.

Desde la década de 1990, la Escuela Politécnica Superior de Huesca lleva realizando una serie de estudios, en parte trabajos fin de carrera de Ingeniería Técnica en Explotaciones Agropecuarias y de Graduado en Ciencias Ambientales, sobre la presencia en nitratos en las aguas subterráneas de esta zona para intentar definir el problema en el espacio y en el tiempo. El presente trabajo resume la información obtenida.

Características hidrogeológicas

La zona estudiada comprende una parte de las estribaciones meridionales del Prepirireno aragonés y las llanuras situadas a su pie, entre los ríos Gállego y Guatizalema. Son dos unidades bien diferenciadas topografica y geológicamente. La primera, accidentada, está formada por materiales calizos del Cretácico Superior y Eoceno. En la segunda, mucho más llana, dominan areniscas y arcillas del Terciario final del valle del Ebro, con recubrimientos de sedimentos aluviales cuaternarios. Están separadas por una orla de mallos de conglomerados

Diversos acuíferos existen en ambas unidades. En el Prepirineo suelen ser de tipo kárstico. En el Somontano prepirenaico existen varios pequeños acuíferos de tipo detrítico [12,13 y 14], que han permitido el desarrollo de algunas localidades en las inmediaciones de sus fuentes. Por sus reducidas dimensiones, han sido poco estudiados. En estos momentos, a nivel administrativo por parte de la CHE, las aguas subterráneas de la zona de estudio se han agrupado en dos unidades: 091.054 Saso de Bolea-Ayerbe y 091.055 Hoya de Huesca. Estas, especialmente la segunda engloban varias subunidades y quedan al margen algunas pequeñas unidades como el acuífero de Apiés o los situados en las terrazas del Gállego. Evidentemente, los límites administrativos, municipales o de otro tipo, no coinciden con los límites hidrogeológicos con los consiguientes problemas.

El acuífero 091.055 es un aluvial de tipo glacis-somontano formado por gravas, arenas, arcillas aluviales y terrazas cuaternarias, especialmente del río Isuela. Se le estima una superficie aproximada de 110 km^2. Tiene una notable heterogeneidad granulométrica, lateral y vertical, con potencias entre 12 y 15 m. El yacente de baja permeabilidad son depósitos lutíticos con intercalaciones de areniscas en geometría de paleocanales. La recarga del acuífero se realiza por infiltración de las precipitaciones, anualmente unos 14 hm^3, perdidas de ríos y retornos de regadío 2 hm^3. La descarga se realiza a través de manantiales 6,5 hm3, pozos (0,5 hm3) y hacia el río Isuela al sur de Huesca. (CHE, 2008-2011).



Figura 1. Acuíferos del Somontano occidental de la Hoya de Huesca según XX.

El acuífero 091.054, formado por diversos glacis y alguna terraza fluvial tiene características muy similares al anterior. Su superficie es de 292 km² en las cuencas de los ríos Seco de Ayerbe, Astón, Riel, Seco de Bolea y Sotón, de los que se estima que pierden en la zona superior y recogen agua en la zona inferior, localizándose sistemas de drenaje abiertos, de edad desconocida en la zona de Guadasespe-Lupiñen. No hay datos sobre recarga anual, que se estima en unos 20 hm³. La explotación del agua subterránea es mínima, salvo para uso de boca, con interesantes ejemplos de recarga artificial en Plasencia del Monte y Lupiñén.

En ambos casos, es dominante el uso agrícola de la mayoría de la superficie de recarga. Es un secano fresco, en un 80% de cereal de secano, actualmente un tercio de trigo y el resto cebada. La superficie restante está ocupada por cultivos leñosos, de almendro en su mayoría. En consultas a agricultores del entorno de Huesca-Ayerbe, manifiestan que como abonado de fondo suelen utilizar 200 kg de 18-46-0 o 250 kg 300 kg /ha de 15:15:15 o similares. En cobertera, como más habitual, emplean urea del 46% a razón de 180-200 kg/ha. Hasta el presente, la ganadería intensiva era minoritaria y, por tanto, el aporte de purines era limitado, pero esta situación está cambiando.

2. Materiales y métodos

2.1. Muestreo

Para comprobar la relación entre usos del terreno y presencia de nitratos en aguas subterráneos se muestrearon 39 puntos de agua en marzo de 2014 en la cuenca del rio Isuela (ver tabla 1). Se abarcaron algunos acuíferos del Prepirineo y los ya citados de Apiés y de la Hoya de Huesca. La evolución temporal del contenido se estudió en 21 puntos de muestreo en ambos acuíferos con una toma mensual de marzo de 2016 a febrero 2017 (tabla 2).

Tabla 1. Información acerca de los puntos de muestreo

Nº de muestra	Puntos de muestreo	Coordenadas UTM			Fecha de muestreo	Localidad
		X	Y	Z		
1	Pozo EPSH	711013	4666082	460	17/03/2014	Huesca
2	Fuente en Cillas	710565	4671015	510	17/03/2014	Cillas
3	R. Isuela en Banastás	711083	4673264	530	17/03/2014	Banastás
4	Dren alberca Loreto	710520	4666985	465	18/03/2014	Huesca
5	Aceq. alberca Loreto	710437	4666960	465	18/03/2014	Huesca
6	Alberca Loreto	710521	4666931	465	18/03/2014	Huesca
7	Ibones de Yéqueda	711206	4673214	525	18/03/2014	Yéqueda
8	Pantano Arguis	711893	4686754	960	19/03/2014	Arguis
9	Manantial S. Clemente	711893	4686493	890	19/03/2014	Arguis
10	Fuente de San Miguel	713980	4669101	460	24/03/2014	Huesca
11	R. Isuela en San Miguel	713940	4669074	460	24/03/2014	Huesca
12	Fte Vieja de Fornillos	717047	4673973	640	24/03/2014	Fornillos
13	Fuente de Apiés	714327	4678122	681	24/03/2014	Apies
14	Fuente de Lienas	714850	4678484	669	24/03/2014	Lienas
15	Fte Huerto en Sabayés	712741	4680500	760	24/03/2014	Sabayés
16	Isuela en Nueno	711412	4682584	700	24/03/2014	Nueno
17	Fuente de la Ralleta	712109	4683929	750	24/03/2014	Nueno
18	Pozo Baños Nueno	712291	4685412	820	25/03/2014	Nueno
19	Fuente de la Cantera	712173	4684586	840	25/03/2014	Nueno
20	Fonturbia, Nueno	710829	4683013	770	25/03/2014	Nueno
21	Fuente Vieja Nueno	711130	4682620	730	25/03/2014	Nueno
22	Pozo Arascués	711089	4680627	650	25/03/2014	Arascués
23	Pozo Huerta molino	711221	4681589	680	25/03/2014	Nueno
24	Depuradora Huesca	715633	4666197	435	26/03/2014	Huesca
25	Pozo de R y C.	712312	4671430	505	26/03/2014	Huesca
26	Fuente Marcelo	712151	4671277	500	26/03/2014	Huesca
27	Fuente Jara	712872	4671182	490	26/03/2014	Huesca
28	Bco. Manjarrés Jara	712873	4671182	490	26/03/2014	Huesca
29	Las Paulesas	711046	4679636	630	26/03/2014	Igriés
30	Ibón de Cuarte	709843	4666908	470	26/03/2014	Cuarte
31	Manantial Banariés	709142	4667945	470	26/03/2014	Banariés
32	Fuente Huerrios	710202	4669151	490	26/03/2014	Huerrios
33	Pozo Atades	710878	4670891	505	28/03/2014	Huesca
34	Fuente Alerre	709589	4670958	500	28/03/2014	Alerre
35	Pozo A. B.	710549	4672984	530	28/03/2014	Banastás
36	Pozo A. S.	712385	4670600	495	31/03/2014	Huesca
37	Pozo T. R.	712161	4670866	500	31/03/2014	Huesca
38	Pozo P. S.	712970	4669808	485	31/03/2014	Huesca
39	Fuente Vieja Lierta	706898	4680163	670	31/03/2014	Lierta

Tabla 2. Puntos de agua subterránea muestreados en acuíferos de la Hoya de Huesca y Saso Bolea-Ayerbe.

Nº	Punto de muestreo	Nº	Punto de muestreo
1	Pozo EPS Huesca (H)	12	Fte. 3 Caños (Ayerbe)(BA)
2	Manantial Banariés (H)	13	Fuente Vieja (Bolea) (BA)
3	Fuente de Cillas (H)	14	Fuente de Lierta (H)
4	Fuente Alerre (H)	15	Ibones de Yéqueda (H)
5	Fte Lupiñén (Dcha) (BA)	16	Fuente de Marcelo (H)
6	Fte Lupiñén (Izqda) (BA)	17	Fuente de Jara (H)
7	Fuente Ortilla (BA)	18	Fuente de Apiés (A)
8	Lavadero Os Corrales (BA)	19	Fuente de Lienas (A)
9	Fuente de Fontellas (BA)	20	Fuente Pilas (Fornillos) (A)
10	Fuente de Los Anglis (BA)	21	Fte Vieja (Fornillos) (A)
11	Fuente de Biscarrués (BA)		

2.2. Metodología analítica

El contenido en nitratos de las muestras de agua se realizó por espectrofotometría VIS-UV a 220 y 275 nm, tras acidificación con HCl, dado que las aguas objeto de análisis tienen, en general, un bajo contenido en materia orgánica.

3. Resultados y discusión

Los resultados del estudio espacial de la cuenca del Isuela se resumen en la figura 2. Puede comprobarse como los niveles son bajos en la cuenca alta del rio, sin uso agrario, tanto para aguas superficiales como subterráneas.

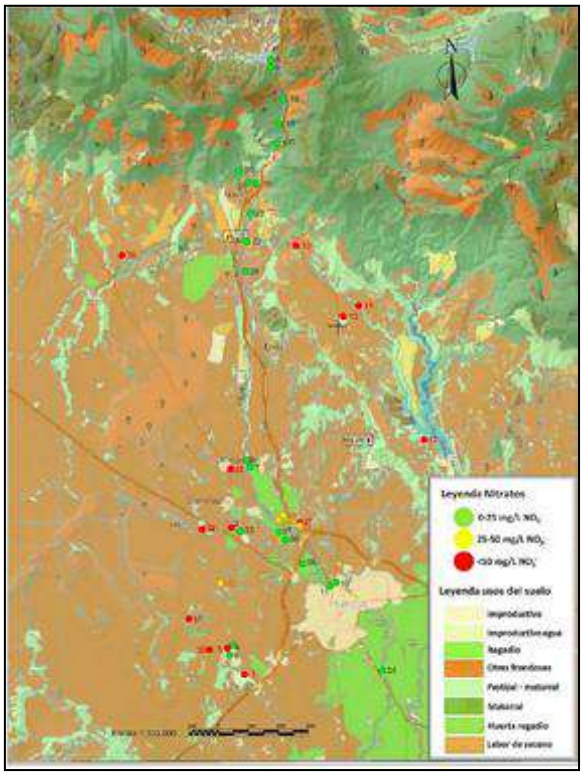


Figura 2. Concentración de ion nitrato y uso del territorio en la cuenca del rio Isuela. Puntos de la tabla 1.

En la zona del Somontano, sin embargo, los niveles en aguas subterráneas son mucho más altos, especialmente en las zonas de cultivo de secano. En las zonas regadas con agua del Isuela a través del sistema de riegos del pantano de Arguis, los niveles son menores. Es difícil, con la información actual, saber si es un efecto de dilución por el agua de riego, baja en nitratos, o por el uso preferentemente periurbano del entorno cercano. Posiblemente sea un efecto conjunto.

La evolución temporal, a lo largo de un año, (figura 3) muestra una cierta estabilidad, aunque en algunos puntos se observa un efecto, con retraso, del abonado. Algunas evoluciones necesitan un estudio más detallado.

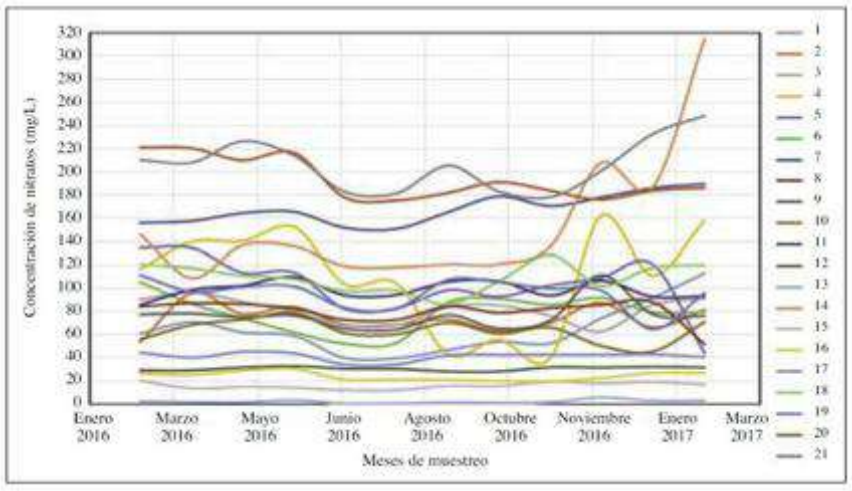


Figura 3. Evolución de nitratos en puntos de agua seleccionados (tabla 2) de acuíferos del Somontano occidental de la Hoya de Huesca.

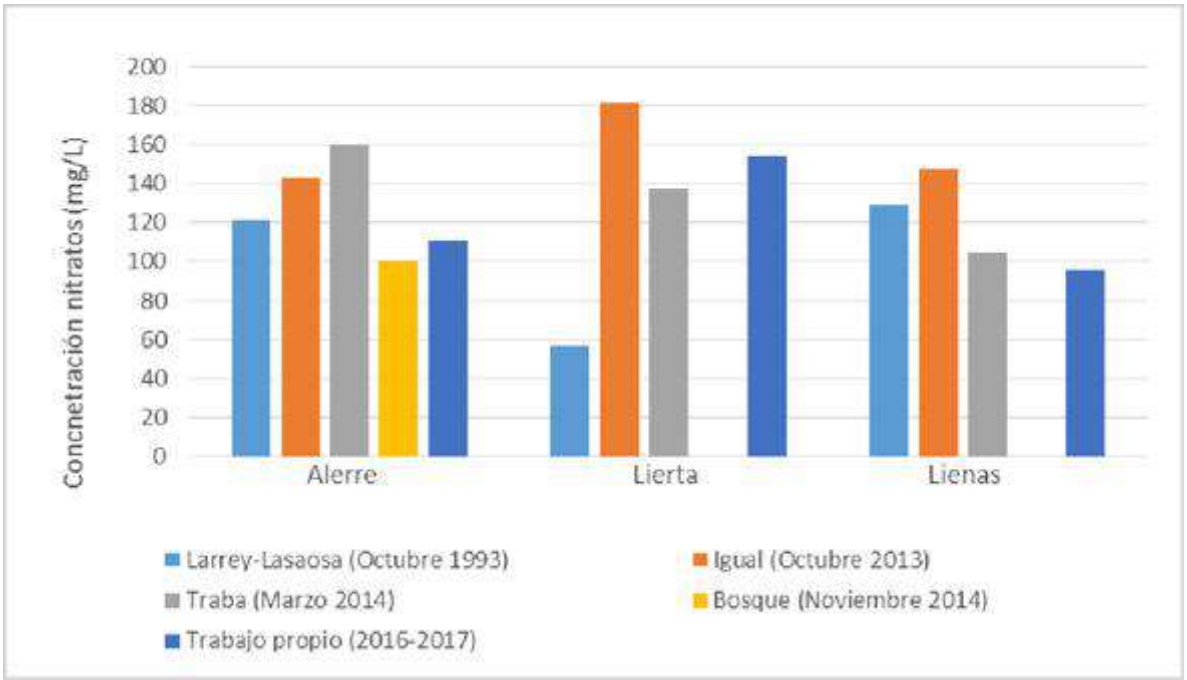


Figura 4. Evolución histórica de la concentración de nitratos en aguas subterráneas del Somontano occidental de la Hoya de Huesca.

Se ha realizado una comparativa de los datos de tres puntos de agua que se han analizado en diversos trabajos (Figura 4). Se observa que, en general se mantienen los niveles elevados. No es fácil definir tendencias, a efectos de evaluar la aplicación del Código de Buenas Prácticas Agrarias.

4. Conclusiones

Los niveles de ion nitrato, en aguas superficiales y subterráneos en la cuenca alta del rio Isuela, que recargan en zonas de uso forestal, son bajos, del orden de 5 mg/l.

Por el contrario, numerosos puntos de agua de los Somontanos, que recargan en zonas de agricultura de secano superan los 50 mg/l.

Estos valores se mantienen desde hace algunas décadas y se pueden relacionar con el abonado agrícola del cereal de invierno.

Se observa que los niveles en puntos de agua de la zona regada por el embalse de Arguis, son muchos más bajos. Puede ser un efecto de dilución o de menor abonado.

Se ha comprobado que los valores de nitratos se mantienen en un ciclo anual. En algunos casos parece observarse un incremento en la concentración de estos relacionada, con cierto desfase, con el abonado.

Es complicada la relación entre las unidades administrativas (términos municipales, parcelas PAC, etc) y las unidades hidrogeológicas.

5. Agradecimientos

J. A. Manso, O. Larrey, J.C. Lasaosa, N. Igual, L. Traba, H. Millán, J. Bosque, O. Gracia.

Referencias

1. Fernández Ruiz, L. F. (2007). Los nitratos y las aguas subterráneas en España. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, *15*(3), 257-265.
2. López-Geta, J. A., López Vera, F. (2010). Estado del conocimiento de las aguas subterráneas en España. *Boletín geológico y minero*, *117*(1), 89-114.
3. Rebolledo, B., Gil, A., Flotats, X., Sánchez, J. Á. (2016). Assessment of groundwater vulnerability to nitrates from agricultural sources using a GIS-compatible logic multicriteria model. *Journal of Environmental management*, *171*, 70-80.
4. García-Garizábal, I., Causapé, J., Abrahao, R. (2012). Nitrate contamination and its relationship with flood irrigation management. *Journal of hydrology*, *442*, 15-22.
5. Albiac, J., Playán, E., & Martínez, Y. (2007). Instruments for water quantity and quality management in the agriculture of Aragon. *Water Resources Development*, *23*(1), 147-164.
6. Cavero, J., Beltrán, A., Aragüés, R. (2003). Nitrate exported in drainage waters of two sprinkler-irrigated watersheds. *Journal of Environmental quality*, *32*(3), 916-926.
7. R. Andrés, J.A. Cuchí (2014). Salt and nitrate exports from the sprinkler irrigated Malfarás Creek Watershed (Ebro River Valley, Spain) during 2010. Environmental Earth Sciences 72 (7):2667-2682.
8. R. Andrés, J.A. Cuchí (2014). The use of nitrogen in a sprinkler-irrigated district in Monegros (Northeast Spain). Agricultural Water Management 144:120-133.
9. Rebolledo, B., Gil, A., Flotats, X., & Sánchez, J. Á. (2016). Assessment of groundwater vulnerability to nitrates from agricultural sources using a GIS-compatible logic multicriteria model. *Journal of Environmental management*, *171*, 70-80.
10. Gimeno, Y. Cuchi J. A. Propuesta de gestión del agua del acuífero de Apiés. (Huesca). 1995. Geórgica (4): 363-369.
11. Y. Gimeno y J.A. Cuchí. 1995. Propuesta de gestión del agua del acuífero de Apiés. (Huesca). Geórgica (4): 363-369.
12. Larrey, O., Lasaosa, J.C., Díaz, R. C., J.A. Cuchí 1996. Niveles de ion nitrato en aguas subterráneas de la Hoya de Huesca. *Kalium*, (5): 117-127.

13. Sánchez, J. A. (1988). Los recursos hídricos de las sierras de Guara y sus somontanos. IEA (Colección de Estudios Altoaragoneses, 27). Huesca.
14. Garrido, E. A., Azcón, A. (1994). Naturaleza y características de los aprovechamientos con aguas subterráneas al sur de las Sierras Exteriores pirenaicas. Actas del Congreso Nacional de Agua y Medio Ambiente: 15-25. TIASA. Madrid.
15. J.A. Cuchí, J.A. 1998. Esquema general de las unidades hidrogeológicas en el Alto Aragón. *Lucas Mallada,* (10): 87-105.
16. J.A. Cuchí, J.A. Manso, F. Pérez. 1993. Algunas características de la calidad del agua de lluvia en la Escuela Universitaria Politécnica de Huesca. Kalium, (2): 61-71.
17. J. Buera, J.A. Cuchí, J. A. Manso 1997. Hidroquímica de las aguas naturales de los sectores occidental y central de la sierra de Guara (Huesca). Lucas Mallada, (9): 35-63.
18. M. Subías, J.A. Cuchí, J.A. Manso. 2002. Hidroquímica de la cuenca del río Vero (Huesca). Somontano, (7): 33-45.
19. Cuchí, J.A. 2004. La Comisión de riegos del Sindicato de Riegos del Pantano de Arguis: 1933-1938. Anales Fundación Joaquín Costa. 21: 31-45.
20. Cuchí, J.A. 2005. Características geoquímicas de las aguas del Pirineo aragonés. Anales de la Real Academia de Medicina de Zaragoza. Vol. LXXXVI: 301-327.
21. Cuchí, J.A., Montes, L., Justes, Lafragüeta, I. 2005. Roca y agua. El condicionamiento del entorno y el desarrollo histórico de la ciudad de Huesca. Saldvie 5, 159-175.
22. J.A. Cuchí. 2006. Anotaciones sobre la distribución de agua en los sistemas de riego tradicionales de la zona occidental de la Hoya de Huesca. Anales de la Fundación Joaquín Costa. 22-23. 5-46.
23. J.A. Cuchí, J.L Villarroel, C. Garcés, S. Fábregas, R. Hurtado, J. Bernués. 2007. La localización de la Mina de Bonés. Una obra hidráulica inacabada en Huesca del siglo XVII. Argensola. 116. 171-185.
24. J.A. Cuchí. 2007. El sistema de riegos Mondod-Rosel (Huesca, España). Anales de la Fundación Joaquín Costa. 24. 47-75.
25. J.A. Cuchí. 2008. Los sistemas de riego del río Riel (Provincia de Huesca). Anales Fundación Joaquín Costa, 25: 23-42.
26. J.A. Cuchí y C. Garcés. 2008 Aportaciones a la evolución del sistema de riegos del Isuela en la Ciudad de Huesca. Anales de la Fundación Joaquín Costa, 25: 43-58.
27. C. Garcés, J.A. Cuchí. 2008. Historia de a la acequia Mayor de Huesca. (Siglos XII al XVII) De una orilla a otra del Isuela. Anales de la Fundación Joaquín Costa, 25: 59-100.
28. Monaj, D., Villarroel, J.L., Manso, J.A., Cuchí, J.A. 2014. Reacciones agua-roca en la cuenca alta de los ríos Isuela y Flumen (Huesca). Lucas Mallada 16: 169-197.
29. Elpuente, R., Cuchí, J.A., Villarroel, J.L., Manso, J.A. (2016). Interacción agua de lluvia-roca en calizas del valle del Alto Isuela (Huesca). Lucas Mallada 18: 147-177.
30. Manso, J.A., Lanuza, J., Gonzalo, G., Garcés, J.M., Jiménez, A., López, E., Arranz, J., Villarroel, J.L., Cuchi, J.A. (2016). Nota sobre algunas características químicas del agua de lluvia y de la nieve en Huesca. Lucas Mallada 18: 407-423.
31. R. Zufiaurre, O. Gracia, J.A. Cuchí (2017). Evolución de nitratos en aguas subterránea de la Hoya de Huesca (marzo 2016-febrero 2017). Lucas Mallada 19: 185-207.
32. Y. Gimeno, J.A. Cuchí. 1994. Contaminación por nitratos en el acuífero de Apiés (Huesca) Semana Tecnológica del Medio Ambiente 94. Zaragoza. 77-82.
33. Ballester, C., Cuchí, J.A., Andrés, R. 2010. Resultados de un primer balance de agua, sales y nitrógeno (2003) en la C.R. de Lasesa. (Riegos del Alto Aragón, Huesca). XXVIII Congreso Nacional de riegos. Junio. León.
34. 10.59. Andrés, R. Cuchí, J.A. 2010. Balance de aguas, sales y nitrógeno en 2008-2009. Cuenca de Malfaras (C.R. Lasesa, Riegos del Alto Aragón, Huesca). XXVIII Congreso Nacional de riegos. Junio. León.
35. Causapé, J., Quílez, D., Aragüés, R. (2006). Irrigation efficiency and quality of irrigation return flows in the Ebro River Basin: An overview. *Environmental monitoring and assessment*, *117*(1-3), 451-461.
36. AEMET (2001). Guía resumida del clima en España 1971-2000. INM. Madrid.

37. Bosque, J. (2015). Hidroquímica de aguas superficiales y subterráneas del Somontano de Huesca. Trabajo fin de grado de Ciencias Ambientales. EPSH. Huesca.
38. Confederación Hidrográfica del Ebro (2008-2011). Informe sobre la masa de agua subterránea de la Hoya de Huesca (09.55). Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Gobierno de España. Madrid.
39. Cuchí, J. A. (1998). Esquema general de las unidades hidrogeológicas del Alto Aragón. Lucas Mallada, 10: 87-105.
40. Gimgeno, Y. (1996). Impacto del uso de agroquímicos (nitratos y fitosanitarios) en agricultura de secano. Aplicación al acuífero detrítico de Apiés (Huesca). Proyecto fin de carrera de Ingeniería Técnica en Explotaciones Agropecuarias. EUPH. Huesca.
41. Gimeno, Y., y J. A. Cuchí (1994). Contaminación por nitratos en el acuífero de Apiés (Huesca). Actas de la Semana Tecnológica del Medio Ambiente: 77-82. Zaragoza.
42. Gimeno, Y., y J. A. Cuchí (1997). Contaminación por nitratos en el acuífero de Apiés (Huesca). Geórgica, 5: 59-71. 206
43. Raquel Zufiaurre y cols. Lucas Mallada-19 Imprenta 15/05/18 16:41 Página 206
44. Gracia, O. (2017). Evolución del contenido en nitratos en aguas subterráneas de la Hoya de Huesca (marzo de 2016 – febrero de 2017). Proyecto fin de carrera de Ingeniería Química. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Zaragoza.
45. Igual, N. (2014). Contaminación por nitratos en acuíferos del somontano altoaragonés. Trabajo fin de grado de Ciencias Ambientales. EPSH. Huesca.
46. Larrey, O., y J. Lasaosa (1994). Estudio de las características hidroquímicas de las aguas subterráneas en el somontano de Huesca. Proyecto fin de carrera de Ingeniería Técnica Industrial (Química). EUPH. Huesca.
47. Larrey, O., J. C. Lasaosa, R. C. Díaz y J. A. Cuchí (1996). Niveles de ion nitrato en aguas subterráneas de la Hoya de Huesca. Kalium, 5: 117-127.
48. Traba, L. (2015). Caracterización hidroquímica del acuífero de Huesca. Trabajo fin de grado de Ciencias Ambientales. EPSH. Huesca.
49. Zufiaurre, R., L. Traba y J. A. Cuchí (2015). Caracterización hidroquímica de aguas en la Hoya de Huesca. Lucas Mallada, 17: 17-4

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

O sistema IrrigaSys de apoio à gestão da rega no vale do Sorraia

L. Simionesei[1], T.B. Ramos[1], J. Palma[1], A.R. Oliveira[1], R. Neves[1]

[1] MARETEC, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal; lucian.simionesei@tecnico.ulisboa.pt

Resumo: Este trabalho apresenta o sistema IrrigaSys que integra diferentes ferramentas "online" de apoio à gestão da rega. Este sistema tem sido desenvolvido ao longo dos últimos 5 anos, prestando apoio à gestão da rega a cerca de 103 parcelas de 30 agricultores do perímetro de rega do Vale do Sorraia, Ribatejo, Portugal. Os dados necessários para correr o sistema são mínimos e incluem a localização da parcela, a cultura a regar, as datas de sementeira e de colheita, a textura do solo, o método de rega e as dotações diárias ou semanais efetivamente aplicadas em cada parcela. Com base nesta informação, o sistema descarrega automaticamente os dados meteorológicos da estação mais próxima, bem como as respectivas previsões para os 7 dias seguintes. Em seguida, procede ao cálculo do balanço da água no solo e das necessidades de rega com o modelo MOHID-Land. Os resultados são depois disponibilizados através da interface Web, numa aplicação para telemóvel, por SMS e por email. No relatório fornecido ao agricultor são apresentados os resultados do balanço de água do solo, o calendário de rega recomendado e um mapa atualizado com um índice vegetativo (NDVI) da parcela. Como próximo passo, o serviço deverá começar a identificar automaticamente o estado da cultura com base na informação obtida por satélite.

Palavras-chave: Balanço de água no solo; Deteção remota; MOHID-Land; Sistema de Apoio à Decisão.

1. Introdução

Existem atualmente uma série de ferramentas (modelos, sensores de humidade, produtos de deteção remota) de apoio à gestão da rega, mas que pelas suas especificidades técnicas, são difíceis de utilizar pelos agricultores ou serviços de extensão rural. Os sistemas de apoio à decisão (SAD) procuram reunir muitas dessas ferramentas, tentando minimizar, tanto quanto possível, muita da complexidade associada e necessidades de intervenção por parte dos utilizadores finais. Destacam-se ao longo dos últimos anos, a título de exemplo, a plataforma FIGARO (www.figaro-irrigation.net/), que corre operacionalmente o modelo AquaCrop [1] para a calendarização da rega com base em previsões meteorológicas para um prazo de 7 dias; o sistema SAGRA (www.cotr.pt/servicos/sagra.php), que fornece as recomendações de rega com base nos dados meteorológicos medidos em 14 estações distribuídas pelo sul do país; e a plataforma IRRISTRAT (www.hidrosoph.com/PT/irristrat.html) que integra informação meteorológica, sensores de humidade e um modelo de balanço de água no solo no cálculo das recomendações da rega. Todos estes sistemas são tecnologicamente avançados, apresentando um produto final um tanto ou quanto semelhante, i.e., o balanço de água no solo. As diferenças residem fundamentalmente na precisão com que as diferentes componentes do balanço são

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3374

estimadas, dependendo a qualidade dos resultados da facilidade com que os modelos subjacentes são calibrados para diferentes situações a partir dos escassos dados disponíveis.

Este trabalho apresenta o sistema de apoio à decisão IrrigaSys (irrigasys.maretec.org) que integra uma base de dados, um modelo baseado em processos físicos, imagens de satélite e uma interface gráfica online. Este sistema tem sido desenvolvido ao longo dos últimos 5 anos, prestando apoio à gestão da rega a cerca de 103 parcelas de 30 agricultores do perímetro de rega do Vale do Sorraia, Ribatejo, Portugal.

2. Descrição do sistema IrrigaSys

2.1. Descrição geral

O sistema IrrigaSys pode ser acedido através de uma plataforma online disponível em http://irrigasys.maretec.org/. Esta plataforma online foi desenvolvida para facilitar a gestão do sistema e a visualização dos resultados. A plataforma possui três níveis de acesso: administrador, gestor, utilizador. O nível de administrador está apenas disponível aos responsáveis pelo desenvolvimento do sistema, sendo estes os únicos com capacidade de adicionar novos usuários ou novas culturas. O nível de gestor foi desenvolvido para os técnicos da Associação de Regantes e Beneficiários do Vale do Sorraia (ARBVS) que gerem o sistema e interagem com os utilizadores finais, podendo ativar os usuários, mudar as culturas de uma determinada parcela, iniciar o serviço de rega, ou discriminar os eventos reais de rega (dotações semanais ou diárias) com base nas respostas dos agricultores. O nível de utilizador foi desenvolvido para os agricultores aderentes ao sistema, permitindo a visualização dos resultados unicamente para as parcelas sob sua gestão, podendo interagir diretamente com a base de dados através da introdução das dotações efetivamente aplicadas (valores semanais ou diários).

Os dados necessários para correr o sistema são mínimos, sendo fornecidos diretamente pelo Agricultor ou por técnicos da ARBVS e incluem a localização da parcela, a cultura a regar, as datas de sementeira e de colheita, a textura do solo, o método de rega e as dotações diárias ou semanais efetivamente aplicadas em cada parcela. Com base nesta informação, o sistema descarrega automaticamente os dados meteorológicos da estação mais próxima, juntamente com as respectivas previsões fornecidas pelo modelo MM5 para os 7 dias seguintes. Em seguida, procede ao cálculo do balanço da água no solo com o modelo MOHID-Land e das necessidades de rega para a semana seguinte. O cálculo do balanço de água do solo tem em conta as propriedades do solo, a fase da cultura e os coeficientes culturais, cuja informação está disponível na base de dados usada na gestão do serviço. Quando as dotações de rega reais não são fornecidas pelos agricultores, o sistema considera uma rega da parcela com base nos parâmetros optimizados. A base de dados inclui também os parâmetros do MOHID-Land previamente calibrados para simulação do desenvolvimento vegetativo de diferentes culturas, sendo esta informação fundamental para a correta partição da evapotranspiração em valores de transpiração da cultura e evaporação do solo. Os resultados são depois disponibilizados através da interface Web, de uma aplicação para telemóvel desenvolvida para o sistema Android, SMS e por email. No relatório fornecido são apresentados os resultados do balanço de água do solo desde o início da cultura, o calendário de rega recomendado para os dias seguintes e um mapa com um índice vegetativo (NDVI) da parcela. Todo o sistema IrrigaSys corre num script desenvolvido em Perl.

2.1.1. Base de dados

A base de dados do sistema IrrigaSys foi desenvolvida em MySQL e é composta por 13 tabelas (Figura 1): a tabela USERS descreve os usuários do sistema, com as respectivas identificações, contactos e códigos de acesso ao sistema; a tabela COMPANIES inclui

informação sobre as explorações agrícolas aderentes ao IrrigaSys, também com as respectivas identificações e contatos (um usuário pode gerir mais de uma exploração agrícola); a tabela PLOTS identifica as parcelas em que o sistema está implementado e a respectiva localização geográfica (uma exploração agrícola pode incluir várias parcelas); a tabela SEASONS é o coração do sistema, identificando o ano em questão e definindo, para cada parcela, o sistema de rega utilizado e respectiva eficiência, a dotação máxima anual que não pode ser excedida (imposta por legislação), o tipo de regante (definido na legislação), a cultura e data de sementeira, o tipo de solo, o teor de água no solo à data de sementeira (início da simulação) e, ainda, o mecanismo de ativação do sistema IrrigaSys para que este comece a funcionar. A tabela SEASONS está ligada às tabelas: IRRIGATION_SYSTEMS onde estão listados diferentes sistemas de rega e respectivas características; SOIL_TEXTURES onde estão descriminados diferentes tipos de solo a serem considerados nas simulações do modelo; CROPS onde estão associados, para cada cultura, os diferentes coeficientes culturais a serem adotados ao longo do ciclo vegetativo das plantas e respectivas frações das unidades de calor totais que fazem alterar a fase do ciclo vegetativo, bem como as pressões efetivas de água no solo que fazem acionar a programação automática da rega; GIVEN_IRRIGATION que recebe, quando fornecidas, as dotações reais aplicadas na parcela até à data; e RESULTS onde são depositados os resultados do cálculo do balanço de água no solo e informação meteorológica a ser apresentada nos relatórios finais a enviar ao agricultor. Existem ainda 4 tabelas que não estão relacionadas com as anteriores, a tabela METEO_STATION que identifica e localiza as 10 estações meteorológicas a que o sistema tem acesso e as tabelas GROUPS, USERS_GROUPS e LOGIN_ATTEMPS que tem apenas uma função administrava do sistema.

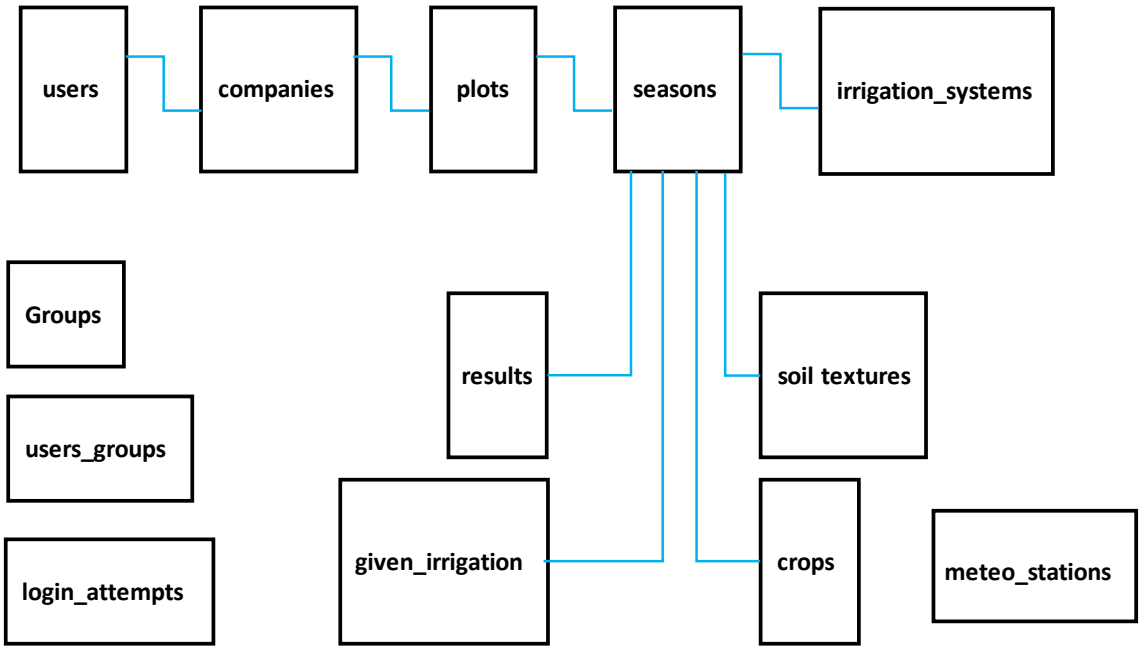


Figura 1. Esquema simplificado da base de dados.

2.1.2. Modelo

O balanço de água no solo e a programação da rega são calculados com o modelo MOHID-Land [2]. Este, é um modelo físico, distribuído, onde os fluxos verticais da água no solo são calculados através da equação de Richards, que inclui também um termo de modo a contabilizar a

extração de água do solo pelas plantas. As propriedades hidráulicas do solo, necessárias à resolução daquela equação, são descritas pelo modelo de Mualem-van Genuchten [3]:

$$S_e(h)=\frac{\theta(h)-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=\frac{1}{\left(1+\left|\alpha h\right|^{\eta}\right)^{m}} \quad (1)$$

$$K(h)=K_s S_e^{\ell}\left[1-\left(1-S_e^{1/m}\right)^{m}\right]^{2} \quad (2)$$

em que S_e é a saturação efectiva ($L^3\ L^{-3}$), θ_r e θ_s correspondem ao teor de água residual e na saturação, respectivamente ($L^3\ L^{-3}$), α (L^{-1}) e η (-) são parâmetros empíricos, m=1–1/η, e ℓ é um parâmetro empírico relacionado com a conectividade/tortuosidade do meio poroso.

A extracção de água do solo pelas raízes das plantas é calculada segundo Feddes et al. [4], em que a transpiração potencial (T_P, $L\ T^{-1}$) é distribuída linearmente pela zona radical através da função $T_P(z)$ e pode ser diminuída pela ocorrência de condições de stress, nomeadamente o stress hídrico. Para tal, a evapotranspiração cultural (ET_c, $L\ T^{-1}$) é primeiro obtida pelo produto da evapotranspiração de referência (ET_o, $L\ T^{-1}$) e o respetivo coeficiente cultural (K_c) [5] e depois fracionada em T_P e evaporação potencial (E_P, $L\ T^{-1}$) em função do índice de área foliar (LAI, $m^2\ m^{-2}$) [6]:

$$T_p = ET_c\left(1-e^{(-\lambda LAI)}\right) \quad (4)$$

$$E_p = ET_c - T_p \quad (5)$$

em que λ é o coeficiente de extinção da atenuação da radiação dentro da canópia das plantas (-). A transpiração real (T_a, $L\ T^{-1}$) é obtida através da integração da função $T_P(z)$ e limitada, de acordo com o modelo proposto por Feddes et al. [4], pela resposta da planta a diferentes condições de h. Este modelo considera que a extração de água pelas plantas iguala as condições potenciais entre as pressões efetivas h_2 e h_3, decrescendo linearmente quando $h>h_2$ e $h<h_3$ ou tornando-se nula quando $h<h_4$ ou $h>h_1$ (números subscritos de 1 a 4 correspondem a diferentes limites de pressão efectiva de água no solo). Já a evaporação real (E_a, $L\ T^{-1}$) é obtida através da limitação da E_P a um determinado potencial mátrico [7].

O LAI evolui ao longo do ciclo da cultura e depende das unidades de calor necessárias para a planta atingir a maturidade (PHU) e das condições de stress a que as plantas estão sujeitas [8]. Durante as fases iniciais de desenvolvimento da cultura (fase inicial e fase de desenvolvimento rápido), o aumento diário do LAI é função da fração do LAI máximo da planta (LAI_{max}, $m^2\ m^{-2}$) que, em condições potenciais, será atingida durante essa fase ($frLAI_{max,\ ini}$) e das condições de stress. Durante a fase média de desenvolvimento, o LAI é considerado constante, enquanto que na fase de senescência, o LAI diminui em função do LAI_{max}, das PHU e do stress da cultura.

A programação da rega é realizada em função das necessidades hídricas da cultura e da pressão efetiva da água do solo. É definido um valor limite de pressão efetiva (h_t) para cada célula que compõe o domínio solo. Quando h_t é atingido numa determinada célula devido à extração de água pelas plantas, o modelo considera que será necessário regar. A quantidade de água a aplicar será a suficiente para elevar h_t nessa célula até uma pressão efetiva a definir, normalmente a correspondente à capacidade de campo. No entanto, a quantidade total, obtida a partir do somatório de todas as células que definem o solo, tem de ser sempre superior a mínimo pré-definido de modo a evitar a recomendação de quantidades pouco significativas. A programação da rega pode ainda ser função das horas disponíveis para regar ou do intervalo de dias entre regas.

2.1.3. Produtos de detecção remota

O sistema permite disponibilizar automaticamente mapas do índice vegetativo NDVI ("Normalized Difference Vegetation Index") para que o agricultor possa avaliar semanalmente a homogeneidade da cultura na sua parcela. Para tal, o IrrigaSys inclui um script feito em

Python que descarrega automaticamente do Copernicus Open Access Hub (https://scihub.copernicus.eu/), a última imagem disponível do Sentinel 2 nos últimos 7 dias, com cobertura de nuvens inferior a 10%. Em seguida, essas imagens são processadas para correção atmosférica dos valores da reflectância. É depois calculado o NDVI a partir das bandas 4 (vermelho, Red) e 8 (infra-vermelho próximo, NIR) do Sentinel 2 (NDVI=(NIR–Red)/(NIR+Red)). Finalmente, as imagens são automaticamente cortadas para a área de cada uma das parcelas, projetadas no sistema WGS84, e disponibilizadas no serviço para visualização.

2.1.4. Apresentação de resultados

Os resultados do sistema IrrigaSys podem ser consultados de várias formas (Figura 2). O formato mais simples é através de uma SMS recebida semanalmente no telemóvel com a identificação da parcela e semana em questão, as previsões da precipitação, temperatura máxima e ET_c para a semana seguinte e a dotação semanal de rega recomendada para essa semana.



Figura 2. Exemplo da visualização dos resultados na plataforma online.

Existe também um aplicação para telemóveis desenvolvida no sistema Android e que pode ser obtido na "Google Store". Esta aplicação foi desenvolvida para facilitar o acesso do agricultor ao sistema, em particular, se consultado diariamente. O menu inicial dá acesso a às diferentes parcelas geridas pelo usuário, podendo este consultar o balanço de água no solo na semana em questão, o total de rega já aplicado deste o início do desenvolvimento da cultura, as previsões da precipitação, temperatura máxima e ET_c para a semana seguinte e a dotação semanal de rega recomendada para essa semana.

Cada usuário recebe semanalmente e por parcela, um relatório mais completo em formato pdf. Este é composto por cinco áreas principais: A primeira parte com as informações da parcela, tais como a sua identificação, data de sementeira que está a ser considerada, sistema de rega e número da semana (data). A segunda área apresenta o balanço hídrico para a semana anterior ao relatório, bem como a previsão para a semana seguinte, juntamente com um gráfico circular que apresenta a quantidade de água já aplicada ao longo da campanha de rega e limite que não pode ser ultrapassado. A terceira parte é composta por dois gráficos, em que o primeiro apresenta a evolução do teor de água na zona radical desde a data de sementeira à data do relatório e o

segundo mostra um gráfico que discrimina os eventos reais de rega e de precipitação que foram tidos em conta no cálculo do balanço de água no solo. A quarta parte do relatório mostra a evolução diária do balanço de água no solo prevista para a semana seguinte à data do relatório, apresentando, para cada dia, as temperaturas mínima e máxima previstas (ºC), as previsões de chuva (mm), a recomendação da rega (mm), o teor de água na zona radical (mm), o teor de água no solo à capacidade de campo e o teor crítico de água da cultura a partir do qual começa a haver stress hídrico (mm), a ET_o e a ET_c (mm), o K_c, profundidade da raiz (m), a quantidade de água perdida por percolação (mm) e variação da água no solo (mm). Finalmente, a quinta parte do relatório exibe o mapa do NDVI atualizado para a parcela em questão.

Todos os resultados podem ser também diretamente consultados na plataforma online.

2.2. Implementação do sistema

O script desenvolvido em Perl para o sistema IrrigaSys tem a capacidade de selecionar diferentes ficheiros de entrada do modelo MOHID-Land, que estão pré-definidos consoante as características das parcelas introduzidas na base de dados. O perfil do solo é sempre especificado com 2 m de profundidade e dividido em 3 horizontes. O domínio de cálculo, composto pelo perfil de solo, é representado por uma coluna vertical discretizada em 11 células com 1 m de largura, 1 m de comprimento e espessura variável entre os 0.05 m na parte superior e 0.50 m na parte inferior. Cada célula da coluna define então um volume de controlo onde as variáveis de estado (por exemplo, o teor de água no solo) são calculados no centro das células e os fluxos (e variáveis relacionadas) nas faces (método dos volumes finitos). A condição de fronteira superior é sempre determinada pelas taxas de T_a e E_a e pelos fluxos de rega e precipitação. A condição de limite inferior é sempre especificada como drenagem livre.

Os valores de ET_c são calculados a partir do produto dos valores horários de ET_o pelos K_c específicos da fase de desenvolvimento de cada cultura, sendo estes definidos na base de dados do IrrigaSys de acordo com Allen et al. [5]. A partição da ET_c nas suas componentes T_P e E_P é feita a partir da simulação do LAI, sendo que a parametrização do modelo para o crescimento vegetativo tem por base o resultado da calibração em alguns casos de estudo na região [2, 9], ou os valores dados por por defeito em Neitsch et al. [8]. Os valores de h_1-h_4 para o cálculo do stress hídrico estão também disponíveis, para cada cultura, nos ficheiros internos do modelo MOHID-Land. Estes são definidos segundo Wesseling et al. [10] e podem ser acedidos através do código da cultura. As condições iniciais do teor de água no solo são sempre definidas para capacidade de campo. Finalmente os parâmetros hidráulicos do solo são definidos para três classes de textura do solo (fina, média, grosseira) com base também nos resultados da calibração do modelo em alguns casos de estudo implementados na região [2, 9].

3. Limitações e desenvolvimentos futuros

O IrrigaSys é um sistema em desenvolvimento que tenta aproveitar a experiência adquirida em diversos projectos de investigação, convertendo-se numa ferramenta prática de apoio à rega na bacia do Vale do Sorraia. O sistema tem a grande capacidade de fornecer uma quantidade significativa de informação ao agricultor de forma fácil e automática. No entanto, a parametrização relacionada com as propriedades hidráulicas do solo tem de ser enriquecida para que o sistema possa ter em conta a grande variabilidade destas propriedades ao longo da paisagem. Também a base de dados relacionada com os parâmetros de desenvolvimento das culturas deve ser estendida para melhor descrever os padrões locais de crescimento das plantas. O sistema também deverá começar a identificar automaticamente o estado de desenvolvimento da cultura com base na informação obtida por satélite, permitindo assim uma melhor precisão no cálculo do balanço de água no solo.

4. Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do Projecto WATER4EVER "Optimizing water use in agriculture to preserve soil and water resources" (WaterJPI/0010/2016), financiado pela Water Joint Programming Initiative, Water Challenges for a Changing World, ERA-NET Cofund WATERWORKS 2015 da Comissão Europeia. O MARETEC foi financiado pelo projecto UID/EEA/50009/2019 da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT). T.B. Ramos foi financiado pelo bolsa SFRH/BPD/110655/2015 da FCT.

Referências

1. Vanuytrecht, E.; Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E.; Heng, L.K.; Vila, M.G.; Moreno, P.M. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield assessment model. Environ. Model. Softw. 2014, 62, 351–360.
2. Ramos, T.B.; Simionesei, L.; Jauch, E.; Almeida, C.; Neves, R. Modelling soil water and maize growth dynamics influenced by shallow groundwater conditions in the Sorraia Valley region, Portugal. Agric. Water Manag. 2017, 185, 27–42.
3. Van Genuchten, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 1980, 44, 892–898.
4. Feddes, R.A.; Kowalik, P.J.; Zaradny, H. Simulation of Field Water Use and Crop Yield; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 1978.
5. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements; Irrigation & Drainage Paper 56; FAO: Rome, Italy, 1998.
6. Ritchie, J.T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resour. Res. 1972, 8, 1204–1213.
7. American Society of Civil Engineers (ASCE). Hydrology Handbook Task Committee on Hydrology Handbook; II Series, GB 661.2. H93; ASCE: Reston, VA, USA, 1996; pp. 96–104.
8. Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.;Williams, J.R. Soil and Water Assessment Tool; Theoretical Documentation; Version 2009; Texas Water Resources Institute; Technical Report No. 406; Texas A&M University System: College Station, TX, USA, 2011.
9. Simionesei, L.; Ramos, T.B.; Oliveira; A.R.; Neves, R. Modelação da rega deficitária em vinha com o MOHID-Land. X Congresso de AgroEngenharia, Huesca, 2019.
10. Wesseling, J.G.; Elbers, J.A.; Kabat, P.; van den Broek, B.J. SWATRE: Instructions for Input Report; Winand Staring Centre: Wageningen, The Netherlands, 1991.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Predicción de la dinámica del carbono orgánico en suelos agrícolas del Cerrato Palentino (España) aplicando el modelo RothC

Norlan M. Ruiz-Potosme[1], Luis F. Sánchez-Sastre[2], Pablo Martín-Ramos[3], Carmen T. Bravo Sánchez[4], Mercedes Sánchez Báscones[4], Salvador Hernández-Navarro[2], Jesús Martín-Gil[2]

[1] Departamento de Enseñanzas Técnicas, Universidad Europea Miguel de Cervantes, Valladolid, España; nmruiz@uemc.es.
[2] Departamento de Ingeniería Agroforestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, Palencia, España.
[3] Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), EPS, Universidad de Zaragoza, Huesca, España
[4] Departamento de Ciencias Agroforestales, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, Palencia, España

Resumen: La gestión de los suelos agrícolas tiene un gran potencial para el secuestro de carbono, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la consecución de una agricultura sostenible. Para predecir la acumulación de materia orgánica en suelos agrícolas del Cerrato Palentino (Palencia, España) se ha utilizado el modelo RothC, un método para simular a escala regional los cambios del carbono orgánico del suelo (COS) en sistemas agrícolas y forestales utilizando datos de clima y suelo. Con datos estimados de la materia orgánica inerte y la entrada mensual de vegetación o de residuos de la planta se han determinado los porcentajes de carbono inicial, carbono orgánico total anual y error frente al carbono orgánico experimental. El incremento de los contenidos de carbono orgánico en el periodo 2012-2013 ha oscilado entre el 4,9 y el 22.5%, según parcela. Las predicciones de acumulación de carbono para 100 años han sido estimadas en torno al 70% para 4 de las cinco parcelas estudiadas y del 115% para la quinta. Esta información representa una herramienta útil para la planificación futura, en nuestra área geográfica, del uso de la tierra y su gestión en relación con la reducción de las emisiones de CO_2

Palabras clave: entrada de C; materia orgánica inerte; modelo predictivo; RothC-26.3; secuestro de carbono

1. Introducción

Los balances de carbono a nivel mundial están cambiando significativamente, producto de la actividad antrópica [1]. Las cantidades de CO_2 (gas de efecto invernadero) emitidas a la atmósfera, resultantes de la quema de combustibles fósiles y el cambio del uso de la tierra, están influyendo en el cambio de temperatura en el planeta Tierra y han generado una preocupación alrededor del fenómeno de cambio climático [1,2]. Una amenaza principal del cambio climático global es que afectaría a la producción de cultivos (por la alteración radical de los regímenes de temperaturas y lluvias) creando una situación comprometida para la seguridad alimentaria tanto a nivel local como mundial.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3695

Este fenómeno cobra importancia en cuanto el proceso de secuestro de carbono por parte de los ecosistemas (sean estos "naturales" o agroecosistemas) resta en parte la indeseada acumulación atmosférica de CO_2 generada por el excesivo uso de combustibles fósiles, principal causante del cambio climático [3].

Desde la agricultura, los estudios referentes a la captura de carbono surgen como un campo en la investigación acerca de la función que los sistemas agrícolas pueden cumplir frente al cambio climático [4]. En zonas agrícolas, reducir las emisiones de CO_2 es sinónimo de aumentar la materia orgánica del suelo [5]. Hoy día, está ampliamente demostrado que la adopción de ciertas prácticas de manejo permite aumentar el carbono orgánico almacenado con el fin de aprovechar la gran capacidad que presentan los suelos agrícolas como sumidero [6-10]. Los sistemas de producción agrícola y en particular, los de conservación, presentan un gran potencial para capturar y almacenar carbono [11,12], generando efectos positivos adicionales: los suelos con mayor cantidad de materia orgánica tendrán mejor capacidad de infiltración del agua, mejor estructuración, resistirán mejor los procesos erosivos y brindarán beneficios a la productividad y sostenibilidad agrícola [13,14]. A su vez, en un contexto de cambio climático, el foco de los estudios recientes sobre la materia orgánica de los suelos apunta a determinar no solo su impacto sobre la productividad sino su función como posible destino del carbono de la atmósfera [15,16].

Actualmente, el secuestro de carbono es uno de los servicios ecosistémicos de mayor interés en suelos cultivados y no cultivados. Muchos estudios han tratado de estimar la capacidad de secuestro de carbono de los suelos según las condiciones climáticas, edáficas y de manejo [17, 18], siendo el balance entre las entradas y salidas de carbono al sistema el determinante de la tasa de fijación de carbono en cada caso. De hecho, la adición de residuos vegetales, como los restos de cultivo, contribuyen a la emisión de otros gases de efecto invernadero que deben ser computados a la hora de realizar el balance global [19,20]. Si bien el almacenaje de carbono mide la diferencia acumulada en el suelo, el término *carbon sequestration* (para un periodo de tiempo concreto y un lugar determinado) debe ser considerado como el balance neto de todos los gases de efecto invernadero, expresado en equivalentes de CO_2 o C-CO_2, teniendo en cuenta todas las fuentes de emisión en el sistema suelo-planta-atmósfera [21] (Figura 1). Toda vez que, en las tierras de cultivo, el tamaño de la acumulación de biomasa C puede considerarse constante en una escala de décadas o siglos, el aumento de C en el suelo a través de la adición de materia orgánica (MO) a las tierras de cultivo, puede conducir a una disminución del CO_2 atmosférico. Por otra parte, es preciso recordar que el contenido de C en el suelo es uno de sus índices básicos de productividad [22].

En España, los bajos niveles de carbono orgánico registrados en suelos de clima mediterráneo y sobre todo, semiáridos, los sitúan a menudo por debajo de los valores propuestos como umbrales de degradación [23]. Según Romanyá *et al*. [24], del análisis comparativo del carbono entre suelos forestales y agrícolas de España se determinó que "los suelos de clima semiáridos presentan una mayor resistencia a la pérdida de carbono y una menor resiliencia que los suelos de climas más húmedos. Este hecho hace pensar que los suelos semiáridos pueden estar cerca de los umbrales de degradación y que por lo tanto su gestión debería evitar las pérdidas de materia orgánica". En el ciclo terrestre del carbono, el carbono orgánico del suelo representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera y se estima en unos 1500 Pg C a 1 m de profundidad y cerca de 2456 a 2 m de profundidad). El carbono inorgánico, que representa cerca de 1700 Pg, es capturado en formas más estables tales como $CaCO_3$. La vegetación (650 Pg) y la atmósfera (750 Pg) almacenan menos cantidades que los suelos [25]. El secuestro de carbono se ha convertido, así, en una estrategia clave para reducir la concentración de CO_2 atmosférico y contribuir a la mitigación del cambio climático [22].

Las implicaciones sobre el cambio climático global del carbono almacenado en el suelo son, precisamente, las que han llevado a que su medición y estimaciones en diversos tipos de suelos (principalmente, agrícolas) haya cobrado importancia a nivel nacional y mundial [26-29].

Entre los sistemas de predicción de almacenamiento de carbono orgánico del suelo los más utilizados a escalas regional y nacional han sido los modelos RothC [30-36], tanto para suelos forestales como agrícolas. Cabe destacar que el uso de estos modelos constituye un método alternativo y complementario a las técnicas experimentales a la hora de predecir resultados a medio y largo plazo, con el propósito de cuantificar el secuestro de C, variación de materia orgánica y la reducción de las emisiones de CO_2, de los suelos agrícolas.

Según Ruiz-Potosme [37] y Ruiz *et al*. [38], el modelo RothC-26.3 es capaz de predecir el porcentaje de carbono de un suelo (p.ej., conocer cuánto carbono orgánico del suelo a largo plazo puede estar disponible para un determinado uso, sea agrícola y forestal). Por ejemplo, a partir del modelo de RothC-26.3, podemos predecir a 100 años, el incremento de porcentaje de carbono orgánico del suelo. Publicaciones recientes reflejan la utilidad del modelo, entre los que cabe destacar el estudio de Romanya *et al*. [24] en suelos españoles.

El presente trabajo tiene como objetivo estimar y predecir el secuestro de carbono en suelos agrícolas en el Cerrato Palentino (España) aplicando el modelo preconizado RothC-26.3.

2. Materiales y métodos

Las parcelas objeto de estudio dentro del área geográfica seleccionada han sido ubicadas mediante el sistema de coordenadas *Universal Transversal de Mercator* (UTM), según distribución que figura en la Tabla 1. Su proyección cartográfica aparece en la Figura 1, donde son identificadas por las abreviaturas de los municipios a los que corresponden: V: Villamediana, SC: Soto de Cerrato, HC: Hérmedes de Cerrato, EC: Espinosa de Cerrato y VP: Valbuena de Pisuerga, todos pertenecientes al Cerrato Palentino. Esta área geográfica se localiza en el sudeste de la provincia de Palencia y se caracteriza por una estructura geológica formada por depósitos del Mioceno (principalmente de margas, yesos y calizas), suelos pertenecientes a los tipos entisoles, inceptisoles-*Xerochrepts* y alfisoles, altos rendimientos en secano y, especialmente, en regadío (principalmente, remolacha y patata) y un clima semiárido y subárido, con escasez de lluvia y temperaturas altas en verano y frías en invierno.



Figura 1. Proyección cartográfica de las parcelas experimentales, cuyas siglas VP: Valbuena de Pisuerga, V: Villamediana, SC: Soto de Cerrato, EC: Espinosa de Cerrato y HC: Hérmedes de Pisuerga. Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN-1986).

Tabla 1. Ubicación geográfica (coordenadas UTM), de las cinco parcelas experimentales objeto de estudio. Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN-1986).

Ubicación de las parcelas	Coordenadas X	Coordenadas Y	Longitud	Latitud	Altitud
Villamediana	386200	4655000	4° 22' 30" W	42° 2' 20" N	820 m
Soto de Cerrato	381900	4645000	4° 25' 29" W	41° 56' 53" N	725 m
Hérmedes de Cerrato	402700	4630000	4° 10' 17" W	41° 48' 57" N	905 m
Espinosa de Cerrato	420800	4646000	3° 57' 21" W	41° 57' 43" N	890 m
Valbuena de Pisuerga	399100	466800	4° 13' 17" W	42° 9' 27" N	895 m

Las 5 parcelas objeto de estudio se utilizan como suelos agrícolas para cultivos de secano.

Las muestras de suelo fueron tomadas en las parcelas experimentales en el mes de julio de 2016, a una profundidad de 35 cm, según Fallon *et al* [30,31], prescindiendo del horizonte 0 o mantillo) en cantidades de aprox. 1 kg, y subsiguientemente, analizadas. Las muestras fueron tamizadas para separar los gruesos (tamiz de 2 mm) de los finos (tamiz de 0.1 mm).

Con las muestras de suelos recogidas de las diferentes parcelas y mediante los métodos convencionales de la American Society for Testing Materials, se han determinado los valores de los parámetros edáficos: pH, carbono orgánico, arcilla, limo y arena (Tabla 2). La densidad aparente para estos suelos es, en promedio, de 1,35 $g \cdot cm^{-3}$

Tabla 2. Parámetros edáficos experimentales para los 5 puntos de muestreo (CO en $t\ ha^{-1}$)

Nº parcela	Municipio	pH	CO	% Arcilla	% Limo	% Arena
Parcela 1	Villamediana	8,85	4,80	8,10	6,25	88,60
Parcela 2	Soto de Cerrato	8,95	8,25	8,65	56,15	38,25
Parcela 3	Hérmedes de Cerrato	8,40	11,20	27,25	28,10	45,85
Parcela 4	Espinosa de Cerrato	8,35	16,10	16,30	17,70	68,75
Parcela 5	Valbuena de Pisuerga	8,65	22,50	19,50	28,80	54,55

Los datos climáticos para la zona estudiada se encuentran recogidos en la Tabla 3. La temperatura del aire y la pluviometría como medias mensuales utilizadas han sido obtenidas de bases de datos procedentes de diferentes centros meteorológicos y corresponden a valores promedio de los últimos 30 años.

Tabla 3. Datos mensuales meteorológicos de la zona estudiada (provincia de Palencia)

Mes	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	ETP (mm)
Enero	2	64	6,60
Febrero	3	45	11,34
Marzo	5	75	26,15
Abril	8	57	41,10
Mayo	15	68	69,35
Junio	18	40	105,50
Julio	19	15	125,15
Agosto	24	12	106,20
Septiembre	13	36	76,61
Octubre	10	84	50,85
Noviembre	4	110	21,40
Diciembre	1	90	9,65

Para determinar el porcentaje de materia orgánica fácilmente oxidable se ha utilizado el Método de Walkley y Black [59] previa eliminación de los carbonatos por ignición a 360 °C (durante 2 h), seguida de enfriamiento a 150 °C en la mufla. Este método, capaz de discriminar entre el humus y las formas fuertemente condensadas (entre las que se cuentan el grafito y el carbón vegetal), permite cuantificar la materia orgánica fácilmente oxidable a partir de la fracción de materia orgánica del suelo que reacciona con $K_2Cr_2O_7$ 1N en medio H_2SO_4 y durante 30 min. Se sabe que la acción del H_2SO_4 concentrado es capaz de producir la oxidación del carbono de la materia orgánica a CO_2. El anión dicromato (añadido en exceso) y no reducido se analiza por titulación.

En la Figura 2, se ofrece la estructura del modelo de RothC que utiliza el cociente entre el material de planta descomponible (DPM) y el material de planta resistente (RPM), DPM/RPM, para determinar el grado de descomposición del material de planta entrante en el sistema a partir de la entrada de materia orgánica. El carbono orgánico del suelo (en t C ha^{-1}) se divide en cuatro fracciones activas y una fracción pequeña de materia orgánica inerte (IOM). Las fracciones activas son: material de la planta descomponible (DPM), material de la planta resistente (RPM), biomasa microbiana (BIO) y materia orgánica húmica (HUM). Cada fracción descompone siguiendo una cinética de primer orden y con su velocidad característica. La fracción de IOM se considera resistente a la descomposición.

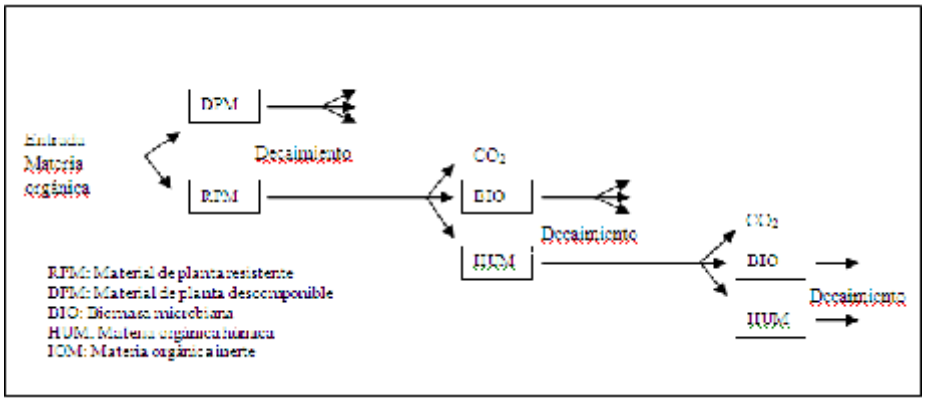


Figura 2. Estructura del modelo RothC. Adaptado de Coleman *et al.* [39,40]

Para la aplicación del método se contó con los registros climatológicos de la zona de estudio, ya que estas variables (temperatura, humedad, y precipitación) están íntimamente ligadas al proceso de descomposición de la materia orgánica.

Las estimaciones de IOM para las parcelas en estudio se obtuvieron por la ecuación de Fallon *et al*, [30]: $IOM = 0.049 \times CO^{1.139}$

Para calcular la entrada de C input, se utiliza el cociente DPM/RPM del material entrante de cada planta particular, cuyos valores asignados a cada resto vegetal fueron de 1.44 para suelos con cubierta vegetal. Todo el material que entra en la planta, origina tanto DPM como RPM, que a su vez se descomponen para formar CO_2, biomasa y materia húmica (BIO+HUM). La proporción que da lugar al CO_2 y la que origina la BIO+HUM, se estima a partir del contenido de arcilla del suelo, mediante el modelo RothC.

La predicción de la evolución del CO a corto y largo plazo se ha llevado a cabo utilizando el modelo RothC-26.3 [39-40], descrito en FORTRAN77, que es una extensión de un modelo previo descrito por Jenkinson y Rayner [39] y por Coleman *et al*., [40], que permite conocer cuánto carbono orgánico puede estar disponible para determinados usos.

3. Resultados y discusión

Como se ha dicho, el modelo Roth es capaz de predecir, a 100 años, el porcentaje de carbono de un suelo e incluso conocer cuánto carbono orgánico del suelo puede estar disponible para una determinada aplicación [37]. En la Tabla 4 se muestran los porcentajes de materia orgánica y toneladas de carbono oxidable junto a las toneladas de carbono orgánico total determinados por la metodología arriba indicada (método de Walkley y Black [59]), para las parcelas objeto de estudio.

Tabla 4. Porcentajes de materia orgánica oxidable (MO oxidable), toneladas de carbono oxidable por hectárea (t C ha^{-1}) y toneladas de carbono total por hectárea (t C ha^{-1}) en los cinco puntos de muestreo

Punto de muestreo	% MO oxidable (a)	t C ha^{-1} oxidable (b)	t C ha^{-1} total (c)
Parcela 1	0,30	3,2	4,12
Parcela 2	2,48	17,2	23,50
Parcela 3	1,20	12,5	16,15
Parcela 4	0,95	9,15	11,72
Parcela 5	0,85	6,8	7,95

Con los valores estimados para la materia orgánica inerte (IOM) y la entrada mensual de vegetación o de residuos de la planta (C input), recogidos en la tabla 5, es posible determinar la velocidad de secuestro de las parcelas objeto de estudio. Esta decrece a lo largo del tiempo y a medida que el sistema se aproxima a la situación de equilibrio o de saturación del suelo.

Tabla 5. Valores estimados de la materia orgánica inerte (IOM) y de la entrada de carbono (C input) en las parcelas objeto de estudio.

Punto de muestreo	IOM	C Input	Edad de las áreas de suelos agrícolas
Parcela 1	0,5	0,050	5
Parcela 2	0,5	0,155	20
Parcela 3	0,5	0,120	35
Parcela 4	0,5	0,095	15
Parcela 5	0,5	0,085	50

Los porcentajes de carbono inicial y carbono orgánico total en el año 2013 junto con la estimación del error frente al carbono orgánico experimental se encuentran recogidos en la Tabla 6.

Tabla 6. Porcentajes experimental y calculado de carbono orgánico total.

Punto de muestreo	% C inicial / año	% C total exp. 2013	% C total calculado 2013	% Error C
Parcela 1	3,85 (2008)	4,86	4,90	0,04
Parcela 2	5,15 (1993)	22,54	22,60	0,06
Parcela 3	4,65 (1978)	15,94	15,90	0,04
Parcela 4	4,85 (1998)	17,33	17,08	0,25
Parcela 5	4,45 (1963)	8,96	8.75	0,21

Se observa que la velocidad inicial del incremento del secuestro de carbono por año es aproximadamente 22.6 en la parcela 2, correspondiente al municipio de Soto de Cerrato.

Es preciso destacar que, a largo plazo, la productividad puede verse incrementada en zonas de secano y la precipitación limita la producción, pero también disminuye la descomposición, resultando en mayores incrementos en el carbono orgánico del suelo, por lo que también aumentan las entradas de carbono al suelo [42,43].

En la tabla 7 se muestran las predicciones a 100 años.

Tabla 7. Valores de carbono orgánico teóricos y predicciones a 100 años.

Carbono teórico, 2008 (t C/ha)	Predicción a 100 años (t C/ha)	% Incremento (100 años)
4,90	9,45	115,70
22,60	35,55	52.58
15,90	25,85	60,52
17,08	19,80	84,31
8.75	14,12	78,50

En las Figuras 3 y 4 se observa el especial incremento de carbono orgánico total previsto para al año 2013 obtenido para la parcela 2, ubicada en Soto de Cerrato, Palencia, con una edad de suelos agrícolas de 20 años. Es seguido por el obtenido para la parcela 3 (Hérmedes de Cerrato), con edad de suelos agrícolas de 35 años, luego por el de la parcela 4 (Espinosa de Cerrato), con edad de implantación de cultivos agrícolas de 15 años y finalmente, por el de la parcela 5 (Valbuena de Pisuerga), con edad de 50 años, durante 1965-2015.

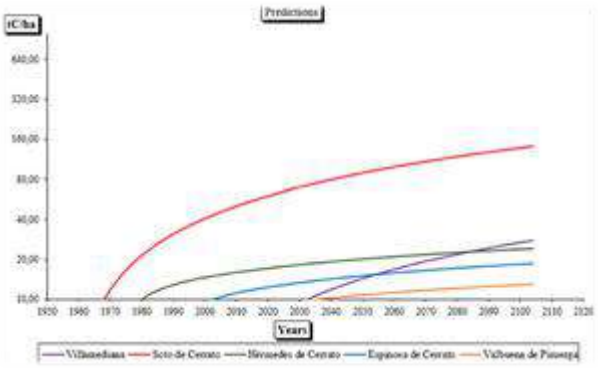


Figura 1. Datos estimados de predicciones de carbono a 100 años de cada parcela agrícola de estudio.

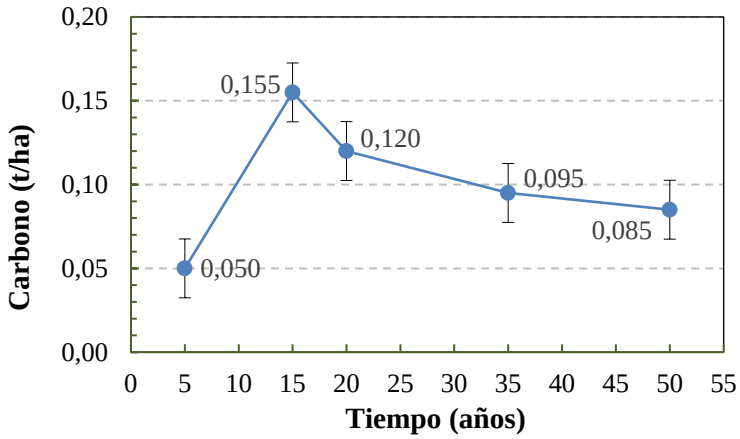


Figura 2. Estimación de la entrada de carbono (C input en t C ha^{-1}) en función de los años, para las parcelas estudiadas

Es preciso tener en cuenta que las emisiones de gases de efecto invernadero de la agricultura, la silvicultura y pesca casi han duplicado en los últimos 50 años y que las transformaciones del uso del suelo y el drenaje de suelos orgánicos para el cultivo son responsables de aproximadamente el 11% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). También se estima que los GEI aumentarán en las próximas décadas debido a la demanda creciente de alimentos. No obstante, la mejora de prácticas del cultivo y las nuevas tecnologías emergentes permitirán una reducción de emisiones por unidad de alimento producida [44].

Al restaurar los suelos degradados y adoptar prácticas de manejo sostenible como la rotación de cultivos, la labranza cero, la agricultura de conservación, la agrosilvicultura y la agroecología, existe el potencial para disminuir los GEI procedentes de la agricultura, mejorar la retención de carbono y aumentar la resiliencia ante el cambio climático [33]. Si se gestionan de forma sostenible, los suelos pueden ser parte de la solución cuando se trata de la mitigación del cambio climático [45-49].

Actualmente, parece existir consenso en que la adopción de ciertas prácticas de manejo (RMPs – *recommended management practices*) permite aumentar el carbono orgánico almacenado aprovechando la gran capacidad que presentan los suelos agrícolas como sumidero [9, 50-55].

4. Conclusiones

El estudio realizado ha conseguido mostrar la viabilidad del modelo de RothC para estimar y simular los efectos del manejo agrícola en la dinámica del secuestro de carbono orgánico (SOC) en las parcelas objeto de estudio. Se ha evidenciado que tanto el incremento del cultivo como la reducción de la intensidad de la labranza son estrategias efectivas para aumentar el secuestro de SOC en condiciones semiáridas, que podrían compensar las emisiones antropogénicas de CO_2.

No obstante, el método considerado también tiene ciertas restricciones y debilidades, por ejemplo, las relacionadas con la resolución de datos estadísticos sobre agricultura, que deben estar vinculados a datos de puntos de suelo o polígonos. Esta es una fuente importante de incertidumbre en términos de valores absolutos de stock de C modelado por lo que su aplicación resulta delimitada para la predicción del cambio de C en un lugar determinado.

En nuestra investigación, tanto el modelo RothC como el análisis comparativo del suelo en los puntos georreferenciados son concluyentes sobre el aumento del stock de C durante el período 1965-2015.

Sin embargo, los experimentos a largo plazo, que son indispensables, no pueden cubrir la gran diversidad de opciones de manejo disponibles para los agricultores. Se necesita un enfoque participativo que enfrente la dificultad de medir de manera confiable los cambios en las existencias de SOC en una escala de campo de solo unos pocos años, que resulte relevante para el agricultor [56].

Estimamos que la aplicación de medidas realistas para mejorar la retención de residuos de cultivos, el uso de cultivos de cobertura y la conversión a pastizales mejoraría el secuestro de carbono del suelo correspondiente a la compensación de emisiones en 0.50 millones de toneladas de CO_2 por año, que solo corresponde al 5% de las emisiones agrícolas actuales de metano y óxido nitroso [57].

En lo que respecta a España, los datos disponibles indican que en los primeros 30 cm los suelos agrícolas (cultivos anuales y cultivos leñosos) acumulan el 31,9% del COS total nacional [58], porcentaje por encima de la media mundial debido en gran medida a que el 33,5% de la superficie española está ocupada por cultivos [58].

Referencias

1. Huang, Y.; Yu, Y.; Zhang, W.; Sun, W.; Liu, S.; Jiang, J.; Wu, J.; Yu, W.; Wang, Y. & Yang, Z. Agro-C: A biogeophysical model for simulating the carbon budget of agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology. Agricultural and Forest Meteorology*, **2009,** *149*, 106 –129
2. Easterling, WE.; Aggarwal, PK.; Batima, P.; Brander, KM.; Erda, L.; Howden, SM.; Kirilenko, A.; Morto, J.; Soussana, JF.; Schmidhuber, J.; Tubiello, FN. Food, fibre and forest products. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Parry ML et al, eds). Cambridge*, UK**. 2007**, Cambridge University Press, 273-313 pp.
3. Stavins, R.; & Richards, K. The cost of U.S. forest based: Carbon Sequestration. *Economics. Pew Center on Global Climate Change*. **2005**, 40 p.
4. West, T. Net Sequestration Carbon in Agriculture: A national Assessment. *Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory*. **2008**, pp. 1 – 6.
5. Jarecki, MK.; Lal, R. Crop management for soil carbon sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **2003**, *22*(5), 471-502.
6. Paustian, K.; Andrén, O.; Janzen, HH.; Lal, R.; Smith, P.; Tian, G.; Tiessen, H.; Van Noordwijk, M.; Woomer, PL. Agricultural soils as a sink to mitigate CO2 emissions. *Soil Use and Management*, **1997**, 13, 230-244.
7. Smith, P.; Powlson, DS.; Smith, JU.; Falloon, P.; Coleman, K. Meeting Europe's climate change commitments: quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture. *Global Change Biology*, **2000**, 6, 525-539.
8. Kimble, JM.; Lal, R.; Follett, RF. Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, **2002**.
9. Freibauer, A.; Rounsevel, MDA.; Smith, P.; Verhagen, J. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*, **2004**, 122, 1-23.
10. Nieto, O.M.; Castro, J.; Fernández, E. Simulation of soil organic carbon stocks in a Mediterranean olive grove under different soil-management systems using the RothC model. *Soil Use and Management*, **2010**, 26, 118-125.
11. LaSalle, J. T. Hepperly, P. Regenerative Organic Farming: *A solution to Global Warming Rodale Institute*. **2008**, pp. 1-9.
12. Dendooven, L.; Patiño-Zuñig, L.; Luna-Guido, M.; Marsch, R.; Govaerts, B. Capítulo 1 Ecosistemas Terrestres. 1.63. Global Warming Potential of agricultural systems with contrasting tillage and residue management in the central highlands of Mexico. In: Memorias del III Simposio Internacional del Carbono en México. *Universidad Autónoma del Estado de México-Programa Mexicano del Carbono- Instituto Nacional de Ecología, México*. **2011**, pp. 778.
13. Altieri, M. Agroecology: the science of Natural Resource Management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **2002**, *93*, 1-24.
14. Robbins, M. Crops and Carbon: Paying Farmers to Combat Climate Change. *Earth scan, Great Britain*. 2001, 300 pp.
15. Mishra, U.; Lal, R.; Slater, B.; Calhoun, F.; Liu, D.; Van Meirvenne, M. Predicting soil organic carbon stock using profile depth distribution functions and ordinary kriging. *Soil Sci. Soc. Am. J***., 2009**, *73*, 614-621.
16. Meersmans, J.; Van Wesemael, B.; De Ridder, F.; Van Molle, M. Modelling the three-dimensional spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma*, **2009**, *152*, 43-52.
17. Schulp, C.J.E.; Nabuurs, G.J.; Verburg, P.H. Future carbon sequestration in Europe - Effects of land use change. *Agric. Ecosys. Environ*., **2008**, *127*, 251-264.
18. Liang, B.C.; Campbell, C.A.; McConkey, B.G.; Padbury, G.; Collas, P. An empirical model for estimating carbon sequestration on the Canadian prairies. *Can. J. Soil Sci*., **2005**, 85, 549-556.
19. Porta, J.; López-Acevedo, M.; Roquero, C. (eds.). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. *3ª ed. Mundi-Prensa, Madrid*, **2003**, 929 p.
20. Dawson, J.J.C.; & Smith, P. Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. *Science of the Total Environment* **2007,** *382*, 165-190.

21. Feller, C.; Bernoux, M. Historical advances in the study of global terrestrial soil organic carbon sequestration. *Waste Management*, **2008**, *28*(4), 734-740.
22. Lal, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, *Science,* **2004,** *304*, 1623–1627.
23. Romanyà, J.; Rovira, P.; Duguy, B.; Vallejo, R.; Rubio, A. C sequestration issues in the Mediterranean soils, in: Greenhouse-gas Budget of Soils under Changing Climate and Land Use (Burnout), edited by: Jandl, R. and Olsson, M., BFW, **2007,** 15–22.
24. Romanyà, J.; Cortina, J.; Falloon, P.; Coleman, K.; Smith, P. Modelling changes in soil organic matter after planting fast-growing *Pinus radiata* on Mediterranean agricultural soils. *European Journal of Soil Science* **2000**, *51*, 627-641.
25. Charro E.; Hernández-Navarro S.; Martín-Gil J.; Moyano A.; Ruiz-Potosme N. Estimación del secuestro de carbono en suelos bajo masas forestales de *Pinus halepensis* en Castilla y León (España). 2ª Reunión del Grupo de Trabajo de Ecología*, Ecofisiología y Suelos Forestales, Sociedad Española de Ciencias Forestales (SECF), Salamanca (Spain)*, **2007**, 284 pp.
26. Segura-Castruita, M.A; Sánchez-Guzmán, P; Ortiz -Solorio, C. A.; Gutiérrez –Castorena, Ma. del C. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, **2005**, 23: 21-28.
27. Álvarez, G.; Krasilnikov, P.; García-Calderón, N.E. Vertical distribution and soil organic matter composition in a montane cloud forest, Oaxaca, Mexico. *European Journal of Forest Research*, **2012**, *6*, 1643-1651.
28. Gamboa, A.M.; Hidalgo, C.; F. De Leon, J. D.; Etchevers, J. F.; Gallardo Campo. J. Nutrient Addition Differentially Affects Soil Carbon Sequestration in Secondary Tropical Dry Forests: Early- versus Late-Succession Stages. *Restoration Ecology*, **2008**, *18*, 252-260.
29. Chiti, T.; Gardin, L.; Perugini, L.; Quaratino, R.; Primo-Vaccari, F.; Migliett, F.; Valentini, R. Soil organic carbon stock assessment for the different cropland land uses in Italy. *Biology and Fertility of Soils*, **2012**, *48*, 9 –17.
30. Falloon, P.; Smith, P.; Coleman, K.; Marshall, S. Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biology and Biochemistry*, **1998**, *30*, 1207–1211.
31. Falloon P; Smith P. Simulating SOC changes in long-term experiments with RothC and CENTURY: model evaluation for a regional scale application. *Soil Use and Management*, **2002**, *18*, 101–111.
32. Falloon, P.; Smith, P. Accounting for changes in soil carbon under the Kyoto Protocol: need for improved long-term data sets to reduce uncertainty in model projections. *Soil Use and Management*, **2003**, *19*, 265–269.
33. Smith, J.; Smith, P.; Wattenbach, M.; Zaehle, S.; Hiederer, R.; Jones, R.J.A.; Montanarella, L.; Rounsevell, M.; Reginster, I.; Ewert, F. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990–2080. *Global Change Biology*, **2005,** *11*, 2141–2152.
34. Smith, J.; Smith, P.; Wattenbach, M.; Gottschalk, P.; Romanenkov, V.A.; Ševcova, L.K.; Sirotenko, O.D.; Rukhovič, D.I.; Koroleva, P.V.; Romanenko, I.A.; Lisovoj, N.V. Projected changes in the organic carbon stocks of cropland mineral soils of European Russia and the Ukraine 1990–2070. *Global Change Biology*, **2007**, *13*, 342–354.
35. Van Wesemael, B.; Lettens, S.; Roelandt, C.; Van Orshoven, J. Modelling the evolution of regional carbon stocks in Belgian cropland soils. *Canadian Journal of Soil Science*, **2005**, *85*, 511–521.
36. Easter, M.; Paustian, K.; Killian, K.; Williams, S.; Freng, T.; Al-Adamat, R.; Batjes, N.H.; Bernoux, M.; Bhattacharyya, T.; Cerri, C.C.; Cerri, C.E.P.; Coleman, K.; Falloon, P.; Feller, C.; Gicheru, P.; Kamoni, P.; Milne, E.; Pal, D.K.; Powlson, D.S.; Rawajhif, Z. The GE FSOC soil carbon modeling system: A tool for conducting regional-scale soil carbon inventories and assessing the impacts of land change on soil carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **2007**, *122*, 13–25.
37. Ruiz Potosme, N.M. Determinación de la distribución potencial de *Pinus Halepensis* Mill en Castilla y León, mediante técnicas geoestadísticas. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Campus de Palencia - Universidad de Valladolid, España, **2009**.
38. Ruiz, N.M.; Bravo, T.B.; Sánchez, L.F.; Correa Guimaraes, A.; Martín Gil, J. Application of RothC Model, in forest soil of Castilla y Leon, Spain. II Congreso do solo, Viçosa-MG, Brasil, **2013**, 10-12 abril.

39. Jenkinson, D.S.; Rayner, J.H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci*. **1977**, *123*, 298–305.
40. Coleman, K.; & Jenkinson, D.S. RothC-26.3. A model for the turnover of carbon in soil. In D.S. Powlson, P.; Smith J.U.; Smith eds. Evaluation of soil organic matter models using existing long-term datasets. *NATO ASI Series I, Springer-Verlag, Heidelberg*, **1995**, *38*, 237-246.
41. Smith, J.U.; Smith, P.; Wattenbach, M.; Zaehle, S.; Hiederer, R.; Jones, R.J.A.; Montanarella, L.; Rounsevell, M.; Reginster, I.; Ewert, F. Projected changes in mineral soil carbón of European croplands and grasslands, 1990–2080. *Global Change Biology*, **2005**, 11, 2141-2152.
42. Jobbágy, E.G.; & Jackson, R.B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, **2000**, 10 (2), 423– 436.
43. López-Bellido, L. Agricultura, Cambio Climático y Secuestro de Carbono, Editor: *Createspace Edición* 1, **2015**, ISBN-13: 978 1507735398.
44. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO. Mitigación del cambio climático y adaptación en la agricultura, la silvicultura y la pesca. *Departamento de Gestión de Recursos Naturales y Medio Ambiente*, **2015**, Roma, Italia.
45. Wu H.; Guo Z.; Peng C. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China. *Glob Change Biol*. **2003**, *9*, 305–15.
46. Maia, S.M.F.; Ogle S.M.; Cerri C.E.P.; Cerri C.C. Soil organic carbon stock change due to land use activity along the agricultural frontier of the southwestern Amazon, Brazil, between 1970 and 2002. *Glob Change Biol*. **2010**, *16*, 2775–88.
47. Sanz-Cobena, A.; Lassaletta L.; Garnier, J.; Smith, P. Mitigation and quantification of greenhouse gas emissions in Mediterranean cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 238, 1-4.
48. MMAMRM (2008): Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC). Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.
49. Lal, R. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO_2 enrichment. *Soil and Tillage Research*, **1997**, *43*, 81-107.
50. Paustian, K.; Six, J.; Elliott, E.T.; Hunt, H.W. Management options for reducing CO_2 emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*, **2000**, *48*, 147-163.
51. Hutchinson, J.J.; Campbell, C.A.; Desjardins, R.L. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, **2007**, *142*, 288-302.
52. Smith, P.; Martino, D.; Cai, Z.; Gwary, D.; Janzen, H.; Kumar, P.; McCarl, B.; Ogle, S.; O'Mara, F.; Rice, C.; Scholes, B.; Sirotenko, O.; Howden, M.; McAllister, T.; Pan, G.; Romanenkov, V.; Schneider, U.; Towprayoon, S. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **2007**, *118*, 6-28.
53. Farina, R.; Marchetti, A.; Francaviglia, R.; Napoli, R.; Di Bene, C. Modeling regional soil C stocks and CO_2 emissions under Mediterranean cropping systems and soil types. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **2017**, *238*, 128–141.
54. Kaczynski, R., Siebielec, G., Marjoleine C. H., Korevaar, H., (2017): Modelling soil carbon trends for agriculture development scenarios at regional level. *Geoderma,* **2017**, *286*, 104–115.
55. Perez, C.; Roncoli, C.; Neely, C; Steiner J.L. Can carbon sequestration markets benefit low-income producers in semi-arid Africa? Potentials and challenges. *Agric. Syst*. **2007**, *94*, 2-12.
56. Taghizadeh-Toosi, A.; Olesen, J.E. Modelling soil organic carbon in Danish agricultural soils suggests low-potential for future carbon sequestration. *Agric. Syst.*, **2016**, *145*, 83-89.
57. Rodriguez Martin, L.A; Álvaro-Fuentes, J; Gonzalo, J; Gil, C; Ramos-Miras, J.J; Grau Corbí, J.M; Bolud, R. Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. *Geoderma*, **2016**, *264*, 117-125.
58. ESYRCE, (2015): Estadística sobre superficies y rendimientos de cultivos. http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/ Accessed: 10 March **2016.**
59. Walkley, S.J.; Black, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci*., **1934**, *37*, 29-38.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Primer balance de agua, sales y nitrógeno en la cuenca de la Clamor Vieja, Castelflorite, Santalecina, Alcolea de Cinca (Huesca). Drenaje de un regadío modernizado

R. Andrés[1], L. Royes[2], J.A Cuchí[1]

[1] Escuela Politécnica Superior de Huesca. Carretera de Cuarte s/n. 22071-Huesca; raulandres@unizar.es, cuchi@unizar.es
[2] Agrostock. Pol. Ind. Fraga Este, s/n. 22520 Fraga -Huesca; lourdesroyes@hotmail.com

Resumen: Hay un creciente interés sobre la gestión de agua en las zonas regadas, riego y drenaje y es importante disponer datos concretos a diferentes escalas de cuenca. Se presenta un estudio preliminar de la Comunidad de Regantes San Pedro de Castelflorite (CRSPC) puesta en riego a pie hacia 1980 y modernizada a aspersión hacia 2001. Situada sobre un terreno fundamentalmente arcilloso, los regadíos de esta zona están afectados por graves problemas de salinidad que limitan el cultivo de amplias zonas. La salinidad de los horizontes superficiales, de origen geológico, es consecuencia de los grandes movimientos de tierra sin capaceo que se llevaron a cabo en su transformación inicial. La CRSPC drena, en parte al barranco de la Clamor Vieja, enclavado en los términos de Castelflorite, Santalecina y Alcolea de Cinca (Huesca) drena una cuenca de 11.450 ha, de las que aproximadamente la mitad están en riego con arroz, maíz, cebada y alfalfa. El presente trabajo es analizar el uso del agua y determinar la cantidad y calidad del drenaje mediante balance de agua, sales y nitrógeno en los años 2009 y 2010. El régimen hídrico de la cuenca está regulado esencialmente por el riego. Durante las campañas de riego el caudal de drenaje aumenta considerablemente siendo el volumen de agua drenado seis veces superior al de fuera de la campaña de riego.

Palabras clave: riego; drenaje; Aragón.

1. Introducción

El análisis por cuencas es uno de los métodos de realizar estudios de eficacia de regadíos y liberación de sales y nutrientes de un polígono de riego. Por ejemplo, se ha aplicado en la CR LASESA [1,2,3].

El presente trabajo analiza la cuenca de la Clamor Vieja, un pequeño tributario del rio Cinca. La cuenca tiene una superficie de 11.450 ha. El 46% es secano. En el regadío, la mayor parte corresponde a la CRSP que se puso en riego secuencialmente de 1972 a 1976 a pie. La nivelación de parcelas, y la geología arcillosa, condujo a importantes problemas de conductividad hidráulica y sodicidad [4]. Para combatirlo, se inició un proceso gradual y complejo de transformación a riego por aspersión.

El presente trabajo analiza el uso del agua y determina la cantidad y calidad del drenaje mediante balance de agua, sales y nitrógeno en los años 2009 y 2010.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3513

2. Localización

La CRSP está situada en los términos de Alcolea de Cinca, Castelflorite, Peralta de Alcolea, San Miguel de Cinca, y Sariñena (Huesca, España). Se localiza en su margen derecha del tramo medio del río Cinca y gestiona una superficie de casi 5.000 ha de los sectores hidráulicos XVII, XVIII, XIX, XX y XXI del Canal del Cinca, acequia de Terreu en la Comunidad General de Riegos del Alto Aragón (Figura 1).

El barranco de la Clamor Vieja drena una cuenca de 11.450 ha, de las que aproximadamente el 54% están en regadío. El 92 % de este regadío pertenece a la CRSP y el 8% restante a la Comunidad de Regantes de Santa Cruz. Los retornos de riego provienen esencialmente de la CRSP. En los años 70, esta zona se trasformó en regadío a pie y 30 años después se ha sustituido la red de distribución cambiando las acequias por tuberías a presión. A nivel de parcela también se ha cambiado mayoritariamente a riego por aspersión a excepción de la zona baja de los sectores XVII, XVIII, XIX donde aún predominaba, en el momento del estudio, el riego por superficie.

El clima se caracteriza por un período frío de cinco meses, otro cálido de tres: Llueve en primavera y otoño, con un periodo seco de 9 meses, de febrero a mediados de octubre, tormentas aparte. La precipitación media anual son 370 mm. La evapotranspiración de referencia (ET0) 1132 mm al año. La humedad relativa media estuvo entre el 54% de julio, y el 78% de diciembre 2009. La velocidad del viento osciló entre 1,2 y 2m/s.

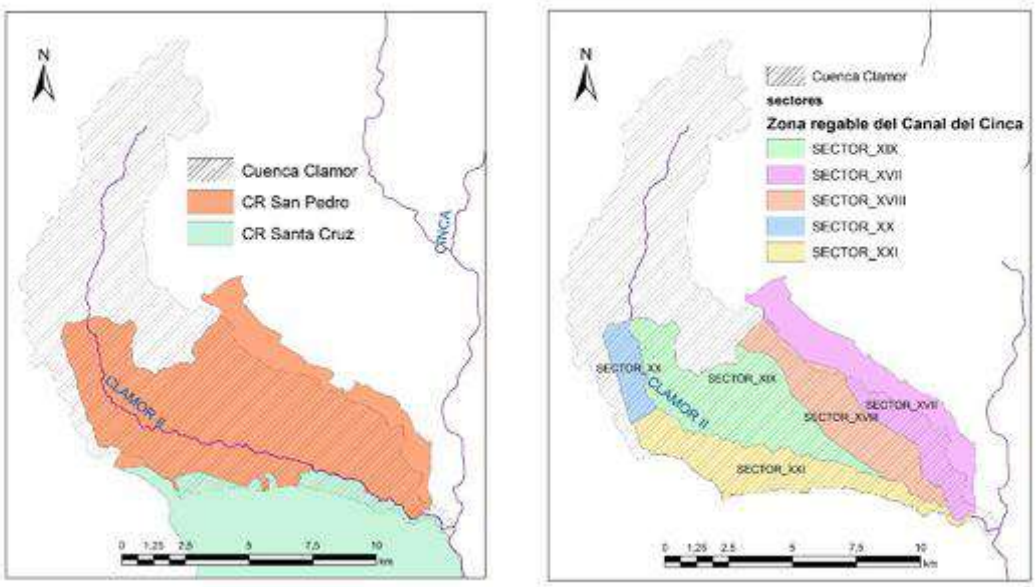


Figura 1. Ubicación de la cuenca y distribución de la superficie de riego por sectores

El marco geológico (Figura 2) son estratos horizontales arcillo-limosos con escasas intercalaciones de arenisca del Mioceno continental del valle del Ebro. Están muy erosionados, las zonas altas protegidas por mantos de grava pliocuaternarios (sasos), y el resto excavado en un valle de fondo plano que desemboca en las terrazas aluviales del Cinca. Se han descrito tres tipos de suelos: Xerorthent Típico, Xerofluvent Típico y Calcixerept Típico. Su granulometría es heterogénea, con representación de casi todas las clases texturales incluso limosa o arcillosa. El limo es predominantemente fino, sobre todo en las texturas franco-arcillo-limosas y arcillo-limosa, donde el limo fino constituye alrededor del 50% del total de la granulometría. Una parte importante de los suelos de esta cuenca está afectada por problemas de salinidad y sodicidad por lo que esta yerma o con cultivo de arroz. Su conductividad hidráulica es mayoritariamente

baja (0,05 a 0,3 m/día) o muy baja (menos de 0.05 m/día) a excepción de los suelos de texturas gruesas donde es media (0.3 a 1 m/día) [4].

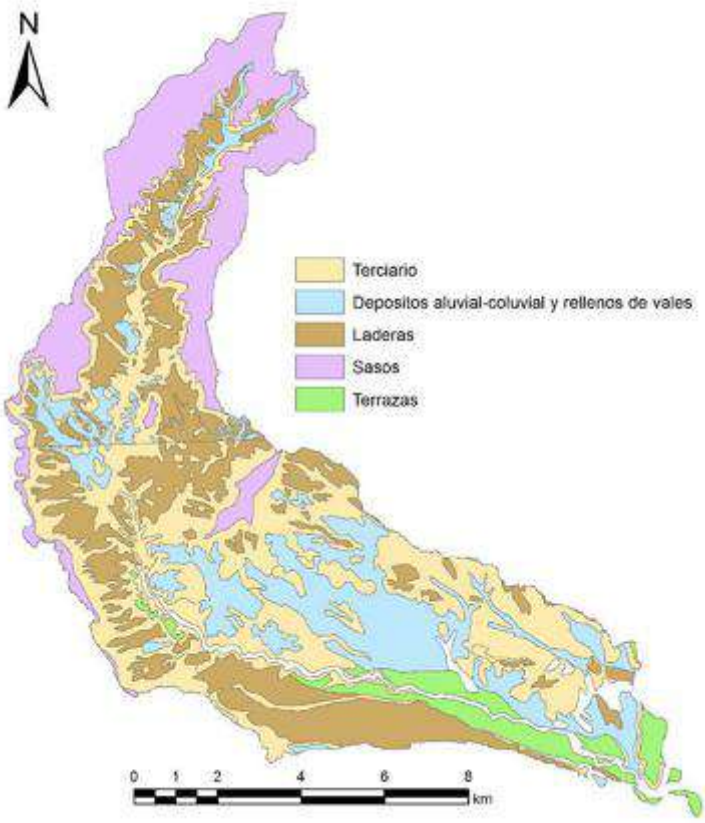


Figura 2. Geología de la cuenca de la Clamor Vieja

3. Materiales y métodos

3.1. Uso del suelo, agua y nitrógeno

La base cartográfica es el parcelario del SIGPAC. Los datos del cultivo por parcela se han obtenido a partir de las declaraciones de los agricultores para la PAC y por agregación, los mapas de cultivo. La ETP se calcula por Penman-Monteith. El agua aplicada se obtuvo de la comunidad de regantes contrastada con encuestas a regantes para determinar, además, prácticas agronómicas, fertilización, tipos de fertilizantes, fechas de aplicación y rendimiento de cultivos. La extracción de nitrógeno por los cultivos (NE) se obtuvo como el producto de su rendimiento por el contenido de N en la cosecha. El contenido de N en cada 1000 kg de materia seca cosechada se estimó: 22 kg para arroz, 24 kg para cebada, 17,3 kg para grano de maíz (14% de humedad), 29 kg para alfalfa, 22 kg para el resto de los forrajes y 12,5 kg de guisantes. No se consideran las extracciones de N contenida en los restos de cosecha del maíz porque es usual incorporar los residuos de cosecha al suelo. Se analiza el manejo del riego mediante el rendimiento del riego o "Relative Irrigation Supply" (RIS) calculado como el coeficiente entre la cantidad de agua aplicada y las necesidades de riego netas (NHn). El manejo del abonado nitrogenado es la relación entre la fertilización nitrogenada mineral y la extracción de los cultivos (NFM/NE).

3.2. Volumen y composición del drenaje

El drenaje se aforó con un minimolinete OTT-C2, por el método de las secciones. Se muestreó con frecuencia semanal durante la campaña de riego y quincenal fuera esta. In situ se mide temperatura y conductividad eléctrica (CE) con un equipo 315i de WTW. Se determinó la concentración de nitrato en la EPS de Huesca mediante acidificación con HCl 1N por espectrometría ultravioleta en un espectrofotómetro Unicam 5625 UV/VIS Spectrometer con lámpara de deuterio, a 220 y 275 nm en cubeta de cuarzo de 1 cm de recorrido de luz. Se determinaron las concentraciones de sodio, calcio y magnesio para calcular el SAR.

3.3. Balance hidrológico de la cuenca

Se han realizado dos balances hídricos a dos escalas diferentes y utilizando metodologías diferentes. El nivel básico, común en la agricultura, es el cultivo como única unidad de gestión. El segundo nivel, utilizado ampliamente en hidrología, es la cuenca. El balance de agua por cultivo permite la estimación del volumen de agua utilizada por todos los cultivos a través de la evapotranspiración (ET) y el volumen drenado por el suelo (DBAS). Utilizando los datos de riego se realiza un balance mensual de agua en el suelo para cada uno de los cultivos presentes en la cuenca entre abril del 2009 y septiembre del 2010. El balance siguiendo la metodología expuesta por [5], hace una distribución de la precipitación (P) y riego (R) entre la evapotranspiración (ET), las pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión (PEA) y DBAS. Las PEA se estimaron según [6]. Desconocida el agua almacenada en el suelo al inicio del estudio (1 de abril de 2009), se asume que el contenido de agua en esta fecha era igual a la mitad de la CRAD.

En una segunda etapa, se ha realizado el balance hidrológico de toda la cuenca que requiere sumar los datos de las parcelas incluidas en la cuenca más los del área de secano para conocer los valores totales de P, R, ET, y PEA. Para ello se necesita determinar dos parámetros más: el agua de canal sobrante vertida al barranco (C) y el drenaje real en el barranco de la Clamor Vieja (D). Así pues, el balance de agua se hizo con los volúmenes asociados a los flujos de entrada (E=P+R+C) y salida (S= ET+D+PEA) del sistema cuenca. Estos volúmenes se agruparon por periodos semestrales con riego (abril a septiembre) y sin riego (octubre a marzo). El error del balance se calcula en términos porcentuales como $200 \cdot [(E - S - A) / (E + S + A)]$, no admitiendo errores superiores al 10% para los balances hidrológicos.

Para evaluar el uso del agua según un modelo de contabilidad del agua hay que determinar los diferentes usos que tienen los flujos de salida del sistema [7]. Por lo que se asigna a cada una de las salidas del balance su uso correspondiente:

- La evapotranspiración productiva (ETp) se corresponde con la ET de los cultivos.
- Se considera evapotranspiración no productiva (ETnp) a la ET de las superficies sin cultivo y a las PEA.
- La escorrentía/percolación se corresponde con el drenaje. Puede ser reutilizable (E/P r) o no reutilizable (E/P nr) dependiendo de la escala espacial que se aplique y de la calidad del agua de drenaje. Si se considera la escala espacial de la cuenca del Ebro, el agua de drenaje de la Clamor Vieja retorna al río Cinca y puede ser reutilizada. Por lo tanto, se consideraría como reutilizable.

Los indicadores hidrológicos relacionan entre sí los volúmenes de los usos del agua mediante las siguientes fracciones:

$FC = (VETp + VETnp + VE/Pnr) / V$

$FR = VE/Pr / V$

$FPC = VETp / (VETp + VETnp + VE/Pnr)$

Donde FC es la fracción consuntiva (%), VETp es el volumen de la evapotranspiración productiva, VETnp es el volumen de la evapotranspiración no productiva, VE/Pnr es el

volumen de la escorrentía/percolación no recuperable, FR es la fracción recuperable (%), VE/Pr es el volumen de la escorrentía/percolación recuperable, V es el volumen de agua total disponible, y FPC es la fracción productiva consuntiva (%).

3.4. Balance de sales

En el balance de sales se calcula la masa de sales en cada componente del balance hídrico, realizado como el producto del volumen de agua y su concentración de sales (producto de la CE del agua en dS/m por el factor de conversión de 640 mg/L). La evapotranspiración y a las pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión son los dos componentes de balance hídrico que no se tienen en cuenta por considerarse libres de iones. También se supone que la exportación de sales por las cosechas es insignificante. Así pues, el balance de sales tiene los siguientes componentes: entrada de sales por riego (SR) y precipitación (SP) y salida por drenaje (SD). El incremento de sales en el sistema formado por el regadío de la cuenca (ΔS) es la diferencia entre las entradas SR y SP y la salida SD. Si este ΔS es positivo se interpreta como procesos de acumulación de sales y si es negativo como lavado de sales fuera de la cuenca.

3.5. Balance de nitrógeno

Se ha realizado el balance de N entre noviembre de 2008 y octubre de 2010 considerando las entradas y salidas de N más importantes del sistema. Las pérdidas a la atmósfera por volatilización y por desnitrificación no se han tenido en cuenta, por carecer de datos. Las entradas consideradas son la masa de nitrógeno en el agua de riego (NR), en la precipitación (NP) y en el vertido del agua sobrante del canal al barranco (NC). Además, se ha considerado el nitrógeno aplicado como fertilizante mineral (NFM), el nitrógeno aplicado como fertilizante orgánico (NFO), y la fijación simbiótica por las leguminosas (NFS). Las salidas consideradas han sido la masa de nitrógeno en el agua de drenaje (ND), y la extracción por los cultivos (NE). La diferencia entre entradas y salidas es la variación de nitrógeno en el sistema (ΔN). El NFM se obtuvo multiplicando las dosis de abonado de las encuestas por la riqueza en N del abono utilizado. La alfalfa puede cubrir sus necesidades de N gracias a la fijación simbiótica. Si se le aporta abono nitrogenado, la planta toma con preferencia el aportado, deja de producir nódulos y de fijar nitrógeno atmosférico a través de las bacterias. A pesar de esto, los agricultores realizan habitualmente aportaciones nitrogenadas en forma mineral, aunque no cubren el total de las necesidades situadas en torno a los 400 kg N/ha. La fijación simbiótica se encarga de cubrir el resto de las necesidades de la alfalfa. Además, cuando se alza un alfalfar, la cantidad de N que queda en el suelo en las coronas y raíces dejadas en el campo, supone al menos 150 kg N/ha. La liberalización de nitrógeno de coronas, raíces y restos de cosecha es lenta y se produce a lo largo de los tres o cuatro años siguientes al enterrado [8]. Para cuantificar este aporte de N por mineralización se toma un valor de 37,5 kg N por hectárea y se multiplica por la superficie de alfalfa levantada.

El nitrógeno aportado por fertilización orgánica (NFO) se calcula a partir del censo ganadero de la comunidad de regantes: 26.270 cerdos, 5.701 ovejas y 570 terneros. El valor neto de N que llega al suelo por tipo de animal y año se ha estimado en de 8,7 kg por cerdo; 18,9 kg por oveja y 77 kg por ternero [9]. Se supone que el purín y estiércol se aplica de forma homogénea en toda la superficie cultivada de la cuenca con un valor medio anual de 41 kg N/ha. La masa de N que entrada en el agua de lluvia (NP) y de riego (NR) se determinó como el producto del volumen por la concentración de nitrato de cada uno. La masa de nitrógeno exportado a través del barranco (ND), se calculó como el producto del volumen de agua aforado por su concentración de nitrógeno nítrico. Se asume que la mayor parte del N presente en el agua se encuentra en forma de nitrato. Finalmente, el incremento de N en el regadío de la

cuenca se calcula como las entradas (NFM+NFO+NFS+NP+NR+NC) menos las salidas (NE+ND).

4. Resultados y discusión

4.1. Cultivos

La Figura 3 presenta los mapas de cultivo durante las campañas de 2009 y 2010. El secano supone el 46% de toda la cuenca, predominando el cultivo de cebada con 2.086 y 2.273 has en 2009 y 2010 respectivamente.

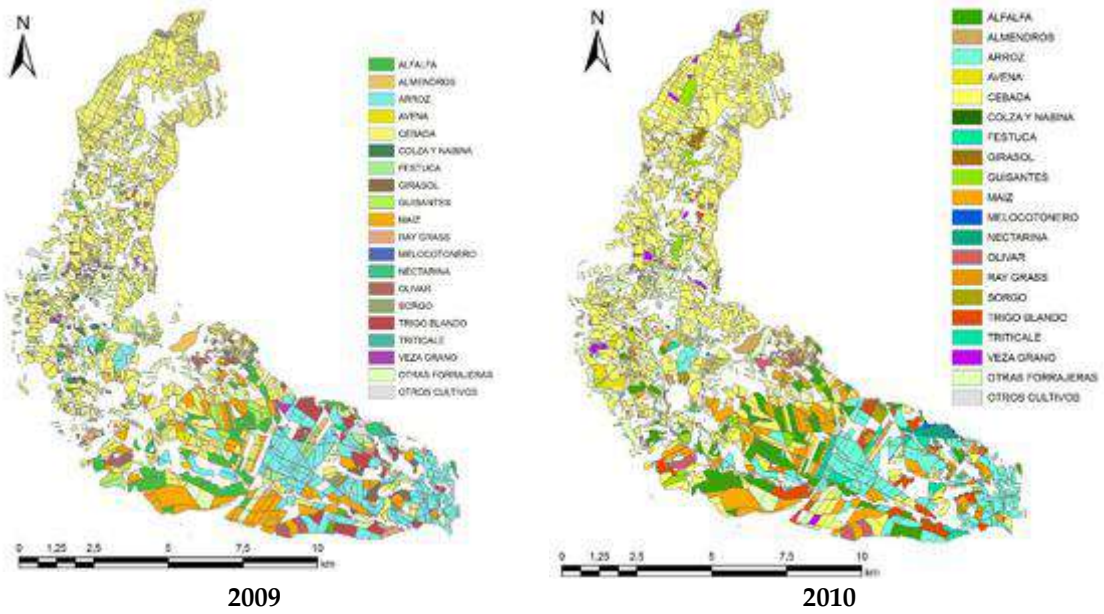


Figura 3. Mapas de cultivo de la cuenca de la Clamor Vieja durante las campañas 2009 y 2010.

Los cultivos mayoritarios en regadío fueron arroz, maíz, cebada y alfalfa. La distribución de superficies fue similar en ambas campañas con un ligero descenso de arroz y maíz en 2010 respecto al 2009, y un aumento en cebada y alfalfa.

El arroz es el cultivo mayoritario, 22% de la superficie de regadío cultivada. Fangueo en noviembre, paso de chisel y abonado de fondo en marzo seguido de pase con grada rotativa. En mayo, embalse y siembra con 200kg/ha. Para cultivo sin fangueo, en febrero se hace un pase de grada. En junio, herbicida y un abonado de cobertera. Se cosecha en octubre, con rendimiento en torno a 6.000kg/ha. El riego en esta zona oscila entre 900 y 1.400 mm/año. Es el cultivo más regado durante las dos campañas con un valor medio de 1080 mm/año.

En el 17% del regadío se cultivó maíz, que se siembra a principios de mayo, tras picado de rastrojo, pases de chisel y grada rotativa y abonado de fondo. La dosis media de siembra es de 85.000 plantas/ha y después se aplica un herbicida de pre-emergencia. Los riegos se hacen de julio a septiembre con un riego medio anual de 735 mm. Se hacen dos abonados por fertirrigación y un tratamiento herbicida de post-emergencia. Hacia noviembre se cosechan, aproximadamente 14.000kg/ha. En las segundas cosechas, tras guisante o cebada, las labores y fechas de siempre son ligeramente diferentes y una siembra más tardía. Tras guisante se obtienen unos 13.000 kg/ha. Tras cebada, 11.000 kg/ha.

En el 16% de la superficie regada hubo cebada. Si sigue a maíz se pican sus restos y se da un pase de chisel y luego subsolador y un abonado de fondo. Se siembran 200 kg/ha en noviembre. En marzo se aplica herbicida, fungicida y un abonado de cobertera. La cebada

recibe unos 165 mm de agua de riego siendo el cultivo menos regado. En junio se cosecha, 5.000 a 7.000kg/ha frente a los 2.500kg/ha de secano.

La alfalfa ocupa el 13% del regadío. Se siembra habitualmente en otoño, aunque en algún caso en primavera. Antes de la siembra se pasan subsolador, cultivador, rulo, abonado de fondo y pase de la grada. Tras la siembra se hace un pase de molón. Cuando la alfalfa ya está implantada, del 2º año en adelante recibe dos o tres abonados de cobertera en abril, junio y agosto con dosis bajas de N. Normalmente la alfalfa se mantiene en el campo unos cinco años y recibe cinco o seis cortes al año, el primero a mitad de abril y el último en octubre, con un intervalo entre cortes de 35 días. El riego medio aplicado es de 680 mm/año. Los rendimientos anuales de alfalfa están en torno a 15.000 kg/ha.

4.2 Uso del suelo, agua y nitrógeno

La Tabla 1 resume los valores de superficie, riego, necesidades hídricas netas (NHn), índice RIS, dosis de fertilización nitrogenada mineral (NFM), nitrógeno extraído teóricamente por los cultivos (NE) y su relación (NFM/NE) para los cultivos más importantes en el regadío de la cuenca Clamor Vieja. Según el índice RIS, el exceso de riego en arroz, maíz y cebada fue del 50% y del 20% en alfalfa. El mayor valor de NFM se da en el maíz con 263 kg/ha, similar al aplicado en otras áreas de riego por aspersión (Sexton et al 1996). El valor de NFM fue similar para arroz y cebada siendo de 165 y 163 kg/ha respectivamente. El valor de NFM de la cebada es similar al de otros regadíos por superficie [10] y por aspersión [11] del valle del Ebro. La relación entre la fertilización nitrogenada mineral y la extracción por cultivos (NFM/NE) varía entre el 0,3 de la alfalfa y el 1,2 del arroz. El valor de la alfalfa se explica porque se le aplica un 30% de sus necesidades nitrógeno y el resto se fija simbióticamente. Por el contrario, en el cultivo del arroz se produce un 20% de exceso de fertilización nitrogenada mineral. Este abono que no se extrae por el arroz podría estar disponible para el siguiente cultivo que también será arroz, pero el exceso de riego lava el nitrógeno sobrante que entra en el ciclo del agua contaminando el agua subterránea y la superficial de los colectores de drenaje. De esta manera las parcelas cultivadas con arroz se identifican como la principal fuente de contaminación por N causada por fertilización excesiva y exceso de riego.

Tabla 1. Superficie, riego, necesidades hídricas netas (NHn), índice RIS, fertilización nitrogenada mineral (NFM), extracción nitrogenada de los cultivos (NE) y su relación (NFM/NE) para los principales cultivos de regadío de la cuenca de la Clamor vieja durante las campañas de riego de 2009 y 2010.

Cultivos	Superficie		Riego		NHn		RIS		N_{FM} N_E		N_{FM}/N_E
	ha		mm		mm				kg/ha		
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009-10		
Arroz	1.034	896	980	1.180	700	773	1,4	1,5	165	132	1,2
Cebada	622	777	120	210	79	144	1,5	1,5	163	144	1,1
Maíz	770	701	670	800	428	533	1,6	1,5	263	242	1,1
Alfalfa	485	633	620	740	495	601	1,3	1,2	142	435	0,3

4.3. Cantidad y calidad del agua drenada

La Figura 4 muestra la evolución del caudal (Q), conductividad eléctrica (CE) y concentración de nitratos [NO_3^-] en el barranco de la Clamor Vieja entre abril de 2009 y noviembre de 2010. Durante las campañas de riego el caudal de drenaje aumenta siendo el volumen de agua drenado seis veces superior al de fuera de la campaña de riego. El régimen hídrico de la cuenca está regulado esencialmente por el riego como ocurre en otras muchas zonas semiáridas con regadío [12,13]. El mayor pico de drenaje fue en agosto de 2009, mes en el

que se registraron elevadas precipitaciones. La CE del agua de drenaje osciló entre 0,48dS/m, y 3,47dS/m, registrándose los menores valores durante las campañas de riego y los máximos fuera de ella. En general, los valores más elevados de concentración de nitratos, se observaron durante los meses de invierno. Las concentraciones de nitrato presentaron valores bajos estando todas las muestras por debajo de los 30 mg/l. Se aprecia una evolución temporal conjunta de la concentración del nitrato y de la conductividad eléctrica. Durante la campaña de riego estos valores se reducen a la mitad en el caso de [NO_3^-] y un 60% en el caso de la CE por el efecto de la dilución que producen los retornos de riego.

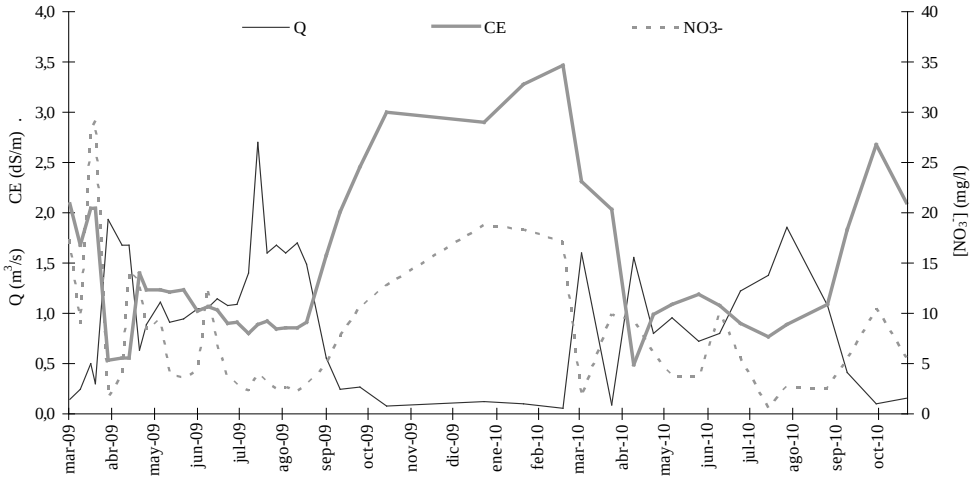


Figura 4. Evolución del caudal (Q), conductividad eléctrica (CE) y concentración de nitratos [NO_3^-] en el barranco de la Clamor Vieja entre abril del 2009 y octubre del 2010.

4.4. Balance de agua

La evolución mensual del balance de agua en la cuenca muestra que durante las campañas de riego el valor de las entradas y salidas se duplica, considerando toda la cuenca y se triplica si se computa sólo el regadío (Figura 4). El riego (R) es la principal entrada de agua a la cuenca durante la campaña de riego, de abril a octubre. El riego varía lógicamente a lo largo de la campaña de riego y alcanza sus mayores valores mensuales en los meses de julio y agosto situándose en torno a los 150 mm. En cuanto a las salidas la más importante fue la evapotranspiración (ET) con un valor medio de 650 mm para el regadío, durante la campaña de riego.

El agua drenada por la cuenca durante las campañas de riego tuvo un valor medio de 157 mm, lo que constituye el 30% de las salidas. La evolución del drenaje es igual durante las dos campañas de riego ya que en ambas tiene dos picos, en mayo y agosto. Si se considera que el agua de drenaje proviene solo de la superficie de regadío el volumen drenado durante la época de riego supera los 400 mm. Este valor tan alto es propio de zonas de riego por superficie [14,15]. El riego influye en el incremento de los volúmenes de salida de agua por evapotranspiración y sobre todo en el drenaje.

El balance de agua de la cuenca se presenta en la Tabla 2. El cierre de los balances de agua durante las dos campañas de riego tiene errores ligeramente superiores al 10%, pero el error acumulado de los 18 meses es sólo del 1,1 % a favor de las entradas, por lo que el balance de agua se considera correcto. La precipitación (P) es la principal entrada de agua a la cuenca durante todos los periodos a excepción de la campaña de riego del 2010 donde lo es el riego (R) seguido del vertido de agua del canal (C). La evapotranspiración (ET) constituye el 72% de la salida de agua seguida del drenaje (D) con un 26% y las PEA con un 2%. El drenaje es seis veces superior durante las épocas de riego frente a al periodo sin riego.

La entrada media anual de agua a la cuenca es de 790 mm de los que 415 son por precipitación, 237 por riego y 138 por vertido del canal. La Figura 6 muestra el reparto que se ha hecho del agua disponible por parte de los regantes entre los posibles usos según un modelo contable. En la cuenca se consume una media de 597 mm de agua al año, de los que 371 mm se han evapotranspirado por los cultivos. Por el barranco de la Clamor Vieja retornan al río Cinca 184 mm de agua. Dicho de otro modo, la fracción consuntiva (FC) se sitúa en el 76 % y la recuperable (FR) en el 23% respecto al agua total de entrada. Debido al error del balance, las fracciones calculadas suman 99% en vez de 100%. La fracción consuntiva productiva (FCp) es del 62% y la consuntiva no productiva (FCnp) es del 38%.

En la zona de regadío, R + P es igual a 1033 mm, de los que 925 mm se consumen por ET. Aunque sólo 671 mm corresponden a la evapotranspiración directa de los cultivos. Según el balance de agua en el suelo, el 10% de las entradas abandona la zona radicular y se convierte en drenaje (Ds), con unos valores del 20% para el arroz, 2% para la cebada, 12% para el maíz y 0% para la alfalfa. Para toda la cuenca se estima un valor de DS equivalente a 41 mm, este valor es próximo los 47 mm, resultantes del restarle los 138 mm de aportación directa del canal (C) a los 184 mm del drenaje real (D).

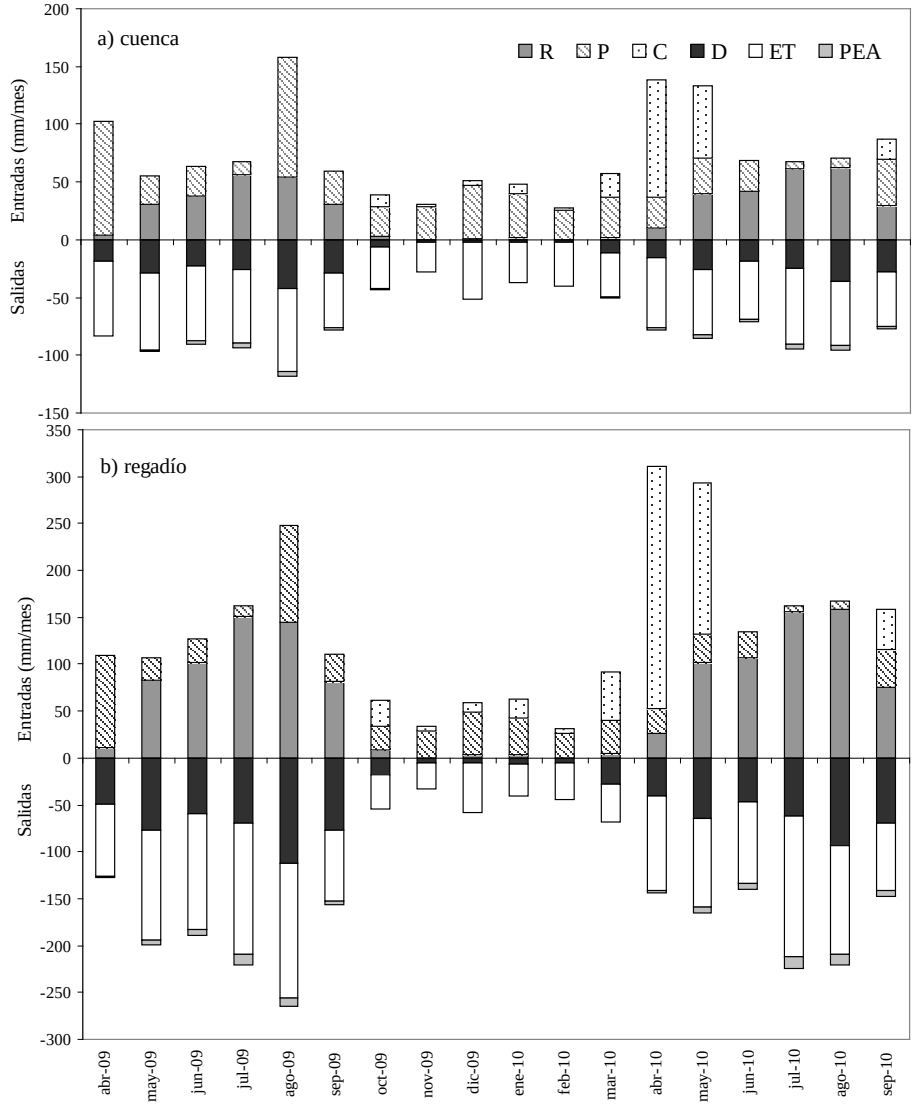


Figura 5. Evolución mensual de las entradas (R, P, C) y salidas (ET, D, PEA) de agua en la cuenca a) y en el regadío b) entre abril de 2009 y octubre de 2010.

Tabla 2. Entradas (E) [precipitación (P), riego (R), vertido del canal al barranco (C)], Salidas (S) [evapotranspiración (ET), drenaje (D), perdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión (PEA)] y error del balance de agua en la cuenca de la Clamor Vieja entre abril de 2009 y septiembre de 2010.

		Abril/ septiembre 2009	**Octubre 2009/ marzo 2010**	**Abril/ septiembre 2010**	**Abril 2009/ septiembre 2010**
			hm³		
	P	33,5	22,8	15,9	72,2
	R	24,4	0,9	28,1	53,5
	C	0	5,3	20,8	26,2
Entradas		58,0	29,0	64,8	151,8
	ET	43,5	25,5	38,5	107,5
	PEA	1,6	0,1	2,0	3,6
	D	19,0	3,1	17,0	39,1
Salidas		64,2	28,6	57,5	150,2
Error Balance	(%)	-10,2	1,5	12,1	1,1
Error Balance acumulado	(%)	-10,2	-6,4	1,1	1,1

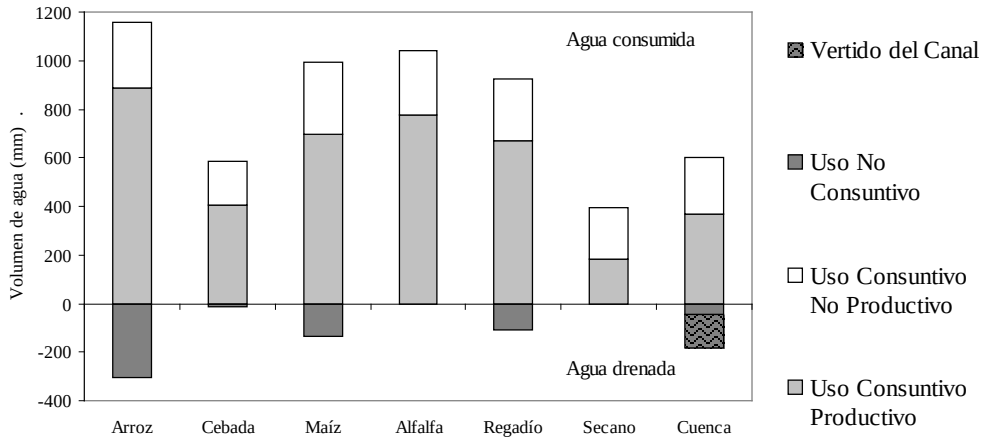


Figura 6. Usos del agua en la cuenca de la Clamor Vieja entre abril de 2009 y octubre de 2010.

4.5. Balance de Sales

Una vez realizado el balance de agua es posible proceder con el balance de sales. Como según éste en el secano no se produce drenaje, se asigna toda el agua drenada al regadío del cual se hace el balance de sales. La masa de sales se calcula a partir de la CE de algunos términos del balance de agua. La Tabla 3 resume el balance de sales y los valores de entradas y salidas de sales al regadío de la cuenca. Por cada ha de regadío entra una media anual de 1187 kg de sal en el agua de riego lo que supone el 62% de las entradas, a pesar de que el agua de riego tiene una baja concentración de sales. La siguiente no es una entrada como el resto, porque se vierte directamente al barranco, pero hay que contabilizarla. Como la evaporación y la evapotranspiración no exportan sales, la única salida es el drenaje y su valor medio anual es de 3878 kg/ha. Este valor de sales exportadas es similar al registrado en los regadíos de Bárdenas [14, 16, 17] y entre tres y seis veces inferior a los registrados en el regadío de la cuenca de la Violada [10, 18,19] y la cuenca de la Valcuerna [20]. Esta diferencia está relacionada con la presencia de yeso en el subsuelo de la cuenca de la Violada y Valcuerna.

Un 51% de las sales exportadas por el drenaje procedió del lavado de las sales del suelo y disolución de los materiales geológicos, otro 31% tuvo su origen en las sales introducidas con el agua de riego y tan solo el 2% se correspondieron a las sales contenidas en el agua de lluvia. El otro 17% de las sales presentes en el agua de drenaje provienen del vertido de agua sobrante del canal de Terreu al barranco de la Clamor Vieja. La diferencia entre entradas y salidas de sales en el regadío de la Clamor Vieja fue negativa. Esto supone un lavado de las sales en torno a los 2.000 kg/ha que puede asociarse principalmente al predominio de los procesos de disolución de sales sobre los de precipitación.

Tabla 3. Balance de sales: Entradas de sal [en la precipitación (SP), en el riego (SR), en el vertido del canal al barranco (SC)], Salida de sal [en el drenaje (SD),] e incremento de sales (⊚S) en el regadío de la cuenca Clamor Vieja entre abril de 2009 y septiembre de 2010.

		Abril/ septiembre 2009	Octubre 2009/ marzo 2010	Abril/ septiembre 2010	Abril 2009/ septiembre 2010
		kg/ha			
Entradas	S_P	63	43	30	**136**
	S_R	1.158	37	1.141	**2.337**
	S_C	1	220	843	**1.065**
Salidas	S_D	2.805	1.192	2.566	**6.563**
E - S = ΔS		-1.582	-892	-551	**-3.026**

4.6. Balance de nitrógeno

El balance de nitrógeno se ha realizado basándose también en el balance hídrico entre abril de 2009 y septiembre de 2010. Es más complejo que el balance de sales debido a que las principales entradas y salidas, como fertilización y cosecha, dependen del manejo de cada agricultor.

La Tabla 4 muestra los principales componentes del balance de nitrógeno del regadío. Lluvia y el riego contribuyen anualmente con una media de con 5 y 2 kg N/ha respectivamente. La fertilización mineral media es 191 kg N/ha y la orgánica 41 kg N/ha. La mineralización de las raíces y coronas de antiguos campos de alfalfa produce un valor de fijación simbiótica de la alfalfa de 1 kg N/ha. La fertilización mineral representa la principal entrada de N al sistema formado por el regadío (80%). La siguiente entrada más importante sería la fertilización orgánica que representa el 17% de las entradas. El nitrógeno extraído por los cultivos del regadío (NE) supone el 97% de las salidas y su valor medio es de 199 kg N/ha. El nitrógeno exportado por el agua de drenaje es la otra salida con un valor medio anual de 7 kg N/ha. Este valor es muy inferior al registrado en otras cuencas con riego por aspersión del valle del Ebro [21]. Según el balance de agua planteado los cultivos fertilizados y regados en exceso, como el arroz y el maíz, serían los responsables de la mayor parte de la exportación de nitrógeno. Sin embargo, el N exportado por el drenaje es sólo el 2,4% de la fertilización orgánica y mineral. Este porcentaje resulta muy bajo respecto a otros estudios, y constata que los suelos poco permeables presentes en esta cuenca, dificultan el lavado de nitratos. La cantidad total de nitrógeno exportado por los cultivos fue de unos 199 kg N/ha. El abonado mineral fue de 191 kg N/ha, ajustándose a las extracciones. De este modo, cabe pensar que el N de la fertilización orgánica (41 kg N/ha), no es tenido en cuenta por los agricultores como un aporte efectivo de nitrógeno.

Tabla 4. Balance de nitrógeno. Nitrógeno total aportado y extraído (kg/ha) en cada una de las cuencas estudiadas.

		Abril/ septiembre 2009	Octubre 2009/ septiembre 2010	Abril 2009/ septiembre 2010	Abril 2009/ septiembre 2010
		kg/ha			%
E	N_P	3,7	4,3	8,0	1,7
	N_R	2,8	1,7	4,5	0,9
	N_{FM}	193	190	383	80
	N_{FO}	43	39	82	17
	N_{FS}	0,9	1,1	1,9	0,4
	N_C	0,0	1,6	1,6	0,3
S	N_E	197	200	397	97
	N_D	6	6	11	3
E - S = ΔN		40,8	31,4	72,2	

5. Conclusiones

La cuenca de la Clamor Vieja es una unidad hidrológica, básicamente arcillosa y muy interesante para estudiar el efecto de la transformación de riego a pie hacia riego por aspersión.

El drenaje de la Clamor vieja está directamente relacionado con el riego. No hay un acuífero amortiguador como en LASESA. Durante las campañas de riego el caudal de drenaje aumenta considerablemente siendo el volumen de agua drenado seis veces superior al de fuera de la campaña de riego.

La conductividad eléctrica del agua de drenaje osciló entre 0,48dS/m, y 3,47dS/m, registrándose los valores más bajos durante las campañas de riego y los máximos fuera de ella. En general, los valores más elevados de concentración de nitratos, se observaron durante los meses de invierno. La concentración de nitrato se encuentra siempre por debajo de los 30 mg/l. Se aprecia una evolución temporal conjunta de la concentración del nitrato y de la conductividad eléctrica. Durante la campaña de riego estos valores se reducen a la mitad en el caso de nitrato y un 60% en el caso de la conductividad eléctrica por el efecto de la dilución que producen los retornos de riego.

El balance hídrico ha permitido conocer que la Fracción Consuntiva se sitúa en el 76 % y la Recuperable en el 23% respecto al agua total de entrada. Debido al error del balance, las fracciones calculadas suman 99% en vez de 100%. La Fracción Consuntiva Productiva es del 62% y la Consuntiva No Productiva es del 38%.

6. Agradecimientos

Agradecer la colaboración de la Comunidad de Regantes de San Pedro de Castelflorite y a su presidente, Alberto Loscertales, por la información aportada. Así mismo la ayuda de J.A. Manso de la EPSH.

Referencias

1. R. Andrés, J.A. Cuchí. Analysis of sprinkler irrigation management in the LASESA district, Monegros (Spain). Agricultural Water Management. 2014, 131: 95–107
2. Andrés, J.A. Cuchí. Salt and nitrate exports from the sprinkler irrigated Malfarás Creek Watershed (Ebro River Valley, Spain) during 2010. Environmental Earth Sciences. 2014, 72 (7), 2667-2682.
3. R. Andrés, J.A. Cuchí. The use of nitrogen in a sprinkler-irrigated district in Monegros (Northeast Spain). Agricultural Water Management.2014, 144:120-133.
4. R. Andrés, R. Proyecto de la red de drenajes para 1200 hectáreas de los sectores XVIII y XIX del Cinca. C.R. San Pedro (Castelflorite, Huesca). 2005. PFC. U. de Zaragoza. 26 p y anejos.

5. J. Causapé. EMR 1.0: Herramienta al servicio de la vigilancia agroambiental del regadío. Información Técnica Económica Agraria. 2008, 104, 369-380.
6. E. Playán, R. Salvador, J.M. Faci, N., Zapata, A. Martínez-Cob, I. Sánchez. Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. Agricultural Water Management. 2005, 76(3), 139-159.
7. D.J. Molden. Accounting for water use and productivity. SWIM Paper 1. IWMI. Colombo, Sri Lanka. 1997. 16pp.
8. Delgado, F. Muñoz, D Andueza, N. Martínez. Acción del abonado nitrogenado sobre el crecimiento y la movilización de reservas nitrogenadas de la alfalfa. En Producción de pastos, forrajes y céspedes. Actas XLII Reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos 6-10 de mayo de 2002, Lérida (España) (pp. 327-332). Ediciones de la Universidad de Lérida.
9. F. Orús. Estiércoles, nitrógeno y cargas ganaderas. Criterios para la valoración del contenido de nitrógeno de los estiércoles, según la Unión Europea. Información Técnica, Gobierno de Aragón. 123. 2003. 16pp.
10. D. Isidoro, D. Quílez, R. Aragüés. Environmental impact of irrigation in La Violada district (Spain). Journal of environmental quality. 2006, 35(3), 776-785.
11. Cavero, A., Beltrán, R. Aragüés. Nitrate exported in drainage waters of two sprinkler-irrigated watersheds. Journal of Environmental quality. 2003, 32(3), 916-926.
12. X. Cai, D.C. McKinney, M.W. Rosegrant. Sustainability analysis for irrigation water management in the Aral Sea region. Agricultural systems. 2003, 76(3), 1043-1066.
13. G. Schoups, C.L. Addams, S. M. Gorelick. Multi-objective calibration of a surface water-groundwater flow model in an irrigated agricultural region: Yaqui Valley, Sonora, Mexico.Hydrology and Earth System Sciences Discussions. 2005. 2(5), 2061-2109.
14. J. Causapé, D. Quílez, R. Aragüés. Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level: II. Salt and nitrate loads in irrigation return flows. Agricultural Water Management. 2004, 70(3), 211-228.
15. D. Isidoro, D. Quílez, R. Aragüés. Water balance and irrigation performance analysis: La Violada irrigation district (Spain) as a case study. Agricultural Water Management. 2004, 64(2), 123-142.
16. J. Causapé. Aprovechamiento del agua en los regadíos de Bardenas. Información Técnica Económica Agraria. 2009, 105(3), 202-221.
17. R. Abrahao, J. Causapé, I. García-Garizábal, D. Merchán, D. Implementing irrigation: Salt and nitrate exported from the Lerma basin (Spain). Agricultural Water Management. 2011, 102(1), 105-112.
18. J. Faci, R. Aragüeś, F. Alberto, D. Quilez, J. Machin, J.L. Arrue. Water and salt balance in an irrigated area of the Ebro River Basin (Spain). Irrigation Science. 1985, 6(1), 29-37.
19. R. Barros, D. Isidoro, R. Aragüés. Three study decades on irrigation performance and salt concentrations and loads in the irrigation return flows of La Violada irrigation district (Spain). Agriculture, ecosystems & environment. 2012, 151, 44-52
20. Tedeschi, A. Beltran, R. Aragüés. Irrigation management and hydrosalinity balance in a semi-arid area of the middle Ebro river basin (Spain). Agricultural water management. 2001, 49(1), 31-50.
21. J. Cavero, A. Beltrán, R. Aragüés. (2003). Nitrate exported in drainage waters of two sprinkler-irrigated watersheds. Journal of Environmental quality. 2003, 32(3), 916-926.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Reescribir los retos del agua con una amplia base social. Grupo Operativo: Partenariado del Agua de la Cuenca del Ebro-Aragón

Á. Jiménez Jiménez[1], I. Oliván Lambea[2], J.R. López Pardo[3], Y. Gimeno Cuenca[4], V. Zapata Ruiz[5], R. Castillo López[6]

[1] Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Aragón, Navarra y País Vasco; decano@coiaanpv.org
[2] Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Aragón, Navarra y País Vasco; secretariotecnico@coiaanpv.org
[3] Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Aragón, Navarra y País Vasco
[4] Riegos del Alto Aragón; ygimeno@riegosaltoaragon.es
[5] EEAD-CSIC; v.zapata@csic.es
[6] CINGRAL; rcastillo@cingral.com

Resumen: El Partenariado del Agua del Ebro-Aragón es un Proyecto que se está ejecutando por el Grupo Operativo del mismo nombre en el marco del Programa de Desarrollo Rural de Aragón 14-20. El estudio y recopilación de los aspectos técnicos, económicos y sociales del regadío generará una geodatabase que permitirá trabajar en tres laboratorios de innovación. El primer laboratorio de innovación abordará la búsqueda de casos de éxito y buenas prácticas, el segundo laboratorio el análisis y prospectiva de las infraestructuras de riego y el tercer taller se encargará de la comunicación interna y externa del Proyecto, sirviendo de canal de adquisición de información y de herramienta para la difusión de los resultados. El proyecto pretende reescribir los retos del agua desde una visión actualizada que aborde los retos del futuro. Será un esbozo de cómo debería evolucionar la gestión del agua, con una perspectiva técnica pero socialmente integradora y con la ambición de crear un modelo atractivo, en el que todos los ciudadanos del Ebro-Aragón quieran instalarse.

Palabras clave: agua, regadío, gobernanza, integración

1. Introducción

La Directiva Marco del Agua hace hincapié en el diálogo para superar las dificultades en la gestión del agua. Hace noventa años en el Ebro se puso en marcha de forma pionera en el mundo la gestión participativa de la cuenca hidrográfica. Los retos que trae el siglo XXI hacen pensar que éste es el momento de dar un nuevo impulso a este modelo.

La discusión acerca del uso del agua en el Ebro-Aragón se establece entre los términos técnicos y los políticos. Ambos son necesarios para identificar soluciones factibles, ampliamente aceptadas y que cumplan con los objetivos de la planificación pública.

Los aspectos técnicos tienen que tender puentes entre disciplinas que suelen vivir aisladas, como la hidrología, la ingeniería, la economía, la ecología, la sociología o el derecho. Técnica y política deben de combinarse para decidir qué bienes y servicios se van a aportar a la sociedad con el agua del Ebro.

El Partenariado del Agua del Ebro se creó informalmente en 2012, y documentalmente en abril de 2014. Se trata de una plataforma de cooperación para la promoción e impulso de un uso

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3298

racional del agua como factor de desarrollo y equilibrio territorial, y de la protección del agua y del suelo como recursos naturales estratégicos de la cuenca del Ebro. El Partenariado presentó en mayo de 2017 una solicitud en respuesta a la convocatoria del Gobierno de Aragón de Grupos Operativos del PDR 2014-2020. La solicitud restringió el ámbito de actuación a la parte aragonesa de la Cuenca (el Ebro-Aragón).

El Grupo Operativo está coordinado por el Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Aragón, Navarra y País Vasco, que junto con la Comunidad general de regantes de Riegos del Altoaragón, el Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Agrícolas de Aragón y la Unión de Agricultores y Ganaderos de Aragón, son los socios beneficiarios de dicho grupo operativo. Es asimismo socia no beneficiaria, la Comunidad de regantes del Canal Imperial de Aragón.

Para la ejecución del proyecto se ha contratado a cuatro centros tecnológicos que se harán cargo de las partes que lo componen. Se trata del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza, el grupo de investigación Riego, Agronomía y Medio Ambiente de la EEAD-CSIC, el Área de Información y Documentación del CITA y la Asociación Española de Periodistas Agroalimentarios.



Figura 1. El Partenariado del Agua del Ebro, el Grupo Operativo y el Proyecto de Cooperación. Liderazgo, Miembros, relaciones entre ellos y con otros elementos del entorno.

2. Estructura del Proyecto

Tal y como se representa en la Figura 2, el proyecto se estructura en dos objetivos:

- Objetivo 1: Análisis del regadio en el Ebro-Aragón
- Objetivo 2: Laboratorios de Innovación

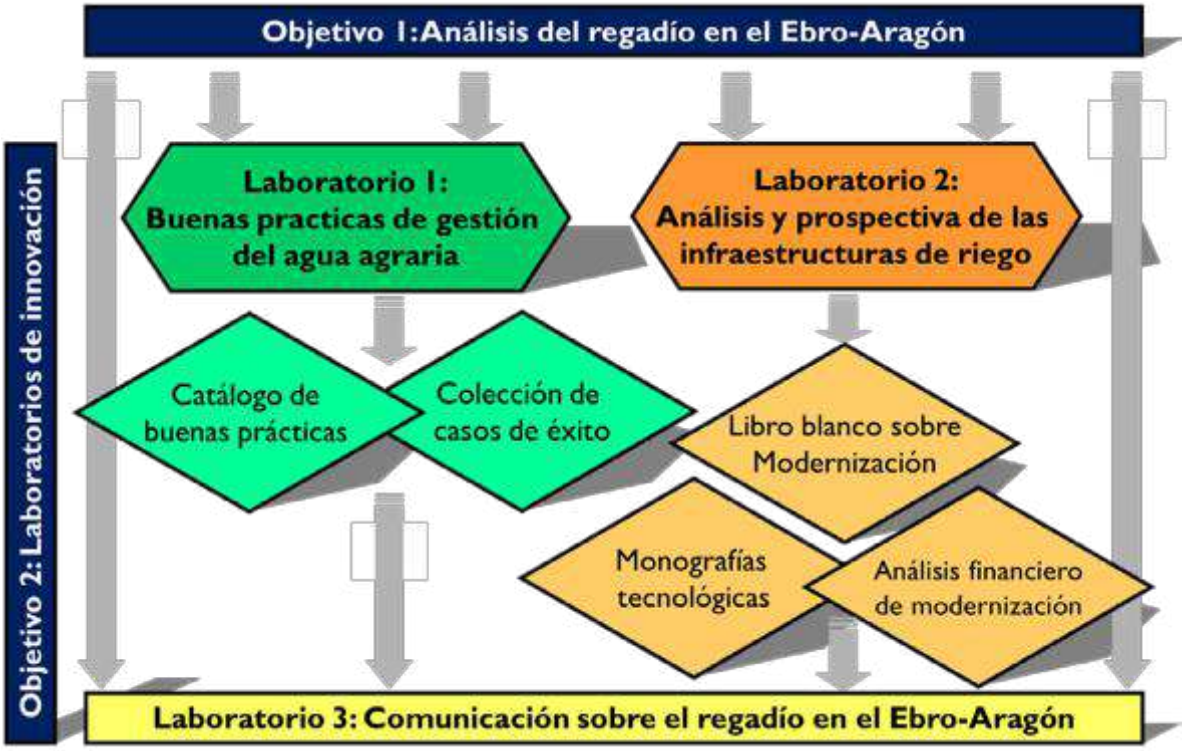


Figura 2. Diagrama funcional de objetivos, laboratorios y resultados principales.

El Objetivo 1 pretende actualizar el mapa del aprovechamiento del agua en Aragón mediante la creación de una geodatabase que contenga la situación de las zonas regables, su potencialidad, su socio economía, sus rasgos hidrológicos y su valor estratégico para el desarrollo regional y local. Analizar los datos de la situación actual con amplitud de miras, para progresar hacia una planificación estratégica de las distintas tipologías de zonas regables. Generar una imagen del regadío diversificada, que sirva de nicho para la generación de iniciativas plurales.

Se pretende obtener la actualización del análisis del regadío en Aragón, generando el mapa de aprovechamiento del agua atendiendo a su situación, potencialidad, valor estratégico para el desarrollo regional y local.

La recopilación de toda esa información será plasmada sobre un medio informático accesible, que permitirá a los usuarios interaccionar y que será la base del análisis para el Proyecto. Se obtendrá una geodatabase con información de tipo geográfico, socioeconómico, hidrológico y ambiental del regadío. Asimismo, esta base cartográfica servirá para integrar los resultados del Proyecto, asociándolos a su localización.

Por otro lado, la geodatabase debe proporcionar soporte cartográfico al laboratorio 3, facilitando la labor de diseminación del conocimiento generado en el proyecto.

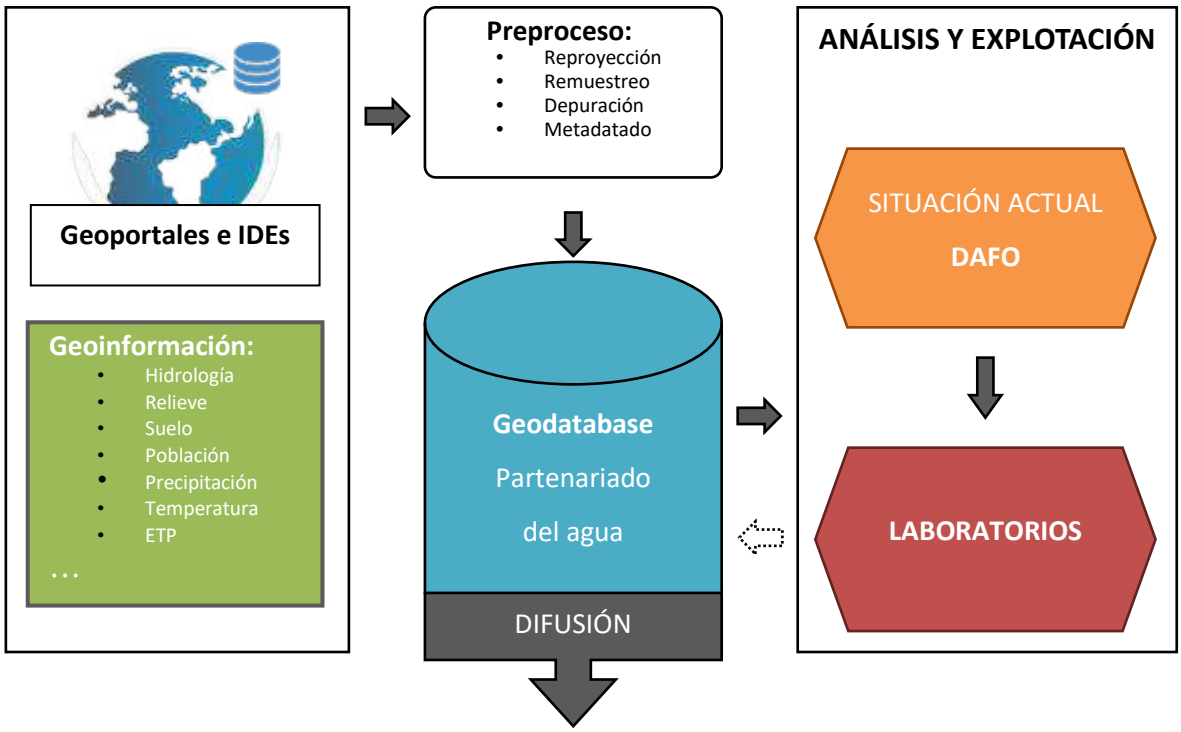


Figura 3. Diagrama de flujos en relación con el Laboratorio 1, mostrando las fuentes de información y las tareas de análisis, así como su relación con los laboratorios 2 y 3.

El objetivo 2 será desarrollado por tres laboratorios:

- Laboratorio 1: búsqueda de casos de éxito y buenas prácticas de gestión del agua agraria.
- Laboratorio 2: análisis y prospectiva de las infraestructuras de riego en Aragón.
- Laboratorio 3: comunicación sobre el regadío en el Ebro-Aragón.

El Laboratorio 1 se encargará del análisis de la "parte inmaterial del agua", mediante la aplicación de técnicas de gestión del conocimiento para la identificación de "buenas prácticas" (BP) y de "casos de éxito" (CE) relativos a la gestión del agua agrícola en el Valle del Ebro. Este conocimiento surge tanto desde los centros de innovación (públicos o privados) como desde los propios usuarios. La estructuración de este conocimiento permitirá poner en valor mediante herramientas de difusión y divulgación tanto las prácticas existentes de gestión, como de cooperación entre los diferentes usuarios, como aquellas que se pudieran poner en marcha en un futuro. Para lograr este objetivo se ha diseñado una herramienta de participación a través de las redes sociales.

En el Laboratorio 2 se va a analizar la "parte material del riego", su planificación, la evolución de las estructuras de regadío en el Ebro-Aragón, su estado de avance tecnológico y los retos que este representa y como se vincula y armoniza con las necesidades productivas.

Se realizará el análisis de la situación actual y el estudio de las infraestructuras de regadío y sus inversiones, ayudará a definir una línea de planificación estratégica de las distintas zonas regables.

El resultado final producirá una colección de monografías técnicas y una serie de modelos económico-financieros aplicables a las modernizaciones de los diferentes tipos de regadíos identificados y un libro blanco de la modernización de regadíos en el EBRO-Aragón.

Laboratorio 3: la comunicación va a ser uno de los elementos clave en el proyecto. Por un lado, se diseminará todo el conocimiento generado y recopilado en el Grupo y por otro, se tratará de comunicar experiencias cotidianas, dirigidas particularmente a la población urbana.

Dentro de estas experiencias, se abordarán los aspectos positivos del agua sobre la vertebración del territorio, así como también la relación entre agua y producción de alimentos y mantenimiento del paisaje del medio rural. El laboratorio se basa en tres ejes de actuación:

- Comunicación interna: destinada a la difusión de los materiales de trabajo entre los socios.
- Comunicación externa: que se establece con los destinatarios directos y los potenciales beneficiarios de los resultados obtenidos.
- Difusión general: con el público en general, a través de prensa y redes sociales.

3. Resultados y discusión

Los resultados previstos se pueden clasificar en los siguientes ámbitos:

Eficiencia en el uso de los recursos naturales. El proyecto guarda una estrecha relación con la modernización de los regadíos de Aragón, que se ha desarrollado fundamentalmente en las dos primeras décadas del siglo XXI. En la medida en que el proyecto impulsará el buen uso del agua en el regadío, facilitará la transición en la eficiencia de riego desde valores próximos al 50% hasta valores próximos al 90%[1], según los análisis realizados en Aragón. Esta transición – que se viene realizando en las comunidades que modernizan sus estructuras y su gestión – se verá apoyada por los resultados del proyecto. Así, se analizará el futuro de estas políticas y la modernización de tipos y zonas de regadíos que hasta ahora no se han beneficiado de proyectos de inversión público-privada.

Desarrollo rural sostenible en el ámbito del regadío. El proyecto analizará indicadores socioeconómicos de los regadíos relacionados con la renta, el empleo y la demografía. El objetivo es contribuir al desarrollo rural sostenible, identificando y promoviendo alternativas estructurales y de gestión que redunden en una mejora de estos indicadores. La falta de un análisis cuantitativo de la situación actual y el corto periodo de tiempo de duración del proyecto en comparación con el tiempo requerido para la mejora de las infraestructuras y la gestión del regadío hacen que no sea posible en este momento cuantificar la mejoría esperable en estos indicadores.

Viabilidad económica de las explotaciones de regadío. Los análisis económicos de los procesos de modernización de regadíos realizados en Aragón hasta la fecha, muestran una mejoría en los resultados económicos de las explotaciones. Las directrices para la mejora futura de las infraestructuras y de la gestión del riego permitirán seguir en esta dirección, poniendo énfasis en aspectos como la reducción de la factura energética, la optimización del coste de las redes colectivas, o la adecuación de las prestaciones de telecontrol a las capacidades de gestión y mantenimiento de cada comunidad de regantes. En el futuro, los proyectos de modernización de regadíos deberían de huir de la "talla única", para ajustarse dinámicamente a cada caso particular, a su realidad económica, social y técnica.

Adaptación y mitigación del cambio climático. La modernización de los regadíos tiene muchas conexiones con la adaptación y la mitigación del cambio climático, pero sólo algunas de ellas están claramente establecidas. Entre las positivas se cuenta la reducción en el uso del agua (cuantificada localmente en un 30%[2]), o la disminución de la contaminación por nitratos (medida en un 76% en una comunidad de regantes de Aragón). El aspecto que hasta la fecha ha resultado más negativo es el aumento de las necesidades de energía para presurizar el agua. Así, entre 1970 y 2007 el consumo energético del regadío español aumentó un 657% (de 206 a 1.560 kWh/ha, Corominas, 2010[3]). El proyecto propondrá acciones estructurales y de manejo que permitan profundizar en la reducción del uso del agua y de la contaminación, así como revertir la tendencia en cuanto al consumo de energía para bombeos.

Soporte a políticas innovadoras sobre regadíos. El equipo del proyecto espera que éste sea uno de los resultados más importantes del proyecto. Las actividades de prospectiva y de elaboración de amplios consensos sociales permitirán hacer una contribución a la formulación

de políticas de regadíos que aseguren su sostenibilidad social, económica y ambiental. Así, desde el proyecto se pretende dar respuesta a preguntas del tipo:

¿Cómo fortalecer la gobernanza de las comunidades de regantes?

¿Cómo planificar la modernización de las zonas regables para minimizar las necesidades energéticas?

¿Cómo aprovechar las energías renovables en el contexto de futuras regulaciones de la generación y la conexión a la red?

¿Cómo gestionar los regadíos para minimizar la contaminación agraria y para consumir los nutrientes que contaminan el agua de riego en la producción agraria?

¿Qué hacer con los regadíos de ribera o de zonas templadas, en los que la modernización casi no ha entrado hasta la fecha?

¿Cómo minimizar el coste de las obras de modernización de regadíos en diferentes contextos geográficos y orientaciones productivas?

¿Cómo diseñar y gestionar las redes para hacer frente a problemas emergentes, como escasez, especies invasoras o cambio climático?

¿Cómo usar mejor los fondos públicos para fomentar la transformación del regadío del Ebro aragonés, fomentando la productividad y la sostenibilidad?

Impacto social en las zonas regables y en la sociedad en general. El proyecto pretende crear una transformación cualitativa (de difícil cuantificación) en la percepción del regadío del Ebro-Aragón tanto en las zonas regables como en la sociedad general. El equipo del proyecto quiere proyectar su visión hacia el futuro para contribuir a fomentar el posibilismo, la proactividad y la gobernanza del sector.

En la figura 4 se representa el diagrama de los flujos alrededor del Grupo Operativo y la interacción con otros grupos de cooperación sectoriales, así como con las instituciones y administraciones involucradas en la gobernanza del agua.

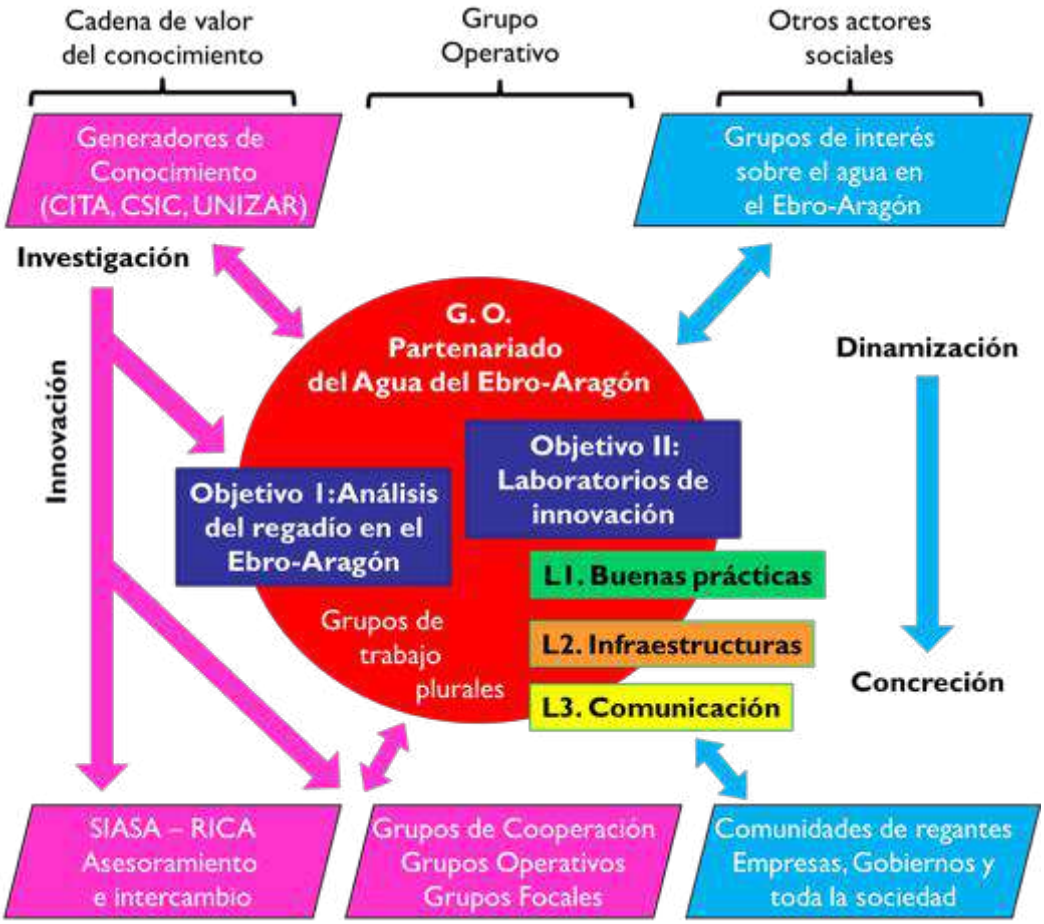


Figura 4. Diagrama de los flujos alrededor del Grupo Operativo y su proyecto. Se representan los flujos relativos a la cadena de valor del conocimiento, los flujos que van de la dinamización a la concreción, y los aspectos de divulgación y comunicación en el marco del proyecto (derivados del Laboratorio 3).

4. Conclusiones

El Grupo Operativo cree firmemente en la capacidad local para generar acuerdos y en la ventaja de la gestión participativa y quiere crear un estado de opinión sobre el regadío, basado en los conocimientos recopilados y creados en este proyecto.

En definitiva el proyecto pretende proporcionar argumentos a las administraciones para ayudarles en la toma de decisiones, en la planificación estratégica, y por lo tanto en su política de regadíos. Además, se pretende divulgar en la sociedad que la realidad del regadío del Ebro-Aragón va más allá de conflictos, desencuentros o desastres naturales.

Referencias

1. Jiménez-Aguirre, M.T., Isidoro, D. 2018. Hydrosaline Balance in and Nitrogen Loads from an irrigation district beforeand after modernization. Agric. Water Manage. 2018, 208 (63-175).
2. Lecina, S., Isidoro, D., Playán, E., Aragüés, R., 2010. Irrigation Modernization in Spain: Effects on Water Quantity and Quality: A conceptual approach. International Journal of Water Resources Development. 2010, 26(2) (265-282)
3. Corominas, J. Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad. Ingeniería del agua. 2010, 17(3), (219-233).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Resultados preliminares del estudio de la influencia de adición de harina de pórfido en la nutrición de un cultivo aplicado al caso de la lechuga (*Lactuca Sativa* L CV Neruda)

A. Fernández López[1], M. Soler-Méndez[2], J.M. Molina-Martínez[2], A. Ruiz-Canales[1]

[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández de Elche, Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO-UMH). Crtra. de Beniel, km 3,2. 03312 Orihuela (Alicante), Spain.
[2] Grupo de I+D+i de Ingeniería Agromótica y del Mar. UPCT. C/ del Ángel s/n. Ed. ELDI E1.06.30202 Cartagena (Murcia), Spain

Resumen: Se desarrolló un experimento en una parcela de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO) de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH). En la citada parcela se aplicó una estrategia de riego común para mantener la tensión del suelo entre 10 y 20 mb. Se escogió como cultivo de control la lechuga (*Lactuca Sativa* L Neruda) pues tiene un ciclo corto y se obtienen resultados de una manera relativamente rápida y sencilla. Se aplicaron diferentes aportes nutricionales y de enmiendas (T1, T2, T3 y T4) durante tres campañas. Para el estudio nutricional de las hojas, a lo largo de todo el experimento, periódicamente se midieron periódicamente: cuatro análisis (uno por tratamiento) al final de la primera campaña; cuatro análisis (uno por tratamiento) al final de la segunda campaña; cuatro análisis (uno por tratamiento) al final de la tercera campaña. Los valores de peso de cosecha (peso por planta) mostraron que en la primera cosecha se obtuvo el mayor peso en el tratamiento T3, seguido del tratamiento T1, T2 y T4. Para la segunda cosecha, el mayor peso se dio en el tratamiento T3, seguido de T4, T2 y T1. Los valores de la segunda cosecha fueron un 3% menores. En la tercera cosecha se obtuvieron mejores resultados de peso de cosecha en los tratamientos T1 y T2 respecto a T3 y T4. Ello indica que se produce homogeneización del estado vegetativo respecto al riego en la segunda campaña y tercera campañas, aunque los valores de cosecha han mostrado peores resultados en la segunda campaña. La influencia en los parámetros de cosecha se muestra en la tercera cosecha y posteriores (si se realizaran) ya que el suelo ha almacenado una serie de elementos y compuestos. El efecto nutricional favorable se presenta a partir de la tercera campaña.

Palabras clave: enmienda, gestión del agua y nutrientes en riego, análisis de hoja, riego localizado, horticultura

1. Introducción

La agricultura es el sector productivo que mayor cantidad de agua consume. De todo el agua dulce que alberga nuestro planeta, el 70% es destinada a la agricultura de regadío y se espera que para 2050 el consumo de agua para producir alimentos aumente un 60% [1]. Con el paso del tiempo está convirtiéndose en un recurso cada vez más escaso y costoso debido a ciertos inconvenientes como las pérdidas del agua consuntiva debido al exceso de riego [2]. Por otra parte, el aumento de la demanda, la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas debido al uso de fertilizantes químicos y la histórica escasez de recursos hídricos que caracteriza

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3510

al sur de Europa debido a la aridez del clima y a las sequías, provoca que en esta zona el suministro de agua nunca esté garantizado, por lo que se hace necesario tomar medidas para utilizarla de un modo racional y eficiente [3].

La utilización de harina de roca de pórfido en sus dos variantes, con materia orgánica y sin materia orgánica, otorga al suelo una capacidad de retención de agua mayor frente a un suelo en el que no se ha utilizado ninguna enmienda. Esta capacidad de retención de agua es un 13 % mayor con la utilización de la harina de roca de pórfido y un 15 % en el caso de *Bocashi*. Se trata de una palabra de origen japonés que indica que es materia orgánica fermentada. Esta característica se traduce en una disminución del periodo de riego y por tanto un mejor aprovechamiento del agua y además un aporte de materia orgánica en el caso del *Bocashi*.

La adición de harina de roca de pórfido supone un aporte mineral al suelo debido a su composición química. Este aporte mineral puede suponer una mejora en la concentración de nutrientes disponibles para la planta en el suelo y este estudio trata de determinar de manera cuantitativa esta mejora y cuánto tiempo es necesario hasta que la planta puede aprovechar estos nutrientes. Se presenta en esta comunicación un ensayo con tratamiento diferencial de adición de diferentes proporciones de materia orgánica y enmienda (harina de pórfido) en suelo desnudo y para el cultivo de lechuga.

2. Materiales y métodos

Se desarrollaron los ensayos durante tres fechas (inicio: 10/11/16; mitad: 2/05/17; final: 19/04/18) en una parcela experimental de 300 m^2 de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO) de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH). En la citada parcela se instaló un sistema de riego localizado con cuatro sectores para aplicar cuatro tratamientos diferenciales respecto a las propiedades del suelo de cultivo. Cada tratamiento ocupaba una superficie de 75 m^2, con un número de 225 lechugas por tratamiento. El desarrollo experimental principal de este proyecto fue el estudio del efecto en las propiedades texturales y edáficas del suelo, así como sus efectos en la producción hortícola, de la adición de harina de roca de pórfido, material desarrollado por la empresa Fulsan, S.A., a un suelo agrícola. Se escogió como cultivo de control la lechuga (*Lactuca Sativa* L Neruda) pues tiene un ciclo corto y se obtienen resultados de una manera relativamente rápida y sencilla. Se realizaron análisis periódicos de la composición química de las hojas y principales parámetros de cosecha (peso, producción por superficie, calibre, entre otros). En este caso se muestra solamente el análisis químico de las hojas y la producción obtenida en cada tratamiento.

Respecto a los tratamientos realizados se focalizó en la influencia de la adición de la harina de roca Fulsan en la producción agrícola. Se realizaron cuatro tratamientos en el suelo de la parcela experimental utilizada. Inicialmente se dividió la parcela en cuatro sectores de riego independientes. Se hizo el seguimiento del cultivo de lechuga durante tres campañas de riego.

En el primer tratamiento (T1) se le añadió al suelo al inicio de la campaña una cantidad convenida de harina de roca Fulsan y se aplicó junto con un abonado de fondo inorgánico. Durante las dos campañas de riego de los dos ciclos de cultivo se le aplicó al correspondiente sector (T1) de la plantación de lechuga, además de las correspondientes dosis de riego establecidas, un abonado inorgánico (fertirriego).

Para el segundo tratamiento (T2) se mezclaron harina de roca Fulsan y compost (*Bocashi*) con el suelo agrícola de la parcela experimental y esta mezcla constituyó un abonado de fondo orgánico. Durante las dos campañas de riego se le aplicó al correspondiente sector (T2) de la plantación de lechuga, además de las correspondientes dosis de riego establecidas, un fertirriego orgánico. El tratamiento T2 no recibió fertirriego inorgánico.

Para el tercer tratamiento (T3) no se añadió ninguna sustancia inicialmente al suelo agrícola. Durante las dos campañas de riego de los dos ciclos de cultivo se le aplicó al correspondiente sector

(T3) de la plantación de lechuga, además de las correspondientes dosis de riego establecidas, un abonado inorgánico (fertirriego), como en el tratamiento T1.

Adicionalmente se consideró incluir un cuarto tratamiento control (T4) para compararlo con los tratamientos anteriores. A este último tratamiento no se añadió abonado de fondo ni se le añadió fertirriego. Únicamente se le aplicó una dosis de riego similar a los tratamientos anteriores.

A los tratamientos T1 y T3 se les añadió un abonado de fondo inorgánico.

La dosificación del abonado de fondo y la adición de enmiendas fue similar en las dos campañas y se resume en lo siguiente.

Tratamiento T 1.

- 70 Kg. Harina de pórfido por bancada. Total 210 Kg.
- 12,5 Kg. Yara Miila Complex (ARA) N-P-K. 12-11-18 más Boro, Hierro, Manganeso y Zinc.
- 12,5 Kg. Durasop Actibion N Plus (Fertinagro) N-P-K. 20-5-5, Mg-S. 2-15 y micronutrientes.

Tratamiento T 2.

- 170 Kg. Bocashi por bancada. Total 510 Kg.

Tratamiento T 3.

- 12,5 Kg. Yara Miila Complex (ARA) N-P-K- 12-11-18 más Boro, Hierro, Manganeso y Zinc.
- 12,5 Kg. Durasop Actibion N Plus (Fertinagro) N-P-K. 20-5-5, Mg-S. 2-15 y micronutrientes.

El plan de abonado inorgánico para los tratamientos T1 y T3 se estableció por la empresa suministradora del abono y se expresa en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Plan de abonado en los tratamientos T1 y T3. 1º y 2º Campaña.

Producción media (Tm/Ha)	40
Producción esperada (Tm/Ha)	40

SUMMUM (Kg/parcela)

		RIQUEZAS	QUINCENAS 1	2	3	4	5	6
SUMMUM	SUMMUM	12-40-6	-	-	-	-	-	-
	SUMMUM	18-5-5	-	0,80	2,50	2,60	2,60	2,60
	SUMMUM	12-5-40	-	-	-	-	-	-
	SUMMUM	15-15-15	0,80	1,60	3,30	4,30	4,30	4,30
			-	-	-	-	-	-

TOTAL KG/parcela	
0	12-40-6
11	18-5-5
0	12-5-40
19	15-15-15
0	0

UNIDADES FERTILIZANTES APORTADAS (U.F./Ha)

	NECESIDADES	1	2	3	4	5	6
N	150	0,16	0,32	0,66	0,86	0,86	0,86
P2O5	110	-	0,08	0,25	0,26	0,26	0,26
K20	100	-	0,08	0,25	0,26	0,26	0,26

TOTAL U.F.APORTADAS	
4	N
1	P2O5
1	K20
Sí	Mn
Sí	Cu
Sí	Zn

Tabla 2. Plan de abonado en los tratamientos T1 y T3. 3º Campaña.

	Aniones mMol/l					Cationes mMol/l						CE
	NO_3^{--}	$N_2PO_4^{-}$	SO_4^{--}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	NH_4^{+}	K^{+}	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^{+}	Ph	mS/cm
Agua de riego	-	-	4	3	7	-	0,28	3	2	8,26	8,2	1,67
Solución ideal	9,12	1,6	-	0,5	-	0,5	6	4	2	-	5,8	2,8
Aportes previstos	9,12	1,6	-	-2,6	-	0,5	5,72	1	-	-	5,8	2,8

Fertilizantes	mMol/l											
H_3PO_4		2,5										
HNO_3		2			2,5							
$Ca(NO_3)_2$		4,1							1			
KNO_3		0,5						4,1				
NH_4NO_3							0,5					
K_2SO_4												
$MgSO_4$												
$NH_4H_2PO_4$												
KH_2PO_4			1,6					1,6				
$Mg(NO_3)_2$												
Aportes reales		9,1										
Solución nutritiva final mMol/l		9,1	1,6	4	-2,5	6,8	0,5	6	4	2	8,3	2,8

	Fertilizantes para 1000 l de solución madre 100 veces concentrada			500 l	250 l
Acido nítrico (37%)		x	13,8=		
Acido nítrico (59%)	2,5	x	7,8=	19,5 l	9,75 l	4,8 l
Acido fosfórico (37%)		x	21,2=		
Acido fosfórico (75%)		x	8,2=		
Nitrato potásico	4,12	x	10,1=	41,6 kg	20,8 kg	10,4 kg
Nitrato calcico	1	x	18,1=	18,1	9,05	4,5
Nitrato amónico	0,5	x	8=	4 kg	2 kg	1 kg
Sulfato potásico		x	17,4=		
Sulfato magnésico		x	24,6=		
Fosfato monoamónico		x	11,5=		
Fosfato monopotásico	1,6	x	13,6=	21,76 kg	10,88 kg	5,44 kg
Nitrato Magnésico		x	25,6=		
Complejo de Microelementos					
Fe^{++}				2,083 kg	

En el tratamiento T2 únicamente se aportó un abono orgánico con una cadencia de dos veces por semana a lo largo de todo el período experimental. Este tratamiento lo dosificó la empresa Fulsan, S.A.

Para el estudio nutricional de las hojas, a lo largo de todo el experimento, se midieron periódicamente:

Cuatro análisis (uno por tratamiento) al final de la primera campaña.

Cuatro análisis (uno por tratamiento) al final de la segunda campaña.

Los resultados de los análisis se muestran en las tablas 3, 4,5 y 6.

Tabla 3. Composición nutricional de la hoja para el tratamiento T1 a lo largo del experimento.

	Valores Normales	**Valores Deficientes**	**Campaña 1**	**Campaña 2**	**Campaña 3**
Sodio %	< 0.30 %	-	0,44	0,23	0,49
Potasio %	4.5-6.3 %	< 2.5 %	5,9	4,1	4,12
Calcio %	0.50-0.75 %	< 0.28 %	1,0	0,39	0,41
Magnesio %	0.25-0.35 %	< 0.20 %	0,32	0,19	0,27
Hierro ppm	> 75 mgkg-1	< 50 mgkg-1	100,4	57,6	82,5
Cobre ppm	50 mgkg-1	< 2.0 mgkg-1	24,6	9,6	16,9
Manganeso ppm	> 5.0 mgkg-1	< 20 mgkg-1	35,3	15,6	17,1
Zinc ppm	> 25 mgkg-1	< 22 mgkg-1	134,2	51,4	55,2
Nitrógeno kjeldahl %	3.5-5.0 %	< 2.5 %	3,2	3,4	2,0
Fósforo %	0.30-0.60 %	< 0.20 %	0,69	0,46	0,59
Boro ppm	> 25 mgkg-1	< 20 mgkg-1	37,5	18,4	12,1

Tabla 4. Composición nutricional de la hoja para el tratamiento T2 a lo largo del experimento.

	Valores Normales	**Valores Deficientes**	**Campaña 1**	**Campaña 2**	**Campaña 3**
Sodio %	< 0.30 %	-	0,41	0,22	0,46
Potasio %	4.5-6.3 %	< 2.5 %	6,1	4,2	4,42
Calcio %	0.50-0.75 %	< 0.28 %	0,85	0,60	0,52
Magnesio %	0.25-0.35 %	< 0.20 %	0,29	0,25	0,29
Hierro ppm	> 75 mgkg-1	< 50 mgkg-1	83,2	68,1	101,3
Cobre ppm	50 mgkg-1	< 2.0 mgkg-1	25,1	6,7	17,5
Manganeso ppm	> 5.0 mgkg-1	< 20 mgkg-1	36,7	21,9	24,3
Zinc ppm	> 25 mgkg-1	< 22 mgkg-1	60,6	41,8	56,7
Nitrógeno kjeldahl %	3.5-5.0 %	< 2.5 %	3,4	3,2	4,6
Fósforo %	0.30-0.60 %	< 0.20 %	0,72	0,49	0,78
Boro ppm	> 25 mgkg-1	< 20 mgkg-1	32,2	19,2	19,7

Tabla 5. Composición nutricional de la hoja para el tratamiento T3 a lo largo del experimento.

	Valores Normales	**Valores Deficientes**	**Campaña 1**	**Campaña 2**	**Campaña 3**
Sodio %	< 0.30 %	-	0,31	0,21	0,46
Potasio %	4.5-6.3 %	< 2.5 %	5,1	3,5	3,61
Calcio %	0.50-0.75 %	< 0.28 %	0,41	0,36	0,35
Magnesio %	0.25-0.35 %	< 0.20 %	0,33	0,18	0,21
Hierro ppm	> 75 mgkg-1	< 50 mgkg-1	86,6	66,3	74,3
Cobre ppm	50 mgkg-1	< 2.0 mgkg-1	40,8	7,9	16,3
Manganeso ppm	> 5.0 mgkg-1	< 20 mgkg-1	38,9	15,1	14,3
Zinc ppm	> 25 mgkg-1	< 22 mgkg-1	43,5	49,4	43,7
Nitrógeno kjeldahl %	3.5-5.0 %	< 2.5 %	3,8	3,6	3,6
Fósforo %	0.30-0.60 %	< 0.20 %	0,42	0,44	0,59
Boro ppm	> 25 mgkg-1	< 20 mgkg-1	28,9	17,4	13

Tabla 6. Composición nutricional de la hoja para el tratamiento T4 a lo largo del experimento.

	Valores Normales	**Valores Deficientes**	**Campaña 1**	**Campaña 2**	**Campaña 3**
Sodio %	< 0.30 %	-	0,43	0,21	0,35
Potasio %	4.5-6.3 %	< 2.5 %	6,0	4,4	3,41
Calcio %	0.50-0.75 %	< 0.28 %	0,99	0,52	0,35
Magnesio %	0.25-0.35 %	< 0.20 %	0,34	0,21	0,21
Hierro ppm	> 75 mgkg-1	< 50 mgkg-1	89,8	57,7	70,7
Cobre ppm	50 mgkg-1	< 2.0 mgkg-1	26,9	8,1	15,3
Manganeso ppm	> 5.0 mgkg-1	< 20 mgkg-1	40,2	19,7	16,7
Zinc ppm	> 25 mgkg-1	< 22 mgkg-1	55,7	40,2	45,1
Nitrógeno kjeldahl %	3.5-5.0 %	< 2.5 %	4,2	2,9	3,1
Fósforo %	0.30-0.60 %	< 0.20 %	0,58	0,38	0,57
Boro ppm	> 25 mgkg-1	< 20 mgkg-1	23,2	22,7	9,7

3. Resultados y discusión

El peso medio de la cosecha (por planta) para la primera campaña fue el siguiente:
Tratamiento T1: 1,195 kg ± 0,303
Tratamiento T2: 1,014 kg ± 0,150
Tratamiento T3: 1,249 kg ± 0,259
Tratamiento T4: 1,077 kg ± 0,172
El peso medio de la cosecha para la segunda campaña fue el siguiente:
Tratamiento T1: 0,758 kg ± 0,192
Tratamiento T2: 0,788 kg ± 0,196
Tratamiento T3: 1,076 kg ± 0,222
Tratamiento T4: 0,896 kg ± 0,199

Según lo expuesto, la producción en la segunda campaña fue de menor cuantía, alrededor de un 3% menor.

El peso medio de la cosecha para la tercera campaña fue el siguiente:
Tratamiento T1: 0,759 kg ± 0,132
Tratamiento T2: 1,251 kg ± 0,157
Tratamiento T3: 1,193 kg ± 0,169
Tratamiento T4: 1,017 kg ± 0,117

El peso medio de la cosecha fue mayor en el tratamiento T2 durante la tercera campaña. Se muestra la tendencia en esta última campaña. Se intuye que las propiedades de mejora que puede aportar la harina de pórfido relacionadas con el almacenamiento de agua y la posibilidad de suministro de nutrientes, se ha materializado en la tercera campaña.

Los valores de análisis de hoja muestran lo siguiente:

Sodio: En el tratamiento T4 se mejora la concentración de sodio en hoja en la segunda campaña desde carencia a valores normales, así como en T1, T2 y T3. Tienen valores similares. No hay una clara influencia de la adición de harina de pórfido en el estado nutricional de la hoja respecto al sodio.

Potasio: Los valores para el T4 han estado dentro de la normalidad y se pasa a una cierta carencia, pero sin ser excesiva, al igual que T2, T3 y T4. Los niveles son mayores en T2, seguidos de T4, T1 y T3. La harina de pórfido puede tener una cierta influencia en el estado nutricional del potasio en hoja, aunque no es muy significativo.

Calcio: Se han mantenido concentraciones normales. Son mayores en el T2 y T1. Puede tener una cierta influencia la adición de harina de pórfido en el estado nutricional del calcio en hoja.

Magnesio: Las lechugas han pasado de niveles normales a valores mínimos, pero sin ser carentes. La influencia de la adición de harina de pórfido es mayor en el T2 que en el resto.

Hierro: Se ha reducido en un 25% la concentración en el T4. Aunque no provoca carencias sí pueden producirse a medio plazo. Igual que en el resto. No ha habido una diferencia al aplicar harina de pórfido.

Cobre: Ha disminuido en el experimento y la dificultad de absorción puede ser problemática a la larga, aunque no llega a presentar carencia. No hay influencia en la adición de harina de pórfido.

Manganeso: El manganeso en el T4 se ha reducido a bajos niveles, pero no de carencia. Valores por debajo de T1, T2 y T3. La adición de harina de pórfido sí puede tener una influencia en la composición de la hoja.

Zinc: El zinc se ha mantenido en valores normales durante todo el experimento, como en T1, T2 y T3. Ha sido mayor en T1 y T2. Tiene una influencia clara la adición de harina de pórfido al estado nutricional de la hoja.

Nitrógeno: La concentración de este elemento se mantiene en la normalidad. Aunque el valor del porcentaje de nitrógeno ha sido inferior a los niveles óptimos para lechugas de 45 días (entre 3,5 y 5 %) en ningún momento del experimento se alcanzan valores que provoquen carencias en

el tratamiento T4. Similar al T1 y T3. La adición de harina de roca ha influido en estados nutricionales de menor cuantía que los tratamientos control. Hay que probarlo en nuevas campañas.

Fósforo: Los valores de la concentración de fósforo en el tratamiento T4 quedaron dentro del rango de los valores normales, igual que en el tratamiento T1, T2 y T3. Las mayores concentraciones se dieron en T1, seguido de T2. Se nota una cierta influencia en el estado nutricional.

Boro: El boro se ha visto reducido en las dos campañas para el T4. Se presentan más carencias que en T1, T2 y T3. La adición de harina de roca puede influir positivamente en el estado nutricional en hoja, en el tratamiento T1.

4. Conclusiones

Los valores de peso de cosecha (peso por planta) mostraron que en la primera cosecha se obtuvo el mayor peso en el tratamiento T3, seguido del tratamiento T1, T2 y T4.

Para la segunda cosecha, el mayor peso se dio en el tratamiento T3, seguido de T4, T2 y T1. Los valores de la segunda cosecha fueron un 3% menores.

Hay una cierta estabilización de la homogeneización del estado vegetativo respecto al riego en la segunda campaña, aunque los valores de cosecha han mostrado peores resultados. Puede que la influencia en los parámetros de cosecha se muestra en las siguientes cosechas ya que el suelo ha almacenado una serie de elementos y compuestos.

5. Agradecimientos

Los autores del artículo expresan su agradecimiento a la empresa FULSAN, S.A. por su apoyo económico. Igualmente se muestran agradecidos a la empresa TELENATURA EBT, S.L. y Viveros Simón Cases, S.L. por su apoyo tecnológico y agronómico.

Referencias

1. Yildiz, I. Review of climate change issues: A forcing function perspective in agricultural and energy innovation. International journal of energy research. 2019, 43, (2200-2215).
2. Wei, X.P., Xie, D.D., Mao, L.C., Xu, C.J., Luo, Z.S., Xia, M., Zhao, X.X., Han, X.Y., Lu, W.J. Excess water loss induced by simulated transport vibration in postharvest kiwifruit. Scientia Horticulturae. 2019, 250, (113-120).
3. Launay, M., Dugue, V., Faure, J.B., Coquery, M., Camenen, B., Le Coz, J. Numerical modelling of the suspended particulate matter dynamics in a regulated river network. Science of the total environment, 2019, 665, (591-605).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Transferencia y acumulación de metales y metaloides tanto en lechuga como en plantas silvestres en suelos afectados por la minería metálica

Martínez-Carlos J.[1], Martínez-Martínez S.[1], Zornoza R., Faz A.[1], Gabarrón M, Soriano-Disla M.[1], Gómez-López M.D.[1], Acosta J.A.[1]

[1] Grupo de Investigación Gestión, Aprovechamiento y Recuperación de Suelos y Aguas; Departamento de Ingeniería Agronómica; Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII 48, 30203 Cartagena, España; silvia.martinez@upct.es.

Resumen: La transferencia y acumulación de elementos tóxicos desde suelos contaminados hacia los cultivos o plantas silvestres es de especial interés tanto desde el punto de vista medioambiental como para la salud pública. En este estudio se evaluó la transferencia y acumulación de metales y metaloides tanto en plantas silvestres *(Chamaerops humilis, Lavanda multífida, Olea europea sylvestris, Pistacia lentiscus, Rhamnus Lycioides)* como en diferentes variedades de lechuga ("Romana", "Batavia" y "Lollo rosso"). El estudio se realizó en una zona afectada por la minería metálica del sureste de España. Las 3 variedades de lechuga fueron cultivadas en maceta bajo invernadero, utilizando tres tipos distintos de suelos agrícolas afectados por dicha minería. Para alcanzar los objetivos planteados se analizaron las concentraciones de Cd, Zn, Pb y As en suelo y planta (raíz, tallo, hoja y fruto), lo que permitió conocer tanto la acumulación de metal/oide en los diferentes órganos de las plantas, así como calcular los factores de transferencia suelo/planta y raíz/(tallo-hoja-fruto). Los resultados mostraron que el mayor riesgo de transferencia se observaba en las hojas de *Lavandula multifida*, mientras que la mayor acumulación se presentaba en las partes aéreas de *Olea europea*. En general, el elemento más móvil en el sistema suelo/planta fue el Zn seguido de Pb > Cd > As, siendo Zn seguido de Pb los más móviles dentro de la planta, principalmente hacia las hojas. Por el contrario, *Pistacia lentiscus* acumuló la mayor parte de los metales absorbidos en raíz, no transferirlos a la parte aérea, por lo que podría ser usadas como especie fitoestabilizadora. Por su parte, los resultados obtenidos en las variedades de lechuga mostraban que el menor riesgo de transferencia de metales se presentaba en la variedad de lechuga "Romana", mientras que Lollo rosso registraba una mayor transferencia de As y Pb, y Batavia la variedad con una mayor transferencia de Cd y Zn. Los contenidos de metales acumulados en las tres variedades estudiadas estaban por encima de los límites tolerables.

Palabras clave: riesgo ambiental, transferencia de metal, fitoestabilización, residuo minero, cultivo en invernadero.

1. Introducción

La contaminación del suelo es uno de los principales problemas medioambientales a escala global. La Sierra Minera, ubicada entre las ciudades de Cartagena y La Unión en el sureste de España, fue una de las zonas mineras más grandes del mundo, en ella se producía Pb/Zn hasta finales de los años 90 del siglo pasado [1,2]. Con el desarrollo de la actividad minera, se

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3440

depositaron millones de toneladas de residuos mineros en más de 80 depósitos mineros. Estos depósitos se abandonaron después del cese de la actividad en 1991. La acumulación de residuos mineros es de gran preocupación debido al riesgo asociado al alto contenido de metales/oides tóxicos. Además, estos depósitos se caracterizar por presentar baja fertilidad, bajo contenido de materia orgánica y alta acidez. Por lo tanto, el establecimiento de vegetación nativa es muy difícil a menos que se apliquen enmiendas orgánicas y/o inorgánicas [3,4,5,6]. Y esta ausencia de especies vegetales en los depósitos mineros favorece la dispersión potencial de metal/oides a los suelos naturales y agrícolas próximos, que pueden ser acumulados por las plantas que crecen en estos suelos y ser transferidos a la cadena trófica desencadenando posibles riesgos ambientales y para la salud humana. Para evitar esta dispersión de metales/oides, se podrían llevar a cabo técnicas de fitorremediación en los depósitos mineros abandonados. La fitorremediación se considera un método económico y ambientalmente sostenible para remediar los suelos contaminados [7]. Entre las técnicas de fitorremediación, la fitoestabilización asistida puede ser una solución para reducir el riesgo de dispersión de contaminantes [8,9]. La fitoestabilización asistida consiste en el uso de plantas junto a la incorporación de enmiendas orgánicas / inorgánicas. Las plantas elegidas deben desarrollar un extenso sistema radicular y una gran cantidad de biomasa en presencia de altas concentraciones de metal/oide. Al mismo tiempo, la translocación de los metales desde las raíces debe ser lo más lenta posible, limitando la transferencia de metales a la cadena trófica [10]. Después de la fitorremediación, el establecimiento de una cubierta vegetal natural o inducida contribuye a mejorar la calidad física. Esto favorece el desarrollo de los suelos porque la rizosfera es una fuente de nutrientes y un refugio para los microorganismos [11 ,12].

Se han propuesto varias enmiendas para estabilizar el metal(loide) en los suelos [13]. Las enmiendas orgánicas y los materiales ricos en carbonatos se han utilizado para reducir la biodisponibilidad de los metales y restaurar la función ecológica de los suelos contaminados [14,15]. La reducción de la biodisponibilidad del metal por los materiales orgánicos se debe a la adsorción sobre superficies sólidas y la complejación con sustancias húmicas. Este proceso de adsorción depende del metal particular, el tipo de suelo, el grado de materia orgánica, la humificación, el contenido de metales y sales, los efectos de la materia orgánica en el potencial redox y el pH [11]. El uso de subproductos es una forma de reducir la eliminación de desechos y revalorizarlos. También contribuyen a compensar la escasez de materia orgánica y aumentan la fertilidad, impiden la degradación del suelo, contribuyen al secuestro de carbono, mejoran la calidad del suelo y aumentan la biodiversidad.

La transferencia de metales/oides a cultivos cercanos a los depósitos mineros supone un riesgo para la salud pública. La acción erosiva incorpora metales a las tierras de cultivo que son tomados por la planta y que puede afectar de distinta manera según la tasa de consumo, la especie vegetal , las propiedades y composición química del suelo [16]. Las lechugas son un ingrediente muy común en la dieta mediterránea y acumulan más metales en sus partes comestibles que otras especies como los tomates o las habas. Esto es debido a que las plantas presentan mayor concentración en sus raíces, tallos y hojas que en sus frutos [17]. Estudios recientes en la Sierra Minera han encontrado suelos de cultivo de lechugas con altas concentraciones de Pb y Zn [18].

El objetivo del estudio fue (i) evaluar la transferencia de Cd, Zn, Pb y As del suelo a las plantas en un área natural de la Rambla del Avenque, (ii) determinar la transferencia de Cd, Zn, Pb y As en plantas hortícolas cultivadas en maceta con suelo tomado de áreas agrícolas próximas a los depósitos mineros de la Rambla del Avenque y bajo invernadero; (iii) seleccionar las mejores especies de plantas de la zona natural para la fitoestabilización asistida de depósitos mineros.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio y diseño experimental

Se cogieron muestras de suelo y planta silvestre en un área forestal de la Rambla del Avenque cercana a cinco depósitos de estériles mineros de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Figura 1). Estos depósitos presentan un pH ácido y alta salinidad [8], que unido a las aridez característica del clima mediterráneo: escasez de lluvias (275 mm anual), temperatura templada (18 ºC) y alta evapotranspiración (>900 mm anual), dificultan el establecimiento de la vegetación. La acción erosiva del viento traslada las partículas de los residuos mineros a las zonas agrícolas y forestales próximas y éstos son incorporados por el suelo y la planta.

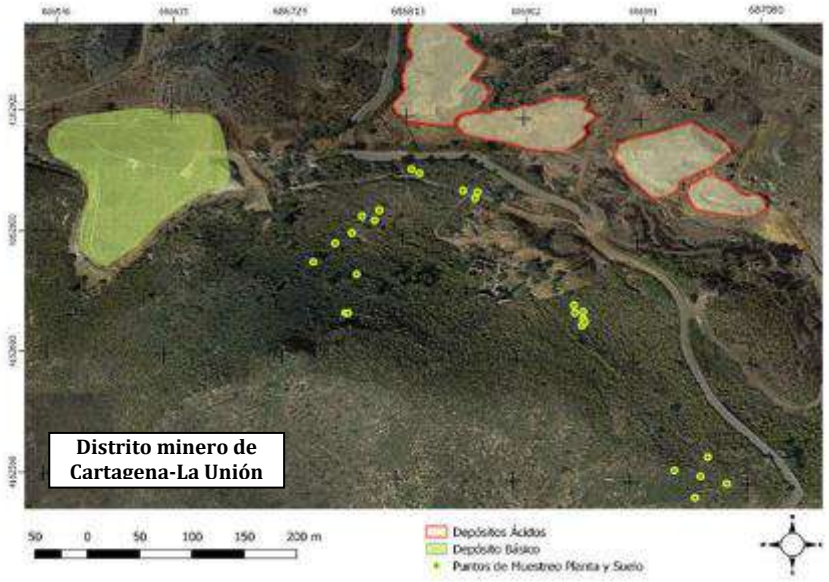


Figura 1. Mapa de localización de las muestras de suelo y planta en la zona forestal de la Rambla del Avenque.

En el área forestal localizada en la Rambla del Avenque se seleccionaron cinco especies vegetales representativas por criterio de abundancia (Chamaerops humilis-CH, Lavandula multifida-LM, Olea europaea var. Sylvestris-OE, Pistacia lentiscus-PL, Rhamnus lycioides-RL), y se tomaron un total de 25 muestras de plantas (5 réplicas por especie) con sus respectivos suelos rizosféricos y no rizosféricos.

Además, se seleccionaron tres suelos agrícolas representativos de las zonas de cultivo próximas a la zona minera de estudio para cultivar 3 variedades de lechuga (Romana, Lollo rosso y Batavia) en macetas bajo invernadero (Foto 1). Se realizaron cinco réplicas por variedad y por tipo de suelo.



Foto 1. Cultivo de lechugas en el interior del invernadero.

2.2. Métodos analíticos

El suelo rizosférico se obtuvo removiendo el material adherido a las raíces de los ejemplares de planta recolectados. Todas las muestras fueron secadas a 45°C durante 7 días, pasadas por un tamiz de luz 2mm y molido en mortero tipo Ágata (RetschRM 100).

Las plantas procedentes de los suelos naturales y las lechugas cultivadas bajo invernadero fueron llevadas al laboratorio donde se separaron en raíz, tallo, frutos y hojas, a continuación se lavaron con agua desionizada y se secaron al horno hasta peso constante a 45°C durante 5 días.

Para las muestras de suelo se prepararon soluciones con agua destilada/suelo [19] para la medida de pH (ratio 1:1) y conductividad eléctrica (1:5). La concentración total de metal en las muestras de planta y suelo se obtuvo por digestión con microondas, método US-EPA 3052[20] , utilizando 0,5 g de planta en HNO3/H2O2/HCl y en HNO3 en el caso de las muestras de suelo. Por su parte, la fracción biodisponible de metales se obtuvo de las fases lábiles del procedimiento de extracción secuencial de Tessier et al. [21] modificado por Li et al. [22]. Para la extracción secuencial del As se siguió el método propuesto por Shiowatana et al. [23]. Todas las concentraciones de metales/oides totales y biodisponibles se midieron mediante ICP-MS (Agilent 7500CE).

Se llevaron a cabo cálculos de los factores bioacumulación (BCF) [24] y el de translocación (TF) [25], [26].

$$\text{Factor de bioacumulación (BCF)} = \frac{\text{Concentración de metal en cada parte de la planta}}{\text{Concentración de metal biodisponible en el suelo}}$$

$$\text{Factor de translocación (TF)} = \frac{\text{Concentración de metal en la parte aérea (tallos, frutos y hojas).}}{\text{Concentración de metal en raíces}}$$

El factor de bioacumulación (BCF) se utiliza para medir la capacidad de captación de un metal por una planta (raíz y parte aérea) con relación a su concentración en el suelo. Para las plantas, el BCF se utiliza como una medida de la eficiencia de acumulación de metales en biomasa. Aquellas especies exclusoras poseen BCF menores que 1, tanto menores cuanto mayor es su capacidad de exclusión. Por su parte, TFs mayores a 1 sugieren gran capacidad para transportar metales desde las raíces a los vástagos, explicada en su mayor parte por eficientes sistemas de transporte de metales [27] y, probablemente, por secuestro de metales en las vacuolas de las hojas y en el apoplasto [28].

3. Resultados y discusión

3.1 Suelo forestal

Los suelos de la zona forestal son ligeramente-moderadamente alcalinos (7,7-8,1) e hipersalinos (247,7-1460,6 dSm^{-1}). Las concentraciones totales medias de metal/oide en estos suelos es de 7,91 mg kg^{-1} para Cd; 288,7 mg kg^{-1} para As; 2882,2 mg kg^{-1} para Pb y 1865,4 mg kg^{-1} en el caso del Zn, todas ellas superiores a los valores de fondo de metal/oide establecidos por Martínez y Pérez [29] en esta zona de estudio. Por su parte, la movilidad de los metales disminuye conforme Cd>As>Pb>Zn.

Respecto a los resultados de planta, los metales que más se acumularon fueron Pb y Zn, siendo las raíces de PL las que presentaban mayores contenidos de Pb y las hojas de LM las mayores concentraciones de ambos metales. Valores de BCF>1 se registraron en las raíces de PL para Pb y en las hojas de LM para Pb y Zn, lo que indica que estas dos especies son potencialmente hiperacumuladoras [29]. La acumulación en las partes comestibles (BCF>1) puede suponer un riesgo de incorporación a la cadena trófica a la vez que hace a las especies una buena elección para aplicar técnicas fitoextractivas [30] por haber desarrollado resistencia a la presencia de metales en sus tejidos

y ser plantas acumuladoras. Sin embargo, si la planta presenta un BCF>1 en la parte radicular podría ser una buena candidata para ser utilizada en la técnica de fitoestabilización, siempre y cuando no se produzca una translocación del metal/oide a la parte aérea.

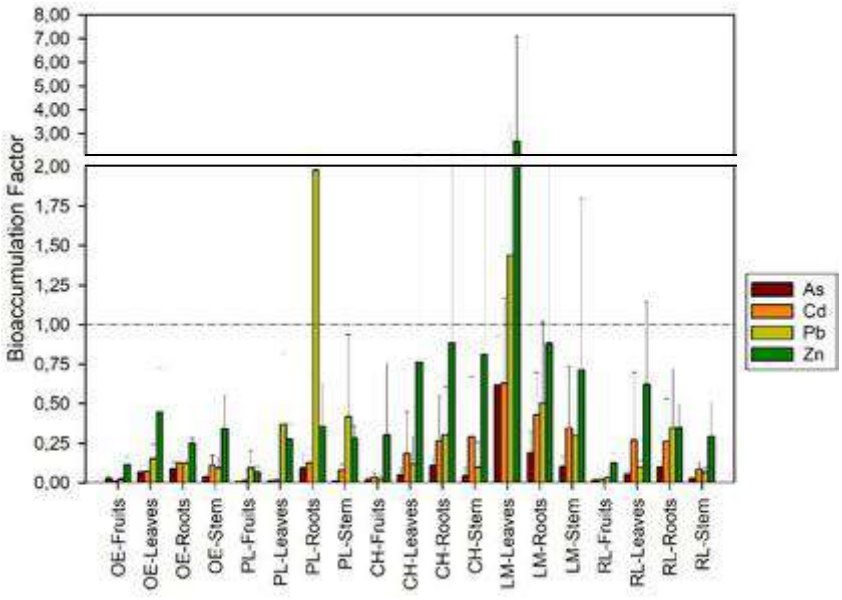


Figura 2a. Factor de bioacumulación (BCF) en plantas procedentes de una zona natural próxima a la Rambla del Avenque.

Las hojas de LM, además, presentaron altos valores del factor de translocación (TF>1) para Pb, Zn y Cd, y sobre todo para As que se aproxima a un valor de 4 , mientras que las hojas de RL para Cd y Zn. OE y PL también translocan Zn a sus hojas y tallos (Figura 2b).

PL sería la especie óptima para fitoestabilización por acumular Pb en sus raíces pero no transferirlo a la parte comestible, contribuyendo a la inmovilización de los metales en el suelo [31][32].

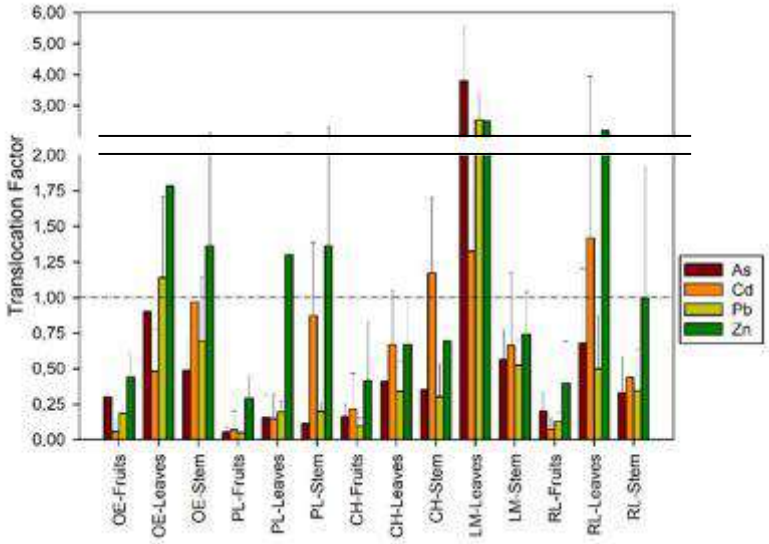


Figura 2b. Factor de translocación (TF) en plantas procedentes de una zona natural próxima a la Rambla del Avenque.

3.2. Suelo agrícola

Los suelos agrícolas en los que se cultivaron las lechugas presentaron un valor de pH neutro (7,5) y conductividad eléctrica diferente según las zona de muestreo, siendo suelos ligeramente salinos los de la zona 1(2,6 dS m^{-1}) y no salinos los de las zonas 2-3 (< 1 dS m^{-1}). Con respecto al contenido en metales, el de mayor presencia fue Zn (1592-3112 mg kg^{-1}) seguido de Pb (596-1035 mg kg^{-1}), As (19-52 mg kg^{-1}) y Cd (2-8 mg kg^{-1}), siendo los suelos de la zona 1 los que presentaron mayores concentraciones seguidos de los de la zona 3 y, en último lugar, los de la zona 2.

Las lechugas cultivadas en el suelo de la Zona 1 presentaron las concentraciones más altas de metales (Tabla 1) superando los valores obtenidos por otros autores en lechugas cultivadas en zonas mineras [17, 18, 27]. Del mismo modo todos los datos obtenidos superaron los límites tolerables propuestos por Kabata-Pendias y Pendias [34]. En la Zona 2, esos límites fueron superados excepto para Cd (en Lollo Rosso) y Zn (en Lollo Rosso y Romana). Por su parte, en las lechugas cultivadas con suelo agrícola de la zona 3 el metal que más se acumulaba era Zn, seguido de Pb y por último Cd y As. Aunque las concentraciones de Zn fueron considerables no sobrepasaban los valores tolerables para su consumo. En este estudio, el mecanismo de entrada del metal hacia la planta fue vía radicular descartándose la vía foliar por las condiciones particulares de un cultivo en invernadero, y teniendo en cuenta que no fueron utilizados ningún herbicida, pesticida, el único imput fue el riego y la fertirrigación de N-P-K que se utliza usualmente para el cultivo de lechuga en el campo de Cartagena.

Tabla 1. 1a-Concentraciones de metales/oides en hojas de lechuga obtenidas en este estudio (mg kg^{-1}); 1b- Concentraciones de metales de referencia en cultivos agrícolas y 1c- Concentrationes de metales en lechugas cultivadas en zonas mineras o próximas a ellas.

Variedad	Zona	As (mgkg^{-1})	Cd (mgkg^{-1})	Pb (mgkg^{-1})	Zn (mgkg^{-1})
[a]***Batavia***	1	1,50	3,37	22,49	141,3
	2	0,59	0,67	5,54	51,61
	3	0,55	1,52	6,17	73,33
[a]***Lollo Rosso***	1	4,46	1,82	67,66	215,8
	2	1,00	0,43	10,21	33,37
	3	1,32	0,85	24,33	62,95
[a]***Romana***	1	1,21	2,36	14,50	70,52
	2	0,31	0,31	1,67	20,49
	3	0,22	0,78	2,05	33,61
[b]**Tolerable in agronomic crops** [34]**.**		0,20	0,05-0,5	0,5-10	50-100
[c]**Cobb et al.** [17]**.**		5,47	1,61	29,80	60,00
[c]**Conesa et al.** [18]**.**		--	--	10,00	90,00
[c]**Wang et al.** [33] **.**		--	1,00	15,00	300,00

4. Conclusiones

La mayor acumulación de metales en la parte aérea de la planta la presentó *Lavandula multifida*, en concreto Pb y Zn. Esto hace a la especie una buena elección para fitoextracción a la vez que supone un riesgo de incorporación a la cadena trófica. La mejor especie para llevar a

cabo trabajos de fitoestabilización fue *Pistacia lentiscus*, al acumular gran cantidad de metales en sus raíces y no transferirlo a sus tejidos comestibles.

Los metales más transferidos desde los suelos a la planta en la zona forestal fueron Pb y Zn. Cd y As, aunque se encuentran también por encima de los niveles de fondo establecidos para la zona, no son incorporados por las plantas a sus tejidos y permanecen en su rizosfera. Se hace necesario profundizar en los estudios del efecto que tiene la rizosfera en la dinámica de los metales del suelo.

Las lechugas cultivadas con suelo agrícola próximo a la Sierra Minera Cartagena-La Unión estaban enriquecidas con metales, especialmente Pb y Zn, comparado con lechugas de otras zonas mineras, superando todas ellas los límites tolerables para cultivos. La vía de entrada en las lechugas cultivadas en este estudio fue principalmente radicular, por las condiciones particulares de cultivo en invernadero, posiblemente, estas lechugas cultivadas al aire libre en las mismas zonas agrícolas donde se recolectó el suelo presentarían mayor concentración de metal/oide por la influencia del desarrollo de la actividad agrícola y por la deposición de metal/oide en los tejidos vegetales transportado por el viento desde zonas mineras próximas y urbanas.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido cofinanciado por la Unión Europea a través de un proyecto Interreg SUDOE (SOILTAKECARE).

Referencias

1. Kabas S. et al. Effect of marble waste and pig slurry on the growth of native vegetation and heavy metal mobility in a mine tailing pond. Journal of Geochemical Exploration. 2012, volumen 123, (69–76).
2. Faz A., Arnaldos R., Conesa H., García G. Soils affected by mining and industrial activities in Cartagena (SE Spain): classification problems. European Soil Bureau. 2001, volumen Research report 7, (165–170).
3. Madejón P., Pérez-de-Mora A., Burgos P., Cabrera F., Lepp N. W., Madejón E. Do amended, polluted soils require re-treatment for sustainable risk reduction? - Evidence from field experiments. Geoderma. 2010, volumen 159, (174–181).
4. Madejón E., de Mora A. P., Felipe E., Burgos P., Cabrera F. Soil amendments reduce trace element solubility in a contaminated soil and allow regrowth of natural vegetation. Environmental Pollution. 2006, volumen 139, (40–52).
5. García C., Lobo M. Rehabilitación de suelos degradados y contaminados mediante la aplicación de compost. Moreno Casco, J., Moral Herrero, R. (Eds.) Compostaje. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. 2007, , (425–448).
6. Pérez-de-Mora A., Burgos P., Madejón E., Cabrera F., Jaeckel P., Schloter M. Microbial community structure and function in a soil contaminated by heavy metals: effects of plant growth and different amendments. Soil Biology and Biochemistry. 2006, volumen 38, (327–341).
7. Wan X., Lei M., Chen T. Cost–benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil. Science of The Total Environment. 2016, volumen 563–564, (796–802).
8. Martínez-Martínez S., Acosta J. A., Cano A. F., Carmona D. M., Zornoza R., Cerda C. Assessment of the lead and zinc contents in natural soils and tailing ponds from the Cartagena-La Unión mining district, SE Spain. Journal of Geochemical Exploration. 2013, volumen 124, (166–175).
9. Zhao L., Li T., Yu H., Zhang X., Zheng Z. Effects of [S,S]-ethylenediaminedisuccinic acid and nitrilotriacetic acid on the efficiency of Pb phytostabilization by Athyrium wardii (Hook.) grown in Pb-contaminated soils. Journal of Environmental Management. 2016, volumen 182, (94–100).
10. Rizzi L., Petruzzelli G., Poggio G., Guidi G. V. Soil physical changes and plant availability of Zn and Pb in a treatability test of phytostabilization. Chemosphere. 2004, volumen 57, (1039–1046).

11. Bernal M., Clemente R., Walker D. J. The role of organic amendments in the bioremediation of heavy metal-polluted soils. Environmental Research at the Leading Edge. 2007, (1–57).
12. Renella G. et al. Long-term effects of aided phytostabilisation of trace elements on microbial biomass and activity, enzyme activities, and composition of microbial community in the Jales contaminated mine spoils. Environmental Pollution. 2008, volumen 152, (702–712).
13. Kumpiene J., Lagerkvist A., Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments – A review. Waste Management. 2008, volumen 28, (215–225).
14. Alvarenga P. et al. Assessment of chemical, biochemical and ecotoxicological aspects in a mine soil amended with sludge of either urban or industrial origin. Chemosphere. 2008, volumen 72, (1774–1781).
15. Alvarenga P. et al. Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization: (II) Effects on soil biochemical and ecotoxicological characteristics. Chemosphere. 2009, volumen 74, (1301–1308).
16. Laperche V., Logan T. J., Gaddam P., Traina S. J. Effect of apatite amendments on plant uptake of lead from contaminated sail. Environmental Science and Technology. 1997, volumen 31, (2745–2753).
17. Cobb G. P., Sands K., Waters M., Wixson B. G., Dorward-King E. Accumulation of heavy metals by vegetables grown in mine wastes, 2000.
18. Conesa H. M., Pérez-Chacón J. A., Arnaldos R., Moreno-Caselles J., Faz-Cano Á. In situ heavy metal accumulation in lettuce growing near a former mining waste disposal area: Implications for agricultural management. Water, Air, and Soil Pollution. 2010, volumen 208, (377–383).
19. Peech M. Hydrogen Ion Activity. Black CA (ed) Methods of soil analysis. 1965, volumen Part 2, (914–926).
20. United States Environmental Protection Agency (US-EPA) SW-846 Test Method 3051A: Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils. US-EPA online. 2007, volumen вы12у, (245).
21. Tessier A., Campbell P. G. C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical Chemistry. 1979, volumen 51, (844–851).
22. Li X., Coles B. J., Ramsey M. H., Thornton I. Sequential extraction of soils for multielement analysis by ICP-AES. Chemical Geology. 1995, volumen 124, (109–123).
23. Shiowatana J., McLaren R. G., Chanmekha N., Samphao A. Fractionation of Arsenic in Soil by a Continuous-Flow Sequential Extraction Method. Journal of Environment Quality. 2010, volumen 30, (1940).
24. Ghosh M., Singh S. P. A comparative study of cadmium phytoextraction by accumulator and weed species. Environmental Pollution. 2005, volumen 133, (365–371).
25. Barman S. C., Sahu R. K., Bhargava S. K., Chaterjee C. Distribution of Heavy Metals in Wheat, Mustard, and Weed Grown in Field Irrigated with Industrial Effluents. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2000, volumen 64, (489–496).
26. Gupta S., Nayek S., Saha R. N., Satpati S. Assessment of heavy metal accumulation in macrophyte, agricultural soil, and crop plants adjacent to discharge zone of sponge iron factory. Environmental Geology. 2008, volumen 55, (731–739).
27. Zhao F., Hamon R. E., Lombi E., McLaughlin M. J., McGrath S. P. Characteristics of cadmium uptake in two contrasting ecotypes of the hyperaccumulator Thlaspi caerulescens. Journal of Experimental Botany. 2002, volumen 53, (535–543).
28. Lasat M. M., Pence N. S., Garvin D. F., Ebbs S. D., Kochian L. V Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator Thlaspi caerulescens. Journal of experimental botany. 2000, volumen 51, (71–9).
29. Audet P., Charest C. Heavy metal phytoremediation from a meta-analytical perspective. Environmental Pollution. 2007, volumen 147, (231–237).
30. Brooks R. R.Ed. Plants that hyperaccumulate heavy metals: their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining. Wallingford, UK: CAB INTERNATIONAL, 1998.

31. Parra A., Zornoza R., Conesa E., Gómez-López M. D., Faz A. Evaluation of the suitability of three Mediterranean shrub species for phytostabilization of pyritic mine soils. CATENA. 2016, volumen 136, (59–65).
32. Fuentes D., Disante K. B., Valdecantos A., Cortina J., Vallejo V. R. Sensitivity of Mediterranean woody seedlings to copper, nickel and zinc. Chemosphere. 2007, volumen 66, (412–420).
33. Wang G., Zhang S., Zhong Q., Peijnenburg W. J. G. M., Vijver M. G. Feasibility of Chinese cabbage (Brassica bara) and lettuce (Lactuca sativa) cultivation in heavily metals−contaminated soil after washing with biodegradable chelators. Journal of Cleaner Production. 2018, volumen 197, (479–490).
34. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in Soils and Plants. CRC Press LLC, 2001.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Uso combinado de harina de pórfido y materia orgánica para la mejora de las condiciones nutricionales e hídricas del suelo. Caso de estudio en el cultivo de lechuga (*Lactuca Sativa* L CV Neruda)

A. Fernández López[1], M. Soler-Méndez[2], M.J. Oates[2], J.M. Molina-Martínez[2], A. Ruiz-Canales[1]

[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández de Elche, Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO-UMH). Crtra. de Beniel, km 3,2. 03312 Orihuela (Alicante), Spain.
[2] Grupo de I+D+i de Ingeniería Agromótica y del Mar. UPCT. C/ del Ángel s/n. Ed. ELDI E1.06.30202 Cartagena (Murcia), Spain

Resumen: La harina de pórfido es un subproducto de las canteras que puede tener varios usos, como su empleo en tratamiento del suelo para la producción vegetal. Este subproducto puede mejorar las condiciones del suelo desde el punto de vista nutricional e hídrico. Se planteó un ensayo sobre la aplicación de harina de pórfido junto con abono en las propiedades texturales y cantidad de materia orgánica. Se escogió una parcela experimental de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO) de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH). Se aplicaron cuatro tratamientos diferenciales. Se escogió como cultivo de control la lechuga (*Lactuca Sativa* L Neruda). La materia orgánica aumenta ligeramente en los tratamientos T1 y T2. Se mantiene en los tratamientos T3 y T4 y alcanza valores inferiores a T1 y a T2. En T4 alcanza valores más bajos, ya que no ha habido aporte ni de harina ni de fertilizante. Se han obtenido valores adecuados de materia orgánica para mejorar la estructura y la actividad microbiana. Es necesario un mayor aporte de materia orgánica. Pese a que la adición de harina de pórfido influye en un cambio en la textura, se espera que sea mayor a largo plazo. En sucesivas campañas se podrá demostrar con mayor exactitud.

Palabras clave: sostenibilidad, enmienda, textura, materia orgánica, horticultura

1. Introducción

La mejora del suelo es uno de los factores determinantes de la producción ecológica. Igualmente el suelo se entiende como un sistema complejo con propiedades físicas, químicas y biológicas que influyen de una manera importante en el desarrollo óptimo de los cultivos [1].

El aumento o conservación de la materia orgánica es clave para que se mantenga la fertilidad del suelo y en consecuencia, el sistema de producción ecológico. Cuando se planifica la aplicación de abono en un cultivo ecológico se deben cubrir las necesidades del cultivo y adicionalmente mantener los niveles de materia orgánica mínimos del suelo entre un 1,5 y un 2,5%. La materia orgánica mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Ésta es la razón de su interés en el cultivo ecológico en particular. La materia orgánica promueve el desarrollo y mantenimiento del complejo arcillo-húmico, fundamental para la movilidad de los nutrientes. Adicionalmente mantiene un pH óptimo del suelo y permite la asimilación de los

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3498

nutrientes del suelo y facilita el mantenimiento de una actividad biológica. Esto último dificulta la proliferación de organismos patógenos, evita la pérdida de nutrientes y permite la absorción de otros [2].

En un agrosistema agrícola se suele hacer un balance anual de pérdidas y ganancias en elementos minerales. El carbono, hidrógeno y oxígeno forman alrededor del 95% de la materia seca de los cultivos pero las plantas lo obtienen directamente del agua o del aire. Lo que interesa es el balance del 5% restante. Se trata, según el balance de nutrientes, de extracciones (salidas) e importaciones (entradas) [3].

Mediante la fertilización ecológica se pretende aportar los nutrientes que necesite el cultivo y aumentar o mantener la fertilidad del suelo. Ello se consigue con unas medidas genéricas: aporte de materia orgánica mediante estiércol, compost, restos vegetales, cubiertas vegetales, entre otras; rotaciones y/o asociaciones de cultivo adecuadas, incluyendo leguminosas; cubiertas vegetales y uso de abonos verdes; manejo de suelo y aplicación de fertilizantes ecológicos [4].

El objetivo del presente trabajo es el estudio del efecto en las propiedades texturales y edáficas del suelo de la adición de harina de roca de pórfido a un suelo agrícola. El material fue desarrollado por la empresa Fulsan, S.A. Se escogió como cultivo de control la lechuga (*Lactuca Sativa* L Neruda) pues tiene un ciclo corto y se obtienen resultados de una manera relativamente rápida y sencilla.

2. Materiales y métodos

Se desarrollaron los ensayos durante los meses de febrero a marzo de 2017 en una parcela experimental de 300 m² de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO) de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH). En la citada parcela se instaló un sistema de riego localizado con cuatro sectores para aplicar cuatro tratamientos diferenciales respecto a las propiedades del suelo de cultivo. El desarrollo experimental principal de este proyecto fue el estudio del efecto en las propiedades texturales y edáficas del suelo, así como sus efectos en la producción hortícola, de la adición de harina de roca de pórfido, material desarrollado por la empresa Fulsan, S.A., a un suelo agrícola. Se escogió como cultivo de control la lechuga (*Lactuca Sativa* L Neruda) pues tiene un ciclo corto y se obtienen resultados de una manera relativamente rápida y sencilla.

Se evaluaron estrategias de abonado y enmiendas diferenciales en el manejo del cultivo en la parcela experimental a partir de los datos periódicos proporcionados por una estación meteorológica próxima y se hizo un seguimiento del consumo de agua y nutrientes en la parcela experimental. Adicionalmente se realizaron análisis periódicos de los principales parámetros de cosecha (peso, producción por superficie, calibre, entre otros).

En el primer tratamiento (T1) se le añadió al suelo al inicio de la campaña una cantidad convenida de harina de roca Fulsan y se aplicó junto con un abonado de fondo inorgánico. Durante las dos campañas de riego de los dos ciclos de cultivo se le aplicó al correspondiente sector (T1) de la plantación de lechuga, además de las correspondientes dosis de riego establecidas, un abonado inorgánico (fertirriego).

Para el segundo tratamiento (T2) se mezclaron harina de roca Fulsan y compost (Bocashi) con el suelo agrícola de la parcela experimental y esta mezcla constituyó un abonado de fondo orgánico. Durante las dos campañas de riego se le aplicó al correspondiente sector (T2) de la plantación de lechuga, además de las correspondientes dosis de riego establecidas, un fertirriego orgánico. El tratamiento T2 no recibió fertirriego inorgánico.

Para el tercer tratamiento (T3) no se añadió ninguna sustancia inicialmente al suelo agrícola. Durante las dos campañas de riego de los dos ciclos de cultivo se le aplicó al correspondiente sector (T3) de la plantación de lechuga, además de las correspondientes dosis de riego establecidas, un abonado inorgánico (fertirriego), como en el tratamiento T1.

Adicionalmente se consideró incluir un cuarto tratamiento control (T4) para compararlo con los tratamientos anteriores. A este último tratamiento no se añadió abonado de fondo ni se le añadió fertirriego. Únicamente se le aplicó una dosis de riego similar a los tratamientos anteriores. (Tabla 1).

Tabla 1. Tratamientos y cantidades de abono aplicado en el periodo experimental.

	T1	**T2**	**T3**	**T4**
Harina de pórfido (kg/ha)	16,8	0	0	0
Bocashi (kg/ha)	0	40,8	0	0
Yaara Mila Complex(kg/ha)	1	0	1	0
Durasop Actibion N Plus (kg/ha)	1	0	1	0

Análisis textural y químico del suelo. Se tomó una primera muestra del suelo de cada tratamiento el 10 de noviembre de 2016. Un segundo y tercer análisis se hicieron el 2 de mayo de 2017. En los análisis segundo y tercero se tomaron muestras en zona de cultivo y en la zona libre que mantenía las propiedades antes de la segunda campaña. Por tanto, se monitorizaron las propiedades texturales del suelo al inicio del experimento (primera campaña), a mitad de experimento y al final de experimento (tercera campaña). Se hizo el análisis textural de los cuatro tratamientos para las tres etapas citadas.

La toma de muestras se hizo en la parcela experimental y queda reflejada en la figura 1. Se hizo un muestreo adicional antes de empezar la campaña 2017-18 y al final de ésta (final 3ª campaña). Ello queda reflejado en el dibujo y se ha incluido en los resultados posteriores a partir de la Tabla 1.

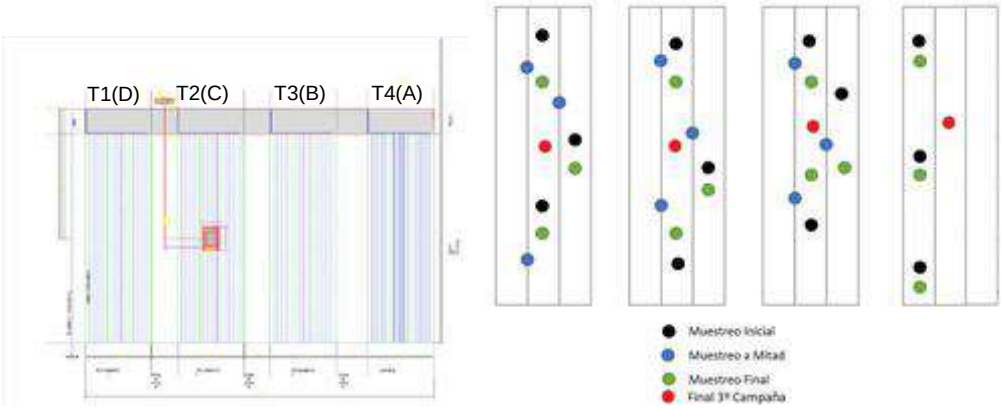


Figura 1. Distribución de los tratamientos de riego en la parcela experimental (izquierda).Muestreo del suelo (derecha). El muestreo inicial del suelo se realizó antes de la primera campaña de riego. Para el muestreo a mitad, se había recogido la primera cosecha y no estaba todavía plantada la segunda cosecha. El punto verde (muestreo final) indica el final de la segunda campaña. El último muestreo del experimento se indica en color rojo (final de la 3ª campaña).

3. Resultados y discusión

La textura varía a lo largo del experimento en el tratamiento T1, aumentando los valores de limo y arena, en detrimento de la arcilla (Tabla 2).

Tabla 2. Evolución de la textura en el tratamiento T1.

	Inicio	**Mitad**	**Fin**	**Inicio 3ª Campaña**	**Fin 3ª Campaña**
Arena (%)	23	21	25	32	27
Limo (%)	64	62	66	38	59
Arcilla(%)	13	17	9	30	14
Materia orgánica oxidable (%)	1,6	1,7	2,3	2,1	1,8

La materia orgánica aumenta ligeramente. Es conveniente que se alcancen niveles mayores del 2,5% con el fin de mejorar la estructura y la actividad microbiana. Con contenidos de materia orgánica entre el 1 y el 1,9% se tienen contenidos bajos y suelos mineralizados. Estos valores son adecuados para este tipo de suelos. Este aumento anómalo de la materia orgánica se comprobó en las siguientes campañas y se muestra que tiende a los valores iniciales. Por tanto, la tendencia es a mantenerse los valores de materia orgánica. No influye en las propiedades químicas la adición de harina de roca.

Con el tratamiento T2 en la textura tienden a descender los limos y las arcillas y aumenta la arena. (Tabla 3).

Tabla 3. Evolución de la textura en el tratamiento T2.

	Inicio	**Mitad**	**Fin**	**Inicio 3ª Campaña**	**Fin 3ª Campaña**
Arena (%)	21	31	31	32	25
Limo (%)	66	60	60	40	58
Arcilla(%)	13	9	9	28	17
Materia orgánica oxidable (%)	1,9	2,3	2,4	1,8	2,3

La materia orgánica aumenta ligeramente. Se han alcanzado valores adecuados para mejorar la estructura y la actividad microbiana. Con contenidos de materia orgánica superiores al 2% se tienen contenidos normales. La materia orgánica oxidable es ligeramente superior que en el tratamiento T1.

En el tratamiento T3 en la textura no varían los limos. La arena aumenta y la arcilla disminuye. El limo se mantiene. (Tabla 4).

Tabla 4. Evolución de la textura en el tratamiento T3.

	Inicio	**Mitad**	**Fin**	**Inicio 3ª Campaña**	**Fin 3ª Campaña**
Arena (%)	27	33	31	32	27
Limo (%)	60	60	60	40	49
Arcilla(%)	13	7	9	28	24
Materia orgánica oxidable (%)	1,3	1,4	1,3	1,7	2,1

La materia orgánica se mantiene y alcanza valores inferiores a T1 y a T2. Se han obtenido valores adecuados para mejorar la estructura y la actividad microbiana. Habría que aumentarla a valores superiores al 2%.

En el tratamiento T4 en la textura disminuye la arena y aumenta la arcilla y el limo. (Tabla 5).

Tabla 5. Evolución de la textura en el tratamiento T4.

	Inicio	**Fin**	**Inicio 3ª Campaña**	**Fin 3ª Campaña**
Arena (%)	33	25	36	32
Limo (%)	52	56	36	34
Arcilla(%)	15	19	28	34
Materia orgánica oxidable (%)	1,2	1,2	3,1	3,8

La materia orgánica se mantiene y alcanza valores inferiores a T1, T2 y T3. Se han obtenido valores adecuados para mejorar la estructura y la actividad microbiana. Habría que aumentarla a valores superiores al 2%.

4. Conclusiones

Se puede deducir que pese a que la adición de harina de pórfido influye en un cambio en la textura que se espera que sea mayor a largo plazo. En sucesivas campañas se podrá demostrar con mayor exactitud. Donde más cambios ha habido de la textura ha sido en el tratamiento T2, respecto al resto de tratamientos.

Otra ventaja del aporte de harina de roca de pórfido Fulsan es la mejora en las características texturales del suelo aumentando el porcentaje de arena y limo en hasta un 10 %. Esto favorece la creación de microporos, de ahí el aumento de la capacidad de retención de agua, además de favorecer el crecimiento del sistema radicular. Al favorecer el crecimiento de las raíces, la planta llega a su momento óptimo de recolección antes que en casos en los que a la raíz le cuesta más expandirse y crecer.

5. Agradecimientos

Los autores de la comunicación expresan su agradecimiento a la empresa FULSAN, S.A. por su apoyo económico. Igualmente se muestran agradecidos a la empresa TELENATURA EBT, S.L. y Viveros Simón Cases, S.L. por su apoyo tecnológico y agronómico.

Referencias

1. Wang, L., Zhang, X., Li, Y., Sun, R., Lin, Y., Xue, Y., Zhou, X., Liu, W., Yan, L., Zhang, Y. The drivers of bacterial community underlying biogeographical pattern in Mollisol area of China. Ecotoxicology and environmental safety, 2019, 177, (93-99).
2. El-Tayeh, N.A., Salama, F.M., Loutfy, N., Abou Alhamd, M.F. Effect of Sandy Soil Amendment with Filter Mud Cake on Growth and Some EcoPhysiological Parameters of Daucus carota and Beta vulgaris Plants. CATRINA-THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES, 2019, 18, 1, (97-104).
3. Masilionyte, L., Maiksteniene, S. The influence of various organic fertilizers and catch crops on the balance of biogenic elements in the agrosystems. ZEMDIRBYSTE-AGRICULTURE, 2019, 97, 2, (41-52).
4. Sun, Y., Qiu, T., Gao, M., Shi, M., Zhang, H., Wang, X. Inorganic and organic fertilizers application enhanced antibiotic resistome in greenhouse soils growing vegetables. Ecotoxicology and environmental safety, 2019, 179, (24-30).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Uso da água e produtividade do trigo mole sob diferentes estratégias de rega e fertilização azotada

A. Canatário Duarte[1,2], M. Patanita[3,4], A. Tomaz[3,4], J. Dôres[3], T. Ramos[3], L. Boteta[5], J. Guerreiro[5]

[1] Instituto Politécnico de Castelo Branco - Escola Superior Agrária, acduarte@ipcb.pt
[2] GEOBIOTEC – Pólo da Universidade da Beira Interior
[3] Instituto Politécnico de Beja - Escola Superior Agrária, mpatanita@ipbeja.pt
[4] GEOBIOTEC – Pólo da Universidade Nova de Lisboa
[5] Centro Operativo e de Tecnologia de Regadio, luis.boteta@cotr.pt

Resumo: Nos ambientes mediterrânicos, a gestão da água de rega e a estratégia de fertilização azotada são determinantes nas respostas produtivas e de qualidade tecnológica do trigo para panificação. Neste estudo foram avaliados os efeitos da rega e da fertilização azotada sobre a produtividade do trigo mole na região do Alentejo, Sul de Portugal, em 2018. Testaram-se 3 tratamentos de rega e 8 tratamentos de tipo/fracionamento do fertilizante azotado. Os tratamentos de rega foram: R1 (rega com reposição de 100% da evapotranspiração cultural (ETc); R2 (rega com reposição de 100% da ETc apenas em quatro fases: início do encanamento, emborrachamento, ântese, enchimento do grão); R3 (sequeiro). Os tratamentos de fertilização azotada incluíram 4 tipos de adubos (clássico; de libertação controlada; com inibidor de nitrificação; com inibidor da urease) aplicados totalmente à sementeira ou fracionados ao longo do ciclo. O ano hidrológico de 2017/2018 decorreu de forma anómala no que respeita à distribuição e volume de precipitação: a precipitação acumulada durante o ciclo de desenvolvimento cifrou-se em 479 mm; entre 26 de Fevereiro e 19 de Março, e entre 18 e 24 de Maio, registaram-se volumes de precipitação de 222.3 mm e 82.5 mm, respectivamente. Nas modalidades R1 e R2 apenas se verificaram dois pequenos períodos de stress hídrico na fase inicial da cultura. Na modalidade R3, verificaram-se períodos mais prolongados de stress hídrico e em maior número, que coincidiram com o final da fase de afilhamento e na fase de enchimento do grão. No que respeita à avaliação agronómica, não se verificaram efeitos significativos dos factores em estudo em qualquer dos parâmetros analisados, nomeadamente na produção de grão e seus componentes. Este conjunto de resultados reflecte o comportamento bastante semelhante do balanço de água no solo nas três modalidades de rega em estudo, como consequência da forma anormal como decorreu o ano hidrológico em causa.

Palavras chave: necessidades hídricas; fertilizantes azotados; rega deficitária; produção de grão; *Triticum aestivum* L.

1. Introdução

Nas culturas com sementeira outono-invernal, nomeadamente nos cereais praganosos como a cevada e o trigo, o fornecimento de água através da rega pode ser decisivo para a obtenção de elevadas produtividades, e para potenciar a qualidade industrial do grão. Os baixos volumes de água que habitualmente satisfazem as necessidades hídricas dos cereais praganosos, possibilitam realizar estas culturas em áreas com menor disponibilidade de água e/ou permitem, com a mesma disponibilidade de água, regar áreas mais extensas do que com culturas típicas de regadio, de consumos mais elevados [1]. As regiões de clima Mediterrânico são marcadas por uma elevada

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3388

irregularidade, típica deste tipo de clima e cada vez mais sujeitas a incerteza resultante da mudança global. A dotação e oportunidade de rega dos cereais praganosos é decisivamente influenciada pela forma com decorre o ano agrícola, nomeadamente no que se refere à precipitação, e o sucesso da cultura depende em larga medida da combinação de estratégias adequadas de gestão da rega e da fertilização [2,3]. Nesta, assume particular destaque a fertilização azotada pela importância decisiva no teor de proteína do grão e, consequentemente, na sua qualidade tecnológica [4].

A rega tem por objetivo compensar as plantas pelas perdas de água ocorridas através da evapotranspiração, sendo a quantidade de água a fornecer e o momento mais favorável dependentes de vários fatores, nomeadamente meteorológicos, da cultura e seu estado fenológico, do desenvolvimento radicular e das propriedades do solo. O conceito de necessidades hídricas da cultura pode ser definido como a quantidade de água de rega, complementar à precipitação, que é requerida pela cultura para alcançar os níveis de produção pretendidos dentro de padrões de qualidade requeridos, ao mesmo tempo que permite manter um equilíbrio no balanço de sais na zona radicular [5]. Numa acepção simplificada do balanço de água no solo, o volume de água requerido pela cultura será o que, num determinado período de tempo e em determinadas condições de exploração e do meio, foi perdido por evaporação e por transpiração num processo conjunto denominado de evapotranspiração [6,7].

As perdas de água por evaporação, processo essencialmente físico, verificam-se sobretudo a partir da superfície do solo; as perdas por transpiração, processo essencialmente fisiológico, ocorrem a partir dos estomas das plantas. Dado serem diferentes as características da atividade fisiológica dos vários tipos de plantas, bem como as condições de exploração e do meio (tipo de solo, rega, fertilizações, controlo de doenças), são estabelecidos vários conceitos de evapotranspiração [6,8].

1.1. Objectivos

O presente estudo tem por objectivo estudar a influência de diferentes regimes hídricos e diferentes tratamentos de fertilização azotada (fertilizantes convencionais e específicos de libertação gradual de azoto), nos aspectos quantitativos e qualitativos da produção de trigo da variedade de trigo *Antequera*, através da implementação de um esquema experimental adequado a este propósito, nomeadamente na região em que se verifica a sua produção. O estabelecimento do balanço hídrico do solo para o período do ciclo cultural, configura-se como de grande interesse para, através da percepção da evolução do teor de humidade do solo, mais facilmente se compreender o impacte dos diferentes regimes hídricos na produção do trigo.

2. Materiais e métodos

2.1. Dispositivo experimental

O dispositivo experimental foi instalado durante o ano agrícola 2017/2018 na Quinta da Saúde (Beja), com a cultivar *Antequera* de trigo mole, classificada como "Melhorador" pela indústria moajeira. A sementeira, em solos da categoria de Barros derivados de calcários, foi realizada em 22 de Dezembro de 2017, e colheita em 25 de Julho de 2018. O clima é temperado húmido com verão seco e quente, normalmente conhecido como clima Mediterrânico (Csa, na classificação de Köppen). No período de 1981-2010 a temperatura média das máximas e a temperatura média das mínimas foi de 22,2 e de 10,0 ºC respectivamente, cifrando-se a precipitação média anual em 558 mm [12]. Relativamente às variáveis anteriores, no ano hidrológico de 2017/2018 registaram-se, respectivamente, 23,6ºC, 10,1ºC e 605 mm [13]. Na modalidade de rega/regime hídrico com cobertura de 100% da ETc durante todo o ciclo da cultura, foi instalada uma sonda capacitiva (Sonda EnvironSCAN - Sentek Technologies) (Figura

1), com o objectivo de monitorização da água e auxilio na decisão da oportunidade das regas. A prática da rega foi realizada com rampa pivotante (center-pivot), tendo as dotações praticadas e a oportunidade das regas sido avaliada através da informação meteorológica local e do teor de água no solo obtido através de sonda capacitiva.



Figura 1 – Observações/medições de caraterísticas ecofisiológicas nas parcelas do regime hídrico R1, e sonda capacitiva instalada na mesma parcela.

2.2. Metodologias usadas

2.2.1. Modelação do balanço hídrico

Para a modelação do balanço hídrico do solo, que corresponde à modalidade P1, foi usada a metodologia da FAO (Food and Agriculture Organization), baseada na utilização da Equação de Penman-Monteith para cálculo da evapotranspiração de referência [9], e nos coeficientes Kc, que integram todas as diferenças físicas e fisiológicas das plantas cultivadas, com enfoque na separação dos processos de evaporação (Ke) e transpiração (Kcb) [6]. O balanço hídrico foi estabelecido entre a data de sementeira (22/12/2017) e a senescência completa da cultura (15/06/2018). As condições iniciais e outros dados de entrada para os cálculos, traduzem-se nos seguintes valores: i) fração máxima de cobertura do solo pela cultura, 100%; ii) fração de água facilmente utilizável, 0.55; iii) profundidade máxima das raízes, 0.60 m; iv) lâmina de água à capacidade de campo, 437.7 mm/m; v) lâmina de água ao coeficiente de emurchecimento, 210.5 mm/m; vi) deficit de água no início do balanço de água, 19.6 mm. Os valores do coeficiente basal da cultura (Kcb) são valores tabelados para o trigo de Inverno (Kcb_{ini}=0.15; Kcb_{med}=1.10; Kcb_{fin}=0.15), sendo a duração de cada fase do ciclo as seguintes: fase inicial, 55 dias, fase de desenvolvimento, 50 dias, fase média ou de maturação, 35 dias, fase final, 36 dias. Os valores do coeficiente de evaporação (Ke), dependem das condições de humidade à superfície do solo e das condições meteorológicas que afectam o processo de evaporação (radiação solar, temperatura do ar, humidade atmosférica e velocidade do vento), e são calculados pelas expressões seguintes [6]:

$$Ke = Kr\ (Kc_{max} - Kcb) \leq few\ Kc_{max}$$

em que:

Ke – coeficiente de evaporação,

Kcb – coeficiente basal da cultura,

Kc_{max} – valor máximo de Kc depois de um evento de humedecimento,

Kr – coeficiente de redução da evaporação na camada superficial do solo,

few – fracção do solo que se encontra simultaneamente humedecido e exposto à incidência da radiação solar directa (fracção da superfície do solo a partir da qual ocorre a maior parte da evaporação).

$$Kc_{max} = max\left\{\left[1{,}2 + \left(0{,}04(u2 - 2) - 0{,}004(HRmin - 45)\right)\left(\frac{h}{3}\right)^{0{,}3}\right]\right\}, \{Kcb + 0{,}05\}$$

onde:
u2 – velocidade do vento medido a 2 m de altura (m/s),
HRmin – humidade relativa mínima (%),
h – altura máxima da cultura em cada fase de desenvolvimento da cultura (inicial, desenvolvimento, média ou de maturação e final.

$$Kr = \frac{AET - D_{e,i-1}}{AET - AFE}$$

na qual:
AET – lâmina acumulada máxima de evaporação na camada superficial do solo, ou seja quando Kr=0 (mm),
$D_{e,\,i-1}$ – lâmina acumulada de evaporação na camada superficial do solo no final do dia i-1 (dia anterior) (mm),
AFE – lâmina acumulada de água facilmente evaporável (no final da etapa 1, Figura 2) (mm).

$$AET = 1000\ (\theta_{FC} - 0{,}5\theta_{WP})Ze$$

em que:
θ_{FC} – teor de humidade no solo à capacidade de campo (m^3/m^3),
θ_{WP} - teor de humidade no solo ao coeficiente de emurchecimento (m^3/m^3),
Ze – espessura da camada superficial do solo sujeita a dessecação devido à evaporação (10-15 cm).

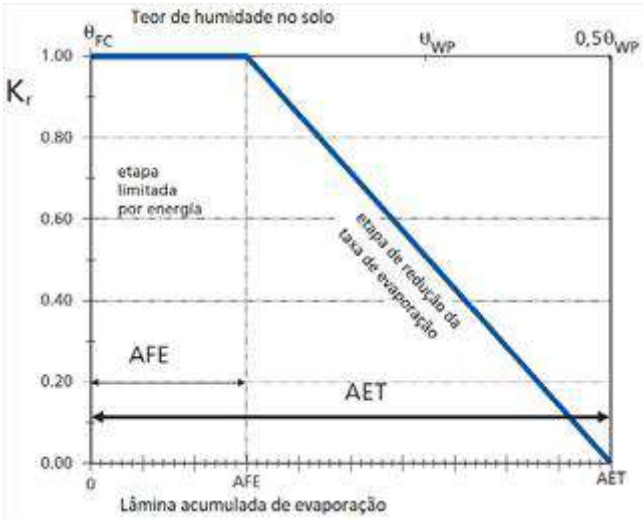


Figura 2 – Coeficiente de redução da evaporação da água na camada superficial do solo (Adaptado de Allen *et al*, 1998).

2.1.2. Desenho experimental e avaliação da produção

O desenho experimental, julgado mais adequado para cumprimento dos objectivos deste estudo, foi do tipo bifactorial em parcelas subdivididas («split-plot») com quatro repetições (Figura 3) [14]. O factor regime hídrico localizou-se nas parcelas principais, com as seguintes modalidades de gestão da rega: R1, correspondente ao conforto hídrico, com rega a 100% das necessidades de água ao longo de todo o ciclo da cultura, recomendadas pelo uso de sondas capacitivas; R2, referente a rega deficitária, com rega a 100% da ETc nas fases críticas da cultura, que, de acordo com [15], são encanamento, emborrachamento, ântese e enchimento do grão; R3, respeitante ao regime de sequeiro, ou seja sem prática da rega. Foi ainda simulado o cenário de

pleno conforto hídrico da cultura, através do balanço de água do solo, com o objectivo de comparação com os resultados da gestão da rega com recurso a sondas capacitivas.

O factor fertilizações azotadas (fertilizantes e fracionamento) localizou-se nas parcelas secundárias, tendo sido praticadas de acordo com os seguintes tratamentos: A1 e A2, com o fertilizante clássico FOSKAMONIO 12-24-12; A3 e A4, com o fertilizante ENTEC 20-10-10, que incorpora um inibidor da nitrificação; A5 e A6, com o fertilizante de libertação controlada NERGETIC 20-8-6; A7 e A8, com o fertilizante DURAMON FUERZA 20-5-5 que dispõe de um inibidor da urease (Quadro 1). Considerando o referido anteriormente, o itinerário técnico, excepto a rega, foi idêntico em todas as parcelas, nomeadamente a dose de 180 kg N/ha, tendo-se ainda utilizado nas fertilizações de cobertura ao afilhamento Ureia 46% e ao encanamento e emborrachamento Nitrolusal 27%. Na modalidade de sequeiro (R3) apenas se aplicou 2/3 da dose de azoto aplicada nas modalidades de regadio (R1 e R2).

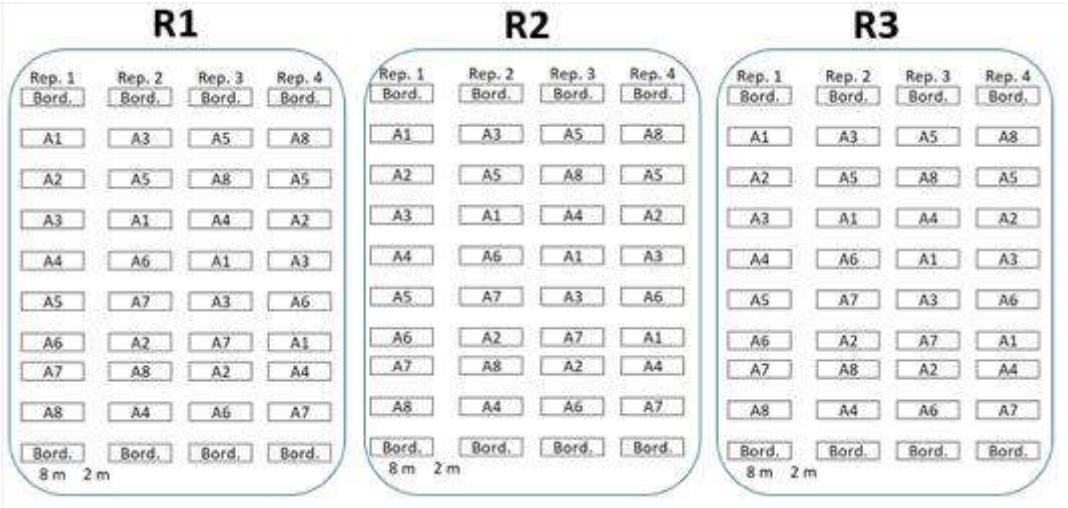


Figura 3 - Desenho dos campos experimentais com quatro repetições para cada modalidade de rega, e replicações das modalidades de fertilização azotada.

Quadro 1 - Tratamentos da fertilização azotada, fracionamento e época de aplicação de fertilizantes de fundo e cobertura

Tratamento	Fertilizante	Sementeira	Afilhamento	Encanamento	Emborrachamento
A1	Foskamónio 12-	25	50		25
A2	24-12	25	25	25	25
A3	Entec	100			
A4	20-10-10	50			50
A5	Nergetic 20-08-	100			
A6	10	50			50
A7	Duramon 20-	100			
A8	05-05	50			50

As variáveis da quantidade e qualidade da produção avaliadas foram as seguintes: produção de grão (kg/ha), componentes da produção (peso de 1000 grãos e número de grãos/m^2), qualidade tecnológica (massa do hectolitro e teor de proteína do grão), valor nutricional do grão e características ecofisiológicas.

3. Resultados e discussão

3.1. Balanço hídrico do solo

3.1.1. Coeficientes Kcb, Ke e Kc

A Figura 4 mostra uma evolução regular do coeficiente Kcb em virtude dos seus valores serem tabelados para a fase inicial, média e final, sendo constantes durante as fases inicial e média. Entre o fim da fase inicial e o início da fase média, e o fim desta fase e o fim da fase final, assume-se que a variação do coeficiente Kcb é linear. A variação do coeficiente Ke depende, como foi referido anteriormente, do teor de humidade na camada superficial do solo e das condições meteorológicas em cada dia. De acordo com a metodologia usada, o coeficiente basal da cultura (Kcb) assume os mesmos valores independentemente da modalidade de rega. No caso da modalidade de sequeiro, os valores do coeficiente Ke, e portanto do coeficiente Kc, apenas está dependente dos eventos de humedecimento da precipitação, pelo que assumirá sempre valores iguais ou inferiores, e nunca superiores, relativamente aos valores das outras modalidades de rega. Na fase inicial de desenvolvimento o valor do coeficiente Kcb é compreensivelmente baixo, apresentando o coeficiente Kc valores relativamente elevados dado as condições meteorológicas favoráveis à evaporação a partir da camada superficial do solo, que nesta altura se apresenta sem vegetação. Ainda no final daquela fase e início da fase seguinte, o coeficiente Ke evolui com oscilações, que se reflectem no coeficiente Kc, menos acentuadas no cenário P1 e mais acentuadas na modalidade R3, já que nesta modalidade se verificam menos eventos de humedecimento do solo. A partir do final de Março, encontrando-se a superfície do solo ensombrada e com menos humidade, o processo de evaporação perde importância relativamente ao coeficiente Kcb, que agora influencia decisivamente os valores elevados do coeficiente Kc.

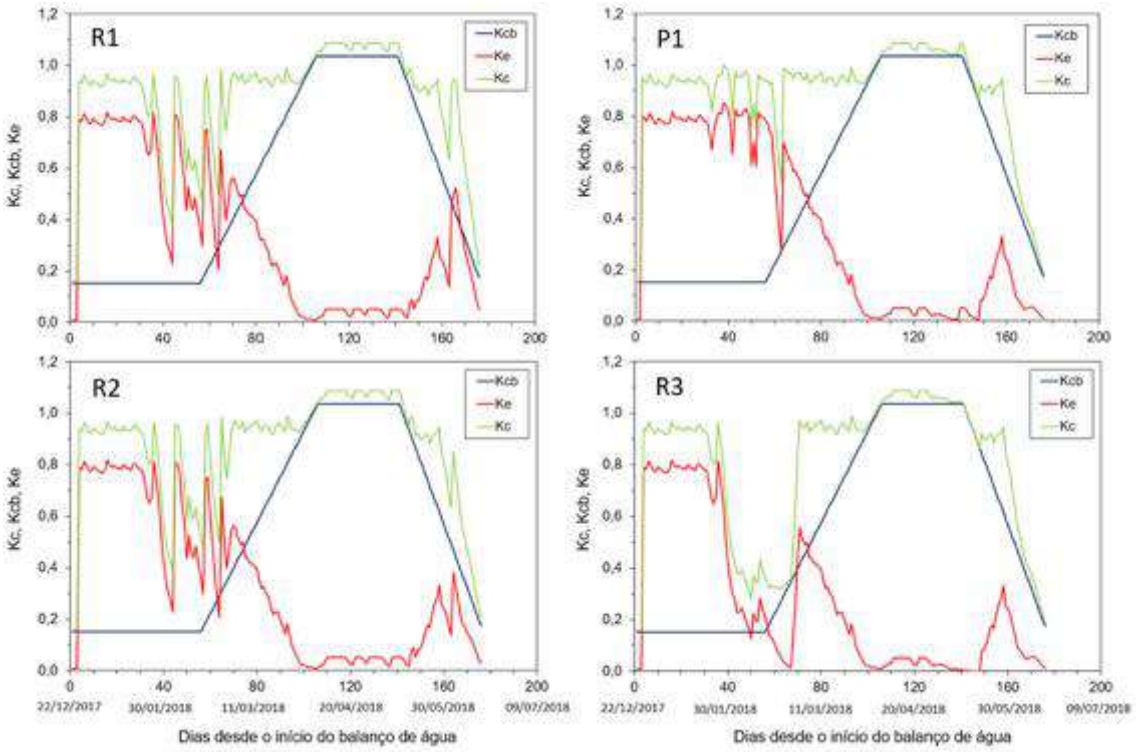


Figura 4 - Evolução dos factores Kcb, Ke e Kc ao longo do ciclo da cultura do trigo (variedade Antequera), nas modalidades do ensaio R1 (rega praticada com 100% ETc), P1 (rega programada com 100% ETc), R2 (rega praticada nas fases críticas), R3 (cultura em sequeiro).

3.1.2. Evapotranspiração

Relativamente à evolução dos valores da evapotranspiração, os períodos em que a ETc real apresenta valores inferiores à ETc potencial correspondem aos períodos em que as plantas deixam de estar em conforto hídrico, ou seja, começam a ser afectados os seus processos fisiológicos fundamentais e, por consequência, o volume e os aspectos qualitativos da produção [16]. Nas estratégias de rega correspondentes à plena satisfação das necessidades de água das plantas em todo o ciclo (R1) e durante as fases críticas (R2), a evapotranspiração que realmente ocorreu é igual ao que potencialmente se poderia verificar (Figura 5), exceptuando dois pequenos períodos no final de Janeiro e meio de Fevereiro, contribuindo para a obtenção de uma produção próximo do máximo no que respeita ao factor de produção água. No início de Junho, já consumada a maturação completa da cultura, a evapotranspiração decresce abruptamente no final da fase de senescência, quando o factor Kc apresenta valores relativamente baixos. Podemos constatar na mesma figura que na modalidade R3, e nos mesmos períodos referidos anteriormente, a ETc real apresenta valores mais baixos pois nesta modalidade não se verificaram alguns eventos de humedecimento (regas), que ocasionam coeficientes Ke mais baixos, e por consequência diminuição do valor do coeficiente Kc

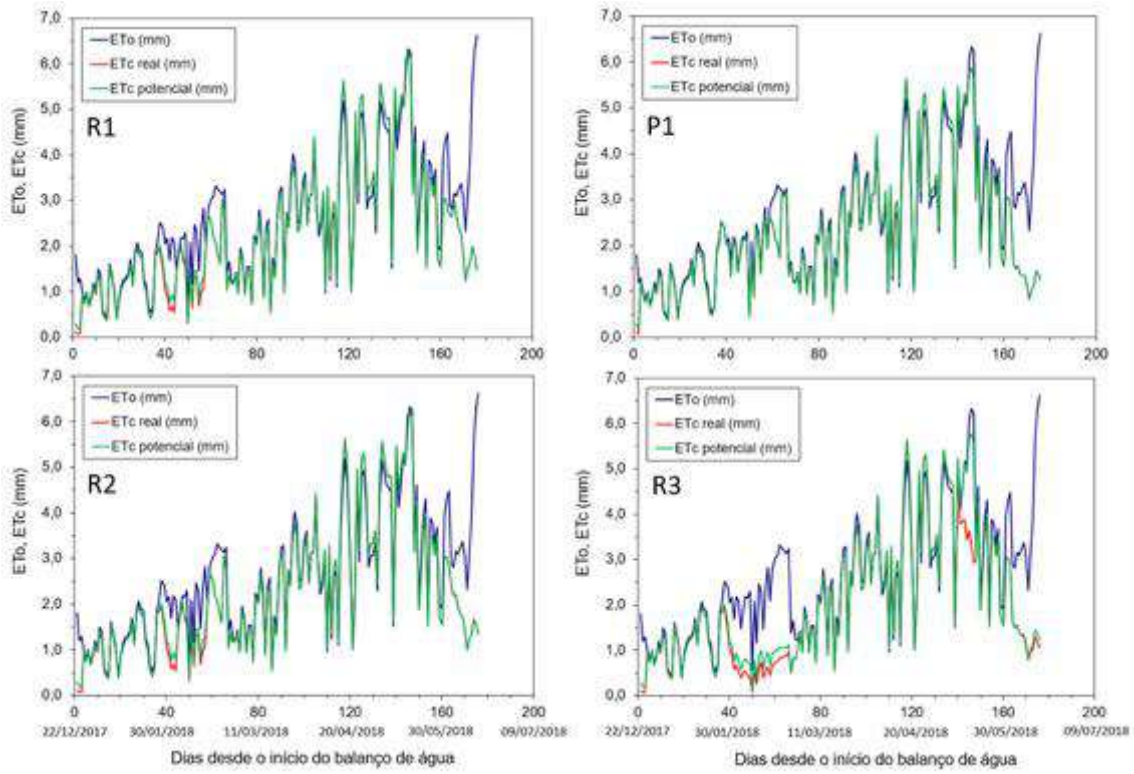


Figura 5 - Evolução da ETo, ETc real e ETc potencial, ao longo do ciclo da cultura do trigo (variedade Antequera), nas modalidades do ensaio R1 (rega praticada com 100% ETc), P1 (rega programada com 100% ETc), R2 (rega praticada nas fases críticas), R3 (cultura em sequeiro).

3.1.3. Precipitação e regas

O ano hidrológico de 2017/2018 decorreu de forma anómala no que respeita à distribuição e volume de precipitação em algumas alturas do ano, tal como ser observado na Figura 6. O volume de precipitação acumulada entre 22 de Dezembro e 15 de Junho, cifrou-se em 465.2 mm. Relativamente aos valores médios de precipitação registados no período 1971-2000 na estação meteorológica de Beja [17], os valores registados na estação udométrica do campo experimental

foram os seguintes: Janeiro 65.5% (48.3 mm, 73.7 mm média), Fevereiro 28.3% (17.4 mm, 61.5 mm média), Março 519.3% (220.7 mm, 42.5 mm média), Abril 129.9% (80.8 mm, 62.2 mm média), Maio 182.3% (85.7 mm, 47.0 mm média). Claramente os meses em que os valores da precipitação registados apresentam maior anormalidade são Fevereiro, Março e Maio, com destaque para os dois primeiros meses. As regas praticadas nas modalidades R1 e R2 ocorreram nas fases críticas da cultura, em número de 10 e com dotações de 11.4 mm para as três primeiras, de 7.7 mm para a quarta, e de 17.0 mm para as seis últimas, sendo a dotação da última rega na modalidade R2 de apenas 8.5 mm. Da soma destas dotações de rega obtém-se o valor de 143.9 mm para a modalidade R1, e 135.5 mm para a modalidade R2, ou seja valores ligeiramente inferiores à dotação total para satisfação plena das necessidades de água durante todo o ciclo da cultura (Cenário P1). Estação situação deve-se ao facto da gestão da rega ter sido feita com base nas leituras da sonda capacitiva, que, como se verá adiante, apresenta valores de deficit de água diferentes dos obtidos na modelação do balanço hídrico do solo. Refira-se ainda que entre 22 de Dezembro (data da sementeira) e 27 de Fevereiro, altura em que normalmente é concentrada uma boa parte da precipitação anual nesta região, apenas se verificaram 71.5 mm (Figura 6). Neste período, o teor de humidade julgado como conveniente no solo foi assegurada com 3 regas nas modalidades R1 e R2, com um adotação total de 34.2 mm.

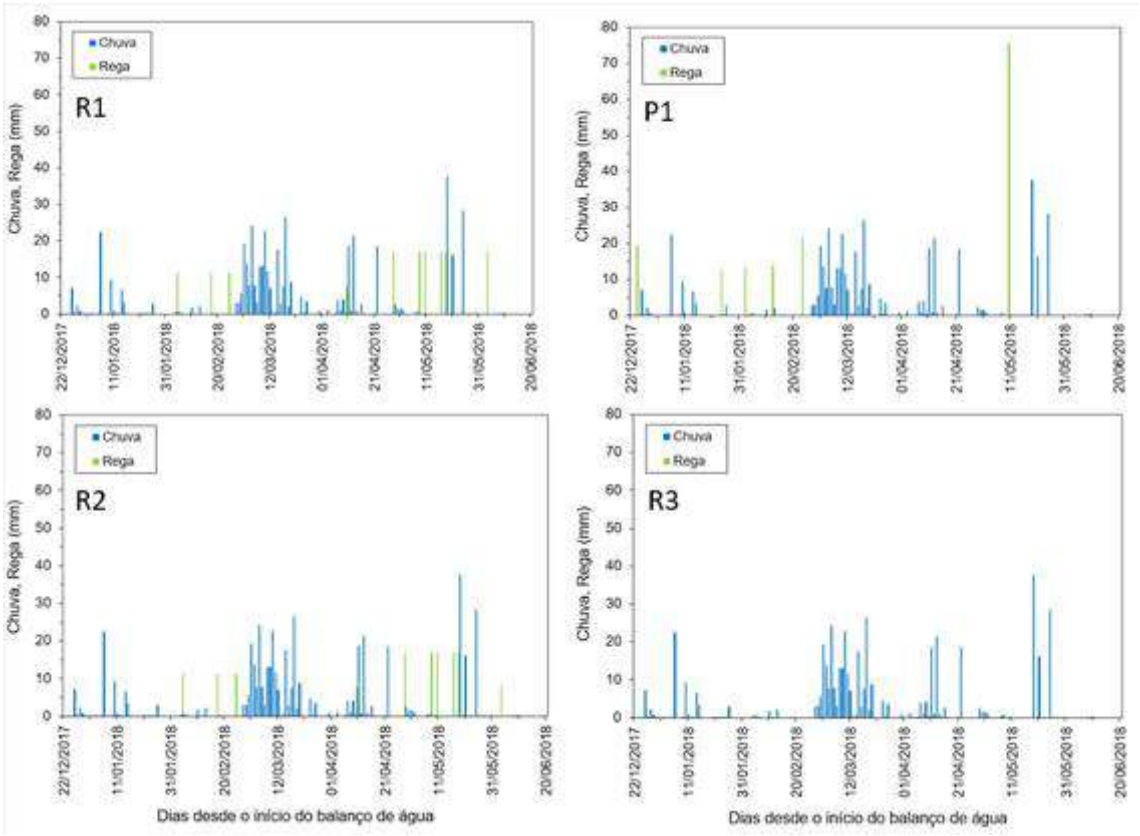


Figura 6 - Eventos de precipitação e rega ao longo do ciclo da cultura do trigo (variedade Antequera), nas modalidades do ensaio R1 (rega praticada com 100% ETc), P1 (rega programada com 100% ETc), R2 (rega praticada nas fases críticas), R3 (cultura em sequeiro).

3.1.4. Balanço hídrico

A forma como decorreu meteorologicamente o ano hidrológico de 2017/2018 determinou, para a modalidade de 100% da ETc, necessidades totais de rega para a cultura do trigo de 143.9 mm. Em ano meteorologicamente normal as necessidades de rega seriam com certeza mais elevadas, pelo que se depreende que o ano em questão terá sido globalmente favorável para as culturas de sequeiro. Atendendo à informação da Figura 7, correspondente aos balanços hídricos do solo nas várias modalidades de rega, podemos constatar que nas modalidades R1 e R2 o déficit de água no solo evolui sempre acima do limite inferior da fracção de água facilmente utilizável, exceptuando dois pequenos períodos na fase inicial de desenvolvimento, o primeiro entre os dias 10 e 15 e o segundo entre os dias 37 e 58 do ciclo da cultura. Na modalidade de sequeiro (R3), para além do primeiro período referido para as modalidades R1 e R2, a cultura experimentou stress hídrico entre os dias 38 e 67, 139 e 148 e a partir do dia 168 do seu ciclo. Obviamente que nesta modalidade as situações de stress hídrico seriam, numa situação normal, francamente mais frequentes comparativamente às outras modalidades de rega. No cenário P1 (regas programadas), atendendo às condições impostas na metodologia usada, o teor de água no solo nunca desce abaixo do nível de conforto hídrico. O momento de regar imposto na programação das regas (consumo de toda a reserva de água facilmente utilizável), numa fase avançada do desenvolvimento da cultura, determina que a última rega apresente uma dotação elevada (75.5 mm).

Podemos ainda verificar na mesma figura que os valores das leituras da sonda capacitiva utilizada na gestão da rega relativos ao déficit de água no solo, seguem a mesma tendência dos valores apurados na modelação do balanço hídrico. Ainda assim, alguns valores diferem entre si com uma amplitude mais ou menos elevada, o que deixa perceber uma eventual necessidade de calibração ou recalibração da sonda usada.

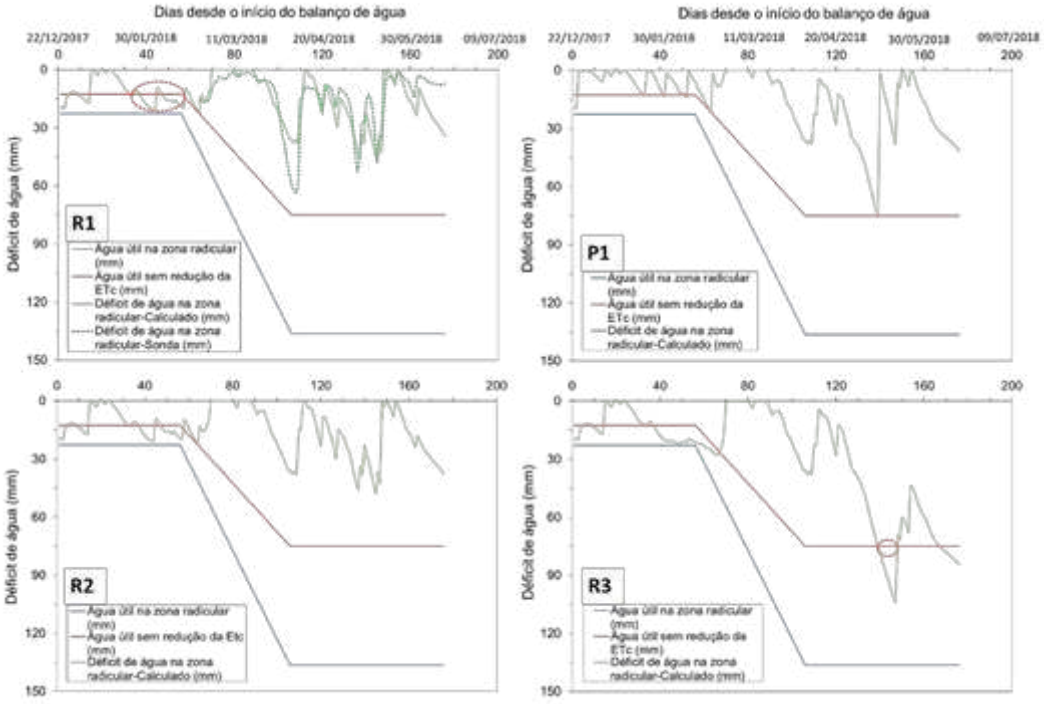


Figura 7 - Evolução do teor de humidade do solo ao longo do ciclo da cultura do trigo (variedade Antequera), nas modalidades do ensaio R1 (rega praticada com 100% ETc), P1 (rega programada com 100% ETc), R2 (rega praticada nas fases críticas), R3 (cultura em sequeiro), com identificação dos períodos de deficit hídrico (

3.2. Aspectos quantitativos e qualitativos da produção

Relativamente à produção e seus componentes, a análise de variância (ANOVA) para a produção de grão, corrigida para 12% de humidade, indica efeito significativo apenas do factor fertilização azotada, enquanto que para as componentes da produção, peso de 1000 grãos e número de grãos/m², se verifica efeito significativo dos dois factores de estudo, regime hídrico e fertilização azotada (Quadro 2). A interação regime hídrico × fertilização azotada não se revelou significativa para qualquer das variáveis, o que indica que o efeito da fertilização azotada não dependeu do regime hídrico.

Quadro 2 - ANOVA da produção de grão (kg/ha) corrigida para 12% de humidade, peso de 1000 grãos (g) e nº de grãos/m².

Origem da Variação	GL a)	Produção de grão 12% H (kg/ha)		Peso 1000 grãos (g)		Nº grãos/m²	
		QM b)	F	QM b)	F	QM b)	F
Regime hídrico (R)	2	3954546	6,5	114,77	38,02***	$4,852*10^7$	12,03
Fertilização azotada (A)	7	517576	4,96***	4,70	3,78***	2630293	4,27***
R×A	14	142517	1,37	0,892	0,72	786337	1,28
Coef. Variação (CV)		4,62		2,43		5,13	

a) Graus de Liberdade; b) Quadrados Médios; *; **; *** significativo para 0,05; 0,01 e 0,001 respetivamente

A análise por fator, mostra-nos que o regime hídrico R1-Rega 100 ETc ao longo do ciclo da cultura apresentou a média de produção de grão mais elevada (7286 kg/ha), embora com valor estatisticamente semelhante aos restantes regimes hídricos, R3-sequeiro e R2-Rega 100% ETc nas fases críticas, respectivamente com 7083 kg/ha e 6932 kg/ha (Quadro 3). Para este resultado poderá ter contribuído a ocorrência de precipitação ao longo do ciclo da cultura muito acima da média anual e também a sua regular distribuição, principalmente na fase final do ciclo, atenuando/eliminando as diferenças entre os distintos regimes hídricos.

Quadro 3 - Médias da produção de grão (kg/ha) corrigida para 12% de humidade, do peso de 1000 grãos (g) e do nº de grãos/m², por regime hídrico e fertilização azotada e teste Tukey (p≤0,05).

Tratamento	Produção de grão 12% H (kg/ha)		Peso 1000 grãos (g)		Número de grãos/m²	
	Médias	Tuckey≤0,05	Médias	Tuckey≤0,05	Médias	Tuckey≤0,05
Regime hídrico						
R3	7083	a	43,82	c	16182	a
R1	7286	a	47,57	a	15814	ab
R2	6932	a	46.14	b	14583	b
Fertilização azotada						
A1	7378	a	45,72	ab	16158	a
A2	7337	a	45,51	ab	16145	a
A3	7244	ab	45,42	ab	15991	ab
A4	7091	abc	46,69	a	15236	ab
A5	6793	c	45,13	b	15091	b
A6	6999	abc	46,33	ab	15138	ab
A7	6873	bc	45,27	ab	15219	ab
A8	7089	abc	46,66	a	15242	ab
Média geral	7100		45,84		15527	

Nota: Letras minúsculas diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas para p ≤ 0,05, entre os níveis de cada fator de estudo, de acordo com o teste de Tuckey.

Estes resultados apontam para a influência determinante da variabilidade climática típica do clima Mediterrânico do Sul de Portugal no rendimento agronómico do trigo mole. De facto, estudos anteriores semelhantes realizados em anos com escassez de precipitação nos meses de primavera, tal como se verificou em 2017, resultaram em efeito significativo da rega na produção de grão e suas componentes [18,19,20,1]. O ano de 2018 caracterizou-se por uma distribuição vantajosa da precipitação, coincidente com as fases de emborrachamento e enchimento do grão, críticas na resposta produtiva da cultura.

Quanto ao efeito da interação do regime hídrico com a fertilização azotada (Figura 8), embora não se tenha revelado significativa, o tratamento que apresentou maior produção de grão foi R1A2 (rega a 100% da ETc ao longo do ciclo cultural e fertilizante azotado clássico mais fraccionado) com o valor de 7809 kg/ha. Observa-se ainda na Figura 8, que todos os tratamentos do regime hídrico R2 apresentaram valores de produção de grão inferiores aos outros dois regimes hídricos, sendo que o valor mais baixo foi obtido no tratamento R2A5 (rega a 100% ETc nas fases críticas e fertilizante Nergetic com aplicação única à sementeira) com 6700 kg/ha.

Na Figura 8 onde se apresenta a interação entre o regime hídrico e a fertilização azotada, observa-se claramente que o regime de sequeiro, R3, apresenta valores de peso de 1000 grãos bastante inferiores aos obtidos nos regimes hídricos de regadio para todos os tratamentos de fertilização azotada, sendo que o valor mais elevado foi registado em R2A8 com 48,88 g. Os resultados obtidos estão de acordo com [18] quando refere que o peso do grão, expresso em peso de 1000 grãos (g), permite estudar a influência dos tratamentos realizados na cultura bem como a influência das condições climáticas, particularmente no período de enchimento do grão.

Quanto à componente nº de grãos/m², o regime hídrico separa apenas os valores de R3 (16182 g) de R2 (14583 g). Os tratamentos com maior produção de grão foram os que registaram também maior nº de grão/m² (Quadro 9), o que revela a importância desta componente na formação da produção, comprovada pela elevada e significativa correlação entre estas variáveis (r=0,824; p≤0,001). Por outro lado, o efeito da fertilização azotada é muito semelhante ao referido para o peso de 1000 grãos, uma vez que separa os dois tratamentos como valores mais elevados (A1 com 16148 e A2 com 16145 g) do tratamento com valores mais baixos, que volta a ser A5 com 15091 grãos/m² (Figura 8).

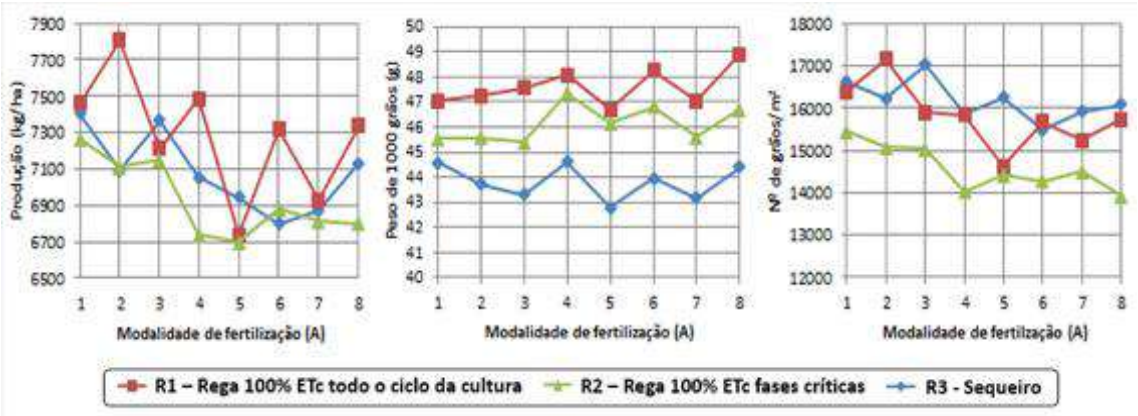


Figura 8 – Produção (kg/ha) por regime hídrico × fertilização azotada, Peso de 1000 grãos (g) por regime hídrico × fertilização azotada, e Efeito do regime hídrico × fertilização no nº de grãos/m².

Relativamente à qualidade tecnológica da produção (massa do hectolitro e teor de proteína do grão), a análise de variância (ANOVA) revelou diferenças significativas apenas para o fator fertilização azotada, enquanto que o teor de proteína mostrou efeito significativo da fertilização azotada e da interação regime hídrico × fertilização azotada, pelo que a influência desta dependeu do regime hídrico (Quadro 4). Independentemente do regime hídrico, a massa do hectolitro

registou cerca de 81,0 kg/hl, valor elevado, sinal de boa formação do grão e acumulação de nutrientes [21]. Embora a ANOVA indique efeito significativo (p≤0,05) da fertilização azotada, o teste de comparação de médias Tukey para p≤0,05 não as separa, variando os valores entre 81,6 e 80,8, respectivamente, para os tratamentos A2 e A6 (Quadro 5).

Quadro 4 - ANOVA da massa do hectolitro (kg/hl) e proteína (% MS).

Origem da Variação	GL a)	Massa hectolitro (kg/hl)		Teor de proteína do grão (% MS)	
		QM b)	F	QM b)	F
Regime hídrico (R)	2	1,42	2,58	4,86	1,97
Fertilização azotada (A)	7	1,11	2,36*	5,49	33,28*
R×A	14	0,45	0,95	0,59	3,61***
Coef. Variação (CV)		0,85		3,18	

a) Graus de Liberdade; b) Quadrados Médios; *; **; *** significativo para 0,05; 0,01 e 0,001 respetivamente

Quadro 5 - Médias da massa do hectolitro (kg/hl) e da proteína (% MS), por regime hídrico e fertilização azotada e teste Tukey (p≤0,05).

Tratamento	Massa hectolitro (kg/hl)		Teor de proteína do grão (% MS)	
	Médias	Tuckey≤0,05	Médias	Tuckey≤0,05
Regime hídrico				
R3	81,3	a	13,18	a
R1	81,1	a	12,40	a
R2	81	a	12,74	a
Fertilização azotada				
A1	81,6	a	12,47	cd
A2	81,6	a	12,96	bc
A3	80,9	a	12,34	de
A4	81,2	a	13,56	a
A5	81,2	a	11,97	de
A6	80,8	a	13,48	ab
A7	80,8	a	11,95	e
A8	81,1	a	13,45	ab
Média geral	81,1		12,77	

Nota: Letras minúsculas diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas para p ≤ 0,05, entre os níveis de cada fator de estudo, de acordo com o teste de Tuckey.

Através da análise da Figura 9 podemos verificar que a combinação que apresentou maior massa do hectolitro foi R3A1 (82,0 kg/hl), tendo-se obtido o valor mais baixo na conjugação das modalidades R2A8 (80,2 kg/hl). Assim, todos os valores se encontram entre 80 e 83 kg/hl, pelo que o trigo é classificado como «muito pesado».

O teor de proteína do grão é uma característica habitualmente influenciada pelas condições ambientais e técnicas culturais, nomeadamente pela dose e fraccionamento da fertilização azotada. Nos resultados que obtivemos este foi o fator que mostrou forte e significativa influência no valor de proteína do grão. Os tratamentos que conduziram a maiores teores de proteína no grão e estatisticamente semelhantes foram A4 (13.56%), A6 (13.48%) e A8 (13.45%), sendo que este valor foi idêntico ao registado em A2 (12,97%) (Quadro 11). A4, A6 e A8 dizem respeito aos fertilizantes específicos e têm em comum a aplicação de 50% do azoto numa fase avançada do seu ciclo vegetativo (emborrachamento), o que prova que aplicações de azoto tardias, tal como referem [22,19] promovem o aumento de proteína do grão, em relação a aplicações da mesma quantidade de azoto mas em fases mais precoces do ciclo da cultura. O tratamento A2, com

aplicação de 25% do N ao encanamento e ao emborrachamento, corresponde à aplicação do fertilizante azotado fraccionado em quatro fases. Os teores de proteínas mais baixos obtiveram-se em A3 (12,34%), A5 (11,98%) e A7 (11,95%), tratamentos com fertilizantes específicos e com a totalidade do N aplicado à sementeira.

A ausência de efeito do regime hídrico na proteína do grão estará certamente ligada à distribuição da precipitação na primavera, que eliminou as diferenças entre as modalidades de rega. De facto, não atingiu 1% a diferença entre o valor mais alto registado em R3 com 13,18% e o mais baixo obtido em R1 com 12,41% (Quadro 5).

O efeito da interação regime hídrico × fertilização azotada evidenciou-se particularmente no tratamento A2, que foi prejudicado em R2 relativamente aos tratamentos A4, A6 e A8, apresentando neste regime hídrico valor estatisticamente mais baixo (12,93%). O regime hídrico R2 foi também aquele que conduziu a maior heterogeneidade e diferenciação nos tratamentos de fertilização azotada, com A4 a apresentar o valor mais elevado no ensaio (13,92%) e A7 o valor mais baixo (11,41%). De salientar que nenhum dos tratamentos atingiu o mínimo de 14% de proteína, valor indicado para a classificação como trigo «Melhorador» e alguns não chegaram a 12,5% para a classificação como trigo «Semi-corretor», de acordo com as especificações da LVR.

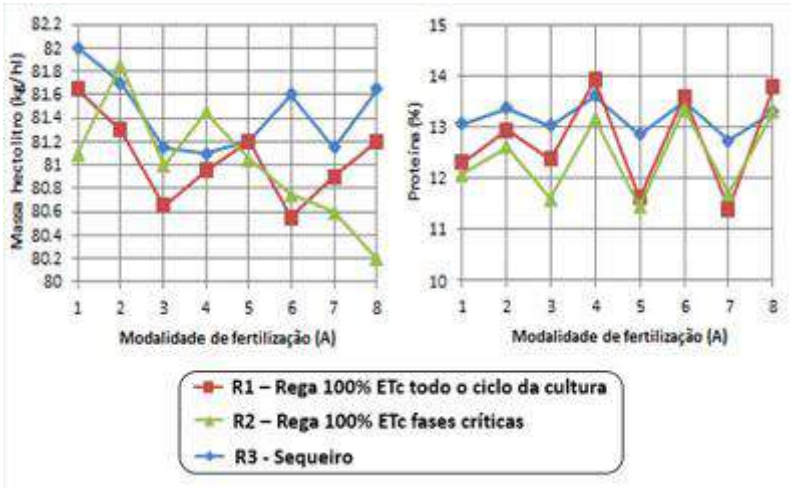


Figura 9 – Massa do hectolitro (kg/hl), e proteína (% MS) por regime hídrico × fertilização azotada.

4. Conclusões

Atendendo aos objectivos definidos no presente estudo, na sequência das metodologias aplicadas para a sua concretização e resultados obtidos, é possível apurar algumas conclusões que se referem a seguir. Deve também ser salientado que a forma anormal como decorreu o ano hidrológico, condicionou alguns dos resultados expectáveis, nomeadamente os referentes à influência das diferentes modalidades de rega na produção. Ainda assim, a leitura e análise daqueles reveste-se de enorme interesse, quando enquadrados numa aleatoriedade do clima mediterrânico, previsivelmente ampliada num quadro de alterações climáticas.

Na fase inicial de desenvolvimento da cultura, o coeficiente Ke assume valores mais ou menos elevados dependendo das condições de humidade à superfície do solo, e das condições que determinam o processo de evaporação. Nas fases mais avançadas de desenvolvimento, os valores do coeficiente basal da cultura (Kcb) ganham uma importância relativa acrescida para os valores do coeficiente Kc, e por consequência da ETc. A gestão da rega implementada, com base nos dados meteorológicos mas sobretudo nas indicações dos valores da sonda capacitiva utilizada, revelou-se eficaz, já que apenas em dois pequenos períodos a cultura entrou em stress hídrico. Com certeza que uma recalibração da sonda tenderia a fornecer informação mais precisa na gestão da rega; esta afirmação é confirmada pela comparação dos valores de deficit hídrico

fornecidos pela sonda, e os valores resultantes da modelação do balanço hídrico para as condições do ensaio.

A análise estatística referente à produção e seus componentes, revela que a modalidade de rega R1 apresentou a média de produção de grão mais elevada (7286 kg/ha), embora com valor estatisticamente semelhante aos restantes regimes hídricos (R2 e R3). Para este resultado parece-nos evidente ter contribuído a ocorrência de precipitação acima do normal em alguns períodos do ciclo cultural, especialmente nos períodos críticos da cultura (emborrachamento e enchimento do grão), atenuando ou eliminando as diferenças entre os distintos regimes hídricos.

Relativamente à qualidade tecnológica da produção (teor de proteína), a análise mostra que a variável regime hídrico não apresenta diferenças estatisticamente significativas, ao contrário da variável adubação azotada que reflecte diferenças significativas. Os resultados obtidos nas modalidades A4, A6 e A8, respeitantes à fertilização com adubos específicos e com aplicações de 50% do azoto numa fase avançada do seu ciclo (emborrachamento), deixam claro que aplicações mais tardias de azoto promovem o aumento de proteína no grão, corroborando os resultados obtidos noutros estudos.

5. Agradecimentos

Este estudo foi suportado pelo projeto INTERATrigo, com as referências POCI- 01-0145-FEDER-023262 e LISBOA-01-0145-FEDER-023262 (SAICT-POL/23262/2016), financiado pelo FEDER através do COMPETE2020 e PORLisboa a a FCT/MCTES através de fundos Nacionais (PIDDAC). O trabalho é uma contribuição e contou com fundos de financiamento dos projetos UID/GEO/04035/2013 e UID/GEO/04035/2019, financiados pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

Referências

1. Patanita, M., Tomaz, A., Dôres, J. 2019. Ainda a rega dos cereais de sementeira outono-invernal. *Agrotec* 30: 60-61.
2. Albrizio, R., Todorovic, M., Matic, T., Stellacci, A.M., 2010. Comparing the interactive effects of water and nitrogen on durum wheat and barley grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.* 115: 179–190.
3. Arrobas, M., Parada, M. J., Magalhães, P., Rodrigues, M. A., 2011. Nitrogen-use efficiency and economic efficiency of slow-release N fertilisers applied to irrigated turfs in a Mediterranean environment. *Nutr. Cycl Agroecosyst* 89: 329-339.
4. Costa, M. N., Bagulho, A., Patanita, M. 2017. Qualidade dos trigos (Parte III/III). Fatores que afectam a qualidade dos trigos. *Grandes Culturas* 11: 11-15.
5. Duarte, A. C. 2006. *Contaminación difusa originada por la actividad agrícola de riego, a la escala de la cuenca hidrográfica*. PhD Dissertation, Universidad de Córdoba, Spain.
6. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*, Rome.
7. Isidoro, D., Quílez, D., Aragüés, R. 2004. Water balance and irrigation performance analysis: La Violada irrigation district (Spain) as a case study. *Agricultural Water Management* 64: 123-142.
8. Pereira, L. S. 2005. *Necessidades de Água e Métodos de Rega*. Publicações europa-América, Lisboa.
9. Monteith, J. L., Unsworth, M. H. 1990. *Principles of environmental physics*, *2nd edn*, Edward Arnold, London.
10. Veloso, A., Duarte, A. C., Ramos, A, S. 2017. *Rega deficitária na cultura do pessegueiro*. In: *+Pêssego – Inovação nas Técnicas de Produção, Volume II*, Centro Operativo e Tecnológico Hortofrutícola Nacional.
11. Pereira, L.S., Cordery, I., Iacovides, I., 2012. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agric. Water Manag*.108: 39–51.
12. IPMA. 2018. *Normais climatológicas 1981-2010 provisórias de Beja*. Instituto Português do Mar e da Atmosfera. https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1981-2010/002/
13. COTR. 2018. *SAGRA – Sistema Agrometeorológico para a Gestão da Rega no Alentejo*. Centro Operativo e de Tecnologia de Regadio. http://www.cotr.pt/cotr/sagra.asp

14. Box, G., Meyer, R. D. 1986. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery, 2nd edition*. New York, NY: Wiley-Interscience.
15. Boteta, L. 2013. Gestão da Rega do Trigo. *Grandes culturas* 1: 18-21.
16. Levidow, L., Zaccaria, D., Maia, R., Vivas, E., Todorovic, M., Scardigno, A., 2014. Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. *Agric. Water Manag*.,146: 8494.
17. IPMA. 2019. *Normais climatológicas 1971-2000 provisórias de Beja*. Instituto Português do Mar e da Atmosfera. http://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1971-2000/002/
18. Oliveira, P. 2018. *Contribuição para o estudo do efeito da rega e da fertilização azotada na produção de trigo mole*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Agronomia. Instituto Politécnico de Beja, Beja.
19. Tomaz, A., Patanita, M., Oliveira, P., Dôres, J., Boteta, L., Ferro Palma, J., Guerreiro, I., Guerreiro, J. 2018. Rega e fertilização azotada do trigo em ambiente mediterrânico: efeito no rendimento e qualidade do grão e na eficiência do uso da água de rega. *Grandes Culturas*, 11: 14-17.
20. Oliveira, P., Patanita, M., Dôres, J., Boteta, L., Ferro Palma, J., Patanita, M.I., Guerreiro, I., Penacho, J., Costa, M.N., Rosa, E., Tomaz, A. 2019. Combined effects of irrigation management and nitrogen fertilization on soft wheat productive responses under Mediterranean conditions. *E3S Web Conf*., 86, 00019. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198600019
21. Costa, M.N., Patanita, M. 2016. Qualidade dos trigos. Parte I/III: Avaliação da qualidade no trigo mole. *Grandes Culturas* 3: 26-29.
22. Patanita, M., Dôres, J., Costa, M.N., Rosa, E., Martins, P. Ferro Palma, J., Tomaz, A., Espada, R., Boteta, L., Costa, A.R., Pinheiro, N., Gomes, C., Bagulho, A.S., Almeida, A.S., Coutinho, J., Coco, J., Costa, A., Maçãs, B. 2018. Otimização da aplicação de fertilização azotada em trigos melhoradores. *Voz do Campo*, 216: 38-39.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Utilização de técnicas de termografia para a avaliação do estado hídrico da *Vitis vinifera* cv Loureiro

Valín, M.I.[1], Araújo-Paredes C.[2], Alonso, J[2], Rodrigues, A.S.[1], Mendes, S[1]

[1] Centre for Research and Development in Agrifood Systems and Sustainability, Escola Superior Agrária de Ponte de Lima (ESA), Instituto Politécnico de Viana do Castelo (IPVC), Viana do Castelo, Portugal

[2] Research Unit in Materials, Energy and Environment for Sustainability, Escola Superior Agrária de Ponte de Lima (ESA), Instituto Politécnico de Viana do Castelo (IPVC), Viana do Castelo, Portugal

Resumo: Nos últimos anos a tendência de aumento da temperatura e redução da precipitação na estação seca do ano, associada à introdução de novas técnicas de viticultura, nomeadamente o aumento do número de plantas/ha, tornam necessário a adoção de práticas de rega em regiões vitivinícolas onde não existia essa tradição. Para realizar uma boa programação e condução da rega é necessário determinar o estado hídrico da planta. A videira, ao longo de todo o seu ciclo vegetativo, necessita de disponibilidade hídrica no solo, sendo especialmente importante em determinados estados fenológicos. A monitorização do estado hídrico da videira mediante a utilização de técnicas não destrutivas (termografia) permitirá avaliar de forma rápida e potencialmente precisa o estado da videira. O presente trabalho tem como objetivos: i) calcular os índices de stress hídrico da videira, nomeadamente o CWSI (Crop Water Stress índex) e o IG (index of relative stomatal conductance) mediante a utilização de uma câmara térmica portátil; e ii) correlacionar os valores de potencial hídrico de ramo com os índices de stress. O estudo desenvolveu-se durante o ano de 2018 numa parcela de *Vitis vinífera* cv. Loureiro de 5,5 ha, situada no concelho de Ponte de Lima, Viana do Castelo, Norte de Portugal (41°40'32.16"N 8°32'6.21"W, altitude 175 m). A textura do solo é franca, e a vinha apresenta uma idade superior a 15 anos e um compasso de 2mx3m (1666 plantas/ha), conduzida em cordão simples ascendente. Durante os meses de julho a setembro foram implementadas 3 estratégias de rega (100% ETc, 50% ETc, sem rega), realizando-se uma monitorização semanal do potencial hídrico de ramo, do teor de água no solo e das temperaturas da canópia. Ao longo do ano 2018, foram registados parâmetros meteorológicos utilizados para o cálculo da evapotranspiração cultural (ETc). Como resultado, identificou-se uma forte correlação entre o CWSI e o IG (R2= 0,89) e entre o potencial hídrico de ramo (-1,2 MPa a -0.4 MPa) e os dois índices de stress, CWSI (R2= 0,73) e IG (R2=0,72), quando calculamos a correlação para as estratégias 50% Etc e sem rega. Estes resultados indicam a termografia como uma técnica apropriada para avaliar o estado hídrico da casta Loureiro, atendendo à forte correlação entre os índices calculados e o potencial hídrico de ramo.

Palavras-chave: Estratégias de rega, Crop Water Stress Index, index of relative stomatal conductance, potencial hídrico de ramo

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3442

1. Introdução

A região dos Vinhos Verdes (RVV) caracteriza-se por ser uma região de elevadas precipitações e temperatura suaves, onde a viticultura é considerada uma cultura de sequeiro. Nos últimos anos o registo de eventos extremos (altas temperaturas e baixas precipitações) com maior frequência, junto com a intensificação das praticas culturais, tem vindo a contruir para a necessidade de aplicar dotações de regar em momentos determinados do ciclo vegetativo. Neste novo desafio para a RVV a utilização de sensores terrestre no âmbito da monitorização solo-planta-clima apresenta-se como uma importante ferramenta para auxiliar ao produtor na tomada de decisões.

A ciência e a investigação, e o consequente desenvolvimento tecnológico, têm facilitado a rapidez de armazenamento, gestão, edição, transferência e analise de dados. A possibilidade de adquirir informação, a partir de sensores, sobre objetos e fenómenos à superfície da terra é uma realidade na atualidade, sendo os sensores de captação de imagem os mais usuais, pela sua capacidade de espacializar e modelar a variabilidade dos fenómenos. A agricultura, tem recebido estas tecnologias de forma sustentada, existindo na atualidade diversos trabalhos com o seu uso em variadíssimas culturas e em particular na viticultura.

Nestas novas abordagens, a aquisição de dados é realizada por sensores remotos, que possuem distintos filmes fotográficos, em distintos comprimentos de onda espectral, onde se destacam as imagens na região do visível e infravermelhos [1, 2]. Nestes comprimentos de onda, a obtenção de imagens termográficas, tem-se evidenciado, pela capacidade não destrutiva e não invasiva das plantas [3, 4], permitindo trabalhar a distintas escalas, com a obtenção de dados quantitativos em tempo real, sendo a termografia terrestre uma técnica em crescente utilização.

Estes sensores acoplados a veículos aéreos não tripulados (Drone), têm sido testados em viticultura de precisão ([5, 6]), oferecendo vantagens em relação às medições em campo, pelo seu desempenho e alta flexibilidade de uso, baixos custos operacionais, resoluções espaciais muito altas, na base centimétrica [7, 8], bem como na capacidade de espacialização dos dados. Imagens de satélite também têm sido usadas em estudos de videira para avaliar o stress hídrico [9] e intra-variabilidade no vigor e expansão foliar [7] e[10]. Com sensores terrestres fixos, nomeadamente sensores térmicos, torna-se possível estimar o estado hídrico da videira através da obtenção da temperatura da canópia [11], bem como indicadores de apoio à sanidade vegetal da videira.

O presente trabalho tem como objetivos: i) calcular os índices de stress hídrico da videira, nomeadamente o CWSI (Crop Water Stress índex) e o IG (index of relative stomatal conductance) mediante a utilização de uma câmara térmica portátil; e ii) correlacionar os valores de potencial hídrico de ramo com os mesmos índices.

2. Material e métodos

O ensaio desenvolveu-se durante o ano 2018 numa parcela de *Vitis vinífera* cv. Loureiro de 5,5 ha situada no concelho de Ponte de Lima Viana do Castelo, Norte de Portugal (41°40'32.16"N 8º32'6.21"W, altitude 175 m). O clima destas regiões apresenta influência atlântica, caracterizado como Csb, classificação de Köppen-Geiger [12], com temperaturas e amplitudes térmicas moderadas e pluviometria elevada (varia entre os 1400 e os 1800 mm) concentrando-se a maior parte nos meses de inverno. O solo apresenta uma textura franca, próxima da franco-arenosa (50 % areia, 31 % limo e 19 %), uma profundidade de 1 m, um conteúdo de matéria orgânica de 2,65 % e um pH de 5,4. Os valores dos parâmetros hídricos do solo, obtidos por métodos laboratoriais, utilizando panelas de pressão, foram de 0,231 $m^3.m^{-3}$ para a capacidade de campo (pF 2; 10 kPa) e de 0,121 $m^3.m^{-3}$ para o coeficiente de emurchecimento (pF 4.2; 1,55 MPa).

A vinha da casta Loureiro, porta-enxertos 1103P, foi plantada no ano 2001, orientação Norte-Sul, com um compasso de 2 m x 3 m (1666 plantas ha^{-1}), conduzida em cordão simples ascendente. O sistema de rega é gota a gota, com gotejadores auto-compensantes de débito 4 $L.h^{-1}$ separados

1 m, entre si. As necessidades de rega foram estimadas semanalmente, utilizando os valores da evapotranspiração cultural (ETc), calculada seguindo a metodologia apresentada pelo manual FAO 56 [13], utilizando dados meteorológicos registados numa estação agrometeorologia, instalada na parcela em estudo, sendo o coeficiente cultural utilizado (Kc) de 0,7 [14].

A partir do estado fenológico da floração foram monitorizados semanalmente os seguintes parâmetros: i) o teor de água no solo (mm), utilizando uma sonda capacitiva; ii) o potencial hídrico de ramo (MPa), com uma câmara de pressão do tipo Scholander; e a iii) a temperatura da canópia utilizando uma câmara térmica manual. Foram implementadas duas estratégias de rega: Rega Completa (RC; 100 ET_c) e Rega Deficitária (RD, 70% da ET_c) e um controlo sem rega (SR). Cada estratégia apresenta dois blocos formados por 4 filas. Nas filas centrais foram realizadas as medições, 7 videira por fila, e as filas extremas funcionaram como bordadura.

As imagens térmicas, foram obtidas com uma câmara térmica de infravermelha (FLIR e75), com uma lente de 42º, resolução de 320 x 240 pixeis, frequência de 30 Hz, faixa espectral de 0,7 – 1,4 μm, tendo uma gama de temperaturas de -20 a 1000 ºC. Cada pixel da imagem possui uma leitura de temperatura em graus Celsius. As imagens foram obtidas em locais pré-definidos, meio dia solar, a uma distância de 2 metros perpendicular à direção da linha. Todas as imagens, foram adquiridas em dias de céu limpo, com condições mínimas de vento, avaliados no local de recolha.

As temperaturas de referencia, (Twet e Tdry; ºC), foram obtidas pela seleção de duas folhas saudáveis e próximas entre si. Na folha Tdry, foi aplicada vaselina em ambos os lados, 30 minutos antes, servindo para forçar artificialmente o fecho dos estomas, impedindo a evapotranspiração e consequentemente o aumento da temperatura da folha e na Twet, foi pulverizada água, 2 minutos antes, para simular a taxa de evapotranspiração máxima.

O calculo do CWSI (índice de stress da cultura), foi usada a partir da equação proposta por [15] modificada por [11].

$$CWSI = \frac{(T_c - T_{wet})}{(T_{dry} - T_{wet})}$$

Onde *Tc*, é a temperatura da canópia, obtida a partir da imagem térmica e *Tdry* e *Twet*, são as temperaturas de referencia (ºC).

O IG (Índice de condutância estomática), foi obtido através da equação proposta por [10].

$$I_G = \frac{(T_{dry} - T_c)}{(T_c - T_{wet})}$$

Com o objetivo de avaliar a relação entre os índices de stress (CWSI e IG) e o potencial hídrico de ramo, foi calculada uma correlação de Pearson e uma regressão linear.

3. Resultados e discussão

Durante o ano 2018 foram registados os estados fenológicos para a casta Loureiro segundo a escala de Baggiolini [16]. Na Figura 1, apresenta-se o conteúdo de água no solo. para os diferentes estados vegetativos ao longo do ciclo cultural. A floração foi atingida no dia 06 de junho (DOY 157), bago de ervilha a 26 de junho (DOY 177) e pintor no dia 9 de agosto (DOY 221). As três estratégias de rega apresentam valores muito próximos, não existindo diferenças significativas, até ao estado fenológico do pintor, evidenciando-se após esse período um aumento de água no solo na estratégia de rega (RC), até à ultima rega (DOY 241), convergindo novamente as três estratégias até á vindima.

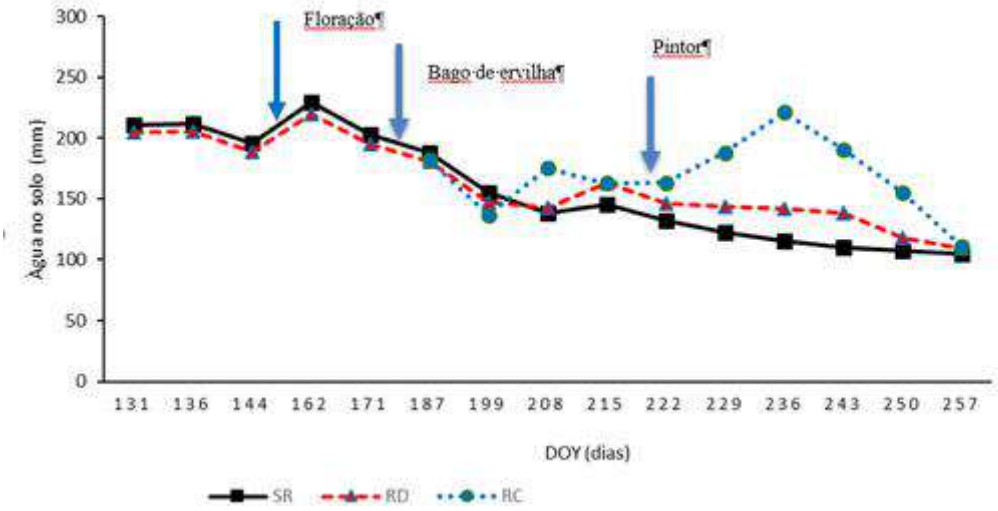


Figura 1. Teor de água no solo (mm) durante o ciclo vegetativo da casta loureiro para as diferentes estratégias de rega (Sem Rega, SR; Rega Deficitária, RD e Rega Completa, RC).

No quadro 1, apresentam-se os índices de stress hídrico CWSI e o IG, nas distintas estratégias de rega implementadas. Os referidos índices não registam diferenças significativas entre si, que permitam concluir que alguma das estratégias implementadas, provocou stress hídrico na cultura pelo facto de ao longo do ciclo vegetativo o teor de água no solo ter sido elevado.

Quadro 1. Valores médios dos índices de stress (CWSI e Ig) e potencial de ramo registados nas distintas estratégias de rega

	CWSI	**IG**
SR	0,60	0,81
RD	0,61	0,81
RC	0,54	1,08

A forte correlação de Pearson obtida entre os índices CWSI e IG (0,94) poderá justificar uma simplificação destes métodos, através da obtenção do CWSI, e posterior estimativa do IG por regressão linear (0,89) (Figura 2), atendendo a que torna redundante para este efeito, o cálculo dos dois índices em simultâneo.

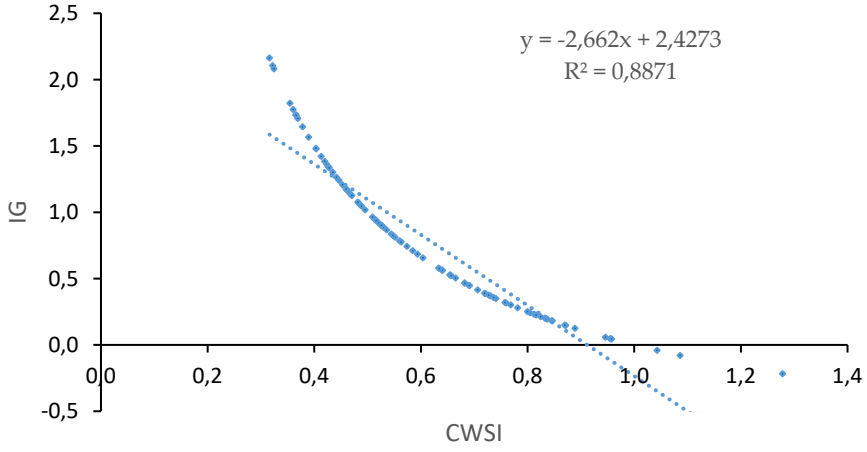
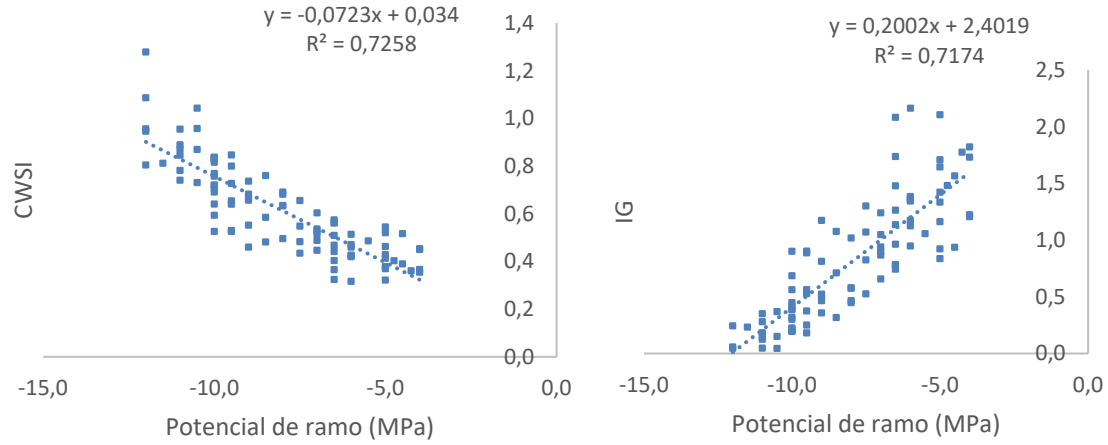


Figura 2. Regressão Linear entre o CWSI (Crop Water Stress índex) e o IG (index of relative stomatal conductance)

Nas restantes correlações, em ambos os casos, verificam-se de igual forma fortes correlações entre as variáveis intervenientes, 0,73 na relação CWSI/Ψ (MPa) e 0,72 na relação IG/Ψ (MPa) (Figura 3a e Figura 3b). O que denota que estes índices poderão ser relevantes no apoio à determinação de stress hídrico da cultura da vinha.



a) b)

Figura 3. Regressão Linear entre o os índices de stress e o potencial de ramo (MPa): a) CWSI (Crop Water Stress índex) e b) IG (index of relative stomatal conductance)

4. Conclusões

A utilização de sensores terrestres de proximidade configura-se como uma boa solução para o acompanhamento dos parâmetros vegetativos da videira. No estudo apresentado, verifica-se que a monitorização do teor de água no solo permite afirmar que as estratégias de rega implementadas, devido às condições climáticas do ano, não manifestaram diferenças significativas no teor de água no solo até o estado fenológico do pintor.

Os índices de stress, podem ser indicadores viáveis para estimar o potencial hídrico do ramo, na casta Loureiro, pela sua forte correlação entre ambos, mas também por se obterem de forma não destrutiva para a planta. O forte coeficiente de correlação, obtido entre os dois índices CWSI e IG, apenas vem justificar a sua utilização, simplificando o processo com o uso de apenas, em função da necessidade no local.

5. Agradecimentos

Este trabalho contou com a participação dos alunos de final de Licenciatura Rodrigo Cardoso, Filipe Fernandes, Rui Silva e João Silva e à coordenação dos trabalhos de campo de Carlos Marques. Foi financiado pelo projeto Terr@eno - Terroir e zonagem agro-ecológica como fator crítico de competitividade e inovação dos Vinhos Verdes (NORTE-02-0853-FEDER-000113).

Referências

1. Fuentes, S., Bei, R., Pech, J., Tyerman, S., 2012. Computacional wáter stress índices obtained from termal image analysis of grapevine canopies. Irrig Sci, 30:523-536.
2. Rustioni, L., Rocchi, L., Guffanti, E, Cola, G., Faila, O., 2014., Characterization of Grape (*Vitis vinifera* L.) Berry Sunburn Symptoms by Reflectance. Journal of Agricultural and Food Chemistry 62(14)
3. Jones, H.G., 1992, Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge University. Press, Cambridge

4. Grant, O.M, Ochagavia, H., Baluja, M.P., Diago, M.P., tardáguila, J., 2016, Thermal imageing to detect spatial and temporal variation in the wáter status of grapevine (*vitis vinífera* L.). The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, Vol. 91, Taylor & Francis.
5. Zarco-Tejada. P.J., Gonzalez-Dugo, V., Berni, J.A., 2012. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. Remote Sensig of Environment, Volume 117, 322-337.
6. Gago, J., Douthe, C., Coopman, R.E., gallego, P.P., Ribas-Carbo, M. Flexas, J., Escalona, J., Medrano, H.., 2015, UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. Agricultural Water Management, Volume 153, 9-19.
7. Matese, A., Toscano, P., Gennaro, S.F., genesio, L., Vaccari, F.P., Primicerio, J., Belli, C., Primacerio, J., Belli, C, Zaldei, A., Bianconi, R., Gioli, B., 2015, Intercomparision of UAV, Aircraft and satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. Remote Sens, 7(3), 2971-2990.
8. Gago, J., Douthe, C., Coopman, R.E., gallego, P.P., Ribas-Carbo, M. Flexas, J., Escalona, J., Medrano, H.., 2015, UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. Agricultural Water Management, Volume 153, 9-19.
9. Consoli, S., Barbagallo, S., 2012, Estimating Water Requirements of an Irrigated Mediterranean Vineyard Using a Satellite-Based Approach. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Volume 138 Issue 10
10. Jones, H.G., Grant, O.M., 2016. Remote sensing and other imaging technologies to monitor grapevine performance. In: Gerós, H., Chaves, M., Medrano, H., Delrot,S. (Eds.), Grapevine in a Changing Environment: A Molecular and Eco-physiological Perspective. Wiley Blacwell, pp. 179–201
11. Garcia-Tejero, I.F., Costa, J.M., Egipto, R., Durán-Zuazo, V.H., Lima, R.S.N., Lopes, C.M., Chaves, M.M., 2016. Thermal data to monitor crop-water status in irrigated Mediterranean viticulture. Agricultural Water management 176, 80-90.
12. Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated.Meteorologische Zeitschrift, 15(3), 259-263.
13. Allen, R, G,, Pereira, L, S,, Raes, D,, e Smith, M, (1998), Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements, Irrigation and Drainage Paper No, 56, FAO, (56), pp,300,
14. Fandiño M., Cancela J.J., Rey B.J., Martínez E.M., Rosa R.G. and Pereira L.S., (2012). Using the dual-Kc approach to model evapotranspiration of Albariño vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. Albariño) with consideration of active ground cover. Agric. Water Manage., 112, 75-87.
15. Idso 1982, Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. Agric Meteorol 27(1–2):59–70
16. Baggiolini M., (1952). Les stades repères dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. Revue Romande d'Agriculture de Viticulture, 8 4-6

Área temática:

Tecnología de la información / Control de procesos / Automatización



X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Análisis del consumo de agua de *Hordeum vulgare* L. mediante un equipo de lisimetría de pesada

M.Soler-Méndez[1], P. Madrona-Sánchez[1], L. Ávila-Dávila[1], A. Ruiz-Canales[2], J.M. Molina-Martínez[1]

[1] Grupo de I+D+i de Ingeniería Agromótica y del Mar. UPCT. C/Ángel s/n. Ed. ELDI E1.06. 30202 Cartagena (Murcia), Spain; manuel.ia@agrosolmen.es, josem.molina@upct.es

[2] Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández de Elche, Escuela Politécnica Superior de Orihuela; acanales@umh.es

Resumen: El consumo de agua en los cultivos es un parámetro muy estudiado por distintas técnicas, pero la que mejor lo evalúa es el Balance Hídrico. En este ensayo se analizó el balance hídrico de un cultivo de *Hordeum vulgare* L. mediante los nuevos lisímetros desarrollados por el grupo de investigación Ingeniería Agromótica y del Mar de la Universidad Politécnica de Cartagena. Se instaló en la finca experimental las Tiesas (ITAP-Albacete), monitorizando con suficiente precisión la evolución del contenido de agua del suelo contenido en el lisímetro, pudiendo discriminar episodios de lluvia, de riego, de condensación, y de evapotranspiración. Se contrastaron los datos con los del lisímetro del ITAP y los datos de la estación meteorológica del ITAP. Los resultados obtenidos permitieron confirmar el equilibrio producido entre las entradas de agua (procedentes de precipitaciones, riego y condensación) y las salidas de agua (causadas por la evapotranspiración del cultivo y el drenaje). Se pudo contrastar que los valores de Etc reales del cultivo discrepaban de los valores estimados a través de las variables climáticas, en general inferiores los valores reales, lo que da pie a que el empleo de este método de cálculo de consumo de agua mediante lisimetría de pesada permita aumentar la eficiencia de su uso.

Palabras clave: Lisímetro, balance hídrico, uso eficiente del agua.

1. Introducción

Existen distintos métodos para calcular las necesidades hídricas de un cultivo, y por tanto, programar el riego, de los que cabe destacar aquellos basados en datos climáticos, en las condiciones de humedad del suelo o en las condiciones de humedad de la planta, pero su exactitud dependerá de la precisión con la que se estimen los distintos elementos que componen el balance hídrico [4, 5, 6].

El método gravimétrico es el más exacto en la determinación del balance hídrico [5], y un lisímetro de pesada nos puede ayudar a emplear este método. Con el lisímetro de pesada se puede controlar un volumen determinado de suelo, colocado en condiciones similares a las del resto de suelo por fuera del lisímetro, de forma continua, monitorizando el peso del suelo seleccionado, y así se puede conocer la variación gravimétrica del agua en el suelo [2, 4, 6].

Para poder discriminar los distintos parámetros que afectan al flujo de entradas y salidas de agua en el balance, en primer lugar, se puede controlar el drenaje igualmente por método gravimétrico, y, por tanto, el resto de salidas serán debidas principalmente a evapotranspiración [3]. En segundo lugar, para discriminar la procedencia de las entradas de

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3377

agua, se pueden conocer los datos tanto de la existencia de riego (con sensores hidráulicos) como de las precipitaciones (con pluviómetro).

Generalmente un lisímetro es una gran infraestructura civil que es capaz de monitorizar una gran cantidad de suelo, aunque el grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar de la Universidad Politécnica de Cartagena está inmerso en el desarrollo de equipos de lisimetría para cultivos de bajo porte, como pueden ser herbáceos y hortícolas, que permiten obtener una información suficientemente precisa con muchísima menor inversión.

El objetivo que el presente trabajo persigue es la de comprobar si, a través de un dispositivo de lisimetría como el que se está desarrollando, se obtienen datos que puedan facilitar la programación de riego, a través de la comprobación con respecto a un lisímetro de grandes dimensiones que está afianzada su validez, y manteniendo la referencia con respecto a las estimaciones de consumo hídrico a través de datos climáticos.

2. Materiales y métodos

El experimento se realizó entre febrero y junio de 2017 en una parcela experimental de una hectárea de extensión, llamada "Las Tiesas", en Albacete, perteneciente al Instituto Agronómico Provincial de Albacete (ITAP). El cultivo empleado fue cebada (*Hordeum vulgare*), variedad "SHAKIRA" de ciclo corto en primavera. El suelo de la parcela experimental es franco-arcillo-limoso determinado con el triángulo de textura de Marshal.

El lisímetro de pesada utilizado fue el modelo LP1 diseñado por el grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar de la Universidad Politécnica de Cartagena, cuya precisión de medición es de 0,063 mm de agua. El dispositivo cuenta con un recipiente de cultivo independizado de su entorno, por lo que los flujos laterales y de ascenso capilar son nulos y cuyas dimensiones interiores son 0,96 m x 0,56 m y 0,35 m de profundidad en el centro, y con depósito de drenaje que es utilizado para almacenar y medir el agua, que se filtra a través del volumen de suelo confinado.

Por medio de dos sistemas de pesaje, se conoce la evolución del peso tanto del recipiente de cultivo como del depósito de drenaje; teniendo en cuenta que las variaciones de peso ocurridas serán debidas sobre todo a variaciones en el contenido de agua en ambos recipientes, conoceremos con certeza los componentes del balance hídrico por el método. De esta forma el lisímetro nos proporciona una medida directa de las variaciones de peso ocurridas en el recipiente de cultivo (provenientes de forma positiva principalmente de precipitaciones y riego, y de forma negativa principalmente de drenaje y evapotranspiración), así como en el depósito de drenaje (provenientes de forma positiva del drenaje).

Para desarrollar el ensayo, el punto de partida es que solo se disponía de una muestra de cada uno de los dos tratamientos, es decir, de un punto de monitorización de consumo hídrico por lisimetría de pesada a través del lisímetro de bajo coste en desarrollo, y del tratamiento control, que en este caso se trataban de equivalentes datos pero obtenidos a través del lisímetro de pesada disponible en el ITAP. Además, para contrastar ambos datos, se analizaron las estimaciones de consumo hídrico a través del método empírico de Penman-Monteith utilizando los datos de la estación meteorológica del ITAP junto con los coeficientes recomendados por la FAO para el cultivo implantado.

Los datos obtenidos en el ensayo (para el tratamiento del lisímetro de bajo coste) han sido tanto el peso del recipiente de cultivo como el peso del depósito de drenaje, expresadas ambas magnitudes en gramos. Por tanto, en base a esos datos, y conociendo las variaciones de ambas magnitudes por unidad de tiempo, se logran estimar los parámetros de interés para la programación del riego; en este caso, concretamente la evapotranspiración de cultivo, y la proporción de drenaje.

El intervalo diario elegido para los cálculos de la evapotranspiración ha sido el de un día, aunque los datos se han registrado por segundos e integrado en datos ofrecidos por el datalogger en minutos.

Por tanto, los datos disponibles son:

RC: Peso del recipiente de cultivo (g)

$$\Delta RC = RC_i - RC_{i-1} \quad (1)$$

DD: Peso del depósito de drenaje (g)

$$\Delta DD = DD_i - DD_{i-1} \quad (2)$$

Para conseguir que los datos obtenidos sean extrapolables, se traspasan las unidades a mm, equivalente a L/m^2. Para ello se relaciona con la superficie del lisímetro, teniendo en cuenta que la densidad del agua es de 1000 g/L:

A_{lis}: Área de ocupación del lisímetro (m^2).

$$A_{lis} = 0{,}96m \cdot 0{,}56m = 0{,}537m^2 \quad (3)$$

$$\Delta RC(mm) = \frac{\Delta RC(g) \cdot \frac{1L}{1000g}}{0{,}537m^2} \cdot \frac{1mm}{1\frac{L}{m^2}} \quad (4)$$

$$\Delta DD(mm) = \frac{\Delta DD(g) \cdot \frac{1L}{1000g}}{0{,}537m^2} \cdot \frac{1mm}{1\frac{L}{m^2}} \quad (5)$$

El balance hídrico se conocerá a través de la siguiente expresión:

$$\Delta RC = P + R - D - ETc \quad (6)$$

P: Precipitaciones (mm)

R: Riego (mm)

D: Drenaje (mm); $D = \Delta DD$

ETc: Evapotranspiración del cultivo (mm)

Por tanto, la evapotranspiración del cultivo será:

$$ETc = P + R - D - \Delta RC \quad (7)$$

Los valores de ETc calculados a partir de los datos obtenidos por este lisímetro se contrastaron con los valores de ETc obtenidos por la estación lisimétrica del ITAP, cuyas dimensiones son de 2,3 m x 2,7 m de superficie, y 1,7 m de profundidad.

Al mismo tiempo, se contrastaron los datos obtenidos por lisimetría con los datos estimados de ETc en base a los datos climáticos ofrecidos por la estación meteorológica del ITAP.

El número de muestras que se manejaron para cada uno de los tratamientos (lisímetro de bajo coste, lisímetro del ITAP, y estación meteorológica del ITAP) fue de una muestra, debido principalmente a dos motivos:

- El objetivo del trabajo es el de validar los datos de consumo hídrico del cultivo ofrecidos por el lisímetro en desarrollo con respecto a otro lisímetro cuyo funcionamiento está contrastado, y compararlo al mismo tiempo con estimaciones a través de datos climáticos.
- Debido al alto coste de la infraestructura que se necesita para este tipo de ensayos, es difícil de replicar las muestras.

El análisis de resultados, por tanto, se realiza contrastando gráficamente los datos obtenidos por los distintos métodos expuestos, estableciendo como referencia los datos ofrecidos por el lisímetro del ITAP.

3. Resultados y discusión

La Figura 1 muestra la evolución de la evapotranspiración de cultivo a lo largo del periodo comprendido entre el 8 de febrero y el 22 de junio del año 2017, teniendo en cuenta que el

cultivo terminó 10 días después, aunque no se muestran los datos porque se perdieron algunos días.

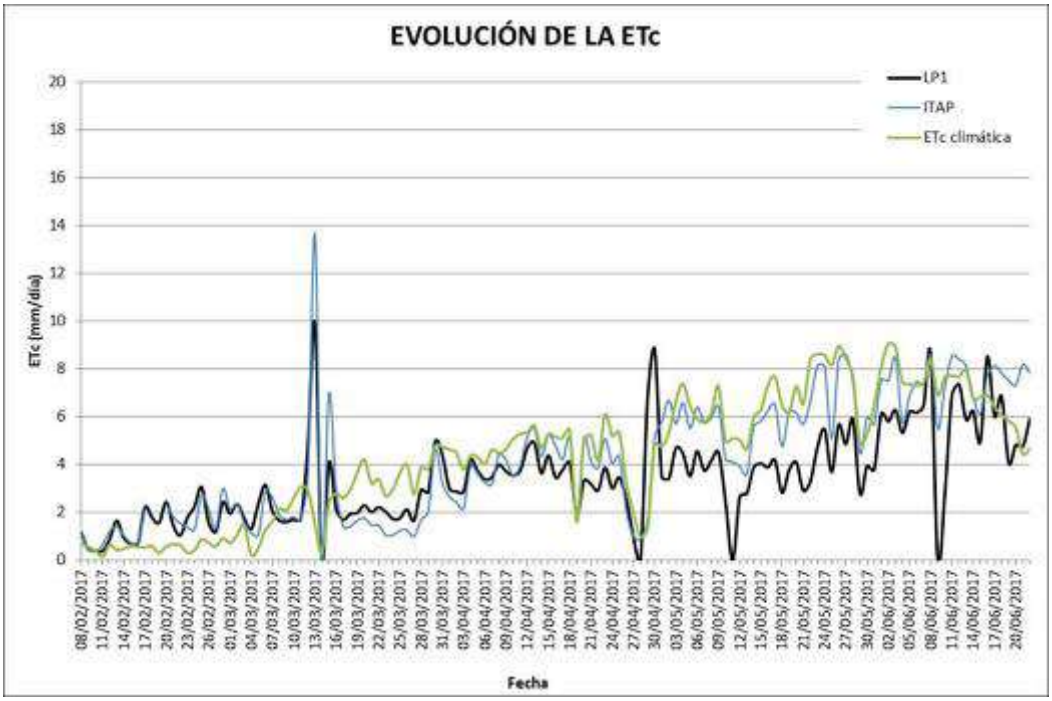


Figura 1. Evolución de la evapotranspiración del cultivo, calculada por distintos métodos.

En los días 13 y 14 de marzo, 27, 28 y 29 de abril, y 11 de mayo, los datos presentan valores extraños debido a distintos episodios de precipitaciones.

En la fase inicial del ciclo, hasta el 12 de marzo, los datos obtenidos por ambos lisímetros son similares, y superiores a los obtenidos por método climático; nuestra hipótesis es que el efecto debido al suelo seco en torno al cultivo (en las primeras fases del desarrollo del cultivo, el área sombreada es muy pequeña) no se estima suficiente a través de los métodos climáticos.

Después del primer periodo de lluvias copiosas (13 y 14 de marzo), entonces se invierte la tendencia, siendo superior la estimación climática que la registrada por los lisímetros; nuestra hipótesis es que, debido al microclima generado por la alta humedad del suelo, se reduce el déficit de presión de vapor del entorno, y por eso, la evapotranspiración es menor que la estimada por métodos climáticos.

Conforme avanza el desarrollo del cultivo, se van asemejando los datos de ETc obtenidos por los tres métodos, hasta el 15 de abril, y después, se separan las tendencias, de forma que el lisímetro LP1 da menores valores de ETc que el lisímetro del ITAP y el método climático, considerando que es debido a una diferencia en la densidad de siembra detectada a lo largo del desarrollo, y una diferencia en la uniformidad del riego por aspersión.

Se ha de tener en cuenta que para el cálculo de la ETc basado en datos climáticos, los datos de ETo se han obtenido de la estación meteorológica del ITAP, y los coeficientes de cultivo, así como la duración de ciclo, se han obtenido de la FAO-56 [1]. En la tabla 1 se muestra la estimación de duración de ciclo para la cebada de plantación de marzo/abril, de acuerdo al cuadro 11 [1], aunque en el ensayo, el ciclo duró 10 días más (a pesar de que los últimos 10 días no se muestran), con lo que la duración de la fase media del ciclo la consideramos 70* días en lugar de 60 días. En la tabla 2 se muestra la evolución del coeficiente teórico de cultivo en función del punto del ciclo fenológico en el que se encuentre, de acuerdo al cuadro 12 [1].

Tabla 1. Duración de ciclo [1], expresado en días.

Fase inicial	Fase de desarrollo	Fase media	Fase final
20	25	70*	30

Tabla 2. Coeficiente de cultivo, Kc [2], en función de la fase fenológica.

Fase inicial	Fase media	Fase final
0,30	1,15	0,25

Teniendo en cuenta las observaciones arriba indicadas, en cuanto a una diferencia en la uniformidad de riego, y en la densidad de plantación, aparentemente según las muestras visuales, el cultivo en ambos lisímetros no presentaba al final de ciclo ninguna deficiencia en el desarrollo.

En base a lo expuesto, se aprecia que la estimación del consumo hídrico del cultivo es de menor magnitud para el lisímetro de pesada de bajo coste LP1, en comparación con la estimación en base a datos climáticos. En la tabla 3 se muestra el sumatorio a lo largo de los días monitorizados de la ETc diaria calculada por cada uno de los tres métodos expresados.

Tabla 3. Sumatorio de la ETc a lo largo de los días monitorizados para los distintos métodos de cálculo, expresado en mm.

ΣETc lis. LP1	ΣETc lis. ITAP	ΣETc climática
462	563	583

4. Conclusiones

Se considera que el lisímetro en desarrollo de bajo coste LP1 puede ser una herramienta útil para la estimación del consumo hídrico de un cultivo de bajo porte, y permite ajustar los coeficientes de cultivo para extrapolar la estimación del consumo hídrico por medios climáticos a parcelas con similares condiciones.

Referencias

1. Allen, R.G; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos., FAO-56 (Italia). 2006
2. Jiménez-Carvajal, C., García-Bañón, A. J., Vera-Repullo, J. A., Jiménez-Buendía, M., Ruiz-Peñalver, L., and Molina-Martínez, J. M. Cloud-based monitoring system for lysimetric and agroclimatic data. Precision Agriculture. 2017, 18(6), 1069-1084.
3. Payero, J.O. and Irmak, S. Construction, installation, and performance of two repacked weighing lysimeters. Irrig Sci 2008, 26, 191-202
4. Ruiz-Peñalver, L., Vera-Repullo, J. A., Jiménez-Buendía, M., Guzmán, I., and Molina-Martínez, J. M. Development of an innovative low cost weighing lysimeter for potted plants: Application in lysimetric stations. Agricultural Water Management. 2015, 151, 103-113.
5. Soler-Méndez M., Ávila-Dávila L., González-Trinidad J., Ruiz-Canales A., y Molina-Martínez J. M. Control de precisión del balance hídrico en tiempo real en cultivos hortícolas. Agrícola Vergel. Abril 2019, 1-3.
6. Vera-Repullo, J. A., Ruiz-Peñalver, L., Jiménez-Buendía, M., Rosillo, J. J., and Molina-Martínez, J. M. Software for the automatic control of irrigation using weighing-drainage lysimeters. Agricultural Water Management. 2015, 151, 4-12.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Automatización de pequeños jardines con Sonoff 4CH Pro R2 y EWelink

M.Soler-Méndez[1], J.M. Molina-Martínez[1], L. Ávila-Dávila[1], L. Ruiz-Peñalver[1]

[1] Grupo de I+D+i de Ingeniería Agromótica y del Mar. UPCT. C/Ángel s/n. Ed. ELDI E1.06. 30202 Cartagena (Murcia), Spain.

Resumen: Se ha analizado el equipo Sonoff 4CH Pro R2 en un jardín residencial. Es un equipo que permite la activación de hasta 4 dispositivos, a través de una APP (Ewelink), tanto de accionamiento manual como por medio de temporizadores. Se puede concluir que es un método sencillo (la aplicación es muy intuitiva), económico, eficaz (resuelve el problema de una automatización simple con telecontrol fácilmente) y con inteligencia distribuida (ante un corte en las comunicaciones, el equipo mantiene las últimas órdenes guardadas), que, dependiendo de la aplicación, supera los inconvenientes que presenta frente a la pérdida de comunicación tras periodos de inactividad (cuando no se accede a la aplicación durante un tiempo, o cuando se actualiza la misma, los equipos dejan de estar conectados, y hay que conectarse de nuevo). Se puede concluir que es una solución de telecontrol válida para aplicaciones de automatización sencillas, donde no se requieren condicionantes, simplemente controles horarios y/o teleactivaciones.

Palabras clave: Telecontrol económico, riego jardín, inteligencia distribuida.

1. Introducción

Un sistema de riego en jardines residenciales requiere un diseño algo peculiar, pues no se puede dejar de lado la tecnología, pero hay que mantener siempre presente el horizonte de rentabilidad económica que aportará, a diferencia de cultivos agrícolas.

La tendencia en general en cualquier ámbito, y en particular en el riego, es a disponer cada vez de más dispositivos conectados a la nube, para poder hacer un control fácil e intuitivo desde un Smartphone o Tablet [1, 3, 4]. Un ejemplo de esto es la aplicación para Android desarrollada [2] para el cálculo óptimo de los nutrientes en la fertirrigación o la aplicación desarrollada para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo tomando datos en tiempo real de las estaciones SIAM de [1].

El objetivo de este trabajo es comprobar el funcionamiento de un dispositivo de telecontrol de bajo coste para hacer frente a proyectos de riego de envergadura simple, como puede ser el riego de un jardín, a través de la última tecnología IOT.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3376

2. Materiales y métodos

El equipo elegido a instalar fue de la marca Sonoff, modelo 4CH Pro R2, cuyas principales características son las que se expresan a continuación, así como el método de instalación y las pruebas realizadas.

2.1.Características del dispositivo marca Sonoff, modelo 4CH Pro R2

- Control remoto encendido / apagado: enciende / apaga dispositivos eléctricos desde cualquier lugar.
- Soporte de aplicaciones: aplicación móvil gratuita para iOS y Android eWeLink.
- Control remoto de RF: encendido / apagado a 433MHz Control remoto de RF en interiores.
- Control independiente: controla cada equipo por separado.
- Montaje en riel DIN - Excelente para control industrial.
- Estado de sincronización: estado del dispositivo en tiempo real proporcionado a la aplicación.
- Temporización: configure los temporizadores programados / de cuenta atrás para que se enciendan / apaguen a una hora específica.
- Escena: enciende / apaga un grupo de dispositivos con un solo toque.
- Smart Scene: activado / desactivado por temperatura, humedad u otras condiciones ambientales.
- Control de voz: funciona perfectamente con Amazon Alexa, Google Home.

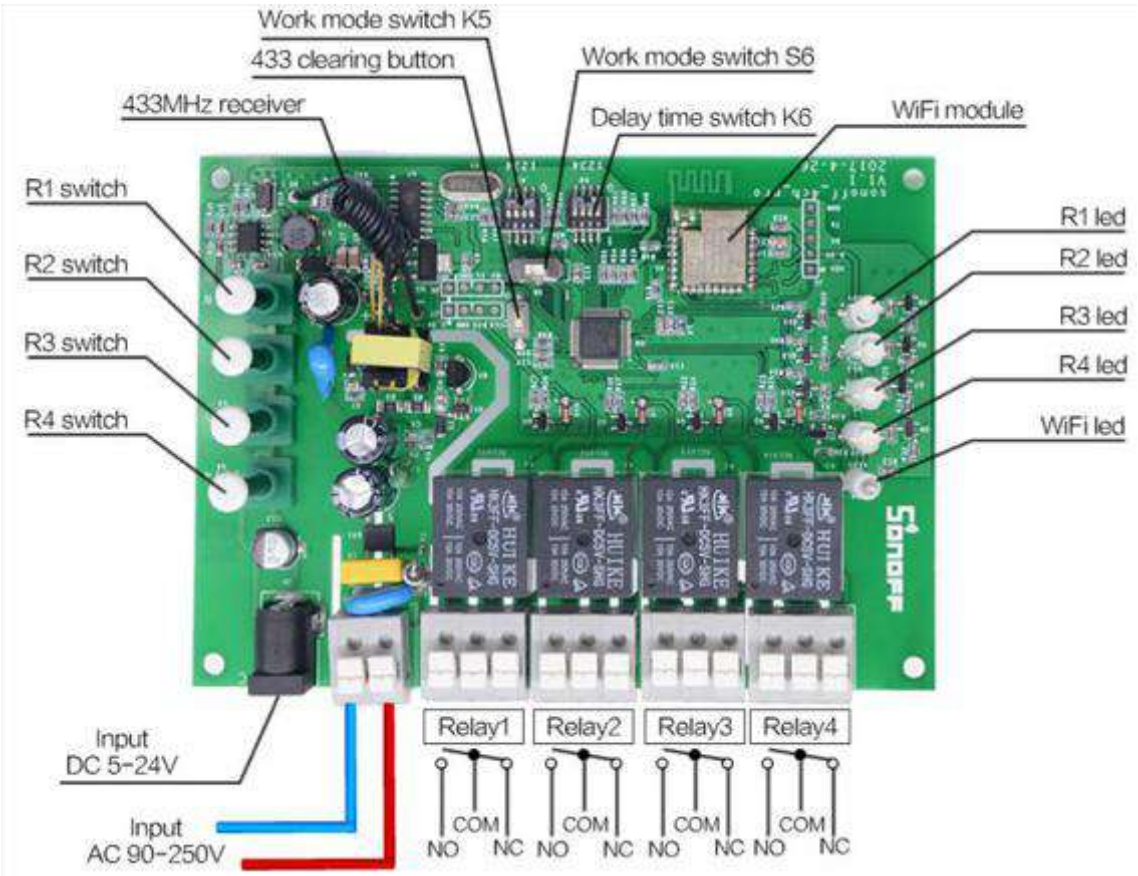


Figura 1. Placa electrónica del equipo empleado.

2.2. Instalación realizada

El equipo se instaló en un sistema de riego existente en una vivienda en el T.M. de Lorca (Región de Murcia), en el que había un programador de riego para jardín tradicional, marca GALCON modelo AC6s.

Se sustituyó el programador existente por el dispositivo IOT elegido; se alimentó el equipo con 230 VAC, y, por tanto, las salidas ofrecidas eran de 230 VAC. Las electroválvulas instaladas trabajaban a 24 VAC, con lo que se instalaron relés alimentados a 230 VAC desde el dispositivo Sonoff empleado, y en el contacto que cerraban permitían el paso de 24 VAC a los correspondientes solenoides de las electroválvulas.

Además, se colocó un router wifi próximo al equipo para poder poner en marcha su telecontrol.

La instalación de riego estaba compuesta por 6 sectores + válvula general + abonado, pero el equipo disponía de 4 salidas únicamente, así que se estableció:

- Unir los sectores de autóctonas y palmeras
- Mantener el sector de hortalizas independiente
- Mantener el sector de sauce independiente
- Unir los sectores de arbolado ornamental y frutales
- Se enclavaron con cada una de las cuatro salidas tanto la válvula general como el sistema de abonado.

2.3. Aplicación empleada

Se ha empleado la aplicación Ewelink desde un Smartphone para el control del equipo. Ésta me permitió cuatro tipos de actuaciones:

- Visualizar el estado de las electroválvulas (si estaban activas/desactivas).
- Actuar sobre las electroválvulas (activarlas/pararlas) de forma manual.
- Programar el riego mediante hora de activación y hora de parada.
- Temporizar la parada tras una activación manual.



Figura 2. Aplicación empleada para el control.

La configuración del equipo permite poner a cada salida un nombre, y especificar si están normalmente abiertas o cerradas.



Figura 3. Configuración del equipo.

La programación es muy sencilla, a través de temporizadores, donde se establecen días de repetición, horas y minutos del evento, canal sobre el que se actúa, y actuación de activación/parada.

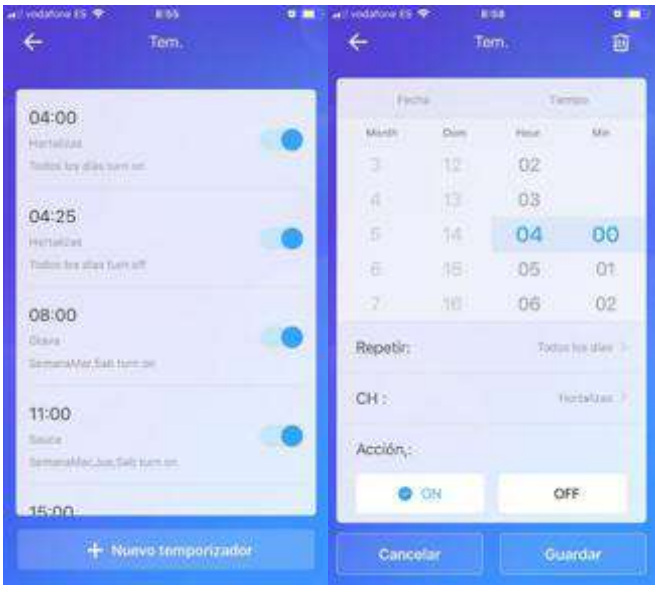


Figura 4. Creación de temporizadores para programar el riego.

La aplicación permite tener varios dispositivos conectados, y cada dispositivo tiene una pantalla de control que muestra el estado de las distintas salidas en tiempo real.



Figura 5. Aplicación que reúne varios dispositivos, y cada dispositivo ofrece el estado de las salidas a tiempo real.

Teniendo en cuenta el objetivo de este trabajo, no se buscaba hacer una comparación entre dispositivos, ni tener un registro de datos de las activaciones y/o programaciones, lo que se perseguía era comprobar el correcto funcionamiento, y por tanto, la metodología de trabajo fue la siguiente:

Primero, se realizó la instalación tal cual se ha expuesto al inicio.

A continuación, se realizaron en varias ocasiones, en días aleatorios, distintas pruebas de programaciones y activaciones/desactivaciones manuales a través de la aplicación de las distintas salidas.

Se hicieron programas de riego (basándose en el criterio del que programaba, sin sensores de humedad y sin cálculos teóricos de dosis de riego, ya que la entidad de la explotación no lo requería), y se hizo un seguimiento visual del correcto funcionamiento de dichos programas a lo largo de varios días.

En distintas ocasiones se cortó el suministro eléctrico del router wifi, para comprobar si el sistema mantenía la última programación establecida, resultando ser así: a pesar de no poder conectarse al dispositivo, éste seguía ejecutando en perfectas condiciones el último programa enviado.

3. Resultados y discusión

Cuando se realizaron las primeras pruebas de la instalación, eléctricamente todo quedó funcionando correctamente, activándose con cada salida del dispositivo Sonoff aquellos sectores agrupados en esa salida, más la válvula general y el fertilizante.

Cada vez que se realizaba un programa de prueba, o se realizaban activaciones/desactivaciones manuales a través de la aplicación, las electroválvulas de los sectores correspondientes actuaban adecuadamente.

Siempre que se desactivaba la conexión del dispositivo a internet, éste seguía ejecutando el último programa enviado.

La programación establecida en los periodos de mantenimiento del ensayo era ejecutada correctamente.

Debido al objetivo del trabajo, no se requerían tantos datos numéricos de las distintas pruebas realizadas, sino una comprobación del correcto funcionamiento, con lo que la

observación visual de la activación/parada del riego en cada uno de los sectores era suficiente, no se requería ni control de caudales, ni de tiempo de riego, ni de humedad de suelo.

Durante el desarrollo del ensayo aparecieron distintos problemas, que son subsanables. El principal problema es que, tras un periodo de inactividad, o tras la actualización de la aplicación, el equipo se desvincula de la aplicación, y hay que volver a conectarse (aunque es un proceso sencillo que puede llevar 5 minutos). Por otro lado, se pueden configurar varios temporizadores (tanto horarios como de cuenta atrás), pero solo pueden estar activos 8 de ellos, con lo que para la gestión de riego, dependiendo de que cultivo, puede ser limitante, aunque debido a su bajo coste, se solventa con la instalación de dispositivos de salida individual.

4. Conclusiones

El empleo de un equipo Sonoff 4CH Pro R2 puede ser una alternativa económica y eficaz para la automatización simple de pequeñas instalaciones de riego, tales como un jardín, a través de internet.

5. Agradecimientos

A la empresa AGROSOLMEN, S.L., que puso la inversión en materiales y mano de obra.

Referencias

1. Bueno-Delgado M. V., Melenchon-Ibarra A., Molina-Martinez J. M. Software application for real-time ETo/ETc calculation through mobile devices. Precisión Agriculture. 2017.
2. Bueno-Delgado M. V., Molina-Martínez J. M., Correoso-Campillo R., Pavón-Mariño P. Ecofert: An Android application for the optimization of fertilizer cost in fertigation. Computers and electronic in agriculture. 2016. 121, 32-42.
3. Molina-Martínez J.M., Jiménez M., Ruiz-Canales A., Fernández-Pacheco D. G. RaGPS: A software application for determining extraterrestrial radiation in mobile devices with GPS. Computers and Electronics in Agriculture. 2011, 78, 116-121.
4. Molina-Martínez J. M. and Ruiz-Canales A. Pocket PC software to evaluate drip irrigation lateral diameters with on-line emitters. Computers and Electronics in Agriculture. 2009, 69, 112-115.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Caracterización del porcentaje de aceitunas mal posicionadas en máquinas deshuesadoras, rodajadoras y relleno de aceitunas de mesa (DRR)

Alberto Lucas Pascual [1], Antonio Madueño Luna [2], Manuel de Jodar Lázaro[3], José Miguel Molina Martínez [4], Antonio Ruiz Canales[5], José Miguel Madueño Luna[6], Meritxell Justicia Segovia[2], Montserrat Baena Sánchez[2].

[1] Doctorando Universidad Politécnica de Cartagena; info@albertolucas.es
[2] Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos, Universidad de Sevilla.
[3] Doctorando Universidad Politécnica de Cartagena.
[4] Food Engineering and Agricultural Equipment Department, Technical University of Cartagena.
[5] Engineering Department, University Miguel Hernández of Elche, Orihuela.
[6] Dpto. Ingeniería Grafica, Universidad de Sevilla.

Resumen: Las máquinas deshuesadoras, rodajadoras y relleno de aceitunas de mesa (DRR), son máquinas rotativas empleadas para aceituna de mesa. Por su naturaleza mecánica presentan un porcentaje de error a la hora de posicionar correctamente las aceitunas a ser deshuesadas/rellenadas/rodajadas, como resultado, esas aceitunas no son aptas para consumo y tienen que ser descartadas por varias razones: Se han deshuesado por el eje menor de la aceituna formando lo que se conoce como "barco" o se han deshuesado en un eje inclinado próximo al eje principal lo que se conocen como "beatas". En el primer caso, pueden presentar en su interior el hueso entero que no ha podido ser extraído debido a la posición de la aceituna en el momento del deshuesado o de trozos del mismo. El sistema de flotación por densidad (que sigue al proceso de deshuesado), a veces no es capaz de eliminar las aceitunas con esquirlas de hueso con el problema que ello conlleva (salud alimentaria, rotura de punzones y asientos de la máquina DRR). El segundo caso, se considerarán aptas o no para su consumo en función de los criterios de calidad de la empresa. Este trabajo presenta una aplicación con QT-Creator en lenguaje C++ , OpenCV , una cámara industrial y varias modificaciones mecánicas en varias máquinas DRR, para cuantificar el porcentaje de barcos/beatas. El resultado obtenido con este sistema se ha contrastado con escandallos reales de las aceitunas deshuesadas/rellenas para cada valor angular seleccionado.

Palabras clave: Beata, barco, Visión Artificial, Qt Creator, OpenCV.

1. Introducción

Las máquinas DRR, son dispositivos mecánicos cuyo buen funcionamiento depende de un ajuste correcto de todos los elementos mecánicos que las conforman: plato de alimentación adecuado a la variedad de aceituna y su calibre, adecuado posicionamiento del plato alimentador respecto de la cadena de alimentación, correcta ubicación del cepillo, punzones y boquillas, etc. Malos ajustes en alimentador y cepillo dan lugar a la presencia de aceitunas mal posicionadas (barcos y beatas). La falta de elementos para inspeccionar estas máquinas deja en manos de la pericia de los mecánicos que las ajustan su correcto funcionamiento. Con la adición

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3410

de equipos electrónicos e informáticos es posible hacer una diagnosis de estas máquinas y con ellos tener elementos objetivos para acometer ajustes óptimos.

2. Materiales y métodos

2.1. Máquinas DRR

Se han realizado pruebas en ocho máquinas de dos fabricantes preparadas para aceitunas gordales con calibres de 140/150 a 70/80 [1, 2, 3, 4].

- Maq 1, 2, 5 y 6: Sadrym de cola corta modelo 130. Cadena de 3/4".
- Maq 3: Cleser. Modelo 220. Cadena de 1".
- Maq 4, 7 y 8: Sadrym de cola larga modelo 114. Cadena de 3/4".

2.2. Equipo de visión artificial

El equipo de visión artificial empleado consta de una cámara del fabricante Imaging Source modelo DFK 33GV024 y sistema de iluminación Led y un sensor magnético que permite la sincronización con el movimiento de la máquina y con ello el análisis del contenido de cada cangilón de la cadena de alimentación [5]. En la Figura 1 hay un dibujo esquemático.

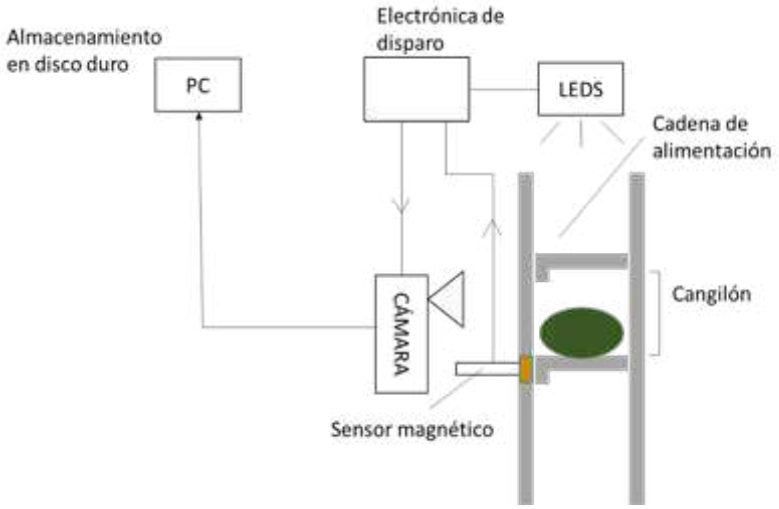


Figura 1. Esquema de los distintos dispositivos usados.

2.3. Software de visión artificial

Se ha preparado un aplicación en Qt/OpenCV [6, 7], que permite analizar el contenido presente en cada cangilón de la cadena (cangilón vacío, aceituna bien posicionada, barcos beatas, trozos de aceituna, múltiples aceitunas), generándose un log cada 1000 aceitunas con los valores de cada clase obtenidos. Asimismo permite seleccionar el ángulo a partir del cual se considera que la aceituna está mal posicionada (barco/beata). En la Figura 2 aparece una captura de pantalla de la aplicación. El origen de ángulos se ubica en la vertical de la imagen como se muestra en la Figura 3.

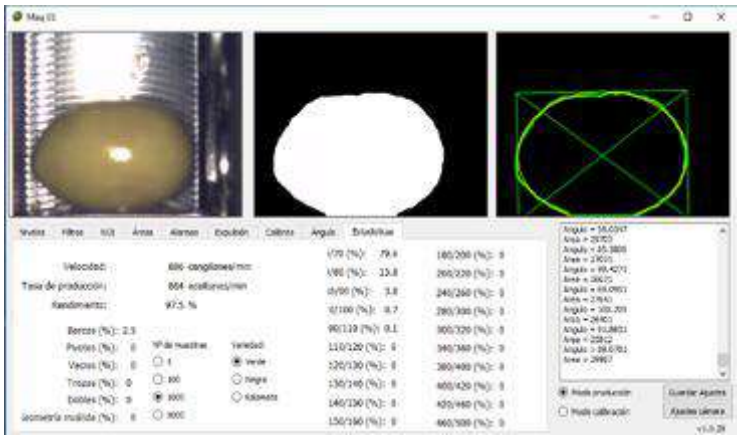


Figura 2. Captura de la aplicación realizada en Qt Creator.

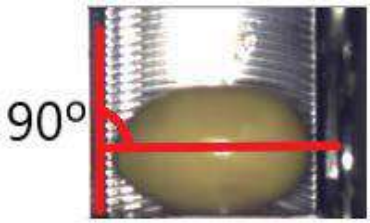


Figura 3. Origen de ángulos.

2.4 Forma de realización de los ensayos

Para conseguir grupos de 1000 aceitunas, la aplicación actúa sobre el variador de la máquina y la hace parar cada vez que cuenta grupos de 1000 aceitunas. Estas aceitunas se interceptan para que no vayan a la línea de procesado siendo extraídas de la misma para la cata manual que permitirá contrastar los resultados del escandallo con los que arroja la aplicación.

3. Resultados y discusión

3.1. Efecto del ángulo seleccionado

Se ha analizado el porcentaje de aceitunas consideradas como mal posicionadas para contrastar con los resultados de catas reales de aceitunas obtenidas a la salida de la máquina DRR.

Se ha realizado para cada máquina en estudio para un mismo calibre de aceituna variando el ángulo desde 10º/170º a 80º/100º. No se estudian los intervalos 0º/180º y 90º/90º ya que respectivamente no consideraría ninguna aceituna como "barco" o las consideraría todas.

En la Figura 4 se muestra a título de ejemplo los barcos acumulados sugeridos por la aplicación para la máquina 1 con calibre 140/150 con muestreos acumulados en 8 intervalos angulares (de 10/170 a 80/100) y (5, 5, 5, 5, 5, 6, 5, 5) repeticiones respectivamente cada una de 1000 aceitunas.

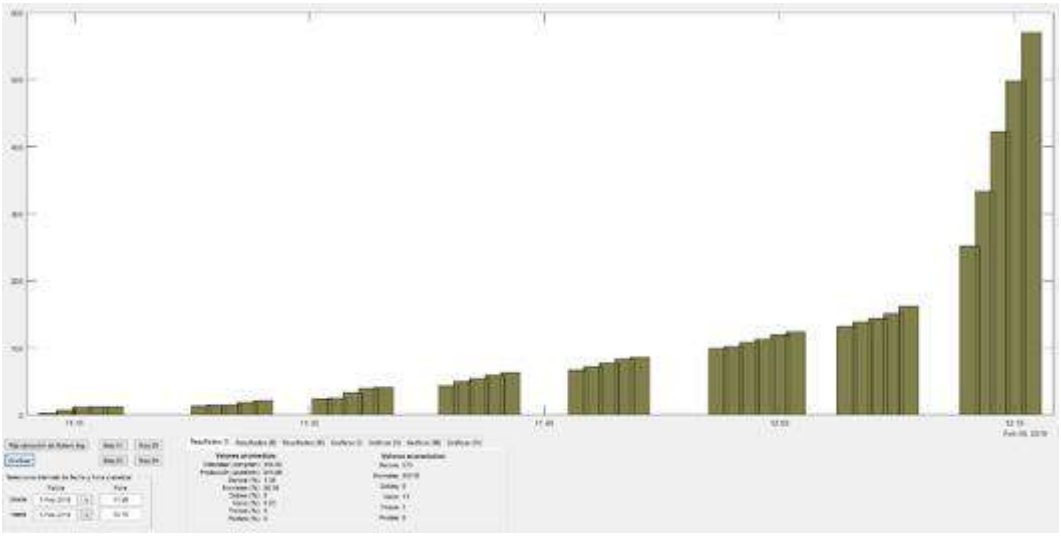


Figura 4. Barcos acumulados para la máquina 1 con calibre 140/15, 8 intervalos angulares (de 10/170 a 80/100) y (5, 5, 5, 5, 5, 6, 5, 5) repeticiones respectivamente cada una de 1000 aceitunas.

En la Figura 5, aparecen los valores promedio de las 8 catas obtenidos de los datos anteriores de la Figura 4 para cada ángulo en la máquina 1 con calibre 140/150.

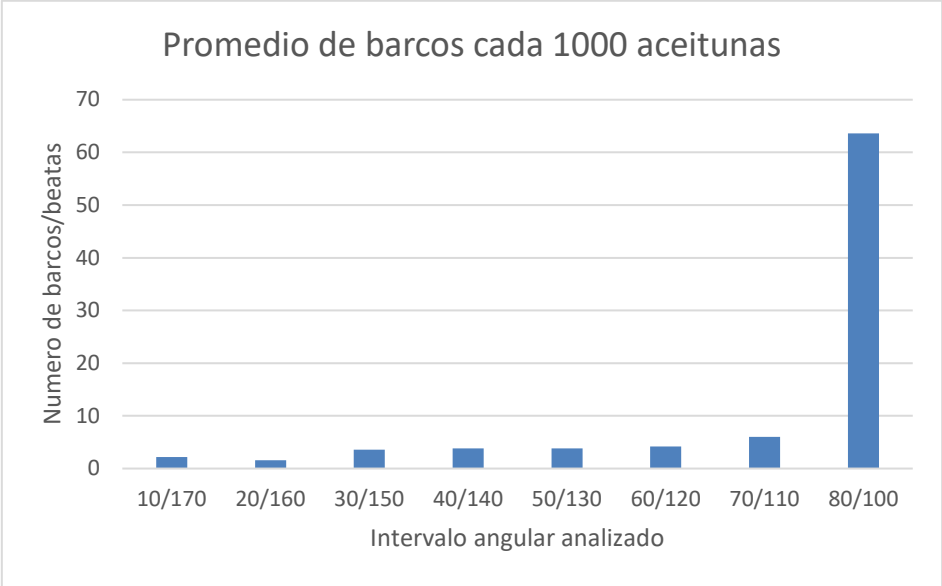


Figura 5. Cantidad de barcos obtenidos por cada 1000 aceitunas según el intervalo angular analizado.

El contraste con los escandallos realizados cada 1000 aceitunas muestran experimentalmente que el porcentaje de barcos obtenido es acorde con el intervalo angular 30º/150º. Por su parte para caracterizar el porcentaje de aceitunas beatas es preferible un intervalo angular más ancho el 40º/140º.

En la tabla 1 se muestran los resultados de valores medios de barcos para las ocho máquinas analizadas.

Tabla 1. Resultados de valores medios de número de barcos obtenidos para las ocho máquinas analizadas. Por ejemplo: 2,2/5 significa 2,2 aceitunas de media en barco sobre 5x1000 siendo 5 es el número de repeticiones de 1000 aceitunas para ese valor angular.

Ángulo	Maq 1	Maq 2	Maq 3	Maq 4	Maq 5	Maq 6	Maq 7	Maq 8
10/170	2,2/5	2/5	6,25/4	3,75/4	9/4	11/3	8/5	9,6/5
20/160	1,6/5	3,2/5	10,25/4	11,75/4	11,6/5	14,16/6	18,2/5	17,4/5
30/150	**3,6/5**	**7/5**	**14,25/4**	**11,75/4**	**12,8/5**	**19,16/6**	**20,8/5**	**25,2/5**
40/140	**3,8/5**	**8,8/5**	**18/4**	**11,75/4**	**19,5/4**	**18,66/6**	**25,2/5**	**33,4/5**
50/130	3,8/5	13,8/5	16,75/4	15,8/5	19,75/4	22,5/6	17,75/4	27,6/3
60/120	4,16/6	18/4	25/4	18/4	25,8/5	38/5	35,2/5	43,4/5
70/110	6/5	60/5	35,25/4	76,75/4	51,5/4	39,5/5	86,6/5	77,4/5
80/100	63,6/5	245,4/5	166,75/4	322,2/5	176/4	143,75/4	310,4/5	263,1/8

Tabla 2. Resultados de los escandallos (número de defectos sobre 1000 aceitunas promedio)

Escandallo	Maq 1	Maq 2	Maq 3	Maq 4	Maq 5	Maq 6	Maq 7	Maq 8
Barcos	3,5	7,2	16,1	12,1	11,9	19,5	21,3	26,3
Beatas	3,7	9,1	17,4	113,2	18,6	20,8	27,1	31,2

Con aperturas muy cerradas (10/170), la aplicación sólo considera (barcos/beatas) las aceitunas que son muy verticales y descarta el resto, por ejemplo 2,2 aceitunas sobre 1000 en la máquina 1, en esta situación da por buenas gran parte de las aceitunas que luego serán deshuesadas en posición incorrecta. Asimismo en el caso contrario de una gran apertura (80/100), por ejemplo 63,6 aceitunas sobre 1000 en la máquina 1, la aplicación considera una cantidad de aceitunas mal posicionadas superior al real que se obtiene en el escandallo.

Los valores que se presentan en la tabla 2 para ambos defectos sugieren empíricamente una buena adecuación a los intervalos 30/150 y 40/140 presentados por la aplicación (tabla 1).

Es interesante advertir, que tras el paso por la zona de visión sigue un trozo de cepillo que comprime la aceituna en el proceso de punzonado, su efecto debe ser tenido en cuenta, dado que una reentrada forzada de las aceitunas en el mismo (un mal ajuste), puede dar lugar a movimientos de las aceitunas (desaparición de un barco detectado o pequeños cambios de posición lo que afecta a la generación de beatas), en consecuencia, la correlación que se aprecia entre escandallo y aplicación es sensible al ajuste correcto del trozo de cepillo final y en especial en el caso de beatas.

3.2. Efecto de la calibración de la máquina para el mismo tipo de máquina, mismo día y alimentadas con la misma aceituna

Con este ensayo se ve el efecto de la calibración de la máquina DRR sobre el porcentaje de fallos (barcos + beatas). Para ello se han realizado pruebas sobre las máquinas 1 y 2 con todos los parámetros idénticos (iguales aceitunas deshuesadas simultáneamente), variando sólo la calibración de la máquina para ese día. Se han sumado los defectos que considera la máquina para ángulos de 30/150 y de 40/140. No se ha realizado un escandallo de contraste porque se dan por validados los valores empíricos de intervalos angulares óptimos (30/150 y de 40/140), para observar defectos del apartado 2.1 Las diferencias por tanto solo se deben al desigual ajuste entre máquinas y desgastes diferenciales adquiridos durante su vida útil. Las Figuras 6 y

7 muestran los resultados de fallos obtenidos expresados en % (de barcos + beatas), obtenidos para calibre 120/130 en ambas máquinas.

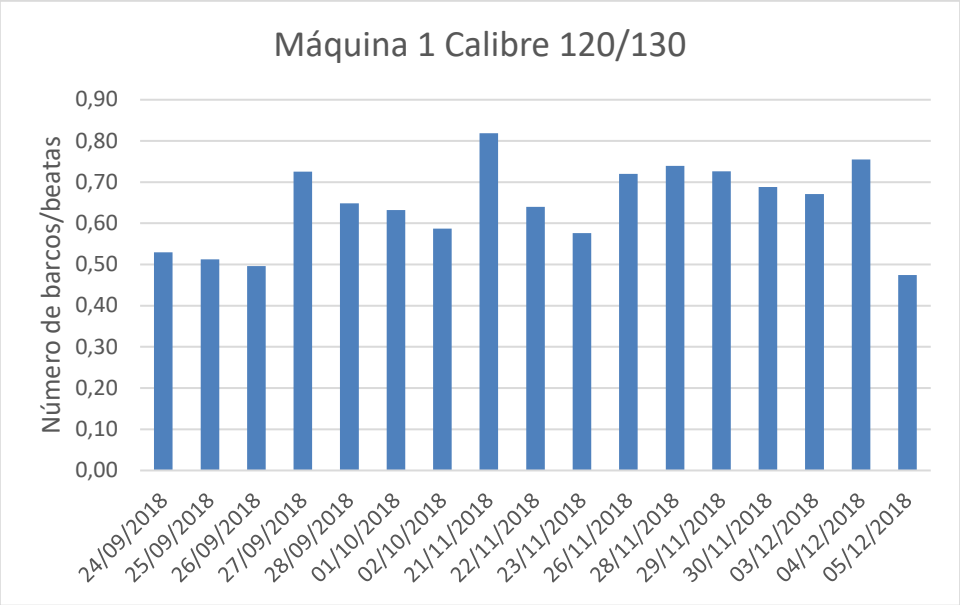


Figura 6. Porcentaje de barcos obtenidos en la maquina 1 para el calibre 120/130

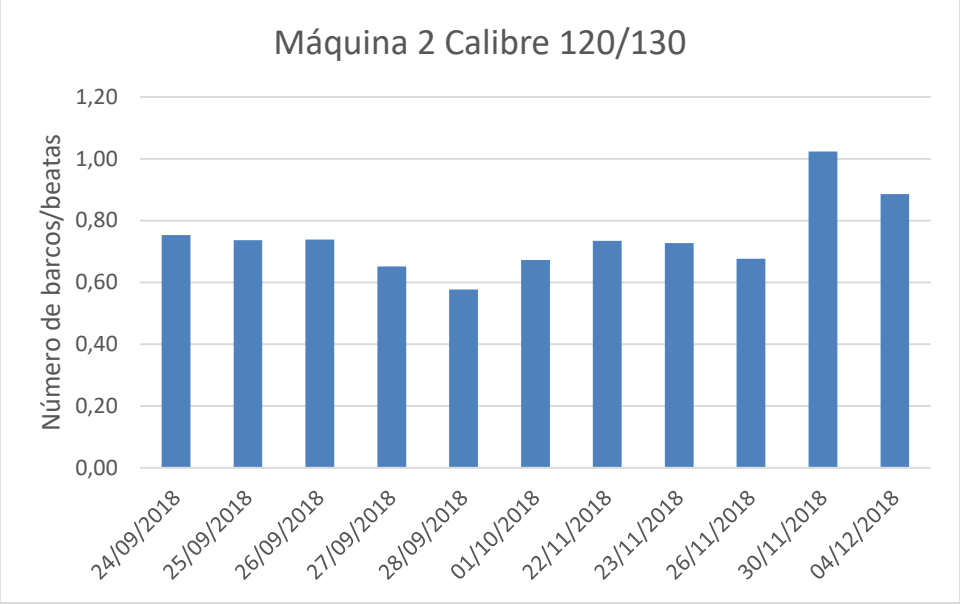


Figura 7. Porcentaje de barcos obtenidos en la maquina 2 para el calibre 120/130

En la Figura 8 se observan las diferencias con signo entre los fallos obtenidos expresados en % (de barcos/beatas), obtenidos para calibre 120/130 desde el 24 de septiembre de 2018 al 4 de diciembre de 2018 entre ambas máquinas.

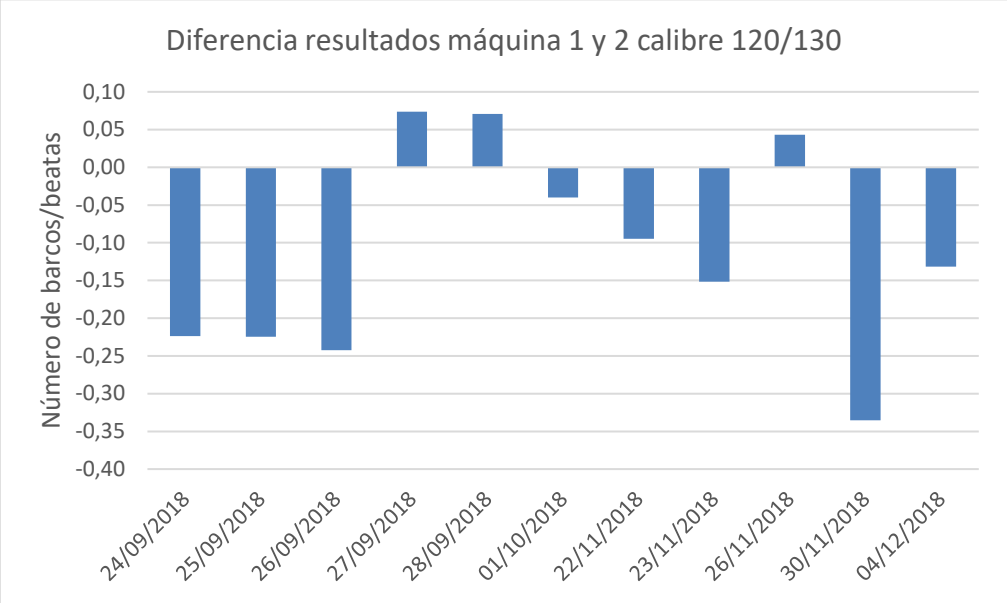


Figura 8. Diferencia de porcentaje de barcos obtenidos entre maquinas 1 y 2 para calibre 120/130

3.3. Otros efectos del desajuste: Dobles, trozo y vacíos…

Cuando el plato distribuidor y la estrella no están bien ajustados, la entrada de aceitunas a la cadena de alimentación sucede de forma irregular de manera que muchos cangilones están vacíos (Figura 9), presentan aceitunas dobles (Figura 10), o aceitunas con trozos (Figura 11), en este último caso por rotura de las aceitunas a la entrada de la cadena de alimentación. La situación es nefasta ya que impide el correcto deshuesado generando daños especialmente en las camas de asiento de goma sobre las que se apoyan las aceitunas al ser punzonadas o en los propios punzones que se partes y finalmente en una merma de calidad al incrementarse el % de aceitunas rotas a la salida de la máquina DRR.



Figura 9. Imagen de un cangilón vacío

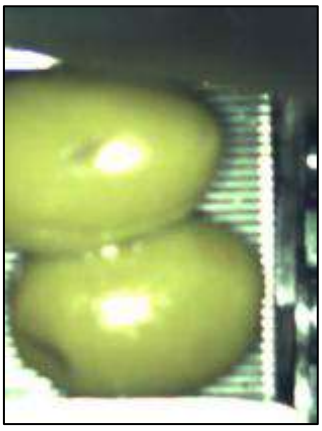


Figura 10. Imagen de un cangilón con aceitunas dobles

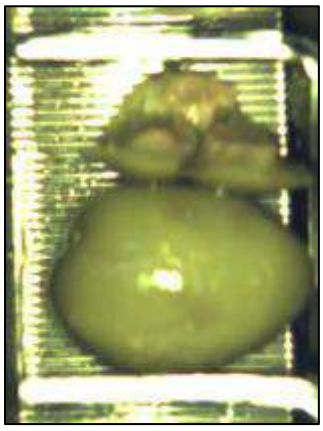


Figura 11. Imagen de un cangilón que presenta una aceituna y un trozo

Las pruebas experimentales llevadas a cabo con la aplicación (que permite clasificar además de los defectos, el caso de cangilón vacío, o la presencia de varias aceitunas o trozos en el mismo), arrojan cifras de hasta un 15% en vacíos y otro tanto en dobles/con trozos, lo que significan mermas de producción de hasta un 30% con máquinas desajustadas.

4. Conclusiones

Se ha diseñado un equipo basado en visión artificial capaz de caracterizar el contenido de cada cangilón de la cadena de alimentación de una máquina DRR modificada mecánicamente. Para la sincronización con la máquina se usa un sensor magnético que detecta el paso de cada eslabón de la cadena de alimentación y un software basado en Qt/OpenCV que analiza y clasifica cada imagen (vacío, normal barco, beata, doble o trozo).

Los resultados empíricos de los escandallos sugieren que es aconsejable el uso de intervalos de ángulo 30º/150º para detectar barcos y de un intervalo más laxo 40º/140º para la detección de beatas.

Además, se ha averiguado que los desajustes en las máquinas pueden dar lugar a diferencias (barcos/beatas) entre las mismas máquinas superiores al 0.15% en los fallos generados durante el deshuesado.

Por lo tanto, los errores en el alineamiento del plato alimentador y la estrella pueden dar lugar a mermas de hasta el 30% en la producción.

Por último, mediante el sistema de visión artificial propuesto es muy fácil realizar el alineamiento preciso de la máquina DRR y con ello reducir las mermas de producción por desajustes en la máquina así como daños en camas y punzones.

Referencias

1. Fernández-Cano, Sebastián. 2012. PFC Mejora de las líneas de deshuesado de una envasadora de aceitunas escuela técnica superior de ingeniería (ICAI).
2. Madueño Luna Antonio, López Lineros Miriam, Madueño Luna, José Miguel.2013. Procedimiento basado en un sensor de sincronismo para la detección de fallos de funcionamiento en máquinas deshuesadoras/rodajadoras de aceituna y de relleno, cuantificación y optimización del rendimiento, señalización, monitorización y control remoto. Patente de invención, Propiedad industrial.
3. Santos Siles, F.J. (1999) "Las nuevas tecnologías aplicadas al sector de la aceituna manzanilla fina". Grasas y Aceites, 50-2, 131-140.
4. Ser González, Clemente del.1987. Método para deshuesar y deshuesar-rellenar aceitunas dispositivo para su puesta en práctica y producto obtenido con el mismo número de publicación: ES2000150 A6
5. Da-Wen Sun, 2008. Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation.
6. Nagata and Qixin (1998). Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation.
7. R. Diaz, 2004. Classification and Quality Evaluation of Table Olives.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Detección de características de cultivo a través de sensores ópticos en un sistema orgánico de tipo *strip-cropping*

A.M. Krus[1], D.F. van Apeldoorn[2], J.J. Ramirez[1], C. Valero[1]

[1] Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España; a.m.krus@upm.es
[2] Wageningen University & Research, Wageningen, Países Bajos

Resumen: Hay un mercado creciente para la agricultura orgánica. Sin embargo, la falta de atención a la biodiversidad y la fertilidad del suelo de las prácticas actuales es un tema urgente. En este contexto, el proyecto SUREVEG analiza el cultivo en franjas en la producción orgánica y su implementación en cultivos intensivos para mejorar la fertilidad del suelo y la biodiversidad en toda Europa. Para contrarrestar la mano de obra adicional de un sistema de cultivos múltiples, se propone una herramienta robótica. Dentro del marco del proyecto, se producirá una versión modular de prueba de concepto (POC) que combinará tecnologías de detección con la actuación en forma de un brazo robótico. Este sistema POC se centrará en las necesidades de fertilización, que se identificarán en tiempo real y se aplicarán en una sola planta. Este artículo se centra en la captación de las características del cultivo mediante nubes de puntos obtenidas con dos lidares y en su procesamiento. La segregación en suelo y plantas fue lograda con éxito aplicando funciones de peso, encontrando el valor clave de una manera dinámica por ensayo. Seccionando las nubes de plantas adyacentes mediante el límite nominal se pudo contar las cantidades y así indirectamente los rendimientos esperados por fila.

Palabras clave: lidar; coles; extracción de plantas; función de peso

1. Introducción

Tras la modernización de maquinaria agrícola y con ello el desarrollo de las prácticas agrícolas, en las últimas décadas el enfoque se ha centrado sólo en la productividad, perdiendo así la atención al equilibrio natural del medioambiente. Afortunadamente, hoy en día la demanda de productos orgánicos está creciendo, aumentando la cantidad de agricultura orgánica que se practica [1]. En Europa específicamente, el crecimiento en la demanda junto con unas iniciativas legislativas han aumentado la superficie de cultivo ecológico en los últimos años [2]. La agricultura ecológica optimiza los nutrientes en el suelo y beneficia la biodiversidad, mientras reduce la contaminación de agua, entre otras cosas [3]. El proyecto SUREVEG [4] se enfoca por un lado en los efectos de la agricultura orgánica al suelo, y por otro los efectos de diferentes estrategias de fertilización, aplicándolo por toda Europa. En dicho proyecto la agricultura orgánica está combinada con el cultivo en franjas, también conocido como *strip-cropping*, *mixed-cropping* o *inter-cropping*, el cual también persigue un aumento de la biodiversidad [5], una mejora en el suelo, y una disminución en el uso de los recursos naturales [6,7]. Asimismo, el cultivo en franjas conlleva un aumento del rendimiento productivo [8]. Sin embargo, el aumento en complejidad de su gestión demanda el desarrollo de soluciones nuevas para facilitar el cambio en las prácticas de cultivo.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3293

Últimamente los desarrollos en la robótica en todo el mundo se han aplicado a una amplia gama de situaciones, incluyendo la agricultura [9]. Las máquinas agrícolas de hoy en día son cada vez más avanzadas y las primeras máquinas autónomas (robots) ya han entrado en el mercado comercial [10,11]. Para reducir la compresión del suelo, uno de los tipos de automatización se centra en actuación y detección suspendida de un sistema de pórtico [12], como se recoge entre los objetivos del proyecto SUREVEG. En todo caso, para automatizar cualquier proceso, primero se necesita percibir la situación actual de la aplicación, lo cual en la agricultura se puede referir tanto al estado de las plantas como al suelo o cualquier otro parámetro de interés. Como se resume en [13,14] hay muchas maneras de realizar la detección visual. En este trabajo se emplearon unos sensores de tipo lidar, de manera análoga a trabajos previos [15–17] entre otros. En los datos 3D obtenidos por dos lidares montados en un tractor, las plantas fueron aisladas con el objetivo de calcular sus volúmenes reales de una manera automática. Así, la gestión y las aplicaciones agrícolas (p.ej. fertilización, riego, pulverización, etc.) podrán ser ajustadas al nivel de una planta individual. El desarrollo de estos sistemas automáticos de fácil uso reducirá el umbral tecnológico para que los agricultores puedan adoptar un sistema orgánico de cultivos múltiples.

2. Materiales y métodos

2.1. Situación de las parcelas

Los cultivos experimentales con sistema orgánico de tipo *strip-cropping* están ubicados en los campos de Wageningen University & Research en los Países Bajos. Los datos para este artículo se tomaron en el verano de 2018 sobre franjas de coles de una sola variedad (*Brassica oleracea* var. *capitata* de tipo 'Rivera'). De las 12 franjas consideradas, 8 se encontraban en campos de tipo *strip-cropping* (franjas alternas de coles y de trigo), mientras las demás fueron medidas sobre franjas en campos de monocultivo. Una franja consiste en 4 líneas de coles, y tiene una anchura de 3 metros. En la Tabla 1 se especifica la línea de tiempo de los campos, referida al día del trasplante de las coles. Con respecto a las 9 etapas estándar de crecimiento estipuladas en [18] la mayoría de las plantas estaba en la etapa 6. En el año 2018 las condiciones meteorológicas fueron excepcionales por lo cual el desarrollo de los cultivos fue muy heterogéneo. Por casualidad las medidas coincidieron con un periodo de sequía anormal para la región y el desarrollo de las coles al final de la temporada fue tan heterogéneo que se decidió posponer la cosecha de la mitad de los cultivos unas semanas más. A pesar de las circunstancias climáticas desafortunadas, el desarrollo de las rutinas presentadas en este artículo no se vio afectado.

Tabla 1. Línea de tiempo de los campos medidos, indicando los Days After Transplant (DAT).

Actividad	Fecha	DAT
Trasplantar	14/06/2018	0
Medidas	15/08/2018	62
Cosecha 1	01/11/2018	140
Cosecha 2	27/11/2018	166

2.2. Hardware

El tipo de sensor óptico utilizado es un lidar LMS10x de la compañía SICK AG. Los dos sensores fijaron sobre una estructura de soporte que está montada en un enganche a tres puntos en el frente de un tractor, como ilustra la Figura 1. Las ruedas del tractor ocupan el espacio entre las líneas extremas de cultivos, es decir el tractor va por encima de las dos líneas centrales solo. Usando el sistema de GPS y la auto-conducción disponible, el tractor se movió con una velocidad

continua de 2 km/h. Los datos de los lidares fueron grabados con el software de SICK en un ordenador portátil a bordo.

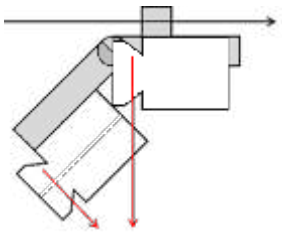


Figura 1. Representación esquemática de la configuración de los dos lidares. La flecha negra es la dirección de movimiento del tractor, los partes grises la estructura de soporte, las figuras blancas son los láseres y con rojo está indicado la dirección central de los barridos.

2.3. Combinación de datos de los lidares

Como en estudios previos [15,19] se eligieron las siguientes inclinaciones para cada uno de los dos lidares empleados: vertical e inclinado 45 grados hacia el frente. Ambos dispositivos fueron fijados en un soporte metálico, por lo cual las nubes de puntos obtenidos por cada lidar tienen una traslación entre ellas que es constante para todas las franjas medidas. La traslación exacta fue deducida de las nubes mismas iterativamente y ello permitió combinar ambas nubes con el objetivo de disponer de una visión más completa de las plantas.

2.4. Identificación de suelo

Para identificar qué puntos pertenecen al suelo y cuáles forman parte de los cultivos, fue calculada una función de peso para cada uno de los puntos. Una función de peso, también conocida como función de coste o función de pérdidas, se puede definir de cualquier forma que delimite las características de mayor interés y es utilizada en muchas áreas de conocimiento en aplicaciones muy distintas. Así, el valor de la función utilizado en este trabajo depende de la altura y cercanía de todos los puntos, registrados por cualquier sensor, que se encuentren en un radio de 150 mm. Cuantos más puntos haya, cuanto más alto estén, y cuanto más cerca se encuentren, mayor será el valor final de un punto en específico. Este criterio se resume en la ecuación Ec. 1, en la cual J_k se refiere al valor de la función de pesos J calculado para el punto k, el índice i describe cada uno de todos los puntos N que haya en el radio mencionado, h se refiere a la altura absoluta, y d a la distancia relativa entre el punto considerado k y el punto en que esté el índice i. Al final, el valor de la función se obtiene por la suma de todos los valores contribuidos por los N puntos dentro del radio.

$$J_k = \sum_{i=1}^{N} \frac{h_i^2}{d_{ik}} \qquad \textbf{Ec. 1}$$

Por consiguiente, clasificando los valores J en orden ascendente (J_s) los puntos que pertenecen al suelo demuestran un incremento aproximadamente lineal, mientras los puntos que pertenecen a los cultivos tienen valores más altos, rompiendo la tendencia. Dicha tendencia lineal L se puede encontrar usando dos valores bajos, y así substraer la tendencia L de los valores J_s. Como resultado, los valores alrededor de 0 indican los puntos del suelo, mientras los más altos denotan los puntos de los cultivos. Aquí, el valor cogido como umbral, que define qué valores J cuentan como casi 0 y cuáles como valores altos, es bastante conservativo y fue encontrado empíricamente mirando los datos de todos los 12 campos. Mantener el umbral fijo para todos los conjuntos de datos permite encontrar un límite en J que depende de los datos del campo mismo, aun teniendo un requisito universal. Con el valor J en que la brecha restante suba el umbral fijo se define el valor de peso límite entre suelo y plantas. El cálculo de este valor de corte c está

resumido en la ecuación Ec. 2, en que el subíndice s denota que los valores de J fueron ordenados y el subíndice $[0.05; 0.2]$ se refiere a los percentiles empleados para estudiar la tendencia L. Todos los puntos que cumplan este requisito forman el conjunto m, del que el valor más bajo define el valor de corte c. El umbral empleado al final era un valor de resultante de 50 000.

$$c = \min\{J_m\}, \qquad \left\{m \in \left(J_s(m) - L_{[0.05;0.2]}(m)\right) > 50\,000\right\} \qquad \textbf{Ec. 2}$$

De esta manera la clasificación funciona tanto en los campos en que apenas se ve el suelo como en los campos en que hay pocas plantas.

2.5. Agrupación de puntos de plantas

Las nubes de puntos de plantas son agrupadas por la distancia entre los puntos mismos. En otras palabras, si la distancia absoluta entre dos puntos es menor que 75 mm pertenecen al mismo grupo (misma planta previsiblemente). En las líneas de cultivo en que hubo más marras (huecos sin planta) las plantas no se tocan, por lo que este criterio de agrupación ya es suficiente. Sin embargo, en algunos casos es necesario deducir dónde cortar un grupo. Para identificar en qué grupos es necesario, se superponen las distancias de siembra y la ubicación exacta de las líneas encima de los grupos de plantas, agrupado solo por la distancia de 75 mm. Cada grupo que cubra más que un punto de siembra pasa otra vez por la segmentación con la distancia mínima reducida a la mitad. Los grupos que todavía cubran múltiples puntos de siembra son cortados por la línea en la mitad entre los puntos de siembra.

3. Resultados y discusión

3.1. Regularidad de medidas

Los sensores lidar llevan un contador de barridos realizados que está incluido en los datos registrados. Tras experimentos con algunos métodos de grabación, el registro final fue realizado con el software propio del fabricante. Sin embargo, siempre hay perdidas de datos y el grado de grabación obtenido en estos registros está listado en la Tabla 1. El porcentaje fue bastante constante con un promedio de 89% en el lidar 1 versus un 87% en el lidar 2. La causa de esta diferencia no ha sido investigada.

Tabla 2. Porcentajes de barridos láser registrado por los dos lidar

Pasada	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Lidar 1	88.0	89.3	89.8	89.3	88.1	90.1	88.2	88.9	89.8	89.0	89.1	89.3
Lidar 2	86.6	88.7	89.0	88.3	86.0	85.9	87.8	86.8	88.0	87.4	87.1	87.6

3.2. Precisión de la nube de puntos

La velocidad de avance fija de 2 km/h y la frecuencia de medidas de 50 Hz resulta en una precisión teórica de 1.11 cm en la dirección de conducción. La altura de más o menos 1 metro por encima del suelo y la precisión de medio grado de giro del láser resultan en una precisión teórica de 0.9 cm lateral para el lidar mirando hacia abajo. El lidar inclinado 45° tiene una precisión de alrededor de 14 cm, aunque los huecos en las líneas de siembra no fueron registrados en la precisión máxima. Un ejemplo de la precisión de las nubes se muestra en la Figura 2. Por último, los puntos más altos están más cerca al sensor por definición y tienen, en consecuencia, una precisión más alta. La traslación para fusionar las nubes fue deducida empíricamente y las nubes finales fueron centradas para que la línea del lateral $y = 0$ se encuentre entre las dos filas centrales.

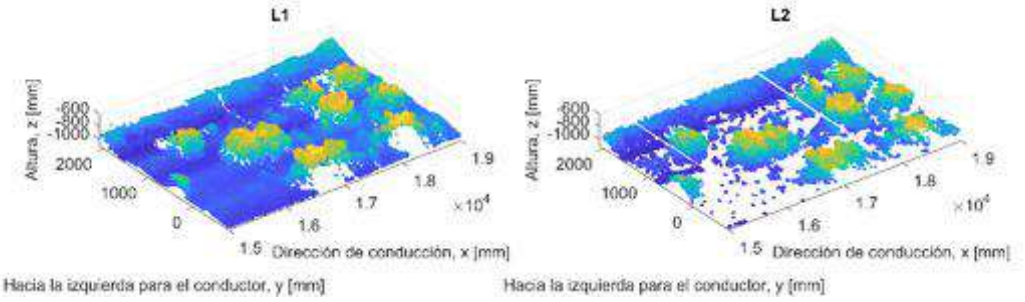


Figura 2. Ejemplo de la precisión de las nubes obtenidas por el lidar vertical (izquierda) versus el lidar inclinado (derecha).

3.3. Valores de la función de peso

Como ya se ha descrito en Ec. 1, cada punto de la nube fusionada está sujeto a la evaluación de la función de peso, para así poder separar el suelo de las plantas, en la que uno es estimado por un ajuste lineal y las otras se componen de los valores que resultan por encima de la tendencia. En las siguientes figuras, Figura 3 y Figura 4, se ilustra el método con los datos de la pasada 1. El valor J de todos los puntos fue calculado y poniéndolos en orden ascendente se obtiene la línea azul de la Figura 3. De los aproximadamente $3.2 \cdot 10^5$ puntos totales, los dos valores en los percentiles 0.05 y 0.2 corresponden a los elementos $0.16 \cdot 10^5$ y $0.64 \cdot 10^5$; estos dos elementos de dicha línea azul son utilizados para formar la base del ajuste lineal L, pintado en rojo. La diferencia entre estas dos líneas, i.e. $(J - L)$, está mostrado en verde en el gráfico de abajo. El umbral conservativo aplicado igual en todas las medidas está indicado con la línea negra (horizontal). El índice de la lista ordenada de los valores J en que coinciden las líneas verde y negro se utilizó para encontrar el valor de J que corresponda, indicado con la línea de corte (vertical). En otras palabras, el valor que tiene la línea azul donde coincida con la línea de corte vertical es el límite para separar la nube de puntos de toda la pasada; los valores encima del límite forman las plantas, mientras los de abajo pertenecen al suelo. En la Figura 4 las alturas presentes en toda la nube se han agrupado en un histograma (azul). Los puntos del suelo están indicados en rojo y los de las plantas en verde. En conclusión, el resultado de la segregación mediante la ecuación de peso es mejor que sólo coger las alturas de los puntos.

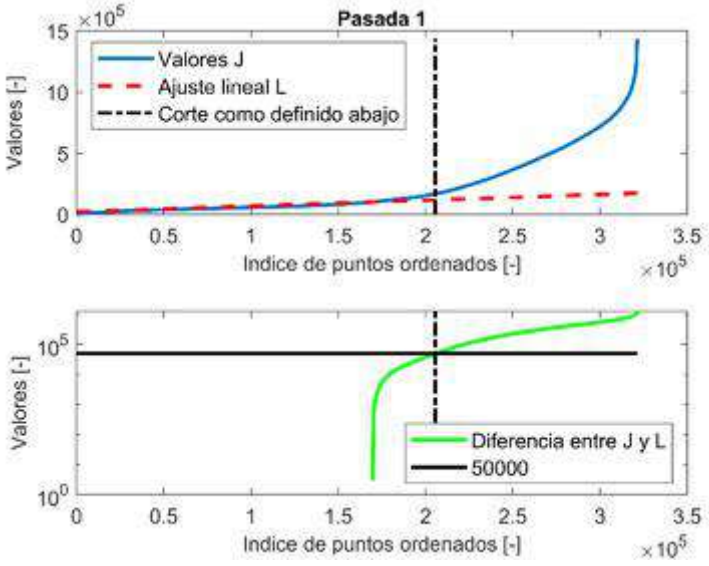


Figura 3. Visualización del proceso de la ecuación Ec. 1.

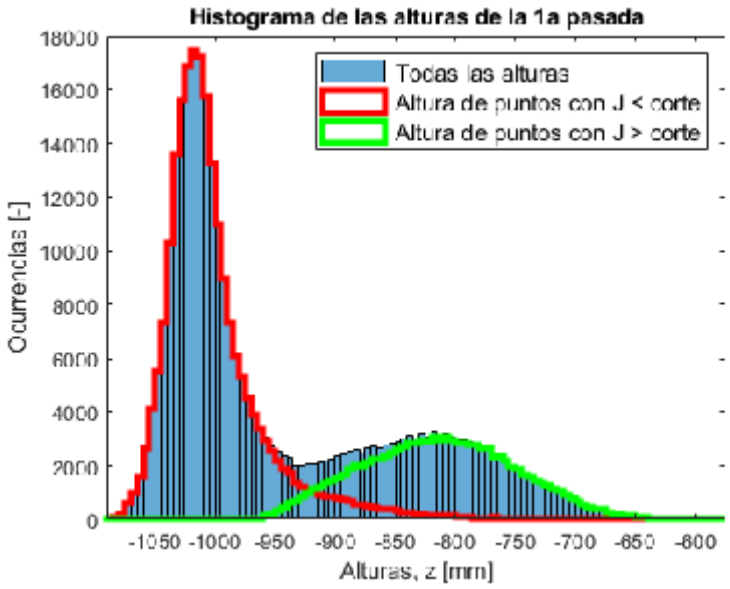


Figura 4. Las alturas presentes en toda la nube de puntos, distinguiendo los puntos del suelo en rojo de los puntos de las plantas en verde.

3.4. Agrupación

En principio, las nubes de puntos de plantas son agrupadas por distancia. En segundo lugar, las ubicaciones teóricas de siembra forman una rejilla superpuesta; cada grupo que toca más de solo un punto medio de los segmentos, i.e. más que un punto de siembra, se seccionó en varios grupos aplicando dicha rejilla. Las filas extremas han sido ignoradas por no tener una cantidad de puntos de medida sustancial por efectos de perspectiva desde la línea de movimiento de los sensores por encima de las filas centrales. Como se puede ver en la Figura 5, en algunos casos los resultados fueron mejores que en otros. Las coles identificadas con número 40 y 41 por ejemplo parecen ser cortadas de forma satisfactoria, mientras la col siguiente está dividida en dos partes, es decir en el grupo 44 y el grupo 45. Por irregularidades de siembra, de crecimiento, o de desarrollo ninguna rejilla preestablecida (siembra teórica) coincide con las coles perfectamente. De momento la división en grupos no ha sido investigada más.

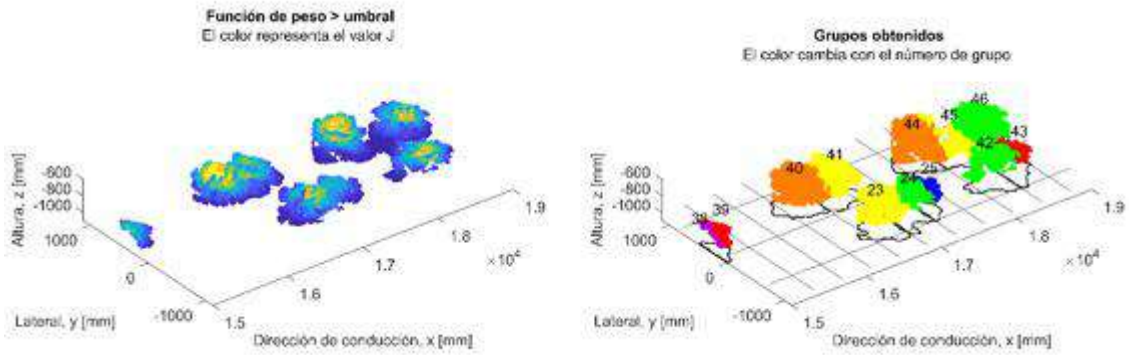


Figura 5. A la izquierda todos los puntos que fueron identificados como coles, a la derecha los grupos obtenidos con el método como descrito. Ojo que el ejemplo cubre la misma zona que en la Figura 2, aunque la fila extrema fue ignorada por no tener la precisión suficiente.

3.5. Correlación con cosecha

En la Tabla 1 ya fue mencionado que pasó mucho tiempo entre las medidas aquí presentadas y la cosecha misma. Desafortunadamente las medidas coincidieron con una sequía excepcional y el desarrollo de las coles ha sufrido por ello, así que el rendimiento productivo final (cosecha de las coles) se refiere a un momento muy posterior a las medidas con lidar. Se han realizado modelizaciones relacionando los pesos cosechados con los volúmenes estimados por los sensores ópticos, pero los resultados distan de ser óptimos.

Sin embargo, las imágenes hechas con drones en la misma semana pueden servir para confirmar los resultados. En la Figura 6 se incluye el mosaico del drone, sin y con la nube de puntos de las plantas de esa pasada. Aunque la resolución deja mucho que desear, sí que se muestra claramente la captura satisfactoria de las filas centrales con los láseres.

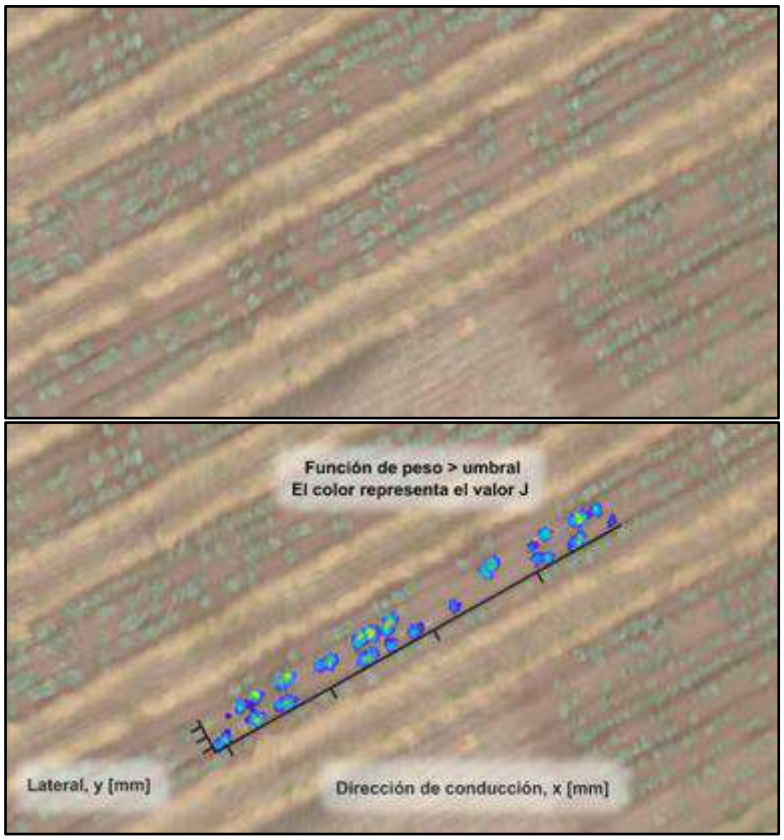


Figura 6. El mosaico del drone (arriba), superpuesto con el resultado del análisis (abajo).

4. Conclusiones

Dos sensores lidar montados en un tractor con guiado automático forman un sistema fácil y rápido de obtener un modelo 3D del estado de los cultivos. La inclinación del segundo sensor añade información al modelo y aumenta la precisión total, aunque la inclinación misma aumenta la distancia entre sensor y objetivo también. Para capturar la altura del suelo el láser vertical es crucial. Por efectos de perspectiva, las plantas más descentradas solo fueron capturadas desde el lado, así que el modelo tiene una calidad mucho más alta en las filas centrales. Una velocidad fija de 2 km/h, una frecuencia de medidas de 50 Hz, y una altura del sensor de aproximadamente un metro resulta en un modelo con una resolución por encima de 1 cm. Para distinguir los puntos de las plantas de los del suelo, la función de pesos desarrollada da buenos resultados, excluyendo las puntas sueltas aunque sean altas mientras sí incluye los puntos bajos de las plantas mismas.

Comparaciones con imágenes de drones de la misma semana confirman el reconocimiento de las plantas en las filas centrales. Un intento de agrupación resultó difícil en las plantas que traslapan. La agrupación en combinación con una temporada de tiempo imprevisto da como resultado que no hay correlación entre las cantidades de plantas encontradas y recogidas, por eso no fueron incluidos en este artículo.

Se recomienda repetir las medidas justo antes de la cosecha para verificar los métodos de agrupación, los cuales dejan margen para investigación adicional, por ejemplo usando los máximos locales de la función de peso. El siguiente paso sería calcular los volúmenes de las plantas individuales encontradas por la agrupación, para así poder deducir la etapa estándar de crecimiento en que estén.

5. Agradecimientos

Se agradece a la Universidad de Wageningen la estancia de Anne Krus y por ofrecernos sus campos de ensayos y sus equipos para medir. En especial, se agradece a P.H. van der Zee por su colaboración en la recopilación de datos y la construcción del enganche para el tractor.

Esta investigación ha sido posible gracias a la financiación del proyecto europeo "Sureveg: Strip-cropping and recycling for biodiverse and resource-efficient intensive vegetable production", perteneciente a la acción ERA-net CORE Organic Cofund: http://projects.au.dk/coreorganiccofund/

Referencias

1. Golijan, J. & Popoviš, A., Basic characteristics of the organic agriculture market. Competitiveness of Agro-Food and Environmental Economy. 2016. (p: 239–248).
2. Willer, H., Meredith, S., Moeskops, B. & Busacca, E., Organic in Europe: Prospects and Developments. 2018. Research Institute of Organic Agriculture FiBL and IFOAM - Organics International.
3. Kukreja, R. & Meredith, S., Resource Efficiency and Organic Farming: Facing up to the challenge. 2011.
4. CORE Organic Cofund, http://projects.au.dk/coreorganiccofund/research-projects/sureveg/. Fecha: 04/03/2019.
5. Wojtkowski, P.A., Biodiversity. Agroecological Economics. January 1, 2008. Academic Press, (p: 73–96).
6. Exner, D.N., Davidson, D.G., Ghaffarzadeh, M. & Cruse, R.M., Yields and returns from strip intercropping on six Iowa farms. American Journal of Alternative Agriculture. 1999, 14(02), 69.
7. Bouws, H. & Finckh, M.R., Effects of strip intercropping of potatoes with non-hosts on late blight severity and tuber yield in organic production. Plant Pathology. 2008, 57(5), 916–927.
8. Wang, Q., Li, Y. & Alva, A., Cropping Systems to Improve Carbon Sequestration for Mitigation of Climate Change. Journal of Environmental Protection. 2010, 1, 207–215.
9. Blackmore, S., Stout, B., MaoHua, W., Runov, B. & Stafford, J. V., Robotic agriculture - the future of agricultural mechanisation? 2005.
10. Slaughter, D.C., Giles, D.K. & Downey, D., Autonomous robotic weed control systems: A review. 2007,.
11. Reina, G., Milella, A., Rouveure, R., Nielsen, M., Worst, R. & Blas, M.R., Ambient awareness for agricultural robotic vehicles. Biosystems Engineering. 2016, 146, 114–132.
12. Taylor, J.H., Development and Benefits of Vehicle Gantries and Controlled-Traffic Systems. Developments in Agricultural Engineering. January 1, 1994. Elsevier, (p: 521–537).
13. Li, L., Zhang, Q., Huang, D., Li, L., Zhang, Q. & Huang, D., A Review of Imaging Techniques for Plant Phenotyping. Sensors. 2014, 14(11), 20078–20111.
14. Bégué, A., Arvor, D., Bellon, B., Betbeder, J., de Abelleyra, D., P. D. Ferraz, R., Lebourgeois, V., Lelong, C., Simões, M., R. Verón, S., Bégué, A., Arvor, D., Bellon, B., Betbeder, J., De Abelleyra, D., P. D. Ferraz, R., Lebourgeois, V., Lelong, C., Simões, M. & R. Verón, S., Remote Sensing and Cropping Practices: A Review. Remote Sensing. 2018, 10(2), 99.
15. Garrido, M., Paraforos, D.S., Reiser, D., Arellano, M.V., Griepentrog, H.W., Valero, C., Baghdadi, N. & Thenkabail, P.S., 3D Maize Plant Reconstruction Based on Georeferenced Overlapping LiDAR Point Clouds. 2015.

16. Escolà, A., Sebé, F., Miquel Pascual, B., Eduard Gregorio, B., Rosell-Polo, J.R. & Escolà AEscola, A., Mobile terrestrial laser scanner applications in precision fruticulture/horticulture and tools to extract information from canopy point clouds. Precision Agriculture. 2017, 18, 111–132.
17. Llop, J., Gil, E., Llorens, J., Miranda-Fuentes, A. & Gallart, M., Testing the Suitability of a Terrestrial 2D LiDAR Scanner for Canopy Characterization of Greenhouse Tomato Crops. Sensors. 2016, 16(9), 1435.
18. Andaloro, J.T., Rose, K.B., Shelton, A.M., Hoy, C.W. & Becker, R.F., Cabbage growth stages. N. Y. Food and Life Sci. Bull. 1983, (101), 1–4.
19. Martínez-Guanter, J., Garrido-Izard, M., Valero, C., Slaughter, D.C. & Pérez-Ruiz, M., Optical Sensing to Determine Tomato Plant Spacing for Precise Agrochemical Application: Two Scenarios. 2017.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Dispositivo de captura y envío de imágenes a un servidor remoto para monitorizar trampas para insectos en el campo

J. Blasco[1*], V. Alegre[2], A. Fereres[3], S. Cubero[1], S. López[1], P. Chueca[1], S. Sanjuan[4], N. Aleixos[5]

[1] Centro de Agroingeniería. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). CV-315, km 10,7 – 46113 Moncada (Valencia), España; blasco_josiva@gva.es
[2] TRAGSA. CV-315, km 10,7 – 46113 Moncada (Valencia), España.
[3] Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC), C/ Serrano 115b, 28006, Madrid, España
[4] Agrícola Villena S. Coop. Carretera del Puerto, S/N, 03400 Villena (Alicante), España
[5] Departamento de Ingeniería Gráfica. Universitat Politècnica de València (UPV). Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España; naleixos@dig.upv.es

Resumen: En este trabajo se ha creado un prototipo para monitorizar trampas de insectos colocadas en el campo mediante la captura y envío a un servidor remoto de imágenes de los insectos atrapados. El dispositivo se ha creado sobre la base de una plataforma Raspberry PI e incorpora una cámara para capturar las imágenes, una placa de control para programar los intervalos de captura de imágenes y un modem para enviar las imágenes e información adicional a un servido remoto mediante 3G. El dispositivo se puede programar para que capture las imágenes en momentos determinados del día o a intervalos regulares. La alimentación se realiza mediante una batería y una placa solar que aumenta su autonomía. Su implementación se ha realizado sobre trampas del tipo Irwin, consiste en una baldosa cerámica cuadrada de textura rugosa y un color y espectro de reflexión similar al de las hojas de la planta. La trampa está montada en un mástil metálico al que se sujeta mediante una pinza. La baldosa se sitúa en posición horizontal dentro de una caja de metacrilato transparente a una altura similar a la del cultivo que se rellena con una solución al 50 % de agua de etilenglicol. Los insectos se ven atraídos por la reflexión de la baldosa y quedan atrapados en el líquido. Se instalaron dos dispositivos en campos de ensayo de zanahorias en Villena (Alicante) con el objetivo de atrapar psílidos vectores de *Candidatus Liberibacter solanacearum*. Los dispositivos han funcionado correctamente durante la campaña de 2018 (Junio a Noviembre), enviando imágenes de las trampas e información climatológica a un servidor remoto cada dos horas. La programación temporal y la conectividad han funcionado bien aunque se han detectado interrupciones por temas de alimentación. El análisis de las imágenes realizado indica una buena resolución pero recomienda la mejora de la óptica para mejorar la nitidez a los insectos atrapados. Este trabajo forma parte del proyecto europeo Pest Organisms Threatening Europe, POnTE (#635646).

Palabras clave: trampa Irwin, envío de imágenes, agricultura de precisión, 3G, monitorización insectos

1. Introducción

El proyecto Pest Organisms Threatening Europe - POnTE (Research and Innovation Action H2020; Grant Agreement Number: 635646) presenta entre sus objetivos minimizar el riesgo de

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3469

introducción e impacto de algunas plagas emergentes que amenazan la agricultura de la UE, así como estudiar el papel de otras plagas conocidas asociadas con enfermedades peligrosas. Este trabajo presenta una de las actividades centrada en la instalación de una red permanente y automatizada de estaciones de muestreo de insectos transmisores de *Candidatus Liberibacter solanacearum* (CaLsol). CaLsol es una bacteria transmitida por los psílidos a las plantas Solanaceae y Apiaceae [1][2][3]. En las zanahorias, este patógeno es transmitido por los psílidos Bactericera trigonica y Trioza apicalis [4][5]. El número de psílidos infectados con CaLsol recolectados en trampas de campo y ninfas grandes contadas en muestras de hojas se correlaciona positivamente con el porcentaje final de la enfermedad en los tubérculos. Por lo tanto, un programa de control de plagas es eficaz para controlar el desarrollo del psílido y, en última instancia, para reducir la incidencia de infección [6]. Para ello, se ha desarrollado un dispositivo capaz de adaptarse a las trampas recomendadas, capturar imágenes de los insectos atrapados y enviarlas a intervalos programables a un servidor remoto.

2. Descripción de la trampa

La trampa recomendada es de tipo Irwin, con una baldosa cerámica cuadrada de textura rugosa y un color que se asemeja al de las hojas de la planta. La reflectancia del color de la baldosa está basada en datos obtenidos del estudio de la reflectancia de las propias hojas [7]. La trampa se instala en una barra de metal vertical que se introduce en el suelo, sujeta de tal forma que permanece horizontal a la altura de la vegetación (Figura 1). La caja se llena con una solución al 50% de etilenglicol. El líquido reduce la evaporación y preserva los psílidos en mejores condiciones para su identificación. La presencia de un segundo contenedor debajo de la baldosa evita la pérdida de muestras de insectos por desbordamiento debido a las lluvias. Actualmente, el procedimiento habitual es visitar la trampa casi a diario para recoger los insectos capturados y realizar el mantenimiento de la trampa. Los insectos se preservan en una solución de alcohol al 70% y se identifican después visualmente.



Figura 1. Trampa tipo Irwin

Con el dispositivo desarrollado, se reduce la necesidad de visitar las trampas, lo que ahorra costos y aumenta la capacidad de monitoreo, ya que las imágenes se pueden capturar y enviar períodos de tiempo que se pueden programar según las necesidades (por ejemplo, cada hora). Además, no solo se pueden controlar los insectos atrapados, sino también el estado de la trampa

cuyo rendimiento puede verse afectado por la suciedad que oculta la baldosa verde, la presencia de hojas o materiales extraños que pueden caer en la trampa. Esto ahora se puede detectar más rápidamente en las imágenes. Las imágenes se envían a un servidor remoto donde su almacenan para su posterior análisis por el entomólogo (Figura 2). En la actualidad, se está desarrollando una herramienta software para ayudar en el procesamiento supervisado de las imágenes por parte de los entomólogos. Esta herramienta facilitará el proceso de conteo, clasificación, análisis y geolocalización de los insectos, especialmente teniendo en cuenta que las trampas pueden están distribuidas en diferentes lugares.

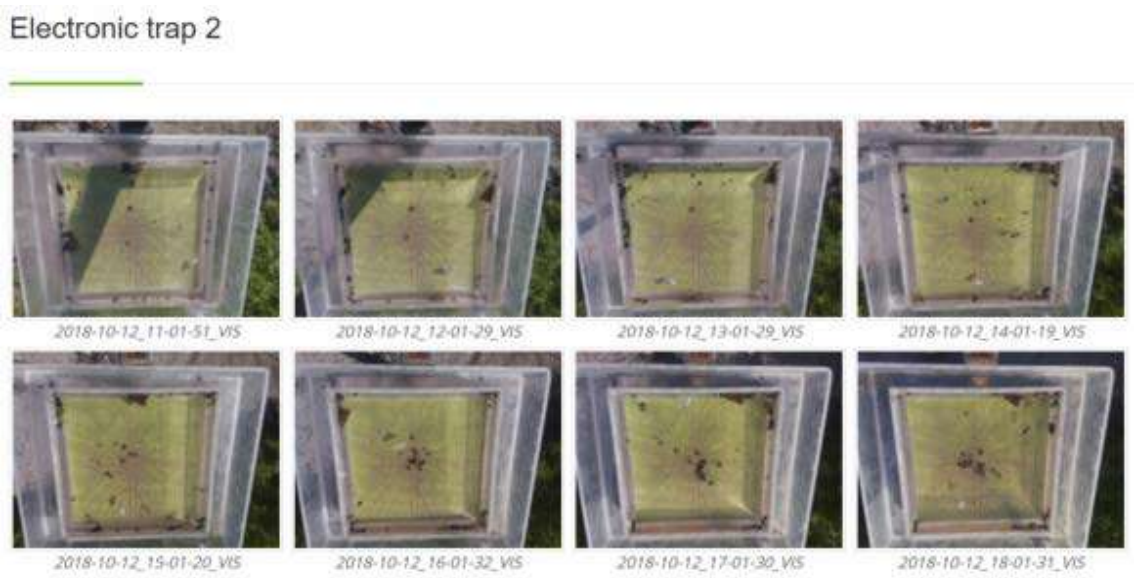


Figura 2. Vista parcial de las imágenes recibidas por el servidor.

3. Principales componentes y modo de operación

Uno de los requisitos de partida es usar elementos de bajo costo para hacerlos asequibles y de ese modo poder automatizar un elevado número de trampas a un precio reducido. Para crear el prototipo, se decidió utilizar pequeños dispositivos electrónicos programables para facilitar su montaje en cajas estancas. Estos dispositivos tienen entradas y salidas digitales y analógicas, así como diferentes tipos de puertos de comunicación estándar que permiten el uso de una amplia gama de extensiones desarrolladas para ampliar sus capacidades. Otra ventaja clave que ofrecen estos sistemas es la posibilidad de utilizar software gratuito respaldado por una comunidad de desarrolladores que están introduciendo continuamente mejoras y nuevas características en estos sistemas.

Sobre esta base, se decidió realizar la implementación sobre una plataforma Raspberry Pi y sus componentes comerciales, como la cámara CSI, cables de comunicación, etc., junto con dispositivos USB Wi-Fi / 3G, paneles solares, baterías, etc. Esta versión incluye los siguientes componentes:

- Raspberry Pi zero
- SD SanDisk Ultra 64 GB
- Witty Pi 2
- Cámara Raspberry Pi V2 (3280x2464 pixels).
- USB 3G Huawei E3531 modem
- Solar panel 6 V 6 W
- Batería LiPo 3.7 V 6600 mAh
- Cargador solar de batería

El entorno utilizado para programar fue PIXEL, (Pi Improved Xwindows Environment, Lightweight). Este sistema operativo se montó en una tarjeta SD de 64 GB con altas tasas de lectura y escritura, para ahorrar tiempo de carga y ejecución de software y de imágenes. Todo el software para controlar el prototipo se ha programado utilizando un desarrollo multiplataforma de código abierto llamado Code::Blocks. El software se desarrolló utilizando el lenguaje C++ para controlar todos los aspectos principales del sistema como la adquisición y almacenamiento de la imagen, el envío a través de 3G, el control de fallos y manejo de errores en la adquisición o envío de las imágenes o la suspensión del sistema entre capturas.

La Raspberry Pi es un módulo electrónico que consume una cantidad relativamente alta de energía, incluso en modo de suspensión. Esto tiene un gran impacto en la vida útil de la batería de un dispositivo que debe instalarse en el campo. Por ello, es necesario proporcionar otro módulo que consuma menos energía y permita la suspensión de la Raspberry (y el resto de los elementos) y encenderla solo cuando sea necesario para capturar y enviar las imágenes. Witty Pi es una pequeña placa de extensión que puede agregar reloj de tiempo real y administración de energía a la Raspberry Pi, y se ha utilizado para controlar el encendido / apagado del sistema para ahorrar batería. Este dispositivo permite programar el tiempo y los momentos en que el prototipo despierta, captura y envía las imágenes, de acuerdo con las necesidades de inspección de los entomólogos. Este dispositivo incorpora un reloj de tiempo real (RTC) que utiliza una batería de 3 V para registrar la hora programada por el usuario.

La escena a fotografiar es relativamente pequeña, ya que solo tiene que capturar la baldosa verde de la trampa (aproximadamente 20 x 20 cm) y, por lo tanto, debe ubicarse a una distancia cercana a la trampa para aprovechar el campo de visión y obtener la mejor relación mm/pixel. Sin embargo, colocar la cámara muy cerca de la trampa puede interferir con la atracción y el vuelo de los insectos.

Una vez que se adquiere la imagen de la trampa, se envía a un servidor remoto. Se estudiaron diferentes soluciones y se decidió utilizar un módem USB 3G (Huawei E3531) para establecer la conexión a través de una tarjeta SIM. Junto con la imagen, se envía un archivo de texto con la información del estado del dispositivo, algunos parámetros meteorológicos y un registro con información sobre la adquisición de la imagen, la conexión a Internet, la compresión de la imagen, la transferencia de los archivos y el cierre del sistema. Este archivo contiene información importante para la detección de errores durante el ajuste y el funcionamiento normal del sistema. La información se envía a un servidor FTP que almacena las imágenes y archivos de texto. El prototipo se instaló dentro de una caja estanca y se ha probado en un campo de ensayo cultivado con zanahoria.

4. Resultados

El prototipo (Figura 3) se probó durante las campañas de 2017 y 2018, programado para enviar imágenes cada dos horas. La cámara pudo enviar imágenes de los insectos atrapados, la ubicación y la temperatura del campo con éxito a un servidor remoto. Sin embargo, fue difícil obtener imágenes nítidas debido al difícil ajuste del enfoque de la cámara. Para obtener buenas imágenes, fue necesario colocar el sistema a menos de 30 cm de la trampa, lo que pudo interferir con el vuelo de los insectos y su aterrizaje en la trampa.



Figura 3. Detalle del prototipo construido

Otro problema encontrado fue que los niveles de batería del sistema disminuyeron progresivamente en el campo, lo que no se observó durante las pruebas de laboratorio. Probablemente ocurrió debido a la situación del panel solar en el campo, cerca de algunos árboles que podrían ensombrecer la trampa, o por problemas de baja cobertura de 3G que obligaron a reintentos continuos para enviar las imágenes. En el campo de ensayo la cobertura era escasa, lo que en ciertos momentos provocó transferencias muy lentas o fue directamente imposible realizarlas con éxito. Para resolver posibles fallos de comunicación, se programó un protocolo de transferencia que detecta estos fallos almacena los datos en una cola para posteriores intentos. Sin embargo, los reintentos continuos acortaron la vida útil de la batería, por lo que después de 15 reintentos, el equipo se suspende hasta la próxima sesión.

El coste de todos los materiales fue inferior a 100 €, que estaba por debajo de las especificaciones iniciales. El dispositivo funcionó relativamente bien en su fase de desarrollo enviando las imágenes según lo previsto aunque presentó los problemas descritos que se están solucionado en un segundo prototipo. Estos son los principales aspectos críticos que se han tenido en cuenta:

- Posición de la cámara. Es necesario ubicar la cámara cerca de la trampa, pero de manera que no interfiera con el vuelo de los insectos. Para ello, un segundo prototipo coloca la cámara en una pequeña caja a una altura ajustable, permitiendo mejorar el enfoque.
- Mejora de la calidad de la imagen con la incorporación de una cámara con óptica ajustable.
- Reducción del consumo energético. Al reducir el consumo de energía, es más factible mejorar la estabilidad del sistema, optimizando las cargas de la batería en ciclos más efectivos.
- Control de carga inteligente que muestra los niveles de la batería en cada momento, lo que ayuda a detectar problemas cuando ocurren varios días nublados o lluviosos seguidos.
- Mejora de la gestión de errores y del reintento en el envío en condiciones de poca cobertura.

- Control de la temperatura del sistema para conocer la temperatura alcanzada por la electrónica, ya que podría ser un motivo de errores en el funcionamiento del sistema o la eficiencia de las baterías de litio.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado un dispositivo que se instala en una trampa horizontal tipo Irwin para capturar psílidos transmisores de *Ca*Lsol, El dispositivo permite programar el intervalo de captura y envío de las imágenes. Estas se transmiten, junto otra información de interés a un servidor remoto donde son accedidas por los expertos. Durante los ensayos en campo se los dispositivos se programaron para adquirir una imagen cada dos horas. Se observaron fallos debido a la mala cobertura de la zona que hacía que la batería se consumiera rápidamente debido a los reintentos en el envío. Además, es necesario aumentar la calidad de las imágenes para distinguir con mayor facilidad los insectos. Se está realizando un rediseño completo para incorporar las mejoras necesarias para su correcto funcionamiento.

6. Agradecimientos

Este trabajo está parcialmente financiado por fondos de la Unión Europea a través del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 a través del proyecto No. 635646 POnTE (Pest Organisms Threatening Europe).

Referencias

1. Alfaro-Fernández A., Siverio F., Cebrián M.C., Villaescusa F.J., Font M.I. (2012) '*Candidatus* Liberibacter solanacearum' Associated with Bactericera trigonica-Affected Carrots in the Canary Islands. Plant Dis. 96, 581–581.
2. Munyaneza J.E., Sengoda V.G., Stegmark R., Arvidsson A.K., Anderbrant O., Yuvaraj J.K., Rämert B., Nissinen A. First Report of '*Candidatus* Liberibacter solanacearum' Associated with Psyllid-Affected Carrots in Europe. Plant Dis. 2010, 94, 639–639.
3. Munyaneza J.E., Crosslin J.M., Upton J.E. Association of Bactericera cockerelli (Homoptera: Psyllidae) with 'zebra chip,' a new potato disease in southwestern United States and Mexico. J. Econ. Entomol. 2017, 100, 656–663.
4. Antolínez C.A., Fereres A., Moreno A. Sex-specific probing behaviour of the carrot psyllid Bactericera trigonica and its implication in the transmission of '*Candidatus* Liberibacter solanacearum'. European journal of plant pathology. 2017, 147, 627-637.
5. Antolínez C.A., Fereres A. Moreno A. Risk assessment of '*Candidatus* Liberibacter solanacearum' transmission by the psyllids Bactericera trigonica and B. tremblayi from Apiaceae crops to potato. Scientific reports. 2017, 7, 45534.
6. Goolsby J.A., Adamczyk J.J.Jr., Crosslin J.M., Troxclair N.N., Anciso J.R., Bester G.G., Bradshaw J.D., Bynum E.D., Carpio L.A., Henne D.C., Joshi A., Munyaneza J.E., Porter P., Sloderbeck P.E., Supak J.R., Rush C.M., Willett F.J., Zechmann B.J., Zens B.A. Seasonal Population Dynamics of the Potato Psyllid (Hemiptera: Triozidae) and Its Associated Pathogen "*Candidatus* Liberibacter solanacearum" in Potatoes in the Southern Great Plains of North America. Journal of Economic Entomology. 2012, 105, 1268–1276.
7. Irwin M.E., Ruesink W.G. Vector intensity: A product of propensity and activity, In: Plant virus epidemics: Monitoring, modeling and predictions outbreaks (ed. by GD McLean, RG Garrett & WG Ruesink), 1986, Academic Press Australia.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Electrónica y automática de bajo coste aplicada al huerto urbano

S. Altares[1], S. Barrado[1], M. Loizu[1], V. García[1], B. Tabuenca[1], J.M. Rubio[1], C. Gilarranz[1]

[1] Universidad Politécnica de Madrid; carlosandres.gilarranz@upm.es

Resumen: En la actualidad, se están estableciendo una gran cantidad de huertos urbanos los cuáles adolecen de sistemas de monitorización y automatización para la gestión de los recursos. Dado el bajo coste que la electrónica está alcanzando, se están desarrollando sistemas aplicados a este nuevo concepto en los que la tecnología está marcando un papel primordial. Por este motivo, se ha implementado un modelo de automatización en sistemas de riego localizado para estas pequeñas superficies urbanas. Dicho sistema, emplea una lógica de control tal que, dependiendo de la información recibida por los sensores dispuestos a lo largo de la conducción, opera sobre los actuadores para alcanzar el objetivo buscado. Cada sensor tiene un microcontrolador asociado, los cuáles se encuentran conectados entre sí por un protocolo de comunicaciones WiFi. Por medio de la programación de *Arduino* y en función de las medidas recogidas por los sensores, se establece la apertura o cierre de la electroválvula que es la responsable de la apertura del circuito hidráulico del riego. Igualmente, esta programación permite la presentación de resultados en una pantalla LCD táctil que permite al usuario visualizar e interactuar fácilmente con el sistema. La implementación de este sistema tiene además una finalidad didáctica, habiéndose instalado para ello un aparato de medida analógico en paralelo por cada uno de los sensores digitales, tanto de presión como de caudal, de tal forma que se pueda comparar con relativa facilidad las medidas analógicas y digitales en cada uno ellos. Con este sistema se consigue una reducción del consumo de agua gracias a la mayor optimización del sistema de riego por medio de la tecnificación, debido a que éste es capaz de medir cuando se alcanza el valor umbral de las necesidades de agua de riego requerido para una zona del huerto urbano.

Palabras clave: Ingeniería, TIC, Smart Farming, Desarrollo Sostenible, Riego Localizado, Automatización.

1. Introducción

En los últimos años, la electrónica ha sufrido un cambio significativo debido a la reducción de costes y a la disponibilidad de nuevos tipos de sensores que se adaptan a cualquier tipo de ámbito de estudio **[1].**

La aparición de nuevas placas de desarrollo ha permitido que se puedan conectar cada vez un mayor número de sensores, lo que posibilita la recopilación de gran cantidad de medidas diferentes y por ende tener un sistema mucho más robusto, automático y preciso **[2]**.

En el campo de la agricultura, se están comenzando a implantar sistemas de monitorización y automatización con mayor frecuencia ya que éstos permiten a las explotaciones reducir sus costes así como sus pérdidas, consiguiendo así un sistema más eficiente en cuestión de recursos, lo que conlleva a un desarrollo sostenible, que es uno de los objetivos a conseguir en el concepto innovador y cada vez más extendido *Smart Cities* o ciudades inteligentes como indica C. Gilarranz

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3400

et al. (2018) **[3]**. El objetivo de estas ciudades es utilizar las infraestructuras y tecnologías existentes para conseguir una disminución tanto en el consumo energético como de las emisiones de CO_2; es por ello que la agricultura tiene un papel fundamental **[4]**.

Existen numerosas iniciativas para que la ciudadanía tome conciencia de la importancia que ésta tiene en nuestras vidas como es el caso de los *huertos urbanos.* Un huerto urbano se define como un espacio que puede estar cubierto o al aire libre orientado al cultivo de flores, aromáticas, hortalizas y frutales a escala doméstica en el interior de los núcleos de población **[5]**. Este tipo de implementaciones urbanas suelen tener sistemas de riego para efectuar el proceso de irrigación, siendo el riego localizado el más extendido **[6]**.

La problemática existente en estas superficies urbanas es que carecen, la mayor parte de ellas, de sistemas de monitorización y automatización, dando lugar a sobrecostes en los recursos aplicados como pueden ser fertilizantes, agua o pérdidas en las plantaciones **[7]**.

En el presente artículo se presenta una solución de automatización y monitorización de bajo coste para un huerto urbano teniendo en cuenta diferentes variables hidráulicas, como son el caudal y la presión, así como agroclimáticas, como la temperatura, la humedad relativa y la humedad de suelo que necesita la planta para alcanzar su óptimo desarrollo **[8]**.

2. Materiales y Métodos

Debido a que se pretende que el sistema pueda ser implantado en huertos urbanos a bajo coste, se ha decidido utilizar una tecnología disponible, versátil y que esté ampliamente extendida, como son las placas con microcontrolador *Arduino*.

Placas de desarrollo con microcontrolador, Arduino: Se trata de una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software. El microcontrolador que lleva la placa es un ATmega328 que funciona a 16 MHz y posee 32 KB de memoria flash, así como 2 KB de RAM y 1 KB de EEPROM, alimentado con 5 voltios **[9]**.

Se emplean dos tipos diferentes de placas Arduino, como son el Arduino UNO, de menores prestaciones y coste, y Arduino MEGA que posee un mayor número de pines, atendiendo a los requisitos demandados por cada funcionalidad.

Una ventaja estratégica que nos brinda esta familia de placas es la gran versatilidad que presentan, permitiendo conectar un elevado número de dispositivos tanto sensores como actuadores **[10]**.

Electroválvula: El modelo de la electroválvula utilizada para la implementación de este sistema es ***TORO EZ-FLO-EZP-02-54*** como se puede observar en la **Figura 1**. Soporta un caudal de 1-114 L/min y tiene una presión operativa de 0,7-10 bares (10-150 PSI). Su solenoide funciona a 9 V, por lo cual necesita el uso de un relé para su automatización.



Figura 1. Electroválvula.

Sensor de Presión: El sensor utilizado para medir las presiones es el ***DC 5V G1***. Posee un rango de trabajo de 0-1.2 MPa. Su tensión de trabajo está comprendida entre 0,5 a 4,5 V CC y el error de medición es de + - 1.5\ % FSO. Dicho dispositivo puede verse en la **Figura 2**.



Figura 2. Sensor de presión.

Caudalímetro Digital: El sensor utilizado es el ***YF-S201*** como se presenta en la **Figura 3**. Consta de una carcasa de plástico sellada y un rotor con paletas en el interior. Cuando el fluido pasa por el interior del sensor, el flujo hace girar dicho rotor.



Figura 3. Caudalímetro digital.

La velocidad de rotación está determinada por un imán fijado al rotor, que es detectado por un sensor de *efecto hall*. Por lo tanto, ninguna parte eléctrica está en contacto con el fluido. La rosca externa de la conexión a la tubería es de 1/2 ", el rango de funcionamiento en cuanto a caudal es de 1-30 l/min.

Sensor de Temperatura y Humedad Relativa: El dispositivo usado es el ***DHT22***, y permite recopilar simultáneamente medidas de temperatura y humedad relativa. Este sensor se muestra la en la **Figura 4**. Cuenta con un procesador interno que realiza el proceso de medición proporcionando el dato por medio de una señal digital. La temperatura puede oscilar desde -40 a 125 ºC y posee una precisión de 0,5ºC. Por otro lado, lectura de la humedad relativa puede variar entre 0 a 100% y tiene una precisión de entre 2 y 5%.



Figura 4. Sensor de temperatura y humedad relativa.

Sensor de Humedad de Suelo: El sensor que se ha utilizado ha sido ***Grove - Moisture Sensor V1.4***. Este sensor, trabaja entre 3,3 y 5V, con corrientes de 0 a 35 Ma y los valores que ofrece oscilan entre 0-1023. El funcionamiento del dispositivo se basa en el hecho de tener un comparador que recibe un voltaje y mide la diferencia teniendo en cuenta la diferencia de potencial. Es este sensor el que detectará cuando se llega a un punto de humedad en el suelo tal para ordenar a la electroválvula cerrar el flujo de agua, así como de abrirla cuando se detecte un bajo nivel de humedad. Conociendo las diferentes formas de medir la humedad del suelo y los actuales sensores de humedad, como indican Martin E. y Muñoz, C. en 2017 **[11]**, el sensor que más se ajusta a nuestras necesidades de proyecto de bajo coste es este que se describe y figura en la **Figura 5**.



Figura 5. Sensor de humedad de suelo.

Relé: Es un dispositivo electromagnético que funciona como un interruptor activado por una corriente eléctrica mucho menor que la que pasa por el circuito principal, de tal manera que permita conectar aparatos que necesitan de un mayor voltaje al sistema.

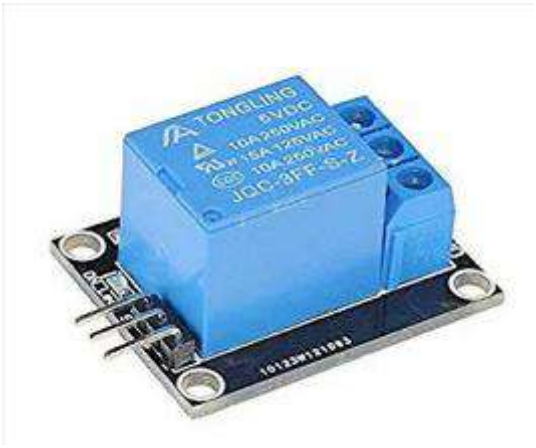


Figura 6. Relé.

Pantalla táctil LCD: El aparato que permite visualizar los valores recogidos en tiempo real por el sistema es el **2.8" TFT CAPACITIVE TOUCH SHIELD**, que muestra la información y permite interactuar con el sistema. Al ser táctil, se ha implementado una interfaz en la cual el usuario es capaz de controlar, así como de realizar un cierre de la electroválvula de manera manual desde este dispositivo en caso de ser necesario.

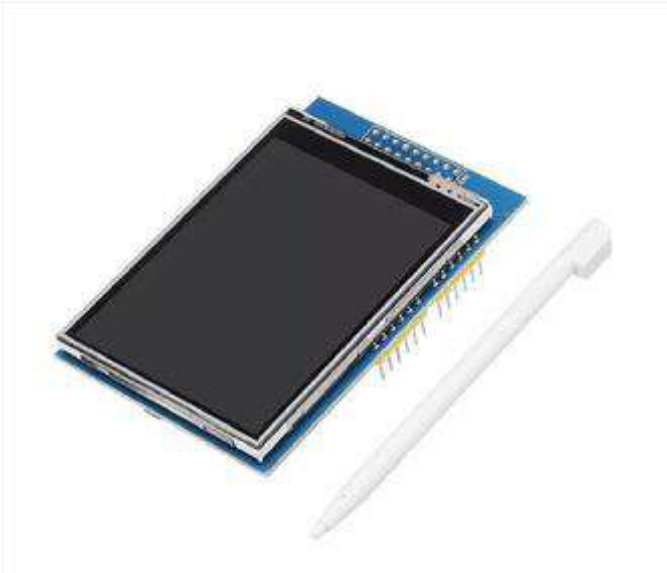


Figura 7. Pantalla LCD táctil

En la **Tabla 1** se pueden observar los diferentes materiales que han sido utilizados a la hora de implementar el sistema de riego de bajo coste, atendiendo a la parte del cabezal de riego y electrónica.

Tabla 1. Materiales utilizados.

Material	Número
Arduino Uno	3
Arduino Mega	1
Presostato - SKU237545	3
Caudalímetro - YF-S201	1
Pantalla LCD - 2.8" TFT CAPACITIVE TOUCH SHIELD	1
Sensor de temperatura y humedad - DHT22	1
Sensor Humedad de Suelo - Grove - Moisture Sensor V1.4	1
Relé	1
Electroválvula	1
Filtro	1

Descripción global del sistema implementado

Los requisitos que el sistema cubre son los siguientes:

1. Control de electroválvula para apertura y cierre de la línea de riego.
2. Control de saturación del filtro.
3. Control de caudal y presión efectivos.
4. Control de temperatura y humedad ambiental.
5. Visualización de estado de la instalación.
6. Coordinación de los elementos anteriores.

Se ha diseñado una solución que divide las funcionalidades anteriores en cuatro módulos interconectados a través de un bus común. El protocolo asociado a dicho bus es el I2C, desarrollado por Philips. Su modo de funcionamiento más básico cubre los requisitos necesarios e implica que un dispositivo se encargue de la gestión y sincronización del bus (denominado *master*, maestro) y un conjunto de dispositivos que hacen uso del bus de manera pasiva (denominados *slaves*, esclavos), conceptos ya originariamente descritos por Bralts et al en 1986 **[12]**.

Atendiendo a lo anterior, se reparten las funcionalidades de la siguiente forma:

1. Módulo *ValveController*: Se encarga de encapsular la apertura y cierre de la electroválvula (requisito 1), procesando los telecomandos enviados por el módulo *Master*.
2. Módulo *FilterController*: Encapsula el control de saturación del filtro (requisito 2) enviando la telemetría de los sensores de presión usados (requisito 3).
3. Módulo *FlowController*: Es el encargado de controlar el caudal y presión efectivos enviando la telemetría de los sensores de caudal y presión.
4. Módulo *Master*: Satisface los requisitos de coordinación del resto de elementos (requisito 6), así como la visualización del estado del sistema (requisito 5) y el control de la temperatura y la humedad (requisito 4).

El esquema de la interconexión de los distintos módulos puede observarse en la **Figura 8**. De izquierda a derecha encontramos el módulo *ValveController*, el módulo *FilterController*, el módulo *FlowController* y por último el Módulo *Master*.

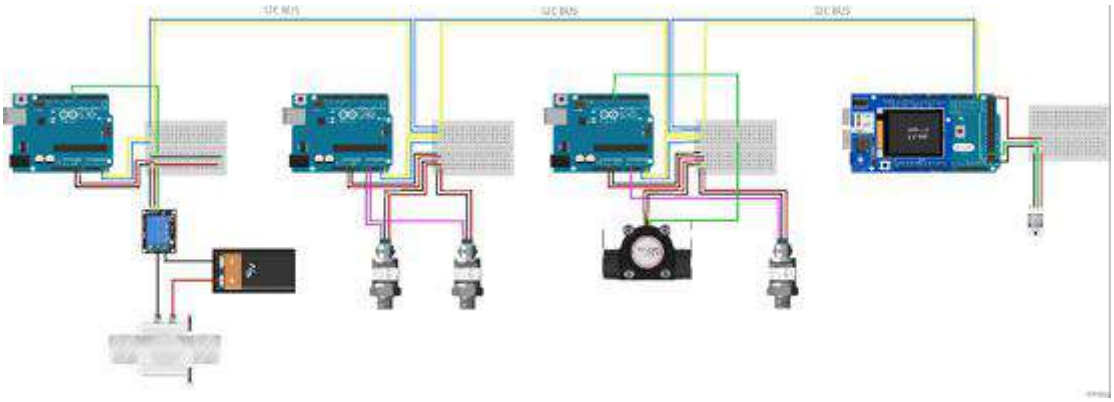


Figura 8. Esquema electrónico global.

Módulo ValveController

Este módulo se encarga de la apertura y cierre de la electroválvula y consta de un *Arduino UNO* y un relé conectado a una electroválvula. Para ello, admite telecomandos del módulo *Master* tal y como se ve en el diagrama de secuencia simplificado de la **Figura 9**.

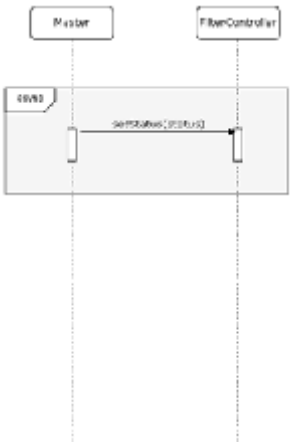


Figura 9. Diagrama de secuencia para ValveController.

El conexionado eléctrico de este módulo es el que podemos observar en la **Figura 10**. A través del pin digital 8 se controla la excitación del relé que abre y cierra el circuito de alimentación de la electroválvula. Los pines A4 y A5 se reservan para la conexión al bus. La alimentación se realiza a través de los pines pertinentes.

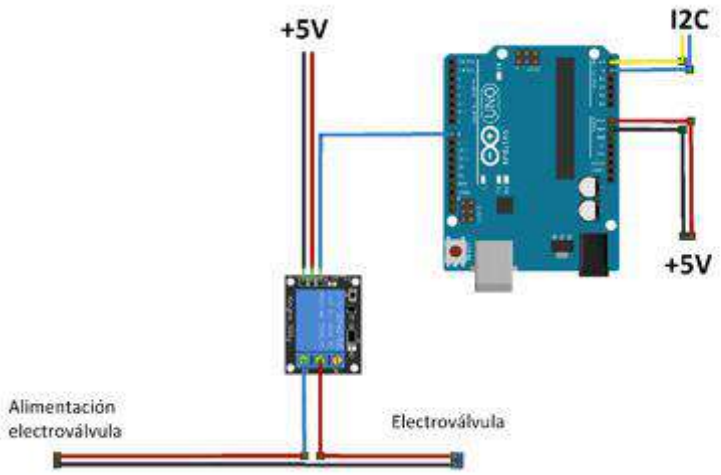


Figura 10. Esquema electrónico del módulo ValveController.

Módulo FilterController

Este módulo se encarga del control del filtro y consta de un *Arduino Uno* y dos sensores de presión, uno aguas arriba y otro aguas abajo de dicho filtro, de tal manera que se pueda observar la caída de presión causada por la obstrucción del mismo si la hubiere. El microcontrolador realiza las lecturas y envía los valores al maestro a través del bus. En la **Figura 11** se muestra su funcionamiento.

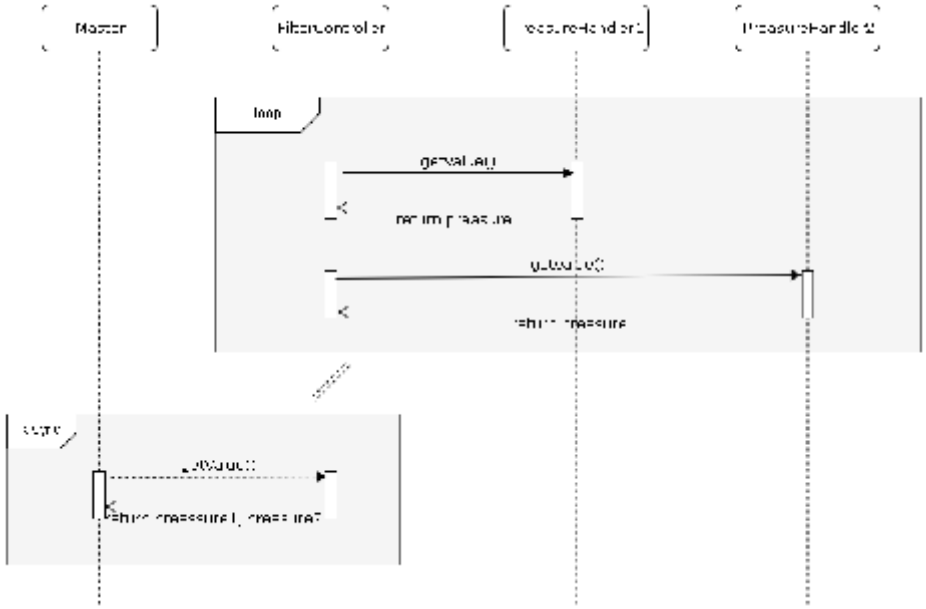


Figura 11. Diagrama de secuencia para FilterController.

En el conexionado, como en el caso anterior, se reservan los pines A4 y A5 para la conexión al bus. Los pines A0 y A1 se usan para la conexión a los presostatos *aguas arriba* y *aguas abajo*, respectivamente. La alimentación también se realiza a través de los pines reservados a tal efecto. En la **Figura 12** se puede ver el detalle de lo anterior.

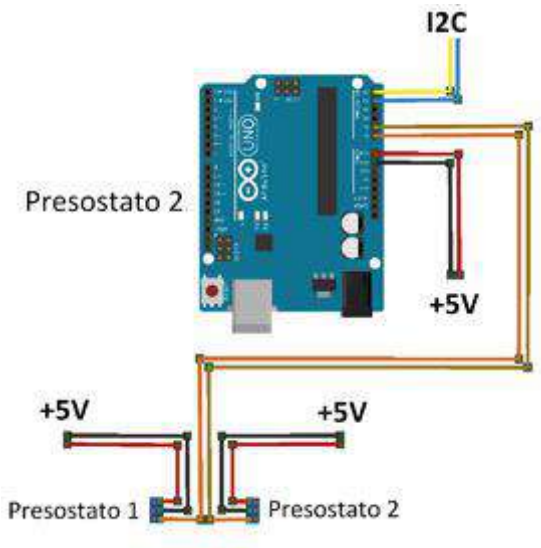


Figura 12. Esquema electrónico del módulo FilterController.

Módulo FlowController

Este módulo es el encargado de leer los valores de un caudalímetro y un presostato y enviarlos a través del bus I2C al dispositivo maestro. En el diagrama de la **Figura 13**, se detalla el funcionamiento y comunicación con el módulo Master.

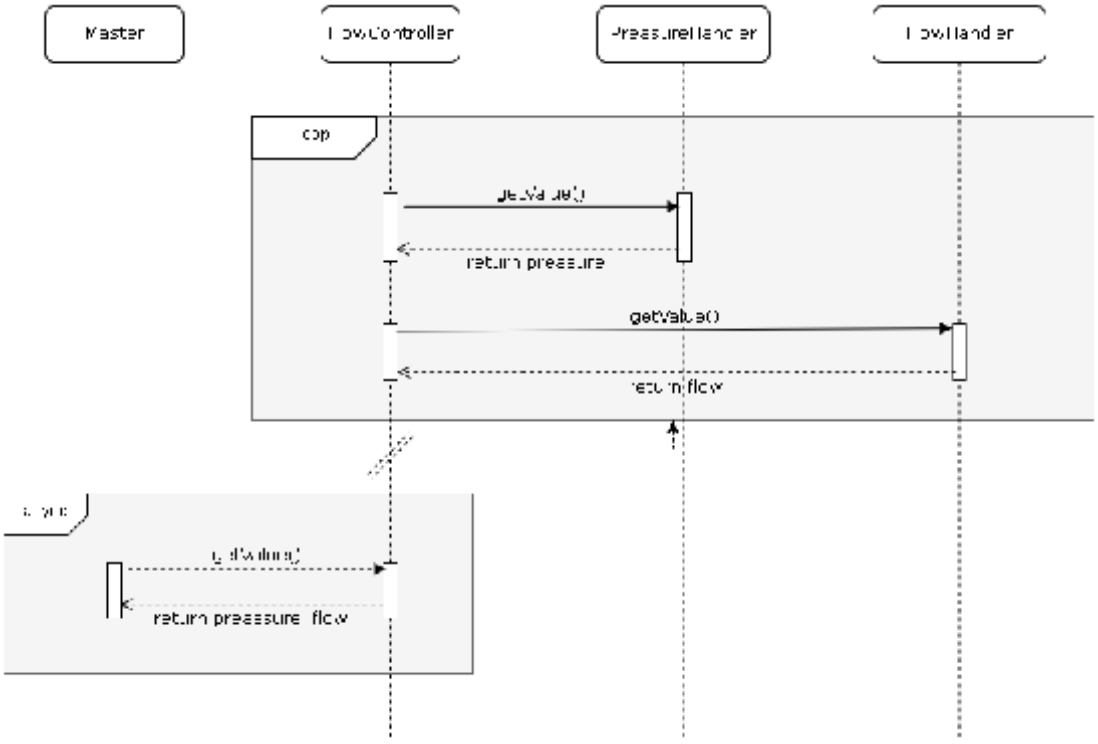


Figura 13. Diagrama de secuencia para FlowController.

El conexionado eléctrico que se detalla en la **Figura 14** implica, como variación sobre los esquemas anteriores, la conexión del pin A4 a la línea de datos del presostato y el pin digital 8 a la línea de datos del caudalímetro.

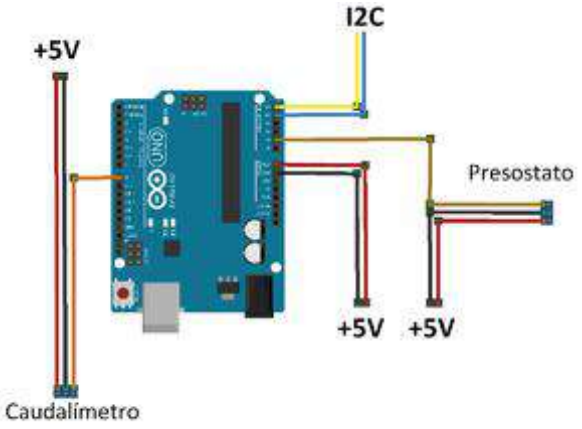


Figura 14. Esquema electrónico del módulo FlowController

Módulo Master

Tal y como se ha comentado con anterioridad, este módulo es el encargado de gestionar la información, tanto de la adquisición de la telemetría de los sensores como de la presentación al usuario y la coordinación de los elementos conectados al bus. Las diferentes conexiones e interacciones pueden verse en la **Figura 15.**

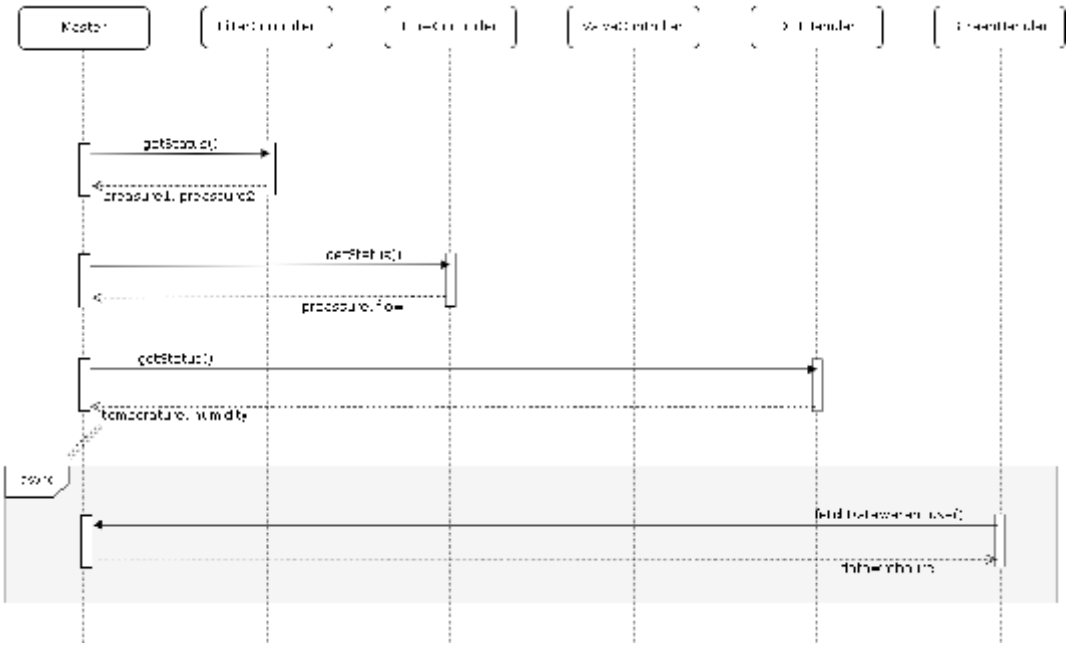


Figura 15. Diagrama de secuencia con los módulos principales.

La información relativa a parámetros ambientales, en este sistema la temperatura y la humedad relativa, es gestionada por el propio módulo mientras que la información relativa al control del filtro y control de caudal se obtienen a través del bus.

El conexionado eléctrico se observa en la **Figura 16**. Los pines 20 y 21 se reservan para la conexión al bus I2C mientras que el pin 49 se conecta a la línea de datos del sensor DHT22.

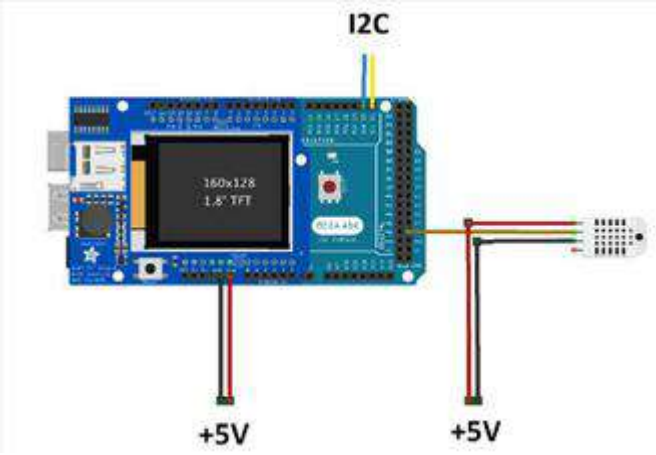


Figura 16. Esquema electrónico del módulo BusMaster.

El sistema se compone de una subunidad de riego en el cual se disponen todos los módulos anteriormente descritos. En cuanto al diseño de la subunidad, ha sido orientado con el fin de poder definir los valores umbrales que han sido utilizados para la programación de los sensores de humedad de suelo.

3. Resultados y discusión

Se ha correlacionado la variable digital que cada sensor ofrece con la variable a estudiar, véase como ejemplo el caudalímetro digital, este sensor de flujo de agua consta de un cuerpo de válvula de plástico, un rotor de agua y un sensor de *efecto hall*. Cuando el agua fluye a través del rotor, éste gira, y su velocidad de giro cambia siendo directamente proporcional al flujo entrante. El sensor de efecto hall emite la señal del pulso correspondiente en función de la velocidad de giro. Como la sección de paso es constante, conociendo una forma de medir la velocidad del agua del fluido, en este caso expresada en pulsos, se conoce el caudal circulante, puesto que el caudal de paso coincide con una sección por una velocidad como enuncia la ecuación de la continuidad.

La variable a medir foco de estudio es el caudal en l/h. Para ello se ha realizado un análisis estadístico a partir de las pruebas de laboratorio donde se han registrado un total de 30 pares de valores que correspondientes al caudal real circulante y su análogo medido en pulsos. Una vez comprobado estadísticamente la normalidad de los datos, se ha procedido a la realización de un modelo de regresión lineal cuyo resultado permite la inferencia dada la recta de regresión correspondiente:

Q (l/h) = 6,2201 + 9,0632*P (pulsos)

Variable dependiente: Q (l/h)
Variable independiente: P (pulsos)
Lineal: $y = a + bx$
Número de observaciones: 30

Coeficientes

	Mínimos Cuadrados	**Estándar**	**Estadístico**	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	6,2201	2,23613	2,78164	0,0096
Pendiente	9,0632	0,110412	82,0853	0,0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	173129,	1	173129,	6738,00	0,0000
Residuo	719,444	28	25,6944		
Total (Corr.)	173849,	29			

Coeficiente de Correlación = 0,997929
R-cuadrada = 99,5862 %
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,5714 %

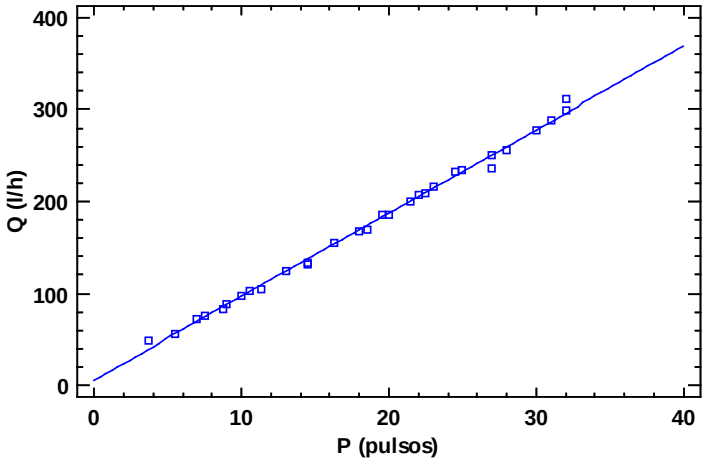


Figura 17. Gráfico del modelo estadístico ajustado. Q(l/h)-Pulsos.

Tal como se puede apreciar en la Figura 17, y dado al elevado valor del R^2 del modelo, se puede establecer una correspondencia real entre los valores digitales dados por el sensor y la variable real que es la que verdaderamente proporciona un significado agronómico en todo el proceso del riego.

De manera análoga se estudió la correlación para el caso del transductor de presión y para el sensor de humedad de suelo. Ambos sensores registraban un valor digital comprendido entre 0 y 1023 y se estableció la correspondencia digital con respecto a la variable agronómica, para el caso de la humedad del suelo, en % de humedad y para el caso del transductor de presión en metros de columna de agua (mca) como unidad de presión. Para el caso del sensor de humedad relativa y temperatura, este mismo ya viene caracterizado, de tal forma que el resultado que ofrece ya lo ofrece en unidades de % y ºC.

Tras la implementación del sistema descrito, se constata la existencia de un ahorro en los recursos hídricos aplicados al huerto. La interfaz desarrollada en la pantalla LCD posibilita la interacción del usuario con el sistema sin que éste precise de conocimientos de programación.

Este sistema permite automatizar y monitorizar un riego localizado, aunando la parte electrónica con la agronómica. La programación del sistema permite contar con un flujo de datos tal que, fijándose un valor umbral de humedad de suelo para un rango de crecimiento óptimo de una especie cultivada, generen la dosis óptima para dicha planta en todas sus fases.

Conociendo la humedad del suelo, se puede precisar con una mayor exactitud la dosis de riego a aportar y por lo tanto permite optimizar el agua a aplicar. Este fin ya lo recoge la **Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible** en su Objetivo 6, donde se cita literalmente: "*De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua*" [13].

Por medio de la disposición de los sensores a lo largo de la conducción, como se puede observar en la Figura 18, se consigue una buena telemetría de las diferentes variables medidas

por el sistema. Éstas, permiten realizar cálculos acerca de los distintos condicionantes que intervienen en su funcionamiento como la pérdida de carga, la detección de posibles anomalías en el funcionamiento como pudiera ser la obturación de un gotero, la rotura de elementos de la conducción, la colmatación del filtro o las diferentes fluctuaciones en presión y caudales.



Figura 18. Sistema de monitorización y automatización.

Se cuenta a su vez con un histórico de consumos de agua con el fin de conseguir una mayor precisión y ahorro de agua en el riego. Además, el almacenamiento de estos datos y su posterior tratamiento brinda la posibilidad de desarrollar una mejora continua del sistema.

Al tener una finalidad divulgativa y docente; se ha instalado un aparato de medida analógico en paralelo por cada uno de los sensores digitales, tanto de presión como de caudal, de tal forma que se pueda comparar fácilmente las medidas analógicas y digitales en cada uno de ellos, aportando mayor seguridad y fiabilidad al sistema además de ayudar a explicar a los estudiantes la agricultura 4.0.

4. Conclusiones

En la actualidad, se están estableciendo huertos urbanos los cuáles adolecen de sistemas de automatización para la gestión de recursos hídricos. Por este motivo, como hemos desarrollado durante el presente artículo, se ha implementado un modelo de monitorización y automatización en sistemas de riego localizado para estas superficies urbanas que tiene en cuenta variables como la temperatura, humedad relativa, presiones y caudales del sistema.

El objeto principal de este sistema ha sido el conseguir un ahorro en el consumo de agua gracias al uso de la tecnología, sin olvidar la finalidad didáctica del mismo. Esto se ha alcanzado gracias a la implementación de un ***diseño modular escalable*** desarrollando un control independiente por funcionalidad.

Se ha conseguido una ***corroboración de las medidas*** mediante el uso en paralelo de sensores digitales y analógicos lo que permite verificar en cada momento las lecturas ofrecidas por sensores digitales, proporcionando una mayor seguridad y fiabilidad al sistema además de permitir explicar de una forma tangible cómo evolucionan las diferentes variables en una instalación de riego e introducir a los estudiantes en el mundo de las *Smart Cities*. A su vez, el sistema muestra la información en una pantalla LCD lo que permite realizar una toma de decisiones no automatizada por el usuario sin que éste precise de conocimientos de programación.

Con este sistema se ha logrado una disminución del consumo de agua, pasando de un riego sin control alguno sobre los inputs, a uno basado en la toma de decisiones a partir de variables agronómicas asistidas por la tecnología y la programación. Gracias a la tecnificación del sistema de riego, se puede observar cuándo una planta necesita realmente ser regada y evitar así pérdidas

innecesarias. Nos gustaría concluir señalando la idoneidad de esta solución propuesta para pequeñas unidades de riego como es un huerto urbano, aunque esta solución es extrapolable, claro está que implementándola y adaptándola, a otros tipos de riego como son los extensivos.

Referencias

1. Chandan K S,. Behera P. *A Low Cost Smart Irrigation Control System*. IEEE SPONSORED 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS AND COMMUNICATION SYSTEM (ICECS 2015), 7.
2. Alagupandi, P., Ramesh, R., Gayathri, S. *Smart Irrigation System for Outdoor Environment using Tiny OS.* 2014 International Conference On Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), pp. 104–108. IEEE Press 2014.
3. Gilarranz C., Altares S., Loizu M., *Intelligent Irrigation System Based on Arduino.* ARXIV- Computers and Society. 2018, 6.
4. Hancke, G., Silva, B., Hancke, G. *The Role of Advanced Sensing in Smart Cities.* Sensors 2013 13, 393–425. 2013.
5. Avram G. *Starting a Garden, Caring for It, Growing with It-a Study on Collective Practices in Urban Gardening*. ECSCW 2013 Adjunct Proceedings, 2013.
6. Caetano F., Pitarma R., Reis, P., *Intelligent management of urban garden irrigation*. 9th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI). 2014, 6.
7. Feng, Z. *Research on water-saving irrigation automatic control system based on Internet of thing.* In: 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE), pp. 2541–2544. IEEE Press (2011).
8. S. V. Devika, Sk. Khamuruddeen, Sk. Khamurunnisa, Jayanth. Thota, Khalesha. Shaik, *Arduino Based Automatic Plant Watering System*, International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, vol. 4, no. 10, pp. 2-3, October 2014.
9. Singh P., Saikia S., et all. *Arduino-based smart irrigation using water flow sensor, soil moisture sensor, temperature sensor and ESP8266 WiFi module*. 2016.
10. S. N. Ishak, N. N. N. Abd Malik, N. M. Abdul Latiff, N. Effiyana Ghazali, M. A. Baharudin, *Smart home garden irrigation system using Raspberry Pi*, Communications (MICC) 2017 IEEE 13th Malaysia International Conference on, pp. 101-106, 2017.
11. Martin, Edward C, Munoz, Carolina. 2017. Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego¿ Cuándo?. PB - College of Agriculture, University of Arizona (Tucson, AZ)
12. Bralts, V. F.; Driscoll, M. A. and Kelly, S. F. 1986. Microcomputer based irrigation management and control system. ASAE, St Joseph, MI. USA. Paper Núm. 86. 1223 p.
13. Agenda 2030 para el desarrollo sostenible (ODS). https://www.agenda2030.gob.es/

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Empleo de sumadores electrónicos en lisímetros de pesada de varías de células de carga

Laura Ávila-Dávila[1], Manuel Soler-Méndez[2], Leandro Ruiz-Peñalver[2], Carlos F. Bautista-Capetillo[1], José M. Molina-Martínez[2]

[1] Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus UAZ Siglo XXI, Carretera Zacatecas-Guadalajara Km. 6, Ejido la Escondida, C.P. 98160 Zacatecas, México; laura_14avila@uaz.edu.mx; baucap@uaz.edu.mx

[2] Grupo de I+D+i Ingeniería Agromótica y del Mar. Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Ángel s/n Ed. ELDI, 30202 Cartagena, España; manuel.ia@agrosolmen.es; josem.molina@upct.es

Resumen: Los lisímetros de pesada son los equipos más precisos que existen en la actualidad para conocer el consumo de agua de los cultivos. Hasta el momento, estos equipos solo han estado disponibles en centros de investigación, ya que eran muy costosos y requerían de una gran infraestructura. Mediante modelos matemáticos y sensores calibrados a partir de los datos proporcionados por estos equipos, se ha intentado extrapolar los datos para ayudar a los agricultores a estimar las necesidades de agua de sus cultivos, aunque en la mayoría de los casos suelen diferir de las necesidades reales. En los últimos años, se han realizado enormes avances que están permitiendo incorporar esta tecnología en parcelas comerciales. Para ello, ha sido necesario reducir el tamaño de los equipos, además de abaratar enormemente los costes para que se amortice en poco tiempo. La medida del peso se lleva a cabo con células de carga. Cuando se pretende compensar la temperatura, las células de carga emplean cuatro galgas extensiométricas, las cuales se ubican a ambos lados del bloque metálico para conocer su deformación. La deformación producida es proporcional al peso aplicado, la cual se transforma en una señal eléctrica medible, conectando las galgas dentro de un puente de Wheatstone. Los cuatro hilos obtenidos del puente, dos de alimentación y dos de señal de salida, pueden conectarse directamente a un datalogger con suficiente resolución o a un indicador de pesada. El recipiente donde se aloja el cultivo, se apoya sobre 4 células de cargas, lo que implica disponer de: a) varios datalogger, b) un datalogger con multiplexor o c) 4 indicadores de pesada conectados a un datalogger. En los tres casos se realizaría la medida de forma individual y la suma por software. Otra forma de conocer el peso global del cultivo, utilizando un único datalogger o indicador de pesada, es mediante el empleo de un sumador electrónico. En los sumadores electrónicos se conectan todas las células de carga en paralelo y se regulan mediante potenciómetros de precisión. De esta forma conseguimos sumar todos los pesos y utilizar un único canal para la medida global del recipiente de cultivo (RC). Este sistema ha permitido resolver de una forma más económica y con la misma precisión, la medida del peso del RC.

Palabras clave: adquisición de datos, datalogger, conexión de dispositivos

1. Introducción

Un conocimiento preciso de la evapotranspiración del cultivo (ETc), requerimiento hídrico del cultivo, es el punto de partida para mejorar la eficiencia del uso del agua y la optimización de la producción del cultivo [1, 2, 3]. Sin embargo, determinar la ETc de manera directa es complejo y difícil, por lo que métodos numéricos han sido desarrollados basados en información climática

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3392

y agronómica, como el método estándar establecido en la publicación no. 56 de la FAO (United Nations Food and Agriculture Organization) que involucra el cálculo de ETc de una superficie de referencia (ET_O) basado en variables climáticas para conocer la demanda de evaporación de la atmosfera y ajustar este valor con un coeficiente de desarrollo del cultivo (Kc), el cual representa el resumen de las diferencias físicas y fisiológicas entre los cultivos y la definición de cultivo de referencia [4].

Estos métodos algunas veces son mejorados con ayuda de estaciones agroclimáticas y sensores de suelo (midiendo temperatura, humedad y conductividad) para determinar modelos de riego más exactos. Esto ha permitido el monitoreo directo o indirecto los proceso involucrados en la ET del cultivo, midiendo las necesidades de agua de un grupo de plantas y extrapolándolas a la planeación del riego del cultivo entero [5]. Otra forma de lograrlo es a través del uso de lisímetros, considerado como la herramienta estándar de medición directa del requerimiento hídrico del cultivo [6].

Los lisímetros pueden ser volumétricos y de pesada, el primero calcula la ET como un residuo de la medición de otros componentes del balance hídrico del suelo incluyendo las entradas de agua (en forma de precipitación y de riego), salidas (en forma de agua drenada y por ET) y cambios en el almacenamiento suelo-agua de un perfil de suelo contenido en un recipiente. En cambio, el lisímetro de pesada mide directamente las variaciones de masa de un perfil de suelo en tiempos cortos y destaca por su exactitud, precisión y fácil operación [1, 5, 10, 12, 13, 14]. La variación de la masa es recolectada en forma de señales eléctricas por el sistema de adquisición de datos desde las células de carga [7].

Este instrumento ha sido usado para verificar métodos de ET_O en áreas locales, procedimientos de balance de energía, el desarrollo de funciones para el Kc en cultivos específicos y evaluar otros métodos directos de mediciones de ET [6, 8]. Esto no significan que estén libres de errores por lo que deben ser sometidos a un proceso de calibración y hacer una correcta representación de las condiciones de campo donde será instalado [1, 2, 7, 12, 13] para evitar interpretaciones inconsistentes en los valores de ET y lograr una fácil operación, especialmente en tiempos cortos [15].

Una alta resolución en las mediciones de las variaciones mínimas de la masa en los lisímetros de pesada requiere de una buena interacción entre el área del lisímetro, sistema de pesado y sistema de adquisición de datos, por lo que es necesario el uso de dispositivos mecánicos, circuitos eléctricos y hacer un mantenimiento regular [16, 17]. Todo esto implica un alto costo en términos de compra, operación y mano de obra. Avances tecnológicos en la electrónica, en equipos de adquisición de datos y células de carga han permitido cambiar el tamaño, costo, exactitud y confiabilidad de los lisímetros [1].

El recipiente donde se aloja el cultivo, se apoya sobre 4 células de cargas, lo que implica disponer de: a) varios datalogger, b) un datalogger con multiplexor o c) 4 indicadores de pesada conectados a un datalogger. En los tres casos se realizaría la medida de forma individual y la suma por software. Otra forma de conocer el peso global del cultivo, utilizando un único datalogger o indicador de pesada, es mediante el empleo de un sumador electrónico. En los sumadores electrónicos se conectan todas las células de carga en paralelo y se regulan mediante potenciómetros de precisión. De esta forma conseguimos sumar todos los pesos y utilizar un único canal para la medida global del recipiente de cultivo (RC). Sin embargo, al hacer uso de dataloggers y multiplexores para la recopilación de datos puede afectar la precisión y resolución de las células de carga [14, 17].

Al respecto, Payero e Irmak (2008) y Misra et al., (2011) al evaluar sus respectivos lisímetros encontraron que la resolución global de los lisímetros puede variar considerablemente dependiendo de la capacidad del sistema de adquisición de datos elegido. De igual manera, Amaral et al., (2018) evaluaron diferentes sistemas de medición de peso de un lisímetro encontraron que los errores e incertidumbre más bajos fue cuando las células de carga eran

conectadas a un sumador electrónico y ésta última a un módulo indicador en una configuración de 6 hilos. El peor sistema fue cuando las células fueron conectadas directamente al datalogger.

El objetivo de este estudio fue evaluar los diferentes sistemas de conexiones posibles entre las células de carga donde se apoya el recipiente de cultivo en un lisímetro y el dispositivo de adquisición de datos y determinar cuál es el que presenta una mejor relación calidad/precio para la recolección de datos.

2. Materiales y métodos

En esta sección se presenta una descripción y caracterización de herramientas que poder ser utilizadas en los diferentes sistemas de conexiones para hacer la adquisición de datos de las células de carga. Además, de metodología para la calibración de las mismas.

2.1. Descripción herramientas utilizadas

En la siguiente Tabla (1) son mostradas las características de dispositivos usados en los diferentes sistemas de conexión. La caja de suma considerada, corresponde al modelo 89053 de la marca UTILCELL de plástico hermética de hasta 4 células, que permite la conexión en paralelo de las células, consigue sumar todos los pesos y utilizar un único canal para la medida global del recipiente. Además, cuenta con un ajuste fino en las esquinas (potenciómetros de precisión).

Tabla 1. Características de los dispositivos utilizados en la adquisición de datos.

Características	**Dispositivos**		
	Datalogger CR300 (Campbell Scientific®)	**Multiplexor AM1632 (Campbell Scientific®)**	**Indicador y transmisor de alta velocidad, SWIFT (UTILCELL)**
Entradas análogas	6 individuales o 3 diferenciales	16 a 33	
E/S digitales	7		3
Convertidor analógico-digital	24 bits		24 bits
Voltaje de alimentación	16 a 32 Vdc	9.6 a 16 Vdc	12 a 24 V
Voltaje de entrada	-100mV a +2500mV		±3,9 mV/V
Protocolos de comunicación	PakBus, Modbus, DNP3, SDI-12, TCP, entre otros.		Mobdus RTU, ASCII, Profibus, Profinet

2.2 Descripción de los sistemas de conexión

Las diferentes conexiones posibles para la adquisición de datos de las cuatro células de carga necesarias son:

SC1, cuatro células de carga + dos datalogger

SC2, cuatro células de carga + cuatro indicadores de pesada + datalogger.

SC3, cuatro células de carga + multiplexor + datalogger.

SC4, cuatro células de carga + una caja suma + datalogger.

2.3 Procedimento de calibración

La calibración de las células de carga puede ser realizada con base al método de los seis puntos, el cual demostró ser el más preciso en [17]. El procedimiento consiste en medir la señal de salida en mV V^{-1} contra la carga en g con aumento de carga a partir de cero y disminución de carga a partir de la carga máxima y obteniendo la ecuación de calibración lineal. De aquí es conocido la pendiente única de las células de carga (sensibilidad) y el coeficiente de ajuste (coeficiente de determinación). Los aumentos de carga deben ser realizados con pesas de valor conocido.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de costos

La Tabla 2 muestra el costo total por tipo de conexión que puede ser realizada para la adquisición de datos de las cuatro células de carga del lisímetro de pesada.

Tabla 2. Tabla de costos.

Sistema de conexión	Dispositivos utilizados	Costo total
SC1	2 datalogger CR300	2.600 € +IVA
SC2	1 datalogger CR300 4 indicadores SWIFT	2.100-2.500 € +IVA
SC3	1 datalogger CR300 1 multiplexor AM1632	1.900-2,100 € +IVA
SC4	1 datalogger CR300 1 caja suma	1.330-1,360 € +IVA

Analizando las ventajas e inconvenientes de los posibles sistemas de conexión de las células al dispositivo de adquisición de datos, puede ser notado que utilizar una caja de suma es más económico que usar dos o más datalogger o indicadores SWIFT y después ir directamente al datalogger. Además, como la caja de suma trabaja en paralelo sumando todas las células de carga entrantes y cuya única salida es de seis hilos, así que no hay caída de tensión por lo que las mediciones de pesaje no son afectadas en precisión. Como la caja suma cuenta con potenciadores, se puede ir calibrando una célula de carga a la vez y hacer un ajuste fino del peso medido, debido a los desajustes de sensibilidad entre las células.

El usar dos o más datalogger e indicadores es por el limitante número de canales análogos de entrada con los que cuentan, si se desea adquirir un dispositivo con más canales disponibles supone un costo más elevado. Así que la solución más viable económicamente es el uso de un sumador electrónico, como la que es propuesta aquí.

La segunda opción más económica es el uso de un multiplexor, que al igual que la suma de caja tiene varias entradas, en las que es posible conectar las cuatro células de carga del lisímetro de pesada y tener una única salida de las mismas. La ventaja de este dispositivo es que, si es posible disponer de los datos individuales o en conjunto de las células de carga, según se elija.

4. Conclusiones

Existen diferentes configuraciones para llevar a cabo la medición del conjunto de células de cargas que soportan el recipiente de cultivo de los lisímetros de pesada. Aunque existen pequeñas diferencias en la precisión de las medidas, atendiendo a la relación calidad/precio se recomienda el empleo de sumadores electrónicos. Además, gracias a los potenciadores con lo que cuenta la

caja de suma se puede hacer un ajuste fino de las células de carga una a una, por lo que se puede compensar la precisión de medición en comparación con los otros sistemas de conexión. Uno de los inconvenientes de este sistema cabe destacar que no es posible disponer de los datos individuales de cada célula de carga, si se pretende realizar un seguimiento individualizado.

5. Agradecimientos

Al Proyecto de Investigación y Desarrollo con referencia IDI-20190146, titulado "Desarrollo e implantación de un equipo de ferticontrol por lisimetría de pesada para uso en agricultura intensiva", en colaboración con la empresa AGROSOLMEN, S.L., cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Operativo Plurirregional de España 2014-2020.

Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete (ITAP) y al Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), por su colaboración para realizar esta investigación.

Referencias

1. Fisher, D. K. Simple weighing lysimeters for measuring evapotranspiration and developing crop coefficients. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2012, 5(3), 35-43.
2. Lorite, I. J., Sants C., Testi L., and Ferers E. Design and construction of a large weighing lysimeter in an almond orchard. Spanish Journal of Agricultural Research. 2012, 10(1), 238-250. ISSN 2171-9292.
3. Ruiz-Peñalver, L., Vera-Repullo, J., Jiménez-Buendía, M., Guzmán, I., Molina-Martínez, J. Development of an innovative low cost weighing lysimeter for potted plants: Application in lysimetric stations. Agricultural water management. 2015, 151, 103-113.
4. Allen R G, Periera L S, Raes D, Smith D. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. United Nations Food and Agriculture Organization. 1998.
5. Jiménez-Buendía, M., Ruiz Peñalver, L., Vera-Repullo, J. A., Intrigliolo-Molina, D. S., Molina-Martínez, J. M. Development and assessment of a network of water meters and rain gauges for determining the water balance. New SCADA monitoring software. Agricultural Water Management. 2014, 151.
6. Libardi, L.G.P., de Faria, R.T., Dalri, A.B., Rolim, G.D., Palaretti, L.F., Coelho, A.P., Martins, I.P. Evapotranspiration and crop coefficient (Kc) of pre-sprouted sugarcane plantlets for greenhouse irrigation management, Agricultural Water Management 2019, 212: 306-316.
7. Amaral, A. M., Cabral Filho, F. R., Vellame, L. M., Teixeira, M. B., Soares, F. A., & dos Santos, L. N. Uncertainty of weight measuring systems applied to weighing lysimeters. Computers and Electronics in Agriculture. 2018, 145, 208-216.
8. Jiménez-Carvajal, C., Ruiz Peñalver, L., Vera-Repullo, J.A., & Jiménez-Buendía, M., Antolino-Merino, A., Molina-Martínez, J.M. Weighing lysimetric system for the determination of the water balance during irrigation in potted plants. Agricultural Water Management. 2017, 183, 78-85.
9. Payero, J.O. & Irmak, S. Construction, installation, and performance of two repacked weighing lysimeters. Irrig Sci .2008, 26, 191-202.
10. Benli, Bogachan, Kodal, Suleyman, Ilbeyi, Adem and Ustun, Haluk. Determination of evapotranspiration and basal crop coefficient of alfalfa with a weighing lysimeter. Agricultural Water Management. 2006, 81: 358-370.
11. Liu, Xiaoying, Xu, Chunying, Zhong, Xiuli, Li, Yuzhong, Yuan Xiaohuan and Cao, Jingfeng. Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement. Agricultural Water Management. 2017, 184: 145-155.
12. Allen, R. G., & Fisher, D. K. Low-cost electronic weighing lysimeters. Transactions of the ASAE. 1990, 33(6), 1823-1833.
13. Iael Raij, Alon Ben-Gal, and Naftali Lazarovitch. Soil and irrigation heterogeneity effects on drainage amount and concentration in lysimeters: A numerical study. Agricultural Water Management. 2018, 195, 1-10, ISSN 0378-3774.
14. Evett SR, Mazahrih NT, Jitan MA, Sawalha MH, Colaizzi PD, Ayars JE. A weighing lysimeter for crop water use determination in the Jordan valley, Jordan. Transactions of the ASABE. 2009, 52: 155–169.

15. Mariano, Daiane de Cinque, Faria, Rogério Teixeira de, Freitas, Paulo Sérgio Lourenço de, Lena, Bruno Patias, and Johann, Andre Luiz. Construction and calibration of a bar weighing lysimeter. Acta Scientiarum. Agronomy. 2015, 37(3), 271-278.
16. Bello, Z.A., and Van Rensburg, L.D. Development, calibration and testing of a low-cost small lysimeter for monitoring evaporation and transpiration. Irrigation and Drainage. 2017, 66 (2): 263-272.
17. Misra R.K., Padhi J., Payero J.O. A calibration procedure for load cells to improve accuracy of mini-lysimeters in monitoring evapotranspiration. Journal of Hydrology. 2011, 406, 113-118.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Estimación de parámetros biofísicos de interés para la mejora de trigo usando inteligencia artificial

O. E. Apolo-Apolo[1], M. Pérez-Ruiz[1], J. Martínez-Guanter[2], G. Egea[1]

[1] Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluido, Universidad de Sevilla, Ctra. Sevilla-Utrera km1 Sevilla 41013; eapolo@us.es ; manuelperez@us.es; jmartinez@us.es; gegea@us.es.
[2] Agroplanning Agricultura Inteligente S.L. Programa Torres-Quevedo 2017 (PTQ-17-09506).

Resumen: La estimación de parámetros biofísicos como el índice de área foliar (IAF) ha sido un reto en los últimos años. Los métodos directos e indirectos existentes hasta el momento son costosos tanto en tiempo como en dinero. El desarrollo en los últimos años de las plataformas de fenotipado ha abierto la posibilidad de crear nuevas herramientas que ayuden a los mejoradores a tomar decisiones. El objetivo de este trabajo ha sido el desarrollo de una red neuronal artificial (ANN) para estimar IAF a partir de imágenes RGB y comparar su poder predictivo con otro método indirecto basado en el uso de imágenes hemisféricas y la teoría de la fracción de huecos. Los valores de IAF estimados con ambos métodos indirectos se compararon con medidas de IAF obtenidas de forma no destructiva con una relación alométrica determinada previamente en las parcelas de ensayo que explica en un 93% la variabilidad del área foliar unitaria observada (RMSE = 0.22 cm2). Los valores de IAF obtenidos con imágenes hemisféricas obtuvieron, en comparación con los medidos con la relación alométrica, un error próximo al 19%. Sin embargo, los valores de IAF obtenidos con la ANN obtuvieron un error notablemente inferior y próximo al 7%. Estos resultados muestran el gran potencial del modelo desarrollado, el cual puede continuar mejorando a través de la optimización del dataset utilizado.

Palabras clave: LAI, ANN, fenotipado, inteligencia artificial, *Deep learning*.

1. Introducción

Es un hecho constatado que la población humana aumentará notablemente en las próximas décadas [1]. En este contexto será necesario incrementar la producción agrícola [2] en un escenario de escasez de recursos y preservación del medio ambiente [3]. Dicho aumento deberá producirse en todos los cultivos, pero muy especialmente en aquellos cultivos básicos como el trigo, el cual aporta en torno al 20% de la ingesta calórica diaria para un ser humano [3,4]. El aumento medio anual del rendimiento en trigo que los mejoradores han conseguido en las últimas décadas a nivel mundial oscila en torno al 0.9%, mientras que las previsiones demandan que dicho aumento debería de ser en torno al 2.4% para satisfacer la creciente demanda mundial de alimentos [4–6]. Para salvar esta diferencia, los mejoradores demandan gran cantidad de información de los cultivos que les ayuden a tomar decisiones a la hora de seleccionar nuevas variedades [7]. Sin embargo, mucha de esta información es obtenida en laboratorios y bajo condiciones controladas, lo cual difiere del comportamiento en campo [7]. Por otra parte, la información que es obtenida en campo se hace de forma manual basándose en la experiencia de un técnico especializado la cual puede ser fuente de error [8]. En este contexto, el fenotipado de alto rendimiento tanto en plataformas terrestres como áreas [9–11], que

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3398

permite la evaluación precisa con sensores remotos de las respuestas a estreses abióticos y bióticos de los cultivos, han emergido como una herramienta prometedora, ya que permite la monitorización de parámetros biofísicos de manera rápida, precisa, no destructiva y barata [12]. Entre la gran cantidad de parámetros fisiológicos y estructurales que se pueden monitorear o estimar a nivel de planta, el Índice de Área Foliar (IAF) es un parámetro biofísico del cultivo que tiene gran importancia agronómica y es un indicador de la capacidad fotosintética del cultivo, estando estrechamente relacionado con la producción final [13] . Su valor, se puede obtener de forma directa dividiendo el área foliar de un cultivo y el área de suelo sobre el cual se encuentra establecido [14,15]. Para el cálculo del IAF tradicionalmente se han utilizado métodos directos (destructivos) e indirectos (no destructivos). Los métodos directos, además de ser destructivos, requieren mucho tiempo y son costosos [16], por lo que su uso queda normalmente relegado a la validación de métodos indirectos (e.g. análisis de la fracción de huecos en fotografías hemisféricas), utilizados con mucha mayor frecuencia [17]. Sin embargo, a pesar de que los métodos indirectos son bastante precisos, estos necesitan un post-procesamiento que consume mucho tiempo [18]. El desarrollo de redes neuronales basadas en aprendizaje profundo o *Deep Learning* (DL), un subconjunto del aprendizaje automático o *Machine Learning* (ML), y concretamente las redes convolucionales (CNN o CovNet) se presentan como alternativa para hacer estimaciones de IAF [19]. Este tipo de redes permiten transferir lo aprendido por la red en un escenario en el que dispone de *datasets* o conjuntos de datos de gran tamaño a otros escenarios con menores datos con el propósito de resolver un problema concreto, técnica conocida como *transfer learning* [20]. Por tanto, el objetivo del presente trabajo ha sido crear un modelo basado en CNNs a partir de una arquitectura de red existente y entrenada para estimar el IAF a partir de imágenes RGB.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción de la parcela experimental

El estudio tuvo lugar en una parcela experimental de la empresa Agrovegetal S.A. (finca La Aceñuela), en el término municipal de Escacena del Campo (Huelva) (37.457333, -6.363585). Dicho ensayo tuvo lugar durante la campaña 2017/2018, sembrándose el 25 de noviembre de 2017, y cosechándose el 15 de junio de 2018. Las variedades se sembraron inicialmente en micro-parcelas de 6.50 m de largo y 1.20 m de ancho. Posteriormente, se segaron químicamente para establecer unas dimensiones definitivas de 6.00 m de largo y 1.20 m de ancho. El ensayo estuvo compuesto por las siguientes 10 variedades de trigo blando (Triticum aestivum L.): Antequera, Conil, Galera, Gazul, Marchena, Montalbán, THA 3753, THA 3829, Tujena y Valbona. Se establecieron tres repeticiones por variedad, siendo 30 el número total de micro-parcelas que formaron parte del estudio. Las condiciones de cultivo del trigo para toda la campaña fueron en secano como suele ser habitual en la región. En este sentido el único aporte hídrico que recibió el cultivo procedió de la precipitación, unos 509 mm, la cual se repartió entre unos 10-12 días antes de la siembra hasta el día de la cosecha.

2.2. Medidas manuales y relación alométrica

La determinación del IAF mediante métodos destructivos es en muchas ocasiones la única forma de poder validar las estimaciones de IAF realizadas mediante métodos indirectos. En este trabajo, debido a que la destrucción de plantas de trigo harinero en las parcelas para estimar de forma directa el IAF afectaría a la determinación del potencial productivo de cada variedad, se decidió recolectar tres plantas por micro-parcela de la zona que posteriormente se segaría. Las plantas recolectadas fueron introducidas inmediatamente en bolsas de plástico y éstas, a su vez, en una nevera portátil refrigerada con placas de hielo. Posteriormente, una vez en el laboratorio, se determinaron las dos dimensiones principales de cada hoja (longitud máxima y

anchura máxima) y el área foliar unitaria con el medidor Li-Cor 3100 (Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA). Finalmente, una vez conocidas las dimensiones principales y el área foliar unitaria de las hojas muestreadas se buscaron relaciones empíricas que permitiesen predecir con precisión el área foliar de hojas de trigo mediante la medida en campo de sus dimensiones principales.

2.3. Toma de fotografías

Durante los días del año (DDA) 25, 40, 53, 80, 87, 93, 108 y 117, se tomaron dos fotografías por micro-parcela utilizando la cámara de un móvil Huawei P8 en condiciones de luz natural. La primera fotografía se tomó desde el centro de la micro-parcela mirando hacia el cielo (up-view). Esta imagen fue de tipo hemisférico, ya que para tomarla se utilizó una lente tipo ojo de pez a través de la cámara del móvil. La otra fotografía fue adquirida usando únicamente la cámara del móvil posicionada en el centro de la micro-parcela a una altura sobre el cultivo de 0.75 m y mirando hacia abajo (down-view). Para la toma de esta última fotografía, con el fin de validar el uso de esta metodología en plataformas de fenotipado masivo, se utilizó una plataforma de fenotipado desarrollada por los autores para su utilización en programas de mejora de trigo (Figura 1). La resolución de ambas fotografías fue de 4000x3000 píxeles.

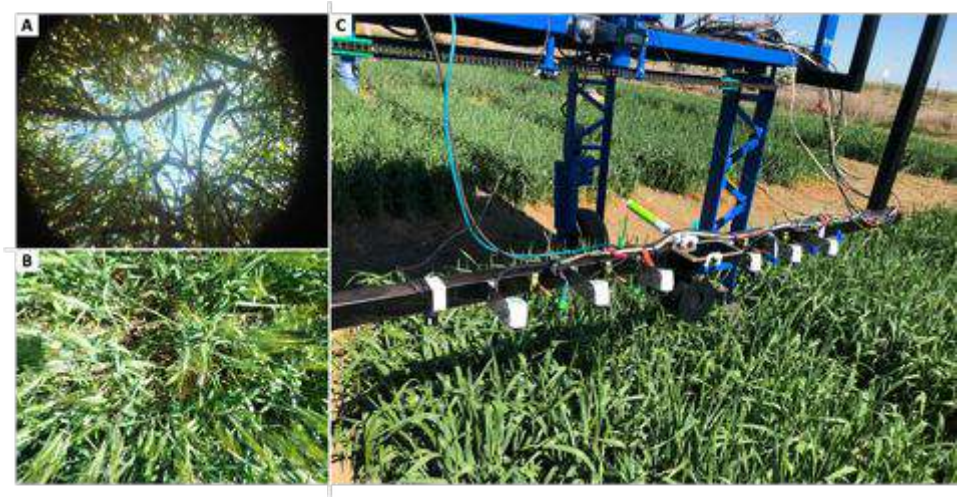


Figura 1. Fotografía obtenida con la cámara del teléfono Huawei P8 utilizando lente de ojo de pez (A), fotografía obtenida con la cámara del Huawei P8 sin lente adicional (B) y plataforma de fenotipado utilizada en B (C).

2.4. Obtención del Índice de Área Foliar del maíz a partir de la relación alométrica

El primer día que se tomaron fotografías (DDA 25), se seleccionaron y se marcaron al azar tres plantas de cada micro-parcela dentro del área que no se iba a segar. Posteriormente, con una cinta métrica se midieron las dimensiones principales de todas las hojas de cada planta, acción que fue repetida durante los DDA 87 y 108. Estas medidas fueron utilizadas para determinar el área foliar de cada hoja mediante la relación alométrica descrita en el epígrafe 2.2. El área foliar total de cada planta se determinó sumando el área unitaria de todas las hojas de una planta. El Índice de Área Foliar de las treinta parcelas del estudio fue calculado a partir de la siguiente expresión:

$$IAF = \frac{PLA\ (m^2)}{MP\ (m^2)}$$

donde PLA es el área foliar de la planta y MP el marco de plantación.

2.5. Construcción de la ANN, software y equipo utilizado

La arquitectura de la ANN utilizada en este proyecto está basada en el trabajo realizado por Ahmed y Moustafa (2016) [21], donde se combinan imágenes y texto como atributos para entrenar una red neuronal (Figura 2). Para el entrenamiento de la red neuronal en este trabajo se emplearon 180 imágenes (down-view) obtenidas en 6 fechas distintas y los valores de IAF calculados a partir de la relación alométrica (DDA 87) y los obtenidos a partir de las imágenes (up-view) usando el software Can-Eye [14] para los DDA 40, 53, 80, 93, y 117). Para lograr la combinación de datos numéricos e imágenes se utilizó la librería Keras, una librería de redes neuronales de código abierto escrita en lenguaje de programación Python [22]. Hay poca literatura científica en la que se utilice la combinación de datos mixtos para hacer predicciones utilizando Keras, ya que la mayor parte de modelos utilizan la interfaz de programación de aplicaciones o API secuencial desarrollada para datos secuenciales [23]. Sin embargo, existe la API funcional que es utilizada para modelos más complejos que utilizan datos no secuenciales [23,24]. En este caso, partiendo de los datos de entrada, se utilizan dos redes neuronales, la Multi-Layer Perceptron (MPL) que se encarga de los datos y la Convolutional Neural Network (CNN) que trabaja con las imágenes. Posteriormente estas dos redes se concatenan y junto con una Fully-Connected Layer (FC) más una función de activación se predice el valor del IAF. El hardware utilizado para todo el proceso de modelado fue el MacBook Pro (MacOs High Sierra 10.13.4) equipado con un procesador de 2.5 GHz Intel Core i7, 16 GB de memoria RAM y una gráfica AMD Radeon R9 M370X 2048 MB Intel Iris Pro 1536 MB.

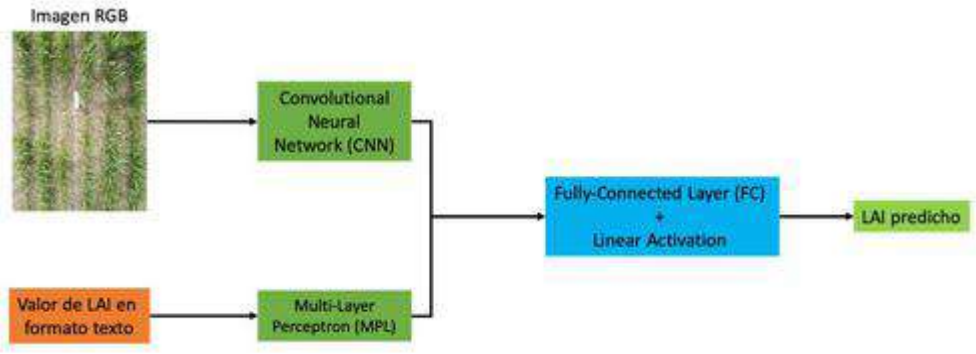


Figura 2. Croquis de la arquitectura de la red neuronal utilizada para predecir el valor del LAI a partir de imágenes RGB.

2.6. Análisis estadístico

La comparación entre los valores de IAF obtenidos con el software Can-Eye y con la ANN y los estimados de forma directa con la relación alométrica para el (DDA 108) se ha llevado a cabo mediante dos valores estadísticos: la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el error porcentual absoluto medio (MAPE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - S_i)^2}{N}} \qquad MAPE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{|IAFr - IAFe|}{IAFr}$$

donde N se refiere al número de valores comparados, O_i el valor observado i, S_i el valor predicho i, $\bar{\boldsymbol{O}}$ el valor medio de los valores observados, IAF_r el valor real del IAF y IAF_e el valor estimado.

3. Resultados y discusión

3.1. Relación alométrica utilizando las dimensiones características de la hoja y el área foliar unitaria

La obtención de una relación alométrica que permita estimar el área foliar de hojas individuales de trigo de forma no destructiva, resulta de gran interés para la validación de otros métodos no destructivos en ensayos donde no se pueda destruir el material vegetal, como es el caso de un ensayo de variedades donde la variación en el número de plantas por micro-parcela alteraría los resultados de productividad de las variedades. En este sentido, el análisis de las dimensiones características y la superficie individual de hojas de trigo ha permitido obtener una relación empírica capaz de predecir el 93% de la variabilidad del área foliar unitaria observada (Figura 3). La relación es una ecuación de primer grado de la forma $Y = ax$, donde la variable independiente (x) se determina a partir del producto de la anchura máxima (W) y la longitud de la hoja (L), y el parámetro a toma el valor 0.92. Esta relación ha sido propuesta con frecuencia para determinar de forma no destructiva el área individual de hojas de trigo, si bien es cierto que el valor de a propuesto por otros autores es de 0.75 [25], ligeramente inferior al obtenido con el material vegetal empleado en este estudio. Así mismo el error cuadrático medio (RMSE = 0.22 cm²) obtenido indica un buen ajuste del modelo.

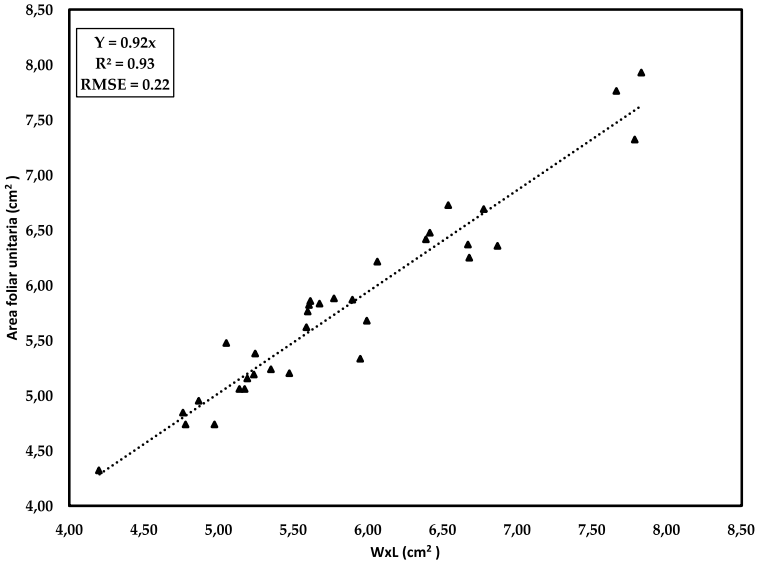


Figura 3. Relación alométrica obtenida entre las dimensiones características de la hoja de trigo y el área foliar unitaria. W: anchura máxima de la hoja; L: longitud de la hoja.

3.2.Validación de las estimas de IAF realizadas mediante la relación alométrica

Al observar las estimaciones de IAF obtenidas en la Tabla 1, se puede comprobar que son valores muy similares a los obtenidos por otros autores en los mismos periodos fenológicos [26]. El error obtenido en las estimas de IAF usando el software Can-Eye es superior al obtenido con la ANN, lo que demuestra el gran potencial de utilizar esta metodología, que no solo es más rápida, sino que acorde a los datos obtenidos es más precisa.

Tabla 1. Estimaciones de LAI obtenidas con Can-Eye y con la ANN frente al obtenido con la relación alométrica para el (DDA108).

	IAF medido	**IAF estimado con Can-Eye**		**IAF estimado con ANN**	
Variedad	Valor medio	Valor medio	Error (%)	Valor medio	Error (%)
GAZUL	5.980	5.12	14.38	5.56	7.02
GALERA	5.913	6.29	6.43	5.33	9.86
VALBONA	6.343	5.02	20.86	5.86	7.62
ANTEQUERA	6.383	4.53	29.09	6.15	3.66
CONIL	5.857	6.29	7.46	5.67	3.19
MARCHENA	6.883	5.02	27.07	6.34	7.89
TUJENA	6.853	5.53	19.36	6.32	7.78
MONTEMAYOR	6.367	5.72	10.21	5.82	8.59
THA3752	7.090	4.81	32.20	6.77	4.51
THA3820	5.993	4.78	20.30	5.47	8.73

Los errores de casi un 10% obtenidos utilizando la ANN sugieren que aún hay margen de mejora para optimizar el modelo. Esto se podría conseguir aumentando el número de imágenes del dataset, modificando los pesos de la red neuronal, introduciendo nuevos valores como (altura, número de hojas, dias despues de la siembra, estado fenológico, etc.) en las entradas de la red neuronal.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran el alto potencial que hay para estimar el IAF utilizando imágenes RGB adquiridas desde una plataforma de fenotipado. En el futuro, para mejorar la estimación del IAF, se podría aumentar el número de imágenes utilizadas como dataset para entrenar la ANN, así como incorporar otros atributos en la capa MPL de la red neuronal tales como: altura del cultivo, estado fenológico, días después de la siembra, fracción de cubierta, etc., para observar si estas modificaciones también influyen en la precisión de la estimación.

Una forma alternativa de aumentar el dataset podría ser utilizando videos grabados desde la plataforma a medida que ésta se desplaza sobre las micro-parcelas. Posteriormente, se extraerían los frames de cada video, lo que permitiría representar la variabilidad de IAF de una misma micro-parcela.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto *Pressing* (Referencia: AGL2016-78964-R) financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Los autores agradecen a la empresa Agrovegetal S.A. y a su Director Técnico D. Ignacio Solís Martel la gran ayuda prestada en el desarrollo del trabajo. Los autores también quieren agradecer el contrato Torres Quevedo (PTQ-17-09506) concedido a JMG y al contrato predoctoral para el desarrollo del programa de I+D+i de la Universidad de Sevilla (IV.3 2017) concedido a OEAA.

Referencias

1. Zipper, S.C.; Qiu, J.; Kucharik, C.J. Drought effects on US maize and soybean production: Spatiotemporal patterns and historical changes. *Environ.* Res. Lett. 2016, 11, 1–11, doi:10.1088/1748-9326/11/9/094021.
2. Fischer, G. Transforming the global food system. *Nature* 2018, 562, 501–502, doi:10.1038/d41586-018-07094-6.
3. Foley, J.A.; Ramankutty, N.; Brauman, K.A.; Cassidy, E.S.; Gerber, J.S.; Johnston, M.; Mueller, N.D.; O'Connell, C.; Ray, D.K.; West, P.C.; et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 2011, 478, 337–342, doi:10.1038/nature10452.
4. Gonzalez-Dugo, V.; Hernandez, P.; Solis, I.; Zarco-Tejada, P.J. Using high-resolution hyperspectral and thermal airborne imagery to assess physiological condition in the context of wheat phenotyping. *Remote Sens*. 2015, 7, 13586–13605, doi:10.3390/rs71013586.
5. Ray, D.K.; Mueller, N.D.; West, P.C.; Foley, J.A. Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050. *PLoS One* 2013, 8, doi:10.1371/journal.pone.0066428.
6. Reynolds, M. Climate Change & Crop Production; 2010; ISBN 9781845936334.
7. Araus, J.L.; Cairns, J.E. Field high-throughput phenotyping: The new crop breeding frontier. *Trends Plant Sci*. 2014, 19, 52–61, doi:10.1016/j.tplants.2013.09.008.
8. Reeves, T.G.; Cassaday, K. History and past achievements of plant breeding. *Aust. J. Agric.* Res. 2002, 53, 851–863, doi:10.1071/AR02038.
9. White, J.W.; Andrade-Sanchez, P.; Gore, M.A.; Bronson, K.F.; Coffelt, T.A.; Conley, M.M.; Feldmann, K.A.; French, A.N.; Heun, J.T.; Hunsaker, D.J.; et al. Field-based phenomics for plant genetics research. F. Crop. Res. 2012, 133, 101–112, doi:10.1016/j.fcr.2012.04.003.
10. Andrade-Sanchez, P.; Gore, M.A.; Heun, J.T.; Thorp, K.R.; Carmo-Silva, A.E.; French, A.N.; Salvucci, M.E.; White, J.W. Development and evaluation of a field-based high-throughput phenotyping platform. *Funct. Plant Biol.* 2014, 41, 68–79, doi:10.1071/FP13126.
11. Chapman, S.; Merz, T.; Chan, A.; Jackway, P.; Hrabar, S.; Dreccer, M.; Holland, E.; Zheng, B.; Ling, T.; Jimenez-Berni, J. Pheno-Copter: A Low-Altitude, Autonomous Remote-Sensing Robotic Helicopter for High-Throughput Field-Based Phenotyping. *Agronomy* 2014, 4, 279–301, doi:10.3390/agronomy4020279.
12. Reynolds, D.; Baret, F.; Welcker, C.; Bostrom, A.; Ball, J.; Cellini, F.; Lorence, A.; Chawade, A.; Khafif, M.; Noshita, K.; et al. What is cost-efficient phenotyping? Optimizing costs for different scenarios. *Plant Sci.* 2019, 282, 14–22, doi:10.1016/j.plantsci.2018.06.015.
13. Gonsamo, A.; Walter, J.M.; Chen, J.M.; Pellikka, P.; Schleppi, P. A robust leaf area index algorithm accounting for the expected errors in gap fraction observations. *Agric. For. Meteorol*. 2018, 248, 197–204, doi:10.1016/j.agrformet.2017.09.024.
14. Weiss, M.; Baret, F.; Smith, G.J.; Jonckheere, I.; Coppin, P. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. *Agric. For. Meteorol.* 2004, 121, 37–53, doi:10.1016/j.agrformet.2003.08.001.
15. Ed. Watson, D.; Listman, M. CGIAR research programme Maize 2012 annual report. Mexico, D.F.: CIMMYT. Vasa 2012.
16. Sonnentag, O.; Talbot, J.; Chen, J.M.; Roulet, N.T. Using direct and indirect measurements of leaf area index to characterize the shrub canopy in an ombrotrophic peatland. *Agric. For. Meteorol.* 2007, 144, 200–212, doi:10.1016/j.agrformet.2007.03.001.
17. Weiss, M.; Baret, F.; Smith, G.J.; Jonckheere, I.; Coppin, P. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. For. Meteorol*. 2004, 121, 37–53, doi:10.1016/j.agrformet.2003.08.001.
18. Demarez, V.; Duthoit, S.; Baret, F.; Weiss, M.; Dedieu, G. Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs. *Agric. For. Meteorol.* 2008, 148, 644–655, doi:10.1016/j.agrformet.2007.11.015.
19. Xavier, F.; Boldú, P. A review of the use of convolutional neural networks in agriculture Social Internet of Things View project P-SPHERE project View project. Artic. J. *Agric. Sci.* 2018, doi:10.1017/S0021859618000436.

20. Mehdipour Ghazi, M.; Yanikoglu, B.; Aptoula, E. Plant identification using deep neural networks via optimization of transfer learning parameters. *Neurocomputing* 2017, 235, 228–235, doi:10.1016/j.neucom.2017.01.018.
21. Ahmed, E.; Moustafa, M. House price estimation from visual and textual features. 2016.
22. Gopalakrishnan, K.; Khaitan, S.K.; Choudhary, A.; Agrawal, A. Deep Convolutional Neural Networks with transfer learning for computer vision-based data-driven pavement distress detection. *Constr. Build.* Mater. 2017, 157, 322–330, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.110.
23. Rosebrock, A. *Deep learning for computer vision*; 2017; ISBN 2013436106.
24. Gulli, A.; Pal, S. *Deep Learning with Keras*; Packt Publishing: Birmingham, 2017; Vol. 73; ISBN 1531-7714 ST - Mixing interview and questionnaires methods: Practical problems in aligning data.
25. Chanda, S. V; Singh, Y.D. Estimation of leaf area in wheat using linear measurements. *Plant Breedin Seed Sci.* 2002, 46, 75–79.
26. Asrar, G.; Kanemasu, E.T.; Yoshida, M. Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. *Remote Sens. Environ.* 1985, 17, 1–11, doi:10.1016/0034-4257(85)90108-7.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Estimación de producción en cítricos usando técnicas de aprendizaje automático

O. E. Apolo-Apolo[1], J. Martínez-Guanter[1,2], G. Egea[1], M. Pérez-Ruiz[1]

[1] Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos, Universidad de Sevilla, Ctra. Sevilla-Utrera km1 Sevilla 41013.
[2] Agroplanning Agricultura Inteligente S.L. Programa Torres-Quevedo 2017 (PTQ-17-09506); eapolo@us.es, martinezj@us.es, gegea@us.es, manuelperez@us.es

Resumen: Estimar con exactitud la cosecha de un cultivo representa una información muy relevante para agricultores y cooperativas/agentes encargados de gestionar y vender el producto. De esta estimación depende la organización y logística necesarias para la recolección, planificación del almacenaje, stock y abastecimiento de los mercados. Actualmente la estimación de la cosecha se realiza en campo con personal experimentado realizando una inspección visual y en base a datos históricos, proceso que tiene riesgo de presentar errores humanos. Las redes neuronales convolucionales (CNN) basadas en el Deep Learning (DL), constituyen una herramienta prometedora para hacer estimaciones de rendimiento basadas en el reconocimiento y conteo de frutos. El objetivo del este trabajo ha sido crear un modelo basado en CNNs a partir de una arquitectura de red existente y entrenada para contar el número de frutos y estimar la producción de la parcela. Una vez entrenados los modelos, se testaron sobre imágenes tomadas con un dron multirrotor sobre 20 árboles seleccionados al azar de una parcela de cítricos *Citrus sinensis* (L.) cv. Navelina. Durante las tres campañas anuales en las que se han realizado las estimaciones, el error medio absoluto obtenido con DL fue entre 4-6% y el del técnico especialista en el aforo entorno al 8-11% frente a la producción real de la parcela. Estos resultados vislumbran un gran potencial de la metodología para la predicción del rendimiento de árboles de cítricos.

Palabras clave: aforo, naranjas, machine learning, UAV, Deep learning

1. Introducción

En la actualidad, el cultivo de cítricos es uno de más relevantes en los países del arco mediterráneo, con una superficie cosechada de 513.602 ha, de las cuales el 57% (295.000 ha) se encuentran en España. En este contexto, España es hoy en día el mayor productor y exportador de naranja en fresco de Europa, a pesar de la fuerte competitividad en el mercado de países fuera de la UE [1]. Las operaciones de cosecha son una de las más costosas por su realización manual en la gran mayoría de explotaciones en España [2], debido al escaso nivel de mecanización de estas tareas en nuestro país [3]. La elección del momento óptimo de cosecha depende del índice de madurez, color de la fruta y tamaño entre otros factores [4]. Sin embargo, el reto más importante en este tipo de cultivo es estimar el número de frutos y su estado con el mayor grado de anticipación posible para organizar las operaciones de cosecha y predecir su precio y puesta en el mercado [5].

Tradicionalmente estas estimaciones del rendimiento en naranjos y otros cítricos se han basado en las condiciones agronómicas del cultivo, los datos históricos de rendimiento de los cultivos y las observaciones visuales del cultivo [6]. Estas observaciones visuales son altamente

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3461

subjetivas, y dependen de la experiencia y conocimiento de los técnicos, llegando a errores en la estimación de entre el 15% y 25% [7]. En las últimas décadas, gracias a los avances en campos como la informática, la robótica, la inteligencia artificial y los sensores o cámaras digitales, se han estudiado diferentes opciones dentro de la llamada Agricultura de Precisión para estimar el rendimiento de los cultivos. Estos métodos semi-automatizados utilizan sistemas de captación de imágenes de forma automática y posteriormente aplican técnicas de segmentación de imágenes [8]. Por ejemplo, se llevaron a cabo algunos estudios anteriores de reconocimiento de frutas para manzanas [9], cítricos [10][11] y tomates [12]. Sin embargo, muchas de estas técnicas utilizaban únicamente la respuesta espectral entre píxeles como una característica única para detectar y contar frutos. La gran mayoría de estos trabajos concluyen que el uso de imágenes RGB o multiespectrales puede ser una más que notable aproximación a los resultados reales, si bien establecen unas barreras comunes como son la presencia de sombras, frutos ocluidos y orientaciones espaciales con respecto a la luz que no facilitan su identificación y posterior conteo. Por ello, en los últimos años se ha incorporado a estas metodologías para el análisis de imágenes, el uso de las técnicas de aprendizaje automático o Machine Learning (ML).

Estas técnicas de aprendizaje profundo permiten el entrenamiento de un modelo en base a sets de datos previamente obtenidos (y etiquetados, en nuestro caso), y generar a modo de salidas de dicho modelo la clasificación o detección de elementos en dichas imágenes de forma automática. Una revisión de la literatura al respecto de uso de estas técnicas para estimar los rendimientos de los diferentes tipos de cultivos, la mayoría de estos métodos utilizan imágenes tomadas mediante plataformas terrestres o sensores a nivel del suelo [13]. Estas plataformas producen resultados precisos, pero consumen más tiempo y tienen mayores costes, lo que las hace inviables en las explotaciones de naranjos.

Por ello, los vehículos aéreos no tripulados (UAVs), capaces de portar sensores y cámaras de muy alta resolución, proporcionan una alternativa que puede ser implementada rápidamente y de forma barata [14]. Estos tipos de vehículos generan una gran cantidad de datos, generalmente en forma de imágenes o secuencias de vídeo, y permiten patrones de vuelo flexibles y adaptados a las tareas que se les demanda [15]. En este contexto, la combinación del potencial tecnológico de los drones y las técnicas de machine learning proporciona perspectivas e información únicas que, de otro modo, sería muy costoso obtener utilizando técnicas tradicionales [16].

En vista de lo anterior, el objetivo principal de este estudio fue desarrollar y validar durante 3 campañas, un sistema de detección de naranjas usando imágenes RGB obtenidas por vuelo de un UAV en combinación con una red neuronal artificial para su aforo de forma automatizada. El desarrollo de esta nueva metodología para estimar el rendimiento de los naranjos con alta precisión o al menos con un error menor que el de los métodos visuales puede contribuir a aumentar la rentabilidad económica de los agricultores y reducir los costos de logística y operacionales.

2. Materiales y métodos

2.1. Localización de ensayos y obtención de imágenes aéreas

Los ensayos se llevaron cabo durante tres campañas de producción (2017, 2018 y 2019) en un área de 4 hectáreas de una explotación comercial de cítricos (*Citrus sinensis* L. cv. Navelina) cerca de Sevilla, suroeste de España (Lat: 37.512574; Long: -5.956659). El muestreo se llevó a cabo en 20 árboles individuales seleccionados al azar de un total de 1.654 árboles. Las imágenes fueron adquiridas bajo condiciones de luz natural empleando la cámara RGB de un dron comercial Phantom 3 (SZ DJI Technology Co.). La resolución de las imágenes de la cámara era de 4.000 × 3.000 píxeles. La altura de vuelo se estableció en seis metros sobre el suelo (tres sobre la copa) y se utilizó la opción de vuelo manual. Se obtuvieron imágenes por los lados izquierdo y derecho de cada árbol

(Figura 1). Además, se empleó una regla corta de madera calibrada en centímetros durante la toma de fotografías para tratar de escalar las imágenes y determinar el tamaño medio del fruto.

Se consideró como verdad-terreno (la producción efectiva de naranjas por árbol) los kilogramos de naranjas, de cada uno de los 20 árboles seleccionados, que se recogieron de forma manual y que fueron pesados de forma individualizada, obteniendo los datos de producción real para luego ser evaluados frente a las estimaciones del modelo.

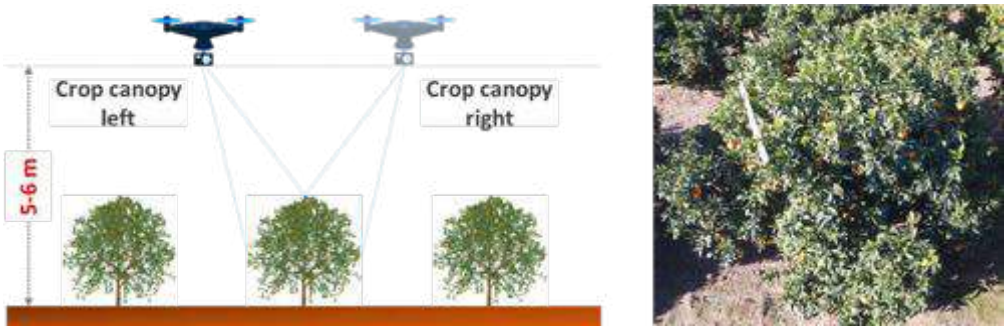


Figura 1. Ilustración del proceso de captura de imágenes mediante un sensor RGB a bordo de un dron por cada uno de los lados del naranjo (izquierda). Ejemplo de imagen capturada del naranjo para ser analizada (derecha).

2.2. Desarrollo de la arquitectura de la red neuronal

La potencia y capacidad de cómputo de los equipos informáticos ha sido desde el inicio una de las barreras para el desarrollo del aprendizaje profundo, ya que se necesita trabajar con grandes cantidades de datos complejos. Para el desarrollo del modelo capaz de procesar las imágenes, se empleó en primer lugar la librería de visión por computador OpenCV [17] del lenguaje de programación Python.

El desarrollo de la red neuronal ha sido hasta ahora algo realmente complejo, debido a las complicadas arquitecturas computacionales que se debían desarrollar prácticamente de cero. La irrupción de las grandes compañías informáticas y la puesta a disposición de sus herramientas lo ha convertido en algo relativamente asequible. En nuestro caso, la red neuronal se generó empleando las herramientas de código abierto Keras [18] y Google TensorFlow [19], que facilitan la construcción y entrenamiento de los modelos. Estas herramientas crean capas de abstracción e interfaces de diseño y evaluación rápida de las arquitecturas Deep Learning [20].

2.3. Generación del dataset y entrenamiento del modelo

Para entrenar un modelo de red neuronal artificial, especialmente una red convolucional, se requiere de un set de datos lo más extenso posible, de manera que el sistema tenga cuantos más ejemplos de aprendizaje mejor. También se necesita que los ejemplos sean lo suficientemente dispares para evitar el sobreaprendizaje (*overfitting*). En este trabajo, esto se aborda con un dataset que incluye frutos de color naranja, frutos que no están maduros (verdes), con diferentes tamaños y formas y frutos ocluidos por ramas y hojas (Figura 2). En este trabajo se generó un primer conjunto de datos con 400 imágenes utilizando la API de TensorFlow, como se sugiere en [21].

Los modelos proporcionados por TensorFlow (https://github.com/tensorflow/models) fueron pre-entrenados y seleccionados en base a su precisión y la velocidad del entrenamiento.

De forma adicional a este primer dataset, se añadieron las imágenes aéreas de alta resolución obtenidas por el UAV. Un total de 50 de estas imágenes fueron etiquetadas de forma manual empleando el software libre de etiquetado gráfico LabelImg [22] (Figura 2).

Para evitar procesar manualmente todo el conjunto de imágenes de entrenamiento, se generó el modelo basado en la red neuronal, y se inició el proceso de entrenamiento automático. Una vez

entrenados los modelos, se utilizó el mejor modelo para detectar frutos de naranja en las imágenes tomadas con el UAV (Figura 3). Cada fruta anaranjada se etiquetó con una caja verde que mostraba la precisión o bondad del algoritmo en el proceso de reconocimiento de cada naranja.

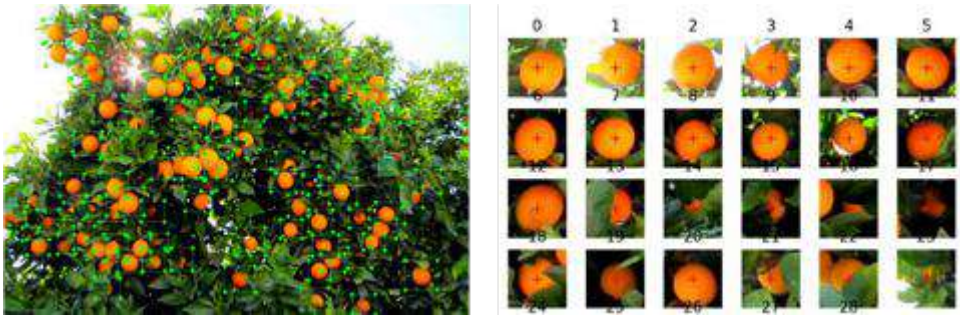


Figura 2. Etiquetado de imágenes sobre imágen completa (izquierda) y diferentes casos de naranjas etiquetadas (derecha).

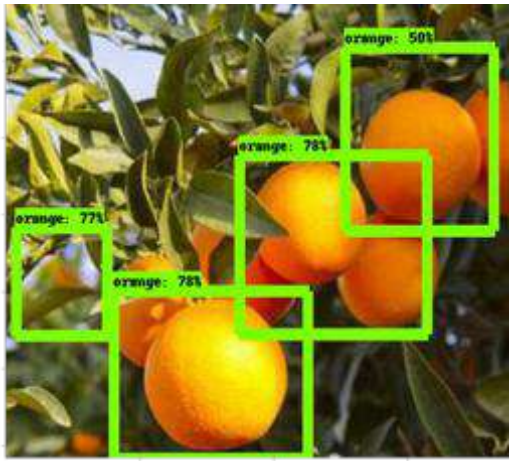


Figura 3. Detección automática de naranjas y precisión del algoritmo en cada detección. Nótese que algunas de éstas no son detectadas por presentar un alto grado de oclusión por otros frutos.

2.4. Análisis de la precisión del modelo.

Durante las tres campañas en las que tuvo lugar el estudio, cada árbol se consideró como una unidad experimental y el número de frutos detectado fue determinado de forma individual. Se realizó un análisis del error estadístico y la varianza con el paquete estadístico Statgraphics (Statgraphics Centurion XV). Las imágenes de cada uno de los lados del árbol se agruparon, y se comparó el número de frutos de cada árbol con el recuento visual de frutos mediante análisis de regresión lineal. Para comparar el rendimiento real con el rendimiento estimado, se desarrolló un modelo de regresión lineal considerando el número de frutos detectados y el peso del fruto para cada árbol. Finalmente, se compararon los rendimientos totales obtenidos a partir de la estimación del rendimiento mediante visión artificial y la estimación visual realizada por un técnico profesional durante la temporada de cosecha para obtener los datos reales de rendimiento.

3. Resultados y discusión

3.1. Conteo automático de frutos

Tras la generación del modelo, se empleó la red neuronal para la detección automática de frutos en los 20 árboles del estudio. Se comparó el número de frutos obtenidos con el mejor modelo de conjunto de datos con el número de frutos contados por métodos visuales en cada conjunto de imágenes. Evaluamos las métricas de píxeles naranjas en un modelo con cerca de 10.000 iteraciones. La red de detección de estos píxeles produce un mapa de probabilidad, obteniendo las detecciones mostradas en la figura 3. El valor estadístico de R^2 obtenido de 0.96 indica que el modelo entrenado tiene una buena precisión en términos de los frutos detectados en las imágenes de ambos lados de los árboles (Figura 4).

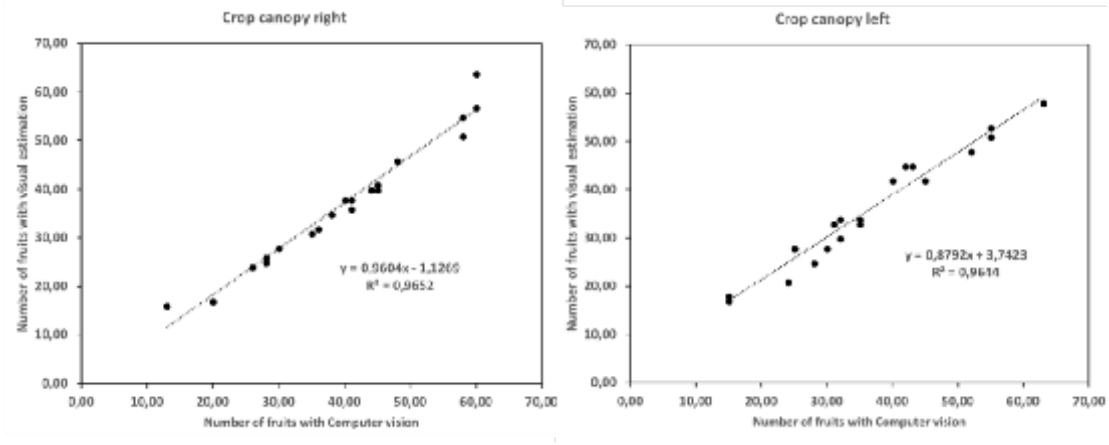


Figura 4. Número de frutas detectadas de forma automática en las imágenes del lado derecho e izquierdo del árbol, comparadas con el número de naranjas detectadas visualmente en las imágenes.

El valor del ajuste de los resultados obtenidos (R^2= 0.96) mejora ligeramente al obtenido en [13], en el que además se evaluó la bondad del modelo con una curva ROC. Nuestro flujo de trabajo con el modelo de Deep Learning ya entrenado, generó resultados de identificación de las naranjas con un coste de tiempo de computación por imagen de alrededor de 30 segundos. Este bajo coste computacional hará atractiva una posible aplicación en el plano práctico de este tipo de modelos.

3.2. Estimación del rendimiento

Al término de cada una de las campañas se cuantificó la producción total de la explotación, obteniendo un rendimiento medio de 217.000 kg. Durante estas campañas, las estimaciones medias del técnico profesional encargado del aforo fueron de 200.000 kg. La tabla 1 a continuación muestra el número de frutos detectados por el modelo en las imágenes de cada uno de los lados del árbol (detecciones en el lado derecho: N_D y lado izquierdo: N_I) y el rendimiento estimado por cada árbol en kg (Y_{est}).

El rendimiento total de la explotación estimado se puede calcular considerando el número de árboles de la parcela (1654) y el rendimiento medio obtenido por cada árbol (132.96 kg), resultando en un rendimiento total estimado de 219.909 kg. La comparación del rendimiento total estimado mediante el modelo generado con el rendimiento total obtenido como verdad-terreno, arroja un error del 1.54%. De la misma forma, la comparación de la estimación realizada por el técnico aforador con el rendimiento final obtenido genera un error del 7.83%. Sin duda esto conlleva una mejora en la estimación, reduciendo la incertidumbre del aforo y permitiendo automatizar el conteo de frutos de forma rápida, repetible y elativamente asequible.

Tabla 1. Comparación de resultados obtenidos tras la cosecha de forma manual y por el modelo generado. YO = Rendimiento obtenido en la cosecha de forma manual en kg/árbol, WO= Peso medio de los frutos obtenidos por árbol, NL= Número de frutos detectados por el modelo en las imágenes del lado izquierdo, NR= Número de frutos detectados por el modelo en las imágenes del lado derecho de cada árbol, Yest = Rendimiento estimado basado en el número de frutos detectados por el modelo en cada árbol calculado en kg/árbol.

Árbol	Yo (kg/árbol)	WO (kg/fruto)	NL	NR	Yest (kg/árbol)
1	187.00	0.55	45	42	154.80
2	145.80	0.45	40	42	144.48
3	199.10	0.45	52	48	172.00
4	120.00	0.43	32	34	123.84
5	139.10	0.49	32	30	120.40
6	162.80	0.27	63	58	208.12
7	122.10	0.24	55	53	197.80
8	123.20	0.25	55	51	197.80
9	133.50	0.45	35	34	130.72
10	139.30	0.50	31	33	123.84
11	116.30	0.64	25	28	77.40
12	137.40	0.49	43	45	122.12
13	126.30	0.48	35	33	108.36
14	132.40	0.30	55	51	194.36
15	80.60	0.29	30	28	111.80
16	112.80	0.58	24	21	86.00
17	146.40	0.58	28	25	110.08
18	85.70	0.72	15	17	48.16
19	145.20	0.28	42	45	149.64
20	110.10	0.27	15	18	77.40
Media	133.26	0.43	37.60	39.70	132.96

4. Conclusiones

Los resultados de este trabajo sobre la estimación del aforo mediante un modelo basado en redes neuronales e imágenes a partir de drones fueron prometedores. Sin embargo, se pone de manifiesto que las principales limitaciones en estas detecciones automáticas de frutos son la capacidad de cómputo, la dificultad para discernir entre frutos con una gran casuística (oclusiones, sombras, frutos no maduros) y la dificultad en el desarrollo de modelos complejos que permitan afinar en mayor medida los resultados obtenidos. El modelo generado en las sucesivas campañas tratará de integrar estas frutas ocluidas o no maduras como parámetros adicionales para mejorar la detección. La estimación del rendimiento del modelo fue más cercana al rendimiento real que las estimaciones visuales realizadas por un técnico profesional. Estos resultados son prometedores y nos hacen ser optimistas sobre la posibilidad de desarrollar un modelo más preciso para estimar el rendimiento en explotaciones comerciales de cítricos de manera robusta y fiable.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto *DronFruit* (Referencia: GOP21-SE-16-0048) financiado por la Junta de Andalucía. Los autores agradecen al técnico de DronSAP, Pablo Agüera Requena la gran ayuda prestada en el desarrollo del trabajo. Los autores también quieren agradecer el contrato Torres Quevedo (PTQ-17-09506) concedido a JMG y a la Beca de investigación predoctoral para el desarrollo del programa de I+D+i de la Universidad de Sevilla (IV.3 2017).

Referencias

1. Cardeñosa, V., Medrano, E., Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M. C., Cuevas, F., Pradas, I., & Moreno-Rojas, J. M.; Effects of salinity and nitrogen supply on the quality and health-related compounds of strawberry fruits (Fragaria × ananassa cv. Primoris); Journal of the Science of Food and Agriculture; 2015; 95(14), 2924–2930.
2. Torregrosa Mira, A.; Albert Gil, FE.; Aleixos Borrás, MN.; Ortiz Sánchez, MC.; Blasco Ivars, J. Analysis of the detachment of citrus fruits by vibration using artificial vision. Biosystems Engineering, 2014, 119:1-12
3. Fonfría, M.; Citricultura; Mundi Prensa Libros S.A, Ed; 2012; Madrid.
4. Lado, J., Rodrigo, M. J., & Zacarías, L.; Maturity indicators and citrus fruit quality. Stewart Postharvest Review; 2014; 10(2).
5. Chinchuluun, R., Lee, W. S., Burks, T. F., & Florida State Horticultural, S.; Machine vision-based citrus yield mapping system; Proceedings of the 119th Annual Meeting of the Florida State Horticultural Society; 2006; 119, 142–147.
6. Srivastava, A.K., Huchche, A.D., Ram,L., Singh, S.; Yield prediction in intercropped versus monocropped citrus orchards; Scientia Horticulturae; 2007; Volume 114, Issue 1, 67-70
7. Apolo-Apolo, O. E., Martínez-Guanter, J., Egea, G., Pérez-Ruiz, M.; UAV and Machine Learning Techniques Applied to Yield Estimation of Orange Trees, Proceedings of the 2018 European Agricultural Engineering Conference Wageningen, The Netherlands, 2018.
8. Teixidó, M., Font, D., Pallejà, T., Tresanchez, M., Nogués, M., Palacín, J.; Definition of linear color models in the RGB vector color space to detect red peaches in orchard images taken under natural illumination; Sensors; 2012; 12, 7701–7718.
9. Linker, R.; Cohen, O.; Naor, A.; Determination of the number of green apples in RGB images recorded in orchards; Computers and Electronics in Agriculture; 2012; 81, 45-57
10. Hannan, M.W.; Burks, T.F.; Bulanon, D.M.; A Machine Vision Algorithm Combining Adaptive Segmentation and Shape Analysis for Orange Fruit Detection. Agric. Eng Int. CIGR J., XI; 2009; 1281.
11. Kurtulmus, F.; Lee, W.S.; Vardar, A. Green citrus detection using "eigenfruit", color and circular Gabor texture features under natural outdoor conditions. Computers and Electronics in Agriculture 2011; 78 (2), 140–149
12. Yamamoto, K., Guo, W., Yoshioka, Y., & Ninomiya, S.; On plant detection of intact tomato fruits using image analysis and machine learning methods. Sensors, 2014; 14(7), 12191-12206.
13. Chen, S.W., Shivakumar, S.S., Dcunha, S., Das, J., Okon, E., Qu,C., Taylor, C.J., Kumar,V.; IEEE Robotics and Automation Letters; 2017; Vol 2, No. 2. 781-788
14. Martínez, J., Egea, G., Agüera, J., & Pérez-Ruiz, M. A cost-effective canopy temperature measurement system for precision agriculture: a case study on sugar beet. Precision Agriculture, 2017; 18(1), 95–110
15. Martinez-Guanter, J., Agüera, P., Agüera, J., Pérez-Ruiz, M.; Spray and economics assessment of a UAV-based ultra-low-volume application in olive and citrus orchards, Precision Agriculture, 2019, pp 1-18.
16. Yin, X., Lan, Y., Wen, S., Zhang, J., & Wu, S. Natural UAV tele-operation for agricultural application by using Kinect sensor. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(4), 173–178.
17. Bradski, G. The OpenCV Library. Dr. Dobb's Journal of Software Tools, 2000.
18. Chollet, F. Keras. 2015
19. Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., et al. Tensorflow: A system for large-scale machine learning. 12th Symposium on Operating Systems Design 2016 (pp. 265-283).
20. Murata, T., Onuki, Y., Nukui, S., Inagi, S., Qiu, X., Watanabe, M., Okamoto, H., Predicting Relations Between RDF Entities by Deep Neural Network. The Semantic Web 2017
21. Rosebrock, A., Deep Learning for Computer Vision with Python, Practitioner Bundle, 2017. Pyimagesearch.com.
22. Tzutalin. LabelImg. 2015 https://github.com/tzutalin/labelImg

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Estudio de la evolución de la calidad de granada 'Mollar de Elche' durante su maduración usando sistemas de visión artificial

S. Munera[1], F. Hernández[2], N. Aleixos[3], S. Cubero[1], J. Blasco[1]*

[1] Centro de Agroingeniería, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Carretera CV-315, Km 10.7, 46113 Moncada, España; blasco_josiva@gva.es
[2] Grupo de Fruticultura y Técnicas de Producción. Departamento de Producción Vegetal y Microbiología, Universidad Miguel Hernández de Elche, Carretera de Beniel, Km 3.2, 03312 Orihuela, España
[3] Departamento de Ingeniería Gráfica, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España.

Resumen: En el presente trabajo se ha estudiado la capacidad de la visión artificial para monitorear la evolución de diferentes propiedades fisicoquímicas de la granada 'Mollar de Elche' durante su madurez. Para ello se han obtenido imágenes hiperespectrales y RGB de 30 frutas intactas y sus arilos durante siete recolecciones consecutivas cada 2 semanas (210 frutos en total). En cada fruta se han medido las propiedades de peso, diámetro, sólidos solubles totales (SST), acidez, la actividad antioxidante y el contenido en fenoles totales. Posteriormente, la información espectral (450-1050 nm) y de color (L*, a* y b*) obtenida de las imágenes de las frutas intactas y arilos se ha correlacionado con las propiedades fisicoquímicas mediante el método multivariante de mínimos cuadrados parciales. En el caso de fruta intacta, ambos métodos de visión obtuvieron resultados de predicción similares en todos los parámetros excepto en la actividad antioxidante, donde la imagen hiperespectral fue más precisa. En general, los parámetros predichos por estas técnicas que mayor precisión obtuvieron (R2 = > 0,75; RPD = > 2) fueron el índice de madurez y BrimA, los parámetros de color de los arilos L* y a*, la actividad antioxidante y los fenoles totales. Sin embargo, en el caso de los arilos, la imagen hiperespectral predijo la mayoría de parámetros de manera más precisa (R2 = > 0,75; RPD = > 2) que la imagen RGB, la cual no obtuvo valores de R2 = > 0,75 y RPD = > 2 en ningún parámetro. Estos resultados indican el gran potencial de la visión artificial, especialmente la imagen hiperespectral, para evaluar las propiedades de calidad de granadas intactas y de los arilos, ofreciendo la posibilidad de determinar el procesamiento al que irán destinadas estas frutas de manera no destructiva y rápida.

Palabras clave: Punica granatum, madurez, no destructivo, imagen hiperespectral, RGB

1. Introducción

Hoy en día, la granada (*Punica granatum* L.) ha ganado gran importancia porque es una fuente de azúcares, ácidos orgánicos y compuestos bioactivos [1] que reportan beneficios positivos para la salud [2].

La calidad comercial de esta fruta se basa en atributos externos como el tamaño, la forma y el color [3]. Sin embargo, el color de la corteza no siempre indica su idoneidad para el consumo. Se deben considerar también los atributos internos, como los sólidos solubles totales y la acidez, que deben satisfacer los requisitos del mercado [4,3]. Dado que la granada es una fruta no

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3419

climatérica, es muy importante que las frutas se cosechen en su etapa de maduración adecuada para obtener su mayor potencial con respecto a las propiedades nutricionales, funcionales y sensoriales [5].

Hoy en día, el control de calidad de la granada todavía se realiza por métodos tradicionales. Esto se debe principalmente a que tanto la corteza como los arilos son delicados y pueden dañarse por las operaciones mecánicas, pero también porque su producción es relativamente baja y no hay máquinas adaptadas. Sin embargo, se está empezando a realizar un esfuerzo científico para crear nuevas técnicas no destructivas basadas en imagen con este objetivo, como los rayos X para cuantificar el volumen de las diferentes partes de esta fruta [6, 7] y para detectar la enfermedad del corazón negro y la carpocapsa [8]. La resonancia magnética nuclear se ha utilizado para determinar el efecto de los cambios fisiológicos inducidos por *Alternaria* y *Aspergillus*, y para detectar el fenómeno de corazón negro [9]. También se ha desarrollado un sistema de visión artificial para clasificar los arilos en diferentes categorías según el color (arilos buenos, inmaduros o podridos) en tiempo real [10]. Este sistema también podía separar los arilos de otros materiales, como trozos de cáscara o membranas internas.

La imagen hiperespectral, que integra información tanto espectral como espacial [11], se ha aplicado como una poderosa herramienta de procesamiento analítico para una inspección rápida y no destructiva de los atributos de calidad internos y externos en frutas con corteza [12] como la naranja [13], la lima [14] o el plátano [15]. Sin embargo, el uso de la imagen multiespectral sólo ha sido investigado para determinar la textura y los sólidos solubles totales (SST) de granada intactas [16].

De acuerdo con esto, el objetivo del presente estudio ha sido evaluar la capacidad de ambas técnicas de visión artificial, color e imágenes hiperespectrales, para predecir las propiedades fisicoquímicas y la etapa de madurez de los frutos de granada 'Mollar de Elche' utilizando tanto la información de las frutas intactas como de los arilos.

2. Materiales y métodos

2.1. Muestras

Para la realización de este estudio se utilizaron un total de 210 granadas "Mollar de Elche" recolectadas en un huerto comercial ubicado en San Isidro (Alicante, España). Se realizaron siete recolecciones durante la temporada 2018, desde finales de julio (90 días después de la floración) hasta finales de octubre (180 días después de la floración) cuando las frutas estaban maduras. En cada recolección, se recolectaron al azar 30 frutos sin daños externos.

En todas ellas se limpiaron todas las frutas, se pesaron y se les midió el diámetro ecuatorial. Luego, se capturaron imágenes de todas las frutas como se explica en la siguiente sección. Después, los arilos se extrajeron cuidadosamente a mano. Se seleccionaron al azar un total de 20 arilos por fruta y se eliminó la humedad de la superficie utilizando papel, para posteriormente adquirir imágenes de los mismos. El resto de los arilos se exprimieron y el zumo resultante se usó para analizar las propiedades químicas de cada fruta.

2.2. Adquisición y procesado de las imágenes de color e hiperespectrales

Las imágenes de color de las frutas intactas y arilos se tomaron con una cámara réflex (Canon EOS 550D, Canon Inc. Japón), con un tamaño de 2592 x 1944 pixeles. A partir de estas imágenes se obtuvieron los valores medios de las coordenadas de color en el espacio CIELAB L^*, a^*, b^*. Para esto se utilizó un software de análisis de imagen desarrollado en el IVIA (FoodImage-Inspector v4.0, disponible en http//www.cofilab.com).

Las imágenes hiperespectrales de las frutas intactas y los arilos se obtuvieron por medio del uso de una cámara industrial (CoolSNAP ES, Photometrics, AZ, USA) acoplada a un filtro sintonizable de cristal líquido (Varispec NIR-07, Cambridge Research & Instrumentation, Inc.,

MA, USA), capaz de adquirir imágenes entre 720 nm y 1050 nm. El sistema se configuró para capturar imágenes de 1392 x 1040 píxeles con una resolución espacial de 0,14 mm/pixel cada 10 nm. La iluminación consistió en 12 halógenos que iluminaron la escena indirectamente por medio de reflexión difusa, en una cúpula de aluminio donde las muestras se introducían manualmente. Una vez capturadas las imágenes, se obtuvo el espectro promedio de todos los píxeles de la fruta intacta y arilos utilizando el programa HYPER-Tools [17] para MATLAB (The MathWorks, Inc. MA, EE. UU.).

2.3. Análisis de referencia

La medición de los SST se realizó por medio del uso de un refractómetro digital (Atago N-20, Atago, Bellevue, Wash., U.S.A.) y la acidez se midió usando un potenciómetro ácido-base (Titrino plus 877, Metrohm AG, Herisau, Switzerland). Los resultaron se expresaron como % de SST y g ácido cítico por L de zumo, respectivamente. Con estos parámetros se obtuvo el índice de madurez (SST/acidez) y el índice BrimA (SST-k*acidez; k=2).

El contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) se determinó utilizando el método de Folin-Ciocalteu [18]. El resultado fue expresado en g de equivalentes de ácido gálico por litro de zumo (g/L).

El análisis de la actividad antioxidante (AA) se realizó por medio de la determinación de la capacidad de captación de radicales libres usando el método del radical DPPH [19]. Los resultados se expresaron como mmol equivalentes de Trolox por litro (mmol Trolox/L).

Finalmente se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) y un test de Tukey para determinar la existencia de diferencias estadísticas entre las propiedades fisicoquímicas con respecto a las diferentes recolecciones.

2.4. Análisis multivariante

Para predecir las propiedades de las frutas se utilizó la regresión basada en mínimos cuadrados parciales (PLS-R). Para la construcción de los modelos se usaron dos tercios de la información de las muestras y el tercio restante se utilizó para validarlo. Los resultados de los modelos fueron expresados en base al coeficiente de determinación (R^2), al error cuadrático medio (RMSE) y a la desviación predictiva residual (RPD), definida como la relación entre la desviación estándar de los datos de referencia y RMSE de la validación externa, y que indica el poder de predicción del modelo [20].

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de referencia

La Tabla 1 resume los resultados obtenidos del análisis de las propiedades fisicoquímicas medidas en las muestras de fruta intacta y en el zumo de las frutas en cada recolección.

El peso aumentó de 237 g en la primera recolección a 456 g en la última, mientras que el diámetro ecuatorial aumentó de 78,9 mm a 95,6 mm. Según las especificaciones de la Denominación de Origen Protegida “Granada Mollar de Elche” [21], deben excluirse las frutas que pesen menos de 125 gramos.

El contenido en SST aumentó de 12,0 % en la primera recolección a 16,6 % en la última, siendo los valores de las últimas tres recolecciones no estadísticamente diferentes. Por el contrario, la tendencia de la acidez fue una disminución durante la madurez. En general, los valores de acidez fueron muy similares, pero entre la primera y la última recolección los valores obtenidos fueron diferentes, de 2,6 a 2,0 g/L. El valor mínimo establecido de acidez en las frutas maduras de esta variedad es de 1,8 g/L y el máximo de 2,4 g/L [21].

El índice de madurez se usa comúnmente para definir el "sabor" de la fruta de la granada durante su desarrollo [22]. Este parámetro aumentó de 4,6 a 8,4, no siendo estadísticamente diferente las últimas dos recolecciones. El valor mínimo del índice de madurez en el fruto maduro de esta variedad debe ser 6,0 y el máximo 9,0 (http://www.agroambient.gva.es). Aunque el índice de madurez se usa comúnmente, éste no siempre se correlaciona bien con la percepción de madurez. El índice BrimA [23] fue propuesto para ser usado en lugar del ídice de madurez debido a que los azúcares y ácidos tienen el efecto opuesto sobre el sabor, y la lengua es más sensible a la acidez. Los valores de BrimA aumentaron de 6,7 a 12,5, no habiendo diferencias estadísticas entre las dos últimas recolecciones.

El contenido de los CPT medido en el zumo de la fruta disminuyó de 2,7 a 1,2 g/L. Esta disminución fue más acentuada en la cuarta recolección, siendo la fruta inmadura más rica en estos compuestos. Estudios previos [24] también informaron sobre la reducción de los CPT en un 54,5 % durante la etapa inicial del desarrollo de la fruta y la disminución continuó hasta que la fruta se consideró completamente madura. Algo similar sucedió con la AA que está relacionada con el nivel de CPT. La AA disminuyó de 8,0 a 2,5 mmol Trolox/L, siendo esta disminución más acentuada en la cuarta recolección. Sin embargo, estos resultados son algo diferentes a los obtenidos en otro estudio [5], en los que se presentaron valores de CPT de 3,7, 3,3 y 2,7 g/L y de AA de of 7,0, 6,5 and 6,6 mmol Trolox/L. Otros autores [25] señalaron que la variación en la concentración de estos parámetros puede depender en gran medida de factores como el área de crecimiento, las condiciones climáticas o la influencia de técnicas de procesamiento como el aclarado.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de las granadas en cada recolección.

Recolec	Peso (g)	Diámetro (mm)	SST (%)	Acidez (g/L)	Índice de madurez	BrimA	CFT (g/L)	AA (mmol Trolox/L
1	$237^{f} \pm 25$	$78,9^{d} \pm 3,1$	$12,0^{e} \pm 1,4$	$2,6^{a} \pm 0,3$	$4,6^{f} \pm 0,3$	$6,7^{e} \pm 1,0$	$2,7^{a} \pm 0,3$	$8,1^{a} \pm 0,2$
2	$274^{e} \pm 33$	$82,9^{c} \pm 3,8$	$13,7^{d} \pm 0,9$	$2,5^{ab} \pm 0,1$	$5,5^{e} \pm 0,4$	$8,7^{d} \pm 0,8$	$2,4^{b} \pm 0,2$	$6,8^{b} \pm 0,4$
3	$305^{d} \pm 45$	$84,5^{c} \pm 3,8$	$14,8^{c} \pm 0,6$	$2,4^{b} \pm 0,2$	$6,2^{d} \pm 0,5$	$10,0^{c} \pm 0,6$	$2,4^{b} \pm 0,2$	$5,1^{c} \pm 0,7$
4	$372^{c} \pm 40$	$90,8^{b} \pm 4,1$	$15,7^{b} \pm 0,8$	$2,2^{c} \pm 0,3$	$7,3^{c} \pm 0,8$	$11,4^{b} \pm 0,8$	$1,2^{c} \pm 0,1$	$3,3^{d} \pm 0,1$
5	$423^{b} \pm 64$	$94,8^{a} \pm 3,9$	$16,4^{a} \pm 0,8$	$2,1^{cd} \pm 0,2$	$7,9^{b} \pm 0,5$	$12,2^{a} \pm 0,6$	$1,2^{c} \pm 0,1$	$3,1^{de} \pm 0,2$
6	$414^{b} \pm 59$	$93,3^{ab} \pm 4,1$	$16,2^{a} \pm 0,8$	$2,0^{d} \pm 0,3$	$8,4^{a} \pm 1,0$	$12,3^{a} \pm 0,7$	$1,2^{c} \pm 0,1$	$2,8^{e} \pm 0,2$
7	$456^{a} \pm 66$	$95,6^{a} \pm 4,1$	$16,6^{a} \pm 0,8$	$2,0^{d} \pm 0,2$	$8,3^{a} \pm 0,6$	$12,6^{a} \pm 0,6$	$1,2^{c} \pm 0,1$	$2,5^{f} \pm 0,2$

Valor medio ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna significa que existe diferencia entre las recolecciones (p-valor < 0,05). SST = sólidos solubles totales

3.2. Análisis espectral y de color

El valor medio de cada coordenada de color de la fruta intacta y los arilos en cada recolección se presenta en la Tabla 2. En la piel, solo la coordenada a* (que va de verde a rojo) aumentó durante la madurez, siendo todos los valores estadísticamente diferentes salvo en la recolección 1 y 2. Por lo tanto, el color de la corteza evolucionó de verde a rojizo debido principalmente a la disminución del contenido en clorofilas y carotenoides y al aumento de la síntesis de pigmentos como las antocianinas [26] (Figura 1). En el caso de los arilos, las tres coordenadas evolucionaron durante la madurez. L* disminuyó especialmente a partir de la tercera recolección, b* (que va de azul a amarillo) a partir de la quinta recolección, mientras que

a* aumentó a partir de la tercera recolección. Por lo tanto, el color de los arilos evolucionó de arilos blancos inmaduros a rojizos debido a la síntesis de antocianinas [27] (Figura 1).

Tabla 2. Color de la fruta intacta y los arilos en cada recolección.

	Fruta intacta			Arilos		
Recolección	**L***	**a***	**b***	**L***	**a***	**b***
1	47,0^{c} ± 4,3	-9,6^{f} ± 2,5	24,3^{d} ± 2,0	59,5 ± 1,7 ^{a}	-5,4 ± 1,2 ^{e}	14,1 ± 0,6 ^{a}
2	52,9^{b} ± 3,4	-7,7^{f} ± 2,6	27,7^{b} ± 1,8	59,5 ± 1,5 ^{a}	-5,0 ± 0,9 ^{e}	14,1 ± 1,1 ^{a}
3	55,2^{b} ± 5,4	-2,8^{e} ± 2,7	29,3^{ab} ± 1,3	58,3 ± 2,2 ^{ab}	-3,4 ± 1,5 ^{e}	13,9 ± 1,4 ^{a}
4	60,5 ^{a} ± 2,7	3,6^{d} ± 3,5	30,3^{a} ± 3,4	56,4 ± 2,8 ^{b}	0,3 ± 2,4 ^{d}	13,1 ± 1,6 ^{a}
5	60,7 ^{a} ± 2,4	9,0^{c} ± 3,5	29,7^{ab} ± 1,3	51,8 ± 3,4 ^{c}	4,4 ± 3,5 ^{c}	13,3 ± 1,2 ^{a}
6	59,4 ^{a} ± 3,7	19,1^{b} ± 5,5	25,4^{c} ± 5,5	43,4 ± 4,9 ^{d}	14,9 ± 4,6 ^{b}	11,1 ± 1,1 ^{b}
7	49.1 ^{c} ± 4.5	22.6^{a} ± 6.8	24.6^{c} ± 1.8	26.9 ± 4.5 ^{e}	23.4 ± 2.5 ^{a}	9.2 ± 1.6 ^{c}

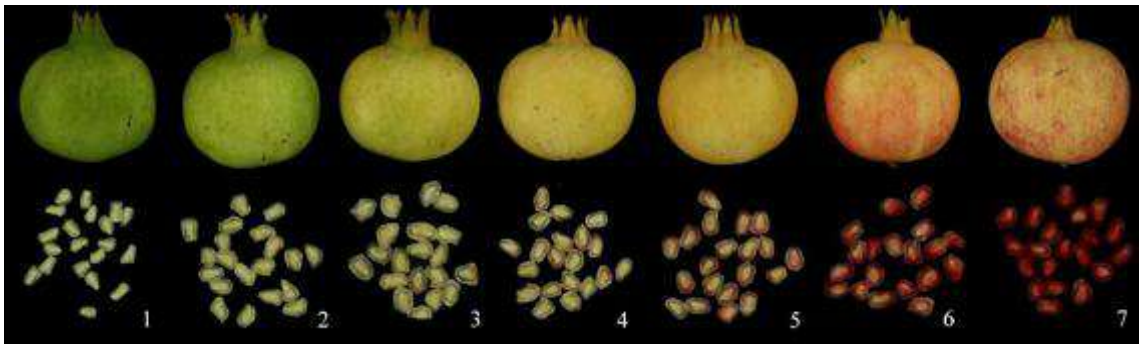


Figura 1. Apariencia de las frutas intactas y arilos en cada recolección.

Los espectros medios de las frutas intactas y los arilos en cada recolección se presentan en la Figura 2. Los espectros mostraron tendencias similares para las frutas intactas y los arilos, pero la intensidad en la reflectancia es diferente en cada recolección. Esto significa que poseen consituyentes similares pero en diferente concentración. En el caso de las frutas intactas, estas diferencias en la intensidad de reflectancia se ubicaron alrededor de 720-750 nm cerca del pico de absorción de clorofila, 680 nm, y el valle presente en la región 960-990 nm, principalmente asignado a las bandas de absorción de agua. Este valle fue más pronunciado en la fruta más madura porque el contenido de agua aumenta en los tejidos durante el inicio de la maduración, debido a la rotura celular y al movimiento osmótico del agua [15].

En los espectros medios de los arilos, las diferencias fueron más acentuadas que en la frutas intactas. Estas se visualizaron principalmente entre 720-800 nm, un pico de alrededor de 920 nm y un valle entre 960 y 990 nm, asignados a ácidos, azúcares y absorción de agua [28]. Sin embargo, los espectros están dominados por el espectro exterior con bandas de armónicos de los enlaces OH a 760 nm y 970 nm y se necesitan sofisticadas técnicas estadísticas para extraer la información útil de estos espectros [29].

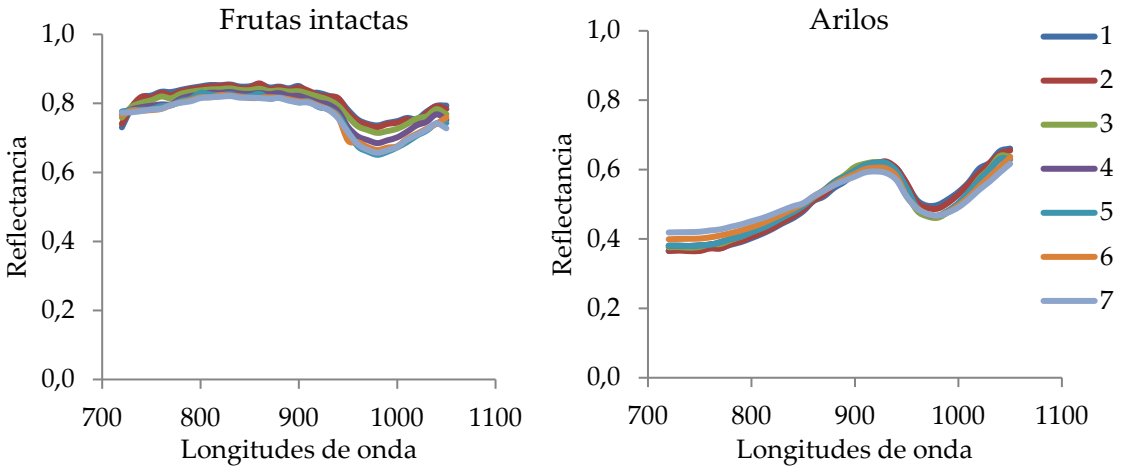


Figura 2. Espectro medio de las frutas intactas y los arilos en cada recolección.

3.3. Predicción de las propiedades fisicoquímicas

La tabla 3 muestra los resultados de la validación de los modelos para predecir las propiedades fisicoquímicas utilizando el color y el espectro de las frutas intactas y arilos.

El peso y el diámetro se predijeron utilizando solo la información de la fruta intacta. El R^2 de predicción utilizando el color fue de 0,62 y 0,64 con un RSME de 58,1 g y 4,49 mm, para frutas intactas y arilos respectivamente. Cuando estos parámetros se correlacionaron con los datos espectrales, el R^2 fue de 0,64 y 0,71 y el RSMEP fue de 54,2 g y 4,10 mm. Estos resultados concuerdan con los obtenidos previamente [30], donde se obtuvo un R^2 de 0,62 en el cultivar 'Wonderful' utilizando espectroscopia de reflectancia difusa.

Los valores de RPD obtenidos para la predicción del peso y el diámetro con datos de color fueron 1,6 para ambos parámetros, y el uso de datos espectrales fue 1,7 y 1,8, respectivamente. Aunque las imágenes hiperespectrales obtuvieron resultados más precisos los valores de RPD para ambas técnicas indicaron que los modelos solo pueden distinguir entre los valores más bajos y los más altos de los parámetros evaluados, pero esto no es suficiente y, por lo tanto, no se recomienda para una aplicación de control de calidad.

En cuanto a los SST y la acidez, el R^2 obtenido usando el color de las frutas intactas fue de 0,68 y 0,47 con un RSME de 0,94 % y 0,24 g/L. En el caso de los arilos el valor de R^2 obtenido fue de 0,44 y 0,37 con un RSME de 1,23 % y 0,26 g/L. Cuando los TSS y la acidez se correlacionaron con los datos espectrales de las frutas intactas, el R^2 fue de 0,71 y 0,46 y el RSME fue de 0,89 % y 0,24 g/L. Cuando se utilizó la información de arilos obtuvieron un R^2 de 0,77 y 0,46 y el RSME fue de 0,82 % y 0,24 g/L, respectivamente.

Otras técnicas no destructivas previamente probadas obtuvieron diferentes resultados en la predicción de estos parámetros en diferentes variedades de granada. Varios estudios [30, 31] utilizaron la espectroscopia para predecir los SST y la acidez de granadas 'Wonderful' utilizando la información de la fruta intacta obteniendo un R^2 de 0,78 y 0,77, respectivamente. Cuando usaron la información de los arilos obtuvieron un R^2 de 0,88 y 0,87. Utilizando un sistema multiespectral se obtuvo un R^2 de 0,94 [16]. Cuando se empleó la resonancia magnética nuclear para evaluar los SST y la acidez de granadas 'Wonderful' se obtuvo un R^2 de 0,12 y 0,54, respectivamente [9].

Los valores de RPD obtenidos para STT utilizando el color fueron 1,7 y 1,3, lo que indica un rendimiento justo del modelo utilizando la información de las frutas intactas, pero un rendimiento pobre del modelo utilizando la información proveniente de los arilos. Usando los datos espectrales, los valores fueron 1,8 y 2,0, lo que indica un buen rendimiento del modelo utilizando tanto la fruta intacta como los arilos. Por lo tanto, las predicciones cuantitativas son

posibles utilizando imágenes hiperespectrales en frutas intactas y arilos. Para la acidez, el valor de RPD obtenido utilizando la información conjunta de frutas intactas y arilos y ambas técnicas fue 1,4, que indican un modelo muy pobre.

Tabla 3. Resultados de la predicción de las propiedades fisicoquímicas en el set de validación externa de granadas 'Mollar de Elche' usando imágenes a color e hiperespectrales.

	Propiedad		Imagen color			Imagen hiperespectral		
			R^2	RMSE	RPD	R^2	RMSE	RPD
Fruta intacta	Peso		0,62	58,1	1,6	0,67	54,2	1,7
	Diámetro		0,64	4,49	1,6	0,71	4,10	1,8
	SST		0,68	0,94	1,7	0,71	0,89	1,8
	Acidex		0,47	0,24	1,4	0,46	0,24	1,4
	Índice madurez		0,78	0,70	2,1	0,71	0,81	1,8
	BrimA		0,81	0,92	2,2	0,85	0,79	2,6
	Color arilos	L*	0,77	5,47	2,1	0,68	6,45	1.8
		a*	0,85	4,05	2,6	0,75	5,15	2.0
		b*	0,49	1,44	1,4	0,45	1,50	1.3
	CFT		0,81	0,30	2,3	0,86	0,25	2,7
	AA		0,84	0,83	2,5	0,91	0,62	3,4
Arilos	SST		0,44	1,23	1,3	0,77	0,82	2,0
	Acidez		0,37	0,26	1,3	0,46	0,24	1,4
	Índice madurez		0,55	1,00	1,4	0,78	0,72	2,1
	BrimA		0,53	1,41	1,4	0,88	0,72	2,7
	CFT		0,57	0,45	1,4	0,87	0,25	2,7
	AA		0,61	1,28	1,6	0,92	0,57	3,6

SST= sólidos solubles totales; CFT= compuestos fenólicos totales; AA= actividad antioxidante; RMSE = error cuadrático medio; RPD = desviación predictiva residual.

La predicción del índice de madurez y el BrimA utilizando el color de las frutas intactas obtuvo valores de R^2 de 0,78 y 0,81 y el RSME fue de 0,70 y 0,92, respectivamente. Utilizando los datos de color de los arilos los valores de R^2 fueron de 0,55 y 0,53 y el RSME fue de 1,00 y 1,41. En el caso de los datos espectrales, el R^2 del índice de madurez y el BrimA utilizando la información de la fruta intacta fueron de 0,71 y 0,85 y el RSME de 0,81 y 0,79. Con la información de los arilos, los de R^2 fueron de 0,78 y 0,88 y el RSME fue de 0,72 y 0,72. Resultados similares fueron obtenidos por en granadas intactas 'Wonderful', R^2 de 0,78 y 0,79, y en arilos, R^2 de 0,82 y 0,83 usando espectroscopia [30, 31]. Utilizando resonancia magnética nuclear para evaluar el índice de madurez en granadas 'Wonderful' se obtuvo un R^2 de 0,63 [9].

Los valores de RPD para los modelos del índice de madurez y del BrimA obtenidos usando el color de las frutas intactas fueron 2,1 y 2,2, lo que indica un buen rendimiento del modelo. Sin embargo, utilizando el color de los arilos, el valor de RPD de ambos índices fue de 1,4, lo que indica un modelo deficiente. En cuanto a los datos espectrales, los valores de RPD que usaron la información de la fruta intacta fueron 1,8 y 2,6, lo que indica un rendimiento justo del modelo para el índice de madurez y una excelente precisión en la predicción para BrimA. El valor obtenido utilizando la información espectral de los arilos fue 2,1 para la predicción del índice de madurez, lo que significa que es posible la predicción de este índice y 2,7 para BrimA, lo que indica un excelente rendimiento del modelo.

Los modelos calibrados utilizando los datos de color mostraron un potencial limitado de predicción de los SST, el índice de madurez y el BrimA cuando se usó la información de los arilos. Estos resultados demostraron un mayor potencial de las imágenes hiperespectrales en comparación con las imágenes de color convencionales para predecir las propiedades de la granada 'Mollar de Elche' usando la información de la fruta intacta y los arilos.

Con respecto al color de los arilos, su predicción se llevó a cabo usando solo la información de la fruta intacta. Los tres modelos que utilizan datos de color obtuvieron valores de R^2 de 0,77, 0,85 y 0,49 y de RSME de 5,47, 4,05 y 1,44, respectivamente. En el caso de los datos espectrales, los valores de R^2 fueron 0,68, 0,75 y 0,45 y de RSMEP fueron 6,45, 5,15 y 1,50.

Los valores de RPD obtenidos para L*, 2,6 y 2,0, indicaron un excelente rendimiento del modelo utilizando datos de color y un buen rendimiento del modelo utilizando datos espectrales. Los valores obtenidos para a*, 2,1 y 1,8, indicaron un muy buen rendimiento del modelo utilizando datos de color y un buen rendimiento del modelo utilizando datos espectrales. En el caso de b *, ambas técnicas presentaron un RPD de 1,4 y 1,3, lo que significa un rendimiento deficiente del modelo. La espectroscopia [30] predijo la coordenada a* de los arilos de la variedad 'Wonderful' y obtuvo un resultado similar a la imagen hiperespectral, R^2 0,71. Estos resultados mostraron que la información de color de la corteza obtuvo una mejor correlación con L* y a* que los datos espectrales en la región NIR.

En el caso del contenido en CFT, los modelos que utilizan los datos de color de la fruta intacta y los arilos obtuvieron valores de R^2 de 0,81 y 0,57 y el RSME fue de 0,30 y 0,45 g/L. Cuando se usaron los datos espectrales, se obtuvieron valores de R^2 de 0,86 y 0,87 y de RSME de 0,25 y 0.25 g/L. Mediante el uso de espectroscopia [30, 31] también se predijo CFT en frutas intactas y arilos de granada y se obtuvieron resultados similares a los obtenidos usando imágenes hiperespectrales, un R^2 de 0,83 usando la información de las frutas intactas y 0,87 usando la información de los arilos.

Los valores de RPD obtenidos para los datos de color fueron 2,3 y 1,4, lo que indica un buen rendimiento del modelo con la información de la fruta intacta, pero un rendimiento pobre del modelo con la información de los arilos. Por el contrario, los modelos que usaron los datos espectrales obtuvieron un valor de 2,7, lo que indica un excelente rendimiento utilizando la información de las frutas intactas y los arilos conjuntamente.

En cuanto a la AA, cuando se usaron los datos espectrales de la fruta intacta, el modelo obtuvo un R^2 de 0,91 y el RSME fue 0,62 mmol Trolox/L. Utilizando la información de los arilos, el R^2 fue de 0,92 y el RMSE fue de 0,57 mmol de Trolox/L. Los valores de RPD obtenidos para el método DPPH fueron 2,5 y 1,6 para los datos de color, lo que indica un muy buen rendimiento del modelo utilizando la información de la fruta intacta y el rendimiento del modelo justo utilizando la información de los arilos. Utilizando los datos espectrales, los valores de RPD fueron 3,4 y 3,6, lo que indica un excelente rendimiento del modelo utilizando los datos espectrales de las frutas intactas y los arilos.

Al igual que en el caso de TSS, MI, BrimA y TPC, los modelos PLS-R calibrados utilizando los datos de color mostraron un potencial limitado de predicción de CFT y AA cuando se usó la información de los arilos.

4. Conclusiones

En este trabajo, se ha evaluado el potencial de dos sistemas de visión artificial, imágenes a color e hiperespectrales, para evaluar la calidad de la granada 'Mollar de Elche' durante su madurez.

Se crearon modelos PLS-R para predecir las propiedades fisicoquímicas de la fruta intacta y los arilos utilizando el color y los datos espectrales (720 - 1050 mn). Los parámetros fisicoquímicos mejor predichos (R2 = > 0,75; RPD = > 2) utilizando imágenes de color fueron el índice de madurez y BrimA, las coordenadas de color L* y a*, los CFT y la AA. Todos ellos

utilizando la información de la fruta intacta. Cuando se usaron imágenes hiperespectrales en la fruta intacta, los parámetros fisicoquímicos mejor predichos (R2 = > 0,75; RPD = > 2) fueron BrimA, la coordenada de color a*, los CFT y la AA. Para los arilos, todos los parámetros fisicoquímicos estudiados se predijeron correctamente (R2 = > 0,75; RPD = > 2) excepto la acidez.

Estos resultados demuestran que las imágenes a color se podrían usar como una potencial herramienta para monitorear algunas propiedades físico-químicas de las frutas intactas. Sin embargo, las imágenes hiperespectrales han demostrado un mayor poder de predicción tanto en frutos intactos como en arilos.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por fondos del INIA y FEDER a través del proyecto RTA2015-00078-00-00. Sandra Munera agradece al INIA el contrato FPI-INIA núm. 43 (CPR2014-0082), parcialmente financiado por fondos de la Unión Europea FSE.

Referencias

1. Opara L.U., Al-Ani M.R., Al-Shuaibi Y.S. Physico-chemical properties, vitamin C content, and antimicrobial properties of pomegranate fruit (*Punica granatum* L.). Food Bioprocess and Technology. 2009, 2, 315–321.
2. Viuda-Martos M., Fernández-López J., Pérez-Álvarez J.A. Pomegranate and its many functional components as related to human health: a review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2010, 9, 635–654.
3. Boussa F., Zaouay F., Burlo-Carbonell F., Nuncio-Jáuregui N., Gmati M., El Arbi B., Melgarejo P., Hernández F., Mars M. Combined effects of cropping system and harvest date determine quality and nutritional value of pomegranate fruits (*Punica granatum* L. cv. Gabsi). Scientia Horticulturae. 2019, 249, 419-431.
4. Fawole O.A., Opara U.L. Developmental changes in maturity indices of pomegranate fruit: A descriptive review. Scientia Horticulturae. 2013, 159, 152-161.
5. Nuncio-Jáuregui N., Calín-Sánchez A., Carbonell-Barrachina A., Hernández F. Changes in quality parameters, proline, antioxidant activity and color of pomegranate (*Punica granatum* L.) as affected by fruit position within tree, cultivar and ripening stage. Scientia Horticulturae. 2014, 165, 181-189.
6. Salmanizadeh F., Nassiri S.M., Jafari A., Bagheri M.H. Volume estimation of two local pomegranate fruit (*Punica granatum* L.) cultivars and their components using non-destructive X-ray computed tomography technique. International Journal of Food Properties. 2014, 18, 439-455.
7. Arendse E., Fawole O.A., Magwaza L.S., Opara, U.L. Non-destructive characterization and volume estimation of pomegranate fruit external and internal morphological fractions using X-ray computed tomography. Journal of Food Engineering. 2016, 186, 42-49.
8. Arendse E., Fawole O.A., Magwaza L.S., Opara U.L. Estimation of the density of pomegranate fruit and their fractions using X-ray computed tomography calibrated with polymeric materials. Biosystems Engineering. 2016, 148, 148-156
9. Zhang L., McCarthy M.J. Black heart characterization and detection in pomegranate using NMR relaxometry and MR imaging. Postharvest Biology and Technology. 2012, 67, 96–101.
10. Blasco J., Cubero S., Gómez-Sanchís J., Mira P., Moltó E. Development of a machine for the automatic sorting of pomegranate (*Punica granatum*) arils based on computer vision. Journal of Food Engineering. 2009, 90, 27–34.
11. Lorente D., Aleixos N., Gómez-Sanchis J., Cubero S., García-Navarrete O.L., Blasco, J. Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment. Food Bioprocess Technology. 2012, 5, 1121–1142.
12. Arendse E., Fawole O.A., Magwaza L.S., Opara U.L. Non-destructive prediction of internal and external quality attributes of fruit with thick rind: A review. Journal of Food Engineering. 2018, 207, 11-23.

13. Liu M., Hu S., Lin H., Guo E. Hyperspectral laser-induced fluorescence imaging for non-destructive assessing soluble solids content of orange. IFIP. 2008, 258, 51-59.
14. Teerachaichayut S., Ho H.T. Non-destructive prediction of total soluble solids, titratable acidity and maturity index of limes by near infrared hyperspectral imaging. Postharvest Biology and Technology. 2017, 133, 20-25.
15. Rajkumar P., Wang N., EImasry G., Raghavan G.S.V., Gariepy Y. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging. Journal of Food Engineering. 2012. 108, 194-200.
16. Khodabakhshian R., Emadi B., Khojastehpour M., Golzarian M.R. Determining quality and maturity of pomegranates using multispectral imaging. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 2017, 16, 322–331.
17. Mobaraki N., Amigo J.M. HYPER-Tools. A graphical user-friendly interface for hyperspectral image analysis. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2018, 172, 174-187.
18. Singleton V.L., Orthofer R., Lamuela-Raventos R.M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. Methods in Enzymology. 1999, 299, 152–178.
19. Brand-Williams W., Cuvelier M.E., Berset C. Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT - Food Science and Technology. 1995, 28, 25–30.
20. Williams P.C. Variables affecting near-infrared reflectance spectroscopic analysis. In: Williams, P., Norris, K. (Eds.), Near-infrared Technology in the Agricultural and Food Industries. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, 1987, pp. 143-166.
21. Generalitat Valenciana. Conselleria de Agricultura, medio ambiente, cambio climático y desarrollo rural. Pliego de condiciones de la denominación de origen protegida "Granada Mollar de Elche" / "Granada de Elche". http://www.agroambient.gva.es/ - Accesed 14.07.19
22. Shwartz E., Glazer I., Bar-Ya'akov I., Matityahu I., Bar-Ilan I., Holland D., Amir R. Changes in chemical constituents during the maturation and ripening of two commercially important pomegranate accessions. Food Chemistry. 2009, 115, 965-973.
23. Jordan R., Seelye R., McGlone A. A sensory-based alternative to brix/acid ratio. Food Technology. 2001, 55, 36–44.
24. Kulkarni A.P., Aradhya S.M. Chemical changes and antioxidant activity in pomegranate arils during fruit development. Food Chemistry. 2005, 93, 319-324.
25. Mena P., García-Viguera C., Navarro-Rico J., Moreno D.A., Bartual J., Saura D. Phytochemical characterisation for industrial use of pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars grown in Spain. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2011, 91, 1893-1906
26. Zhao X., Yuan Z., Yin Y., Feng L. Patterns of pigment changes in pomegranate (*Punica granatum* l.) peel during fruit ripening. Acta Horticulturae. 2015, 1089, 83-89.
27. Gil M.I., García-Viguera C., Artés F., Tomás-Barberán F.A. Changes in pomegranate juice pigmentation during ripening. Journal of the Science of Food and Agriculture. 1995, 68, 77-81.
28. Yang C. H., Sun D.-W., Pu H., Wang N.N., Zhu Z. Rapid detection of anthocyanin content in lychee pericarp during storage using hyperspectral imaging coupled with model fusion. Postharvest Biology and Technology. 2015, 103, 55-65.
29. Nicolaï B.M., Beullens K., Bobelyn E., Peirs A., Saeys W., Theron K.I., Jeroen L. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. Postharvest Biology and Technology. 2007, 46, 99-118.
30. Arendse E., Fawole O.A., Magwaza L.S., Nieuwoudt H., Opara, U.L. Fourier-transform near infrared diffuse reflectance spectroscopy and two spectral acquisition modes for evaluation of external and internal quality of intact pomegranate fruit. Postharvest Biology and Technology. 2018, 138, 91-98.
31. Arendse E., Fawole O.A., Magwaza L.S., Nieuwoudt H.H., Opara U.L. Development of calibration models for the evaluation of pomegranate aril quality by Fourier-transform near infrared spectroscopy combined with chemometrics. Biosystems Engineering. 2017, 159, 22-32.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Evaluación de los descriptores organolépticos de subproductos producidos durante la fermentación alcohólica de la cerveza

V. Moya[1], B. Diezma[1], E. C. Correa[1]

[1] Laboratorio de Propiedades Físicas y Técnicas Avanzadas en Agroalimentación. E.T.S.I. Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas. Universidad Politécnica de Madrid; va.moya@alumnos.upm.es

Resumen: Se ha realizado dos encuestas a cerveceros profesionales y no profesionales y a jueces cerveceros de diferentes procedencias y niveles de experiencia, con el objetivo de determinar la influencia que un grupo de descriptores organolépticos puede tener sobre la calidad final de la cerveza. Se preguntó acerca de descriptores relacionados principalmente con la fermentación alcohólica, pero también varios provenientes de contaminaciones, de ingredientes o de los procesos de elaboración. El resultado se ha tabulado en forma de clasificación numérica. De forma general los compuestos sulfurosos, la humedad, el dimetil sulfuro y los solventes constituyen los principales indicadores negativos. Por otro lado, los ésteres, fenoles, diacetilo, y benzaldehído, son aceptados como los que menor influencia pueden tener.

Palabras clave: defectos, jueces cerveceros, control de procesos, microcervecerías

1. Introducción

El auge de las microcervecerías y las cervezas artesanas ha dado lugar a una oferta diferenciada de productos individualizados y no estandarizados. En este sector se ha ampliado la variedad de los procesos fermentativos tanto desde el punto de vista de los protocolos tiempo-temperatura, como de la microbiología de estos.

En cualquier caso, la creciente profesionalización de este sector exige incrementar el nivel de control de los procesos de fabricación, siendo de especial relevancia el control de la fermentación. Durante la fermentación se producen una serie de subproductos químicos que, sin el adecuado tratamiento, pasan a la cerveza, ocasionando muchos de estos productos características organolépticas desagradables. Entre los compuestos producidos se encuentran el dimetil sulfuro (DMS), el etanol, ésteres, fenoles, y fúseles, entre otros [1].

La finalidad última de la línea de investigación que se inicia con el presente trabajo es el análisis, desarrollo y adaptación de algoritmos basados en lógica difusa, aplicados a biorreactores trabajando con mosto cervecero [2]. Se busca optimizar el proceso fermentativo tanto en los tiempos de fermentación como en la concentración de los diferentes subproductos mencionados, para conseguir mejoras tanto en la calidad organoléptica de la cerveza como en el tiempo requerido para la misma.

Los distintos descriptores organolépticos tienen diferentes niveles de influencia en la calidad de la cerveza. Varios de estos descriptores son críticos y su presencia puede provocar un rechazo inmediato por parte del consumidor, o incluso superar los niveles permitidos por la legislación sanitaria en vigor [3]. Por ello anular o disminuir la concentración de estos subproductos a niveles por debajo del umbral de percepción es materia de este estudio. Una complicación es que existen descriptores organolépticos que pueden ser considerados defectos en unos estilos de cerveza,

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3432

pero aceptables o incluso deseables en otros casos, como el conocido caso del diacetilo en las lager checas o el DMS (sulfuro de dimetilo) en las pilsener [4].

Como primera aproximación, el objetivo principal de este trabajo es determinar el nivel de aceptación o rechazo de los diferentes descriptores organolépticos relacionados con los subproductos resultantes del proceso de fermentación alcohólica mediante la consulta a un panel de expertos. Se considera imprescindible conocer la valoración subjetiva de la influencia de los descriptores mencionados con el fin de identificar los indicadores sobre los que ha de actuar un posible sistema de control durante la fermentación. Como objetivo secundario se considera la comparación entre la percepción organoléptica entre personas con entrenamiento sensorial (jueces cerveceros) y quienes, aunque pertenecen al movimiento no cuentan con entrenamiento sensorial (cerveceros profesionales). Además, se considera el origen de los jueces (Latinoamérica – Europa), en la segunda encuesta, con el fin de establecer si el lugar de origen influye en la percepción organoléptica de ellos.

2. Materiales y métodos

Se ha recopilado datos mediante la realización de dos encuestas dirigidas a un grupo variado de cerveceros con experiencia mínima certificable: Se cuenta con jueces cerveceros internacionales expertos, jueces cerveceros noveles, cerveceros profesionales y cerveceros no profesionales.

Los jueces fueron consultados en el contexto de la Copa Cervezas del Ecuador 2018, Copa Cervezas Ecuador 2019, Copa Cervezas del Caribe 2018, Copa ACCE - Bilbao 2019, Granada Beer Festival 2019, y del Barcelona Beer Challenge 2019. Los cerveceros proceden del Curso de Especialista en Cervezas Artesanas y del Curso de Microcervecerías como Modelo de Negocios de la Universidad de Alicante, y de la Asociación de Cerveceros Caseros Españoles (ACCE). Se envió una invitación electrónica a participar, siendo un total de 61 personas las que contestaron la encuesta, de las que 36 son jueces y 25 cerveceros. Se descartó 1 registro en la primera encuesta y 1 en la segunda debido a que las respuestas brindadas mostraban una clara distorsión frente al resto de encuestados. El total de jueces que contestó la encuesta fue del 28,1% del total de jueces invitados. El porcentaje de cerveceros profesionales participantes es desconocido, debido a que se distribuyó por las redes de comunicaciones internas de las organizaciones anteriormente mencionadas, y se desconoce el número de personas que las conforman. En todo caso, el presente trabajo se encuentra en desarrollo, por lo cual se espera que se incremente el número de registros a medida que jueces y cerveceros sigan aportando a la investigación.

Los jueces, independientemente de su nivel de experiencia, se especializan mediante entrenamiento sensorial en la búsqueda de defectos y virtudes organolépticas. Los cerveceros conocen en detalle los métodos de elaboración de cervezas, y cómo corregir los diferentes defectos que en estas se encuentran.

Las encuestas se realizaron mediante invitación directa a través de una plataforma digital.

Se han realizado dos encuestas. En la primera se busca determinar el nivel de criticidad de 22 descriptores distintos relacionados con la presencia de defectos provenientes de distintas fuentes. En la segunda encuesta, en cambio, se habla únicamente de los defectos provenientes de la fermentación alcohólica, y se ha pedido que sea completada por jueces exclusivamente.

Tabla 1. Cabeceras de las encuestas

Encuesta 1	Encuesta 2
Impacto de descriptores organolépticos en la cerveza	Valoración de descriptores organolépticos en la fermentación

Como método estadístico de comparación se ha utilizado el análisis de varianza (ANOVA).

2.1. Primera encuesta

La encuesta consta de 1 pregunta dividida en dos bloques. Los defectos organolépticos que son y los que no parte de un estilo cervecero. 22 descriptores del primer grupo y 11 del segundo.

Se preguntó: Califique si los siguientes descriptores podrían estar presentes en una cerveza, de 0 a 10 puntos, siendo 10 "NUNCA" y 0 "SIEMPRE".

Posteriormente, se realizó un promedio de los datos obtenidos y los resultados fueron reorganizados en forma de clasificación desde el más (10) hasta el menos (0) indeseable. Los casos numéricamente iguales comparten posición.

Adicionalmente los datos se organizaron en función de si la respuesta fue dada por un Juez o un Cervecero no profesional.

Los descriptores consultados en el primer bloque (defectos que no constituyen parte del estilo) son:

1) Acetaldehído - Manzana verde.
2) Alcohólico, alcoholes superiores - Especiado picante, vínico, de calentamiento.
3) Astringencia - Persistente aspereza en lengua, como una lija.
4) Diacetilo - Mantecoso, caramelo, a popcorn (canguil).
5) DMS (Dimetil Sulfuro) - A maíz cocido, a choclo en conserva.
6) Ésteres - Afrutado (fresa, pera, banana, manzana, uva, cítricos).
7) A césped - Pasto recién cortado, hojas verdes podadas.
8) Golpe de luz - A orina de zorrillo.
9) Clorofenoles - A botiquín, a hospital.
10) Metálico - Hierro, cobre, monedas, a sangre.
11) Mohoso, húmedo.
12) Oxidaciones.
13) Fenoles: Plástico - Cinta aislante.
14) Solvente - Acetona.
15) Ácidos/Sour - Láctico, cítrico, etc., (no acético).
16) Fenoles: especiado - Clavo de olor, pimienta, vainilla, etc.
17) Sulfuroso - Huevos podridos, fósforos, cebollas.
18) Vinagre - Ácido acético, como avinagrado, acetona.
19) Levadura - A pan o con gusto a levadura.
20) Ácido isovalérico - A queso, medias sucias, sudor.
21) Ácido butírico - Se percibe como queso o mantequilla rancia, vómito de bebé.
22) Benzaldehído - A jerez, a almendras, mazapán.

Los descriptores del segundo bloque (defectos que sí pueden formar parte del estilo) son:

1) Acetaldehído - Manzana verde.
2) Alcohólico, alcoholes superiores - Especiado picante, vínico, de calentamiento.
3) Astringencia - Persistente aspereza en lengua, como una lija.
4) Diacetilo - Mantecoso, caramelo, a popcorn (canguil).
5) DMS (Dimetil Sulfuro) - A maíz cocido, a choclo en conserva.
6) Ésteres - Afrutado (fresa, pera, banana, manzana, uva, cítricos).
7) A césped - Pasto recién cortado, hojas verdes podadas.
8) Mohoso, húmedo.
9) Ácidos/Sour - Láctico, cítrico, etc., (no acético).
10) Fenoles: especiado - Clavo de olor, pimienta, vainilla, etc.
11) Sulfuroso - Huevos podridos, fósforos, cebollas.

2.2. Segunda encuesta

La encuesta consta de 1 pregunta acerca de 9 descriptores relacionados con la fermentación alcohólica.

Para esta segunda fase se encuestó a 17 jueces. Cerrando el grupo objetivo a jueces certificados. 6 fueron los jueces expertos o de mayor experiencia, y 11 jueces noveles, de menor experiencia. En cuanto al lugar de procedencia, 9 son europeos (España y Portugal), y 8 latinoamericanos (Panamá, Perú, Argentina, y Ecuador).



Figura 1. Lista de descriptores consultados en la segunda encuesta.

Se preguntó: Ranking de descriptores. Se debe organizar los descriptores en función de cuál es el más indeseado o más grave (1), y cuál el menos indeseado o más leve (9).

Posteriormente, se realizó un promedio de los datos obtenidos y los resultados fueron reorganizados en forma de clasificación desde el más (1) hasta el menos (9) indeseable. Los casos numéricamente iguales comparten posición.

Adicionalmente los datos se organizaron en función de si la respuesta fue dada por un Juez experto, o un Juez con menos experiencia. Otra clasificación utilizada fue europeos y latinoamericanos, con el fin de observar si existen discrepancias en función del lugar de procedencia.

Los descriptores consultados fueron:

1) Acetaldehído - Manzana verde.
2) Alcohólico, alcoholes superiores - Especiado picante, vínico, de calentamiento.
3) Diacetilo - Mantecoso, caramelo, a popcorn (canguil).
4) Ésteres - Afrutado (fresa, pera, banana, manzana, uva, cítricos).
5) Fenoles: Plástico - Cinta aislante.
6) Solvente - Acetona.
7) Otros ácidos. Sour - Láctico, cítrico, etc., (no acético).

8) Sulfuroso - Huevos podridos, fósforos, cebollas.
9) Vinagre - Ácido acético, como avinagrado, acetona.

Para esta segunda encuesta se ha considerado únicamente los descriptores como defectos organolépticos.

3. Resultados y discusión

3.1. Primera encuesta

En total se encuestó a 44 personas, de 12 países entre América Latina y Europa. En el análisis de datos se realiza una ponderación basada en la experiencia del catador. 19 son jueces y 25 cerveceros no profesionales.

En la Tabla 1 se listan los resultados de los descriptores que en las cervezas son considerados como defectos.

Tabla 2. Defectos organolépticos que no forman parte de los estilos de cerveza

	Promedio	$\bar{x}$	**σ**	**Jueces**	$\bar{x}$	**σ**	**Cerveceros no profesionales**	$\bar{x}$	**σ**
1.	Sulfuros*	9,09	2,42	Sulfuros*	9,67	1,15	Húmedo, mohoso	8,76	2,82
2.	Húmedo, mohos	9,02	2,38	Clorofenoles	9,44	2,06	Sulfuros*	8,68	2,95
3.	DMS	8,84	2,45	Húmedo, mohos	9,39	1,50	DMS	8,52	2,94
4.	Astringencia	8,81	2,30	Fenoles plásticos*	9,39	1,86	Astringencia	8,48	2,70
5.	Fenoles plásticos*	8,79	2,67	Golpe de luz	9,39	2,09	Ácido butírico	8,64	2,85
6.	Ácido butírico	8,77	2,64	Diacetilo*	9,28	1,37	Solvente, acetona*	8,44	2,79
7.	Solvente, acetona*	8,71	2,51	DMS	9,28	1,41	Ácido isovalérico	8,40	2,74
8.	Metálico	8,70	2,56	Astringencia	9,28	1,45	Metálico	8,36	2,78
9.	Clorofenoles	8,67	2,69	Metálico	9,17	2,11	Fenoles plásticos*	8,36	3,06
10.	Golpe de luz	8,67	2,79	Solvente, acetona*	9,12	1,97	Golpe de luz	8,16	3,11
11.	Ácido isovalérico	8,65	2,45	Alcoholes superiores*	9,00	1,91	Clorofenoles	8,12	2,94
12.	Diacetilo*	8,53	2,50	Ácido isovalérico	9,00	1,91	Diacetilo*	8,00	2,95
13.	Oxidación	8,35	2,31	Ácido butírico	8,94	2,30	Acetaldehído*	7,96	2,49
14.	Alcoholes superiores*	8,26	2,53	Oxidación	8,89	1,45	Oxidación	7,96	2,71
15.	Acetaldehído*	8,14	2,55	Otros ácidos**	8,83	1,54	Ácido acético*	7,67	3,20
16.	Pasto cortado	8,05	2,48	Pasto cortado	8,67	1,45	Alcoholes superiores	7,72	2,78
17.	Otros ácidos**	8,02	2,58	Fenoles especiados*	8,39	1,74	Pasto cortado	7,60	2,93

	Promedio	$\bar{x}$	σ	**Jueces**	$\bar{x}$	σ	**Cerveceros no profesionales**	$\bar{x}$	σ
18.	Ácido acético*	7,81	2,96	Acetaldehído*	8,39	2,61	Otros ácidos**	7,44	2,99
19.	Fenoles especiados*	7,53	2,34	Ácido acético*	8,00	2,60	Fenoles especiados*	6,92	2,51
20.	Ésteres afrutados*	6,98	2,38	Ésteres afrutados*	7,50	1,77	Ésteres afrutados*	6,60	2,67
21.	Benzaldehído	6,07	2,94	Benzaldehído	6,06	3,01	Benzaldehído	6,08	2,90
22.	Levadura	5,65	2,26	Levadura	5,72	2,30	Levadura	5,60	2,23

* Defectos provenientes de la fermentación.

** Incluye ácidos como el láctico y cítrico. Aunque aparecen durante la fase de fermentación no son realmente subproductos de esta, sino que suelen aparecer por presencia de otros microorganismos o por adiciones voluntarias.

Después de realizar un análisis de varianza entre los descriptores, se ha encontrado que el único caso estadísticamente considerable de discrepancia entre jueces y cerveceros se da en los fenoles especiados (p=0,043), en la que los Jueces otorgaron de media una calificación más alta ($\bar{x} = 8{,}389$) que los Cerveceros no profesionales ($\bar{x} = 6{,}92$). En todos los demás casos, las diferencias entre jueces y cerveceros no son significativas, por lo que podemos afirmar que existe un consenso general entre ambos grupos.

Observando las diferencias de varianzas, los jueces otorgan puntuaciones más altas (más desfavorables) con varianzas más bajas para prácticamente todos los descriptores, con excepción del acetaldehído ($\sigma^2_{jueces} = 7{,}193$; $\sigma^2_{cerveceros} = 6{,}457$), la levadura ($\sigma^2_{jueces} = 5{,}624$; $\sigma^2_{cerveceros} = 5{,}167$), y el benzaldehído ($\sigma^2_{jueces} = 9{,}585$; $\sigma^2_{cerveceros} = 8{,}743$), que las otorgadas por los cerveceros. Con esto queda en evidencia que los Jueces tienen una mayor sensibilidad y precisión en la detección de los defectos.

Los compuestos sulfurosos y la humedad son en promedio los descriptores más desfavorables, coincidiendo con los descriptores cabecera de cada uno de los grupos.

A continuación, se listan el DMS y la astringencia, los cuales son defectos relacionados con los ingredientes o con los métodos de elaboración. En sexta posición aparecen los fenoles plásticos, que normalmente provienen directamente de fermentaciones a temperaturas relativamente altas.

Por el contrario, los sabores a levadura, el benzaldehído, los ésteres afrutados, los fenoles especiados, el ácido acético, otros ácidos, pasto cortado, alcoholes superiores, y la oxidación son los descriptores menos castigados por ambos grupos. Probablemente porque todos estos pueden tener connotaciones agradables desde el punto de vista organoléptico, dando sabores y aromas similares a frutas, especias, pan, frutos secos y que, aunque no son correctos, son tolerables; otros pueden confundirse con descriptores positivos y requieren un cierto grado de entrenamiento para diferenciarlos.

En el caso particular del golpe de luz, los clorofenoles, el diacetilo, los solventes, y alcoholes superiores, se muestra discrepancia en las posiciones que ambos grupos otorgan. Esto probablemente se deba al desconocimiento de los efectos organolépticos de este tipo de descriptores en los cerveceros. El golpe de luz u olor a mofeta es un defecto producido cuando la radiación UV incide directamente sobre la cerveza y produce 3-metilbut-2-eno-1-tiol a partir de las isohumulonas presentes en el mosto cervecero [5].

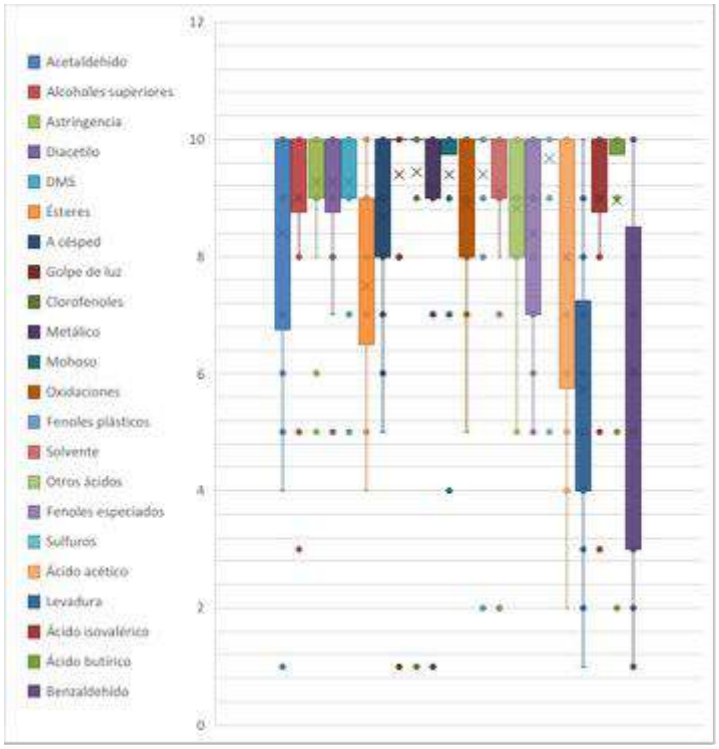


Figura 2. Gráfico de cajas y bigotes de la puntuación de 0 a 9 otorgada a los descriptores que no forman parte del estilo según los Jueces. La distribución de datos se encuentra representada en cuartiles, siendo las X los valores medios, y los puntos exteriores los valores atípicos

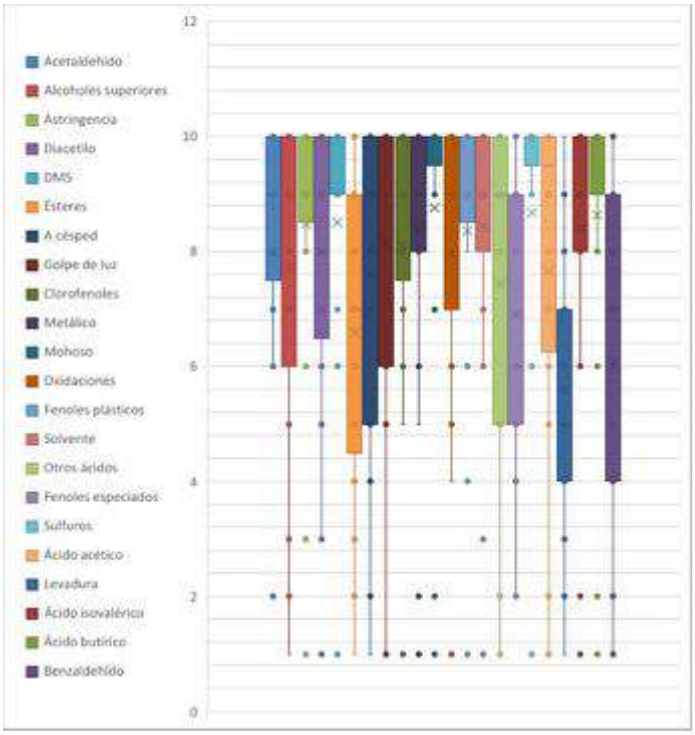


Figura 3. Gráfico de cajas y bigotes de la puntuación de 0 a 9 otorgada a los descriptores que no forman parte del estilo según los Cerveceros no profesionales. La distribución de datos se encuentra representada en cuartiles, siendo X los valores medios, y los puntos exteriores los valores atípicos

Tabla 3. Descriptores que forman parte de los estilos de cervezas

	Promedio	$\bar{x}$	σ	**Jueces**	$\bar{x}$	σ	**Cerveceros no Profesionales**	$\bar{x}$	σ
1.	Húmedo, mohoso	6,30	3,20	Húmedo, mohoso	6,61	3,16	Sulfuros*	6,12	3,18
2.	Sulfuros*	6,21	3,01	Astringencia	6,44	3,20	Húmedo, mohoso	6,08	3,21
3.	DMS	5,28	3,08	Sulfuros*	6,33	2,75	DMS	4,92	3,02
4.	Astringencia	5,23	3,26	DMS	5,78	3,10	Astringencia	4,36	3,02
5.	Alcoholes superiores*	4,49	2,48	Alcoholes superiores*	5.17	2,97	Acetaldehído*	4,16	2,72
6.	Acetaldehído*	4,40	2,71	Acetaldehído*	4,72	2,66	Alcoholes superiores*	4.00	1,92
7.	Diacetilo*	4,19	2,65	Diacetilo*	4,56	2,91	Diacetilo*	3,92	2,42
8.	Pasto cortado	3,72	2,55	Pasto cortado	3,89	2,56	Pasto cortado	3,60	2,55
9.	Fenoles especiados*	3,00	2,65	Ésteres afrutados*	2,33	2,16	Fenoles especiados*	3,52	2,84
10.	Otros ácidos**	2,60	2,52	Fenoles especiados*	2,28	2,16	Otros ácidos**	2,84	2,65
11.	Ésteres afrutados*	2,44	2,19	Otros ácidos**	2,28	2,28	Ésteres afrutados*	2,52	2,21

* Defectos provenientes de la fermentación.

** Incluye ácidos como el láctico y cítrico. Aunque aparecen durante la fase de fermentación no son realmente subproductos de esta, sino que suelen aparecer por presencia de otros microorganismos o por adiciones voluntarias.

En la Figura 2 se observa el gráfico de cajas y bigotes de las calificaciones dadas por los jueces, la distribución de datos se encuentra representada en cuartiles, siendo las X los valores medios, y los puntos exteriores los valores atípicos. Las cajas que se encuentran en la parte superior de la figura son aquellas que han obtenido puntuaciones más altas. Se observa que son los sulfuros el descriptor que mayor consenso obtuvo entre jueces.

En la Figura 3 se muestra el gráfico de cajas y bigotes con las calificaciones otorgadas por los cerveceros. En este caso, el consenso se encuentra con los descriptores mohoso y sulfuros, como se comentó anteriormente.

En la Tabla 3 se listan los descriptores que pueden formar parte de los estilos cerveceros sin necesidad de que se consideren defectos.

La puntuación media obtenida en este bloque de descriptores ha descendido 3,84 puntos con respecto a la puntuación media del primer bloque de descriptores, demostrándose una mayor tolerancia hacia estos compuestos cuando ellos pertenecen al estilo.

Se realizó un análisis de varianza. Se ha encontrado que el único caso estadísticamente considerable de discrepancia entre jueces y cerveceros se da en la Astringencia (p=0,0395), en la que los Jueces otorgaron de media una calificación más alta ($\bar{x} = 6{,}444$) que los Cerveceros no profesionales ($\bar{x} = 4{,}360$). En todos los demás casos, las diferencias entre jueces y cerveceros no son significativas, por lo que, nuevamente, podemos afirmar que existe un consenso general entre ambos grupos.

Como en el caso anterior, son los compuestos sulfurosos y la humedad en promedio los descriptores más desfavorables, coincidiendo con los descriptores cabecera de cada uno de los grupos.

La astringencia, el DMS y los alcoholes superiores son también poco deseados. Quizás se deba a que de estos descriptores se tolera su presencia como parte del estilo por ser inevitables

durante el proceso de elaboración, mas no significa que sean deseables, y por ello se busca que estén en la menor concentración posible. Aparecen principalmente porque ciertos ingredientes o métodos de elaboración los producen en demasía y son inevitables cuando se buscan ciertos rasgos organolépticos particulares. Un claro ejemplo de esto es la astringencia en las IPA americana; ya que para conseguir los niveles de amargor deseados es necesario utilizar grandes cantidades de lúpulo que provocarán inequívocamente astringencia. Aún así, esta se busca que sea la mínima posible, lo que explica la puntuación de 6,44, y la segunda posición adjudicada por los expertos.

Por otro lado, el acetaldehído, diacetilo y los fenoles especiados, sí suelen ser buscados como parte integral del producto final. Las Weissbier alemanas son por antonomasia ejemplo de estas características, ya que los fenoles que asemejan al clavo de olor son su principal característica, por esto la puntuación obtenida fue de 3,00.

Hay dos casos particulares, el pasto cortado ($\bar{x} = 3{,}72$) y los otros ácidos ($\bar{x} = 2{,}60$). En el primer caso, se debe a que en las cervezas que se pretende dar una nota a lúpulo fresco, la materia vegetal puede dejar el aroma de hierbas al cortarse, mas en gran medida se disimula con el mismo aroma del lúpulo, por lo cual no lo han considerado un defecto tan grave como otros. En el segundo caso, normalmente estos ácidos se buscan en los estilos Sour, en donde son agregados directamente, se incentiva su producción natural, o se siembra de microorganismos capaces de producirlos, con el fin de bajar el nivel de pH.

En la tabla 4 observamos las varianzas de todos los descriptores estudiados en este bloque. Se aprecia con claridad los altos valores relativos de la varianza, y la diferencia significativa que se encuentra en varios casos, como los alcoholes superiores, el diacetilo, los fenoles, los sulfuros, y los otros ácidos, indicando que existe mucha discrepancia entre jueces, entre cerveceros, y entre ambos grupos. Posiblemente esto se deba a que la valoración dada por cada individuo obedezca en mayor grado a la percepción individual de tolerancias y gustos. En el caso en el que un descriptor es un defecto queda claro que este lo es y es indeseable, mas, cuando este puede hallarse en la cerveza, su presencia es controvertida.

Tabla 4. Varianzas entre jueces y cerveceros

	Descriptor	Jueces	Cerveceros no profesionales
1.	Húmedo, mohoso	10,605	10,743
2.	Sulfuros	8,000	10,527
3.	DMS	10,183	9,493
4.	Astringencia	10,850	9,490
5.	Alcoholes superiores	9,324	3,833
6.	Acetaldehído	7,056	7,723
7.	Diacetilo	8,967	6,077
8.	Pasto cortado	6,928	6,75
9.	Fenoles especiados	4,918	8,427
10.	Otros ácidos	5,506	7,307
11.	Ésteres afrutados	4,941	5,093

En la Figura 4 se observa el gráfico de cajas y bigotes de las calificaciones dadas por los jueces cerveceros. Las cajas que se encuentran en la parte superior de la figura son aquellas que han obtenido puntuaciones más altas. Se observa que son mohoso y los sulfuros los descriptores con medias más altas. También se puede observar que a excepción de los ésteres afrutados, otros ácidos y los fenoles especiados, todos los demás descriptores presentan desviaciones estándar importantes. Así, los jueces mostraron gran discrepancia.

En la Figura 5, se observa el gráfico de cajas y bigotes según los cerveceros. De forma general mantienen la tendencia de los datos aportados por los jueces, aunque con menos desviación.

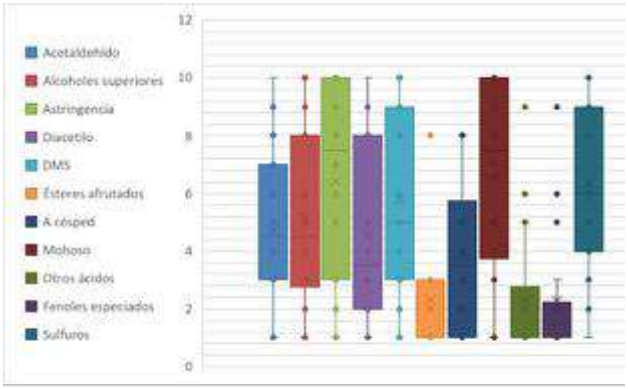


Figura 4. Gráfico de cajas y bigotes de los descriptores que sí pueden formar parte del estilo según los Jueces.

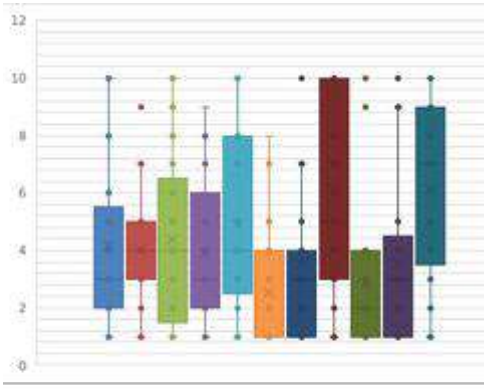


Figura 5. Gráfico de cajas y bigotes de los descriptores que sí pueden formar parte del estilo según los Cerveceros no profesionales.

3.2. Segunda encuesta

En la Tabla 5 se especifican los resultados obtenidos durante la realización de la segunda encuesta, y en la que participaron exclusivamente jueces cerveceros (expertos y noveles). Los datos se encuentran ordenados en función de su nivel de experiencia.

En esta encuesta se tomaron en cuenta únicamente descriptores que se encuentran durante la fermentación alcohólica.

A diferencia de la primera encuesta, los jueces, han ubicado del 1 al 9 cuáles descriptores consideran son más (9) o menos (1) indeseables.

Tabla 5. Defectos provenientes de la fermentación por nivel de experiencia de los catadores

	Promedio	$\bar{x}$	σ	**Jueces expertos**	$\bar{x}$	σ	**Jueces noveles**	$\bar{x}$	σ
1.	Ácido acético	2,88	2,06	Ácido acético	1,17	0,37	Solventes	2,60	1,69
2.	Solventes	3,00	1,50	Solventes	3,67	0,75	Fenoles plásticos	3,70	2,10
3.	Sulfuros	3,75	2,05	Ácidos láctico, cítrico, etc.	3,67	2,13	Sulfuros	3,70	2,19
4.	Fenoles plásticos	4,06	2,16	Sulfuros	3,83	1,77	Ácido acético	3,90	1,97
5.	Ácidos láctico, cítrico, etc.	4,38	1,90	Fenoles plásticos	4,67	2,13	Ácidos láctico, cítrico, etc.	4,80	1,60
6.	Alcoholes superiores	5,69	1,86	Alcoholes superiores	5,83	1,34	Acetaldehído	5,30	2.37
7.	Acetaldehído	5,94	2,30	Acetaldehído	7,00	1,73	Alcoholes superiores	5,60	2,11
8.	Diacetilo	6,75	1,85	Diacetilo	7,00	1,83	Diacetilo	6,60	1,85
9.	Ésteres	8,56	0,61	Ésteres	8,17	0,69	Ésteres	8,80	0,40

En el ANOVA de los descriptores se ha encontrado que hay dos casos estadísticamente considerables de discrepancia entre jueces. Se da en el Ácido Acético (P=0,0072), y en los Ésteres (p=0,0469). En el primer caso, los Jueces expertos, otorgaron de media una ubicación más baja

($\bar{x} = 1{,}167$) que los Jueces noveles ($\bar{x} = 3{,}900$), lo que significa que los expertos consideran que el acético es más indeseable que los noveles. En todos los demás casos, las diferencias no son significativas.

El ácido acético, los solventes, sulfuros y fenoles plásticos, son los considerados más negativos. Estos normalmente están asociados con fermentaciones a altas temperaturas o incluso contaminaciones de otros microorganismos y su presencia siempre resulta de naturaleza desagradable. Los otros ácidos presentes se han descrito en el apartado 3.1.

El caso del acetaldehído, diacetilo y ésteres, son por unanimidad los descriptores de menor impacto. Posiblemente se debe a que los dos primeros son defectos de sencilla solución, tan solo alargando el proceso de maduración en caso de que se encuentren presentes. Los ésteres por su parte se producen por elevadas temperaturas de fermentación [6], pero los aromas y sabores que brindan son afrutados, y aunque en exceso pueden no ser deseables tampoco llegarán a ser desagradables.

Los alcoholes superiores se producen normalmente por estrés celular de las levaduras. En las cervezas con moderado a alto nivel de alcohol se pueden confundir con el etanol propio de ellas. De hecho, para detectarlo organolépticamente se requiere un cierto entrenamiento sensorial.

A continuación, se observa el gráfico de cajas y bigotes de las respuestas dadas por los jueces expertos. El nivel inferior señala los descriptores más indeseados. Se observa con claridad que el ácido acético es al que se le ha otorgado la peor calificación. Por otro lado, los ésteres, son los que menos afectan a la calidad final de la cerveza.

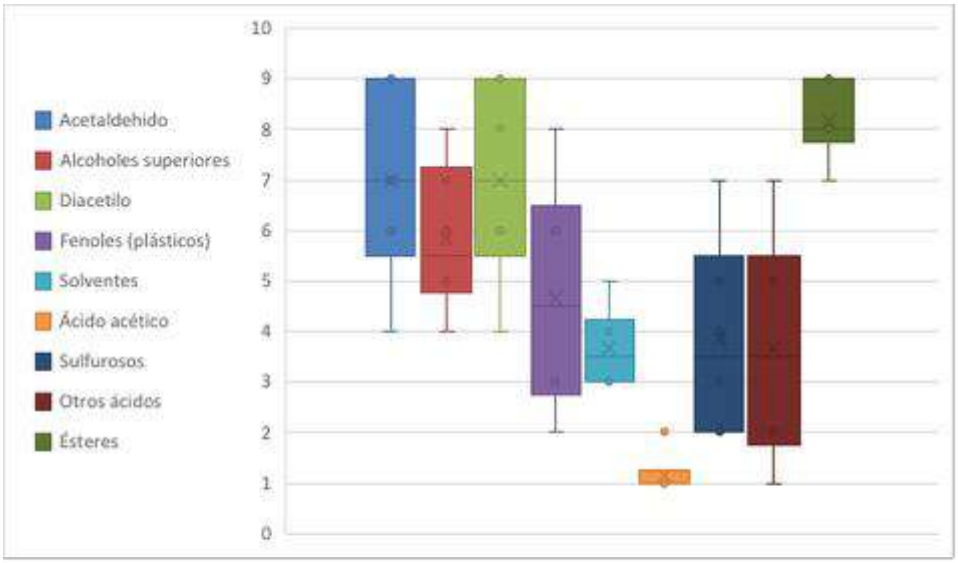


Figura 6. Gráfico de cajas y bigotes de los descriptores de la fermentación según los Jueces Expertos. Los valores más bajos representan los descriptores más indeseados.

En las respuestas dadas por los jueces noveles, son los solventes los que reciben la peor puntuación. Los ésteres, al igual que el caso anterior, son los que menos influencian en la calidad final de la cerveza. Sin embargo, el ácido acético, que en el caso anterior fue localizado como el peor descriptor casi por unanimidad, pasa a encontrarse en la cuarta posición, después de los solventes, fenoles y sulfuros.

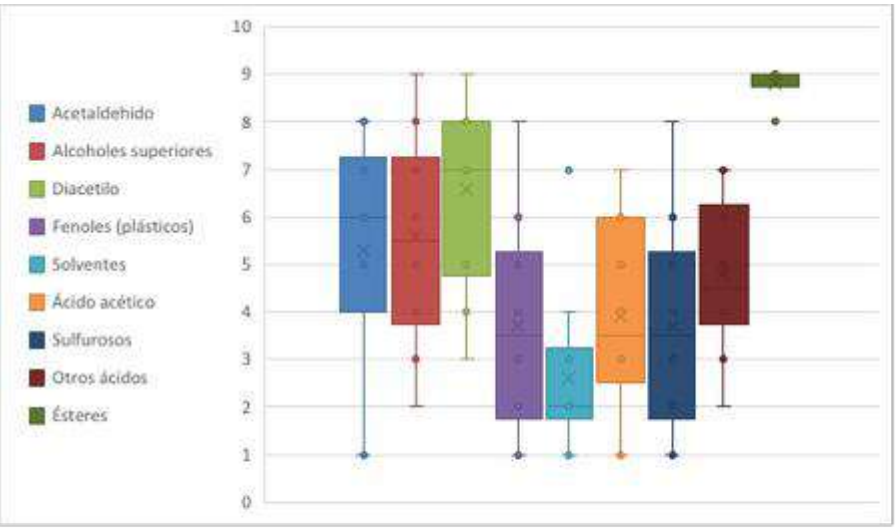


Figura 7. Gráfico de cajas y bigotes de los descriptores de la fermentación según los Jueces Noveles. Los valores más bajos representan los descriptores más indeseados.

En la Tabla 6 se observa una comparativa de los resultados por lugar de procedencia del catador, entre europeos y latinoamericanos.

Tabla 6. Defectos provenientes de la fermentación por origen de los catadores

	Promedio (por experiencia de juez)	$\bar{x}$	σ	**Europeos**	$\bar{x}$	σ	**Latinoamericanos**	$\bar{x}$	σ
1.	Ácido acético	2,88	2,06	Solventes	2,38	0,70	Ácido acético	2,80	1,64
2.	Solventes	3,00	1,50	Sulfuros	3,25	1,64	Solventes	3,30	1,80
3.	Sulfuros	3,75	2,05	Ácido acético	3,50	2,24	Sulfuros	3,60	2,28
4.	Fenoles plásticos	4,06	2,16	Fenoles plásticos	4,50	2,45	Fenoles plásticos	4,20	1,73
5.	Ácidos láctico, cítrico, etc.	4,38	1,90	Alcoholes superiores	4,63	1,65	Ácidos láctico, cítrico, etc.	4,40	1,54
6.	Alcoholes superiores	5,69	1,86	Acetaldehído	4,75	2,33	Alcoholes superiores	5,90	1,39
7.	Acetaldehído	5,94	2,30	Ácidos láctico, cítrico, etc.	5,63	1,32	Acetaldehído	6,00	1,54
8.	Diacetilo	6,75	1,85	Diacetilo	7,63	1,32	Diacetilo	6,60	1,90
9.	Ésteres	8,56	0,61	Ésteres	8,75	0,43	Ésteres	8,20	0,70

En el ANOVA de los descriptores se ha encontrado que hay tres casos estadísticamente considerables de discrepancia entre jueces. Se da en el acetaldehído (P=0,0410), en los alcoholes superiores (p=0,0209), y en los otros ácidos (p=0,0056). En el primer caso, los jueces europeos otorgaron de media una ubicación más baja ($\bar{x} = 4{,}750$) que los jueces latinoamericanos ($\bar{x} = 7{,}125$). En el caso de los alcoholes superiores los jueces europeos otorgaron de media una ubicación más baja ($\bar{x} = 4{,}625$) que los jueces latinoamericanos ($\bar{x} = 6{,}750$). En el caso de los otros ácidos los jueces europeos otorgaron de media una ubicación más alta ($\bar{x} = 5{,}625$) que los jueces latinoamericanos ($\bar{x} = 3{,}125$). Estos datos indican que para los latinoamericanos el descriptor

acetaldehído y los alcoholes superiores es más tolerable que para los europeos, mientras que los otros ácidos son más tolerables para europeos que para latinoamericanos. En todos los demás casos, las diferencias no son significativas.

Estos datos podrían explicarse porque en Europa existe una tradición más larga de cervezas ácidas, haciendo que, en el registro organoléptico personal, los jueces sean más tolerantes a estos perfiles.

Aunque en promedio el diacetilo ha sido ubicado en la misma posición por los dos grupos de jueces, es evidente en el gráfico de cajas y bigotes (Figura 8 y 9) que, la distribución de las calificaciones se ha dado como menos crítica en el caso de los europeos y más crítica para los latinoamericanos. Esto puede deberse a que los estilos europeos (británicos, checos) suelen tener al diacetilo como parte integral de las cervezas elaboradas en dichos países. Por el contrario, en Latinoamérica, suele estar asociado con maduraciones no completas, y por lo tanto considerado como defecto.

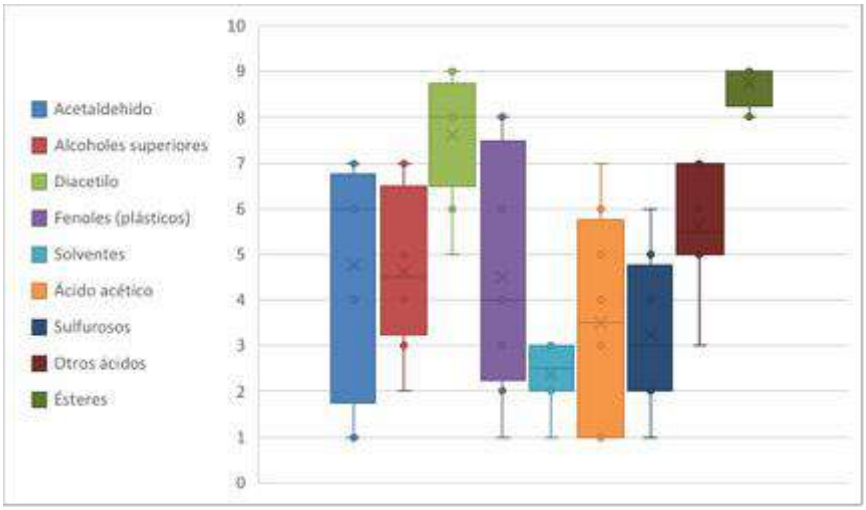


Figura 8. Gráfico de cajas y bigotes de los descriptores de la fermentación según los jueces europeos. Los valores de ordenación más bajos representan los descriptores más indeseados.

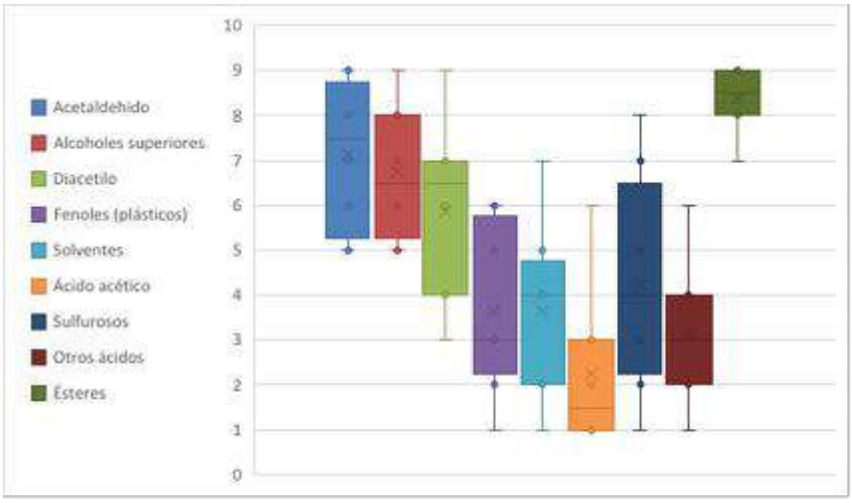


Figura 9. Gráfico de cajas y bigotes de los descriptores de la fermentación según los jueces latinoamericanos. Los valores de ordenación más bajos representan los descriptores más indeseados.

Las similitudes generales se pueden deber a que la mayoría de los jueces han sido capacitados en programas similares de entrenamiento, como por ejemplo el BJCP (Beer Judge Certification Program), el cual actualmente es el mayor programa de certificación de jueces a nivel mundial, o el programa Cicerone. Los kits de entrenamiento sensorial suelen provenir de los mismos desarrolladores, como el del Siebel Institute of Technology.

4. Conclusiones

Con miras al desarrollo de un futuro sistema de control, el ácido acético, los solventes, sulfuros y fenoles plásticos, serían los descriptores organolépticos susceptibles de ser considerados como prioritarios.

Los jueces cerveceros mostraron desviaciones estándar menores que los cerveceros, por lo que se deduce que existe un fuerte consenso en cuanto a las afectaciones dadas por los diferentes descriptores.

Se ha demostrado que de forma general la opinión entre jueces de más y menos experiencia, además de los cerveceros experimentados es similar.

Las diferencias entre los resultados presentados entre jueces europeos y latinoamericanos son significativas, teniendo discrepancias considerables en 3 de los 9 descriptores.

Los compuestos sulfurosos y la humedad son en promedio los descriptores más desfavorables. Los compuestos sulfurosos son considerados como los de mayor afectación o menos deseados en las cervezas. Estos compuestos normalmente aportan aromas como a huevos podridos, azufre, cebollas, incluso caucho.

Aunque indeseado entre los cerveceros, el diacetilo resulta ser uno de los descriptores que menor preocupación causa a estos. Análogamente, los ésteres y todos los descriptores que se perciben similares a frutas, especias, pan, o granos, a pesar de que no deberían estar presentes, su presencia es tolerable frente a otros que siempre resultan desagradables.

5. Agradecimientos

Reconocimiento al Gobierno del Ecuador que, a través de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT), financia la investigación principal de la cual es parte este documento.

Referencias

1. Šmogrovičová, D., & Dömény, Z. (1999). Beer volatile by-product formation at different fermentation temperature using immobilised yeasts. Process Biochemistry, 34(8), 785-794.
2. Rani, K. Y., & Rao, V. R. (1999). Control of fermenters–a review. Bioprocess Engineering, 21(1), 77-88.
3. Dev.bjcp.org. (2019). Beer Faults – Beer Judge Certification Program. [online] Available at: http://dev.bjcp.org/education-training/education-resources/beer-faults/ [Accessed 1 May 2019].
4. Dev.bjcp.org. (2019). Beer Style Guidelines – Beer Judge Certification Program. [online] Available at: http://dev.bjcp.org/beer-styles/beer-style-guidelines/ [Accessed 1 May 2019].
5. De Keukeleire, Denis & Heyerick, A & Huvaere, Kevin & Skibsted, L.H. & Andersen, M.L. (2008). Beer lightstruck flavor: The full story. Cerevisia. 33. 133-144.
6. Riverol, C., & Cooney, J. (2007). Estimation of the ester formation during beer fermentation using neural networks. Journal of food engineering, 82(4), 585-588.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

GreenBook: App híbrida para el seguimiento y control de explotaciones agrarias intensivas

Víctor J. R. Maldonado[1], Joaquín Cañadas[1], Jorge A. Sánchez-Molina[1], Manuel Berrenguel[1], Manuel Muñoz[1]

[1] Departamento de Informática, Universidad de Almería, CeiA3, CIESOL. Ctra. del Sacramento s/n, 04120 Almería.

Resumen: Se ha diseñado una APP híbrida para el seguimiento y control de las tareas que se realizan en explotaciones agrarias intensivas. El sistema tiene una Arquitectura MVC (Modelo-Vista-Controlador), dividida en dos partes, la parte del cliente es desarrollada en JavaScript, donde se envían peticiones HTTP a la parte del servidor. El servidor o backend está formado por los datos que introduzca el usuario y el pretratamiento de los datos de fuentes externas. Del acceso a los datos se encarga una API que use las funciones de un servicio REST, con una base de datos parra lograr la persistencia de la información generada. Finalmente, se interacciona con los diferentes datos usando FIWARE. Este sistema se integrará con un Sistema de Ayuda a la Toma de Decisiones (DSS) diseñado con el objetivo final de ofrecer al agricultor apoyo a la gestión del clima en invernadero mediante el uso de modelos de predicción del clima interior del invernadero y de crecimiento del cultivo con los datos proporcionados por los servicios de predicción climáticos disponibles como AEMET. Los datos del Greenbook se utilizarán en los modelos de predicción del crecimiento y de desarrollo de enfermedades, ya que estos modelos utilizan las tareas culturales como entrada, por ejemplo, los tratamientos sanitarios o las podas.

Palabras clave: cuaderno, FIWARE, cultivo, invernadero

1. Introducción

El trabajo de un agricultor tiene muchos factores para tener en cuenta, no solo consiste en plantar una semilla y recoger una hortaliza, es por ello que realizamos un estudio en profundidad sobre los distintos aspectos de este negocio, para así desarrollar una solución tecnológica lo más completa posible.

Greenbook es una aplicación híbrida, es decir, tanto para páginas web como para teléfonos móviles con una técnica "responsive". Esta aplicación nos permite el seguimiento y asesoramiento de una mejor forma de tomar decisiones en las explotaciones agrarias, a partir de la información que se genera diariamente en las explotaciones, con la finalidad de poder ayudar a la gestión de este sector. Cada día en una explotación agraria genera miles de datos que no se almacenan. Esta información es llamada Cuaderno de Campo, es muy importante para cada agricultor durante todo el año, para ayudarle a gestionar y economizar la explotación agraria. De la explotación se puede recoger mediante tres vías, la primera sería la información que recoge el propio agricultor que trabaja diariamente en esta, la segunda es el técnico agrícola, que asesora al agricultor mediante sus conocimientos y experiencia y la última es mediante sensores (si los hubiese en la explotación). Toda esta información ayuda al agricultor a tomar mejor sus decisiones en la explotación. En la aplicación Greenbook toda esta información es introducida por las diferentes personas que trabajan en la explotación y también consultada de una forma

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3490

intuitiva y amigable, fácil de usar para todos los usuarios. Las funciones que un agricultor puede hacer es la de introducir los datos comentados del Cuaderno de Campo de sus explotaciones, una gráfica donde visualizar la información recogida en el cuaderno de campo durante el año y una sección de alerta de tareas que hay que hacer en la explotación y que pueden ser introducidas por el agricultor o el técnico agrícola, por último, configurar su perfil y gestionar las certificaciones de sus explotaciones agrarias.

En términos de crecimiento del cultivo, tener un control sobre las tareas que se realizan en un cultivo es muy importante desde un punto de vista de gestión de la explotación y de trazabilidad a la hora de dar un valor añadido al producto agrícola. En esta línea, se ha diseñado una aplicación web/móvil con una técnica "responsive", como hemos comentado. La idea surge al detectar el gran volumen de información que se recoge en las explotaciones agrarias, que debe ser adecuadamente almacenada y gestionada. En el mercado existen diversas alternativas de empresas privadas, en ésta se recogerá información de diferentes fuentes, para ayudar al agricultor y técnico agrícola en la toma de decisiones, pero son soluciones cerradas que carecen de acceso a los datos generados. La solución técnica está basada en JavaScript en la versión ECMAScript 6, usando diferentes frameworks y librerías actuales. Está solución nos da la posibilidad de migrar el sistema a cualquier dispositivo, para que pueda ser utilizada por agricultores y técnicos agrícolas sin importar el dispositivo o el sistema operativo. El objetivo principal de este producto es un software donde poder registrar, visualizar y compartir de forma intuitiva y amigable, los datos del seguimiento y asesoramiento de las explotaciones, para ello se hace uso de una API REST. El sistema diseñado permite a los agricultores y técnicos agrícolas, mejorar la gestión de las explotaciones agrarias, parcelas, cultivos, tareas, etc., aumentando la accesibilidad a dicha información y a los responsables de certificaciones poder hacer el seguimiento de los agricultores, con la concesión o no, de los diferentes certificados a nivel mundial, que pueden acreditarse a cada parcela de la explotación del agricultor, si cumple con los requisitos de éstas. Los usuarios tienen un perfil personalizable y acceso a la gestión de sus explotaciones agrarias. Para llevar a cabo las buenas prácticas de una explotación agraria, como se ha mencionado se hará uso de un Cuaderno de Campo, donde se recogen datos necesarios para las tareas en explotaciones reales, por agricultores y técnicos agrícolas. También se obtendrá información del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación referente a los productos fitosanitarios permitidos en España, así como de otros servicios públicos.

2. Materiales y métodos

El principal problema al que nos enfrentamos es la falta de interoperabilidad entre los diferentes sistemas. La agricultura, como se la conoce actualmente, está compuesta por sistemas cerrados de adquisición de datos, bases de datos inaccesibles y ordenadores que gestionan la adquisición de datos, en este caso no es diferente, cada invernadero tiene su propio sistema cerrado. Para ello se desarrolla una API Rest que sea capaz de interoperar con sistemas de cualquier fabricante. Un conjunto de ETLs fue diseñado para hacer una serie de llamadas al API Rest solicitando la información de estos sensores. Además, se desarrollaron procesos CRON para llamar a los servicios de ETL cada minuto para relacionar el conjunto de ETL. Además, Fiware está basado en el estándar NGSI-V2, además de consultar la información de los sensores, resultados de los análisis de laboratorio o los datos por eventos del Greenbook, la transforman en el modelo de datos necesario para que Fiware Orion la interprete. El habilitador de FIWARE disponible llamado ContextBroker [1] se utiliza para gestionar los datos, que es responsable de gestionar la información de contexto utilizando el modelo de información NGSI, basado en entidades y atributos. Por lo tanto, es responsable de gestionar la información de contexto de los sensores y actuadores del invernadero, para su posterior tratamiento en tiempo real. Para la persistencia de los datos, es necesario suscribirse al ContextBroker para que notifique un cambio en las entidades previamente creadas, en cuyo caso lo hará al Back-End encargado de gestionar la persistencia en MongoDB [2].

Los datos utilizados para el desarrollo de la primera versión de la plataforma fueron adquiridos en los invernaderos de la Estación Experimental de la Fundación Cajamar en El Ejido, provincia de Almería, España. Tipo de cultivo tomate. Las condiciones de cultivo y manejo de los cultivos son muy similares a las de los invernaderos comerciales de tomate. Fuera del invernadero, una estación meteorológica midió las condiciones ambientales. Durante los experimentos también se tomaron las variables climáticas interiores, especialmente la temperatura del aire, la humedad relativa, la radiación solar, la radiación activa fotosintética, la temperatura del suelo y de la cubierta, el consumo de agua y electricidad, el contenido de agua, la conductividad eléctrica (CE) y la temperatura del sustrato, y la concentración de CO_2. Además, datos de análisis de laboratorio y cuaderno de campo (Greenbook), así como predicciones meteorológicas. Los parámetros climáticos dentro del invernadero eran monitoreados continuamente cada 30 segundos, la información recolectada por los sensores es manejada por un SCADA en el cual se desarrolló un módulo https encargado de llevar a cabo las comunicaciones para enviar estos datos a la plataforma Fiware.

Para la segunda fase del desarrollo se incorporan 7 agricultores en producción real con tomates distribuidos por la provincia de Almería con un tamaño medio de 1ha de superficie cultivada y pertenecientes a diferentes cooperativas. A parte del uso del Greenbook, se instaló una estación con más de 10 sensores para recoger los datos. Específicamente, sensores de temperatura interior y del suelo, humedad interior y del suelo, radiación, CO2, DPV, CE del suelo, CE del medio, etc.

Además de los sensores mencionados anteriormente y la información del cuaderno de campo, se recogen los datos meteorológicos de la estación del OpenWeatherMap y el AEMET más cercanas cada invernadero invernadero.

3. Resultados y discusión

El problema que se pretende resolver es el desarrollo de una aplicación web/móvil responsive, para el seguimiento y asesoramiento de una mejor forma de tomar decisiones en las explotaciones agrarias, a partir de la información que se genera diariamente en las explotaciones, con la finalidad de poder ayudar a la gestión de este sector. La idea surge al detectar el gran volumen de información que se recoge en las explotaciones agrarias, que debe ser adecuadamente almacenada y gestionada. Se va a seguir una Arquitectura MVC (Modelo-Vista-Controlador), dividida en dos partes, la parte del cliente está desarrollada en JavaScript en su versión 6, donde se enviarán peticiones HTTP a la parte del servidor. También el framework de Cordova y PhoneGap para empaquetar la aplicación desarrollada y que sea ejecutable en diferentes plataformas, como móviles, tablets, etc.

En la parte del servidor o back-end, estará formada por los datos que introduzca el usuario y el pretratamiento de los datos de fuentes externas. Del acceso a los datos se encargará una API que use las funciones de un servicio REST, con una base de datos relacional, por el volumen de datos final. También se interaccionan con diferentes datos usando FIWARE y otras herramientas.

Esta herramienta está pensada para diferentes usuarios:

1. A los Administradores debe permitir:
    - Gestionar los perfiles de los usuarios.
    - Actualizaciones de la Plataforma.
2. A los Agricultores y Técnicos Agrícolas debe permitir:
    - Gestionar su perfil de usuario.
    - Visualización de diferentes gráficos relacionados con la información de las explotaciones, para llevar a cabo la toma de decisiones.
    - Configurar alertas al agricultor durante el seguimiento del ciclo de vida del cultivo, como alerta de riegos, tratamientos, etc.

Además, se han desarrollado funcionalidades que fomentan la interoperabilidad y el intercambio de datos.

La información que recoge el Cuaderno de Campo de las explotaciones agrarias de los agricultores son las recolecciones, tratamientos fitosanitarios, muestreo de plagas, abonados, tareas realizadas, etc.

Toda la información recogida se exporta a FIWARE, es un servicio de almacenamiento que permitirá la interoperabilidad con otros sistemas del entorno y una explotación avanzada de los datos, mejorando la accesibilidad a estos.

El proyecto es desarrollado mediante una metodología ágil, SCRUM, basada en iteraciones que a su vez están compuestas por tareas, que van tomando diferentes estados hasta su finalización. Estas iteraciones estarán divididas por los Requisitos del Sistema y priorizadas por el cliente y sus reuniones periódicas. Las Etapas de la fase del desarrollo para cada Requisito es Diseño, Codificación, Prueba, Despliegue y Documentación.

En la figura 1, se puede observar las diferentes partes que se han considerado para la configuración del contenido del cuaderno, los datos de la exploración, el plan de cultivo y el plan de fertirriego y control de enfermedades.



Figura 1. Estructura del contenido de la aplicación Greenbook

Las Figuras 2 y 3, muestran algunas pantallas de configuración de la aplicación, básicamente para la introducción y visualización de datos por partes del agricultor.

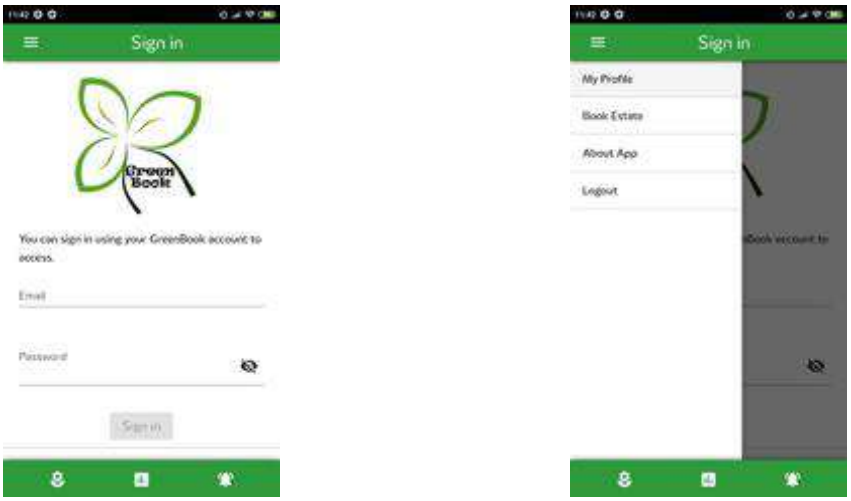


Figura 2. Pantalla principal (izquierda) y menú principal (derecha)

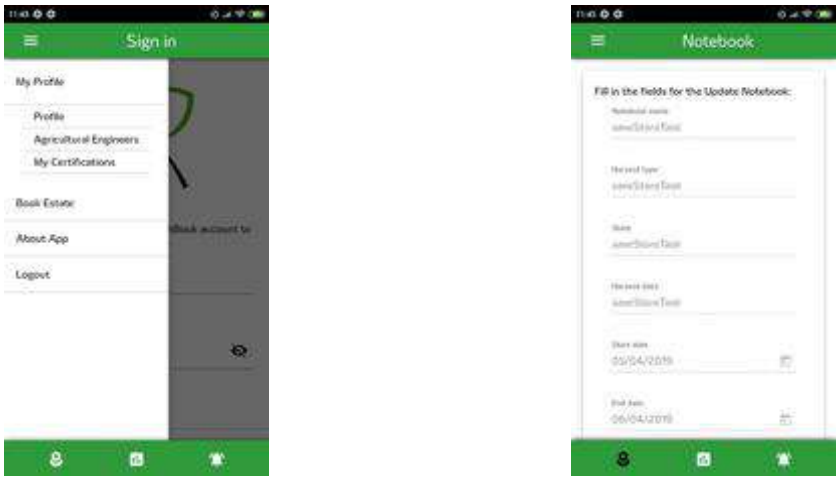


Figura 3. Ejemplo del perfil del usuario (izquierda) y de entrada de datos de producción (derecha)

Por otro lado, esta aplicación se complementa a la perfección con las necesidades del proyecto Iof2020, Caso de Uso 4.2 (Figura 4). El cual, esta desarrollando una aplicación con gran índice de interoperabilidad entre diferentes sistemas dotando a los invernaderos de estaciones encargadas de realizar mediciones de las diferentes variables de interés. Esta interoperabilidad se basa en el Enable de Fiware ContextBroker. Fiware es una plataforma desarrollada por la unión europea para crear un estándar basado en APIS. Como se menciono anteriormente el cuaderno de campo dispone de una API REST encargada de responder las peticiones de cualquier cliente. La integración con la plataforma IoF2020 se realizará por este servicio, el usuario realizará las consultas a la API del cuaderno de campo y esta enviará la información al cliente que realiza la consulta. En la siguiente figura se muestra el esquema de integración entre el cuaderno de campo con la API REST y el proyecto IoF2020. Por otro lado, estas peticiones se envían a Fiware para obtener un modelo estándar, dando la posibilidad de interoperar entre diferentes sistemas.

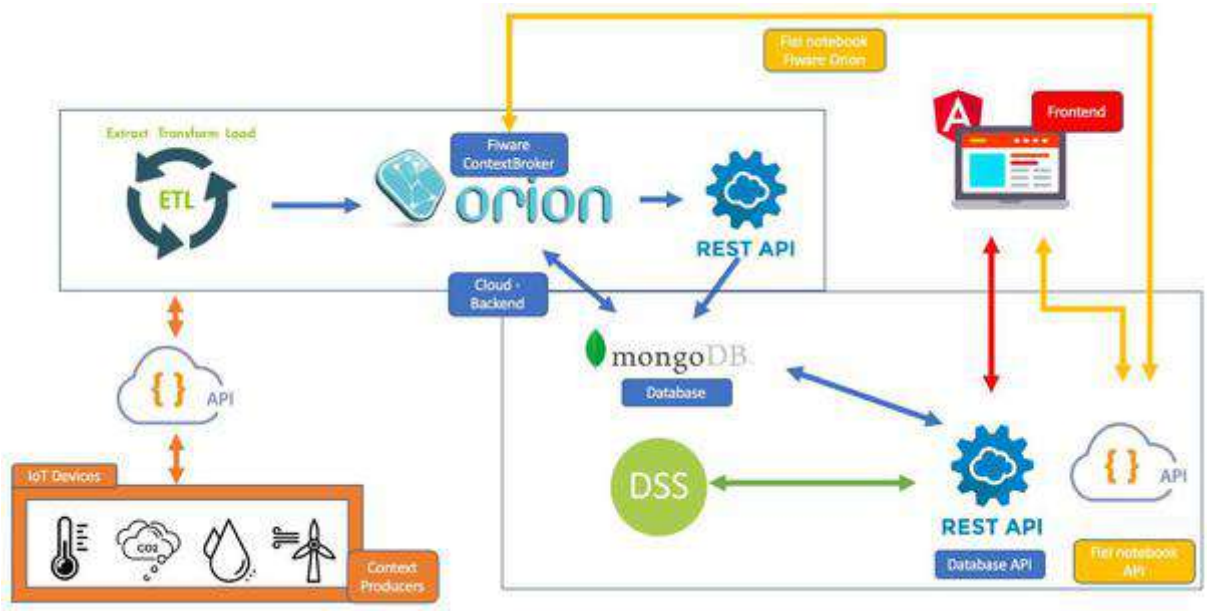


Figura 4. Integración del GreenBook en funcionamiento del sistema completo desarrolla para el proyecto IoF2020.

4. Conclusiones

El desarrollo tratado de este sistema ayuda a gestionar una explotación agraria del sector agrícola, en el que están implicados muchos roles, como el agricultor, el técnico agrícola, las certificadoras, etc, y donde es tan difícil gestionar y no olvidarse de los detalles que puedan suceder y que conllevarían a grandes desastres tanto para un agricultor en concreto, como para el sector en general. Para ello se permite gestionar y mostrar toda la información importante, basada en una interfaz de usuario intuitiva y amigable, basada en diseños y gráficas propios con los datos recogidos. El agricultor puede llevar detallado todo lo comentado anteriormente en su cuaderno de campo.

La aplicación y el sistema desarrollado hace que sea una forma muy fácil de llevar este control, asesoramiento y comunicación entre agricultores, técnicos agrícolas y todas las personas implicadas en este sector. En resumen, está demostrado que cada vez las personas usan más las nuevas tecnologías y con un dispositivo que toda persona lleva consigo, es decir, cualquier persona puede ayudar o informarse de una explotación agraria en concreto mediante cualquier dispositivo que tenga instalada la aplicación, ya sea un ordenador, un teléfono móvil, una tablet, etc, en cualquier momento y lugar.

5. Agradecimientos

This work has been developed within the framework of the Project IoF2020-Internet of Food and Farm 2020, funded by the Horizon 2020 Framework Programme of the European Union, Grant Agreement no. 731884

Referencias

1. Moltchanov, B. and Rocha, O. R. (2014) 'A context broker to enable future IoT applications and services', in 2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). IEEE, pp. 263–268. doi: 10.1109/ICUMT.2014.7002113.
2. Kang, Y.-S. et al. (2016) 'MongoDB-Based Repository Design for IoT-Generated RFID/Sensor Big Data', IEEE Sensors Journal, 16(2), pp. 485–497. doi: 10.1109/JSEN.2015.2483499.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Herramienta para la generación de mapas de rendimiento en cítricos usando los datos de una plataforma de asistencia a la recolección con sistema de clasificación

M.G. González-González [1], J. Gómez [2], V. Alegre[1], S. López [1], J. Blasco [1], S. Cubero [1], E. Soria [2], P. Chueca[1]

[1] Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), Valencia, Spain,
[2] Intelligent Data Analysis Laboratory (IDAL), Universitat de València, Valencia, Spain.

Resumen: El uso de las nuevas tecnologías en la agricultura moderna permite obtener información esencial para la gestión óptima de la explotación del cultivo. Una de sus principales ventajas es la posibilidad de asociar los datos con ubicaciones muy específicas del cultivo. La representación espacial de esta información permite llevar a cabo operaciones agrícolas de manera precisa, consiguiendo así una mayor eficiencia en la gestión del cultivo. Este trabajo se engloba dentro del objetivo de desarrollar una aplicación web de concepto abierto utilizando el lenguaje de programación R, capaz de generar mapas agrícolas que muestren la información capturada del cultivo utilizando diferentes sensores. Una función clave de esta aplicación es la creación interna de una base de datos que enlaza todas las propiedades medidas por cualquier sensor con la información espacial proporcionada por un sistema de posicionamiento global (*GPS*) sin la necesidad de integrar todos estos componentes en un conjunto. En este trabajo se presenta un caso práctico de la aplicación web utilizando los datos recopilados por un prototipo de plataforma de asistencia a la recolección de cítricos.

Palabras clave: *SIG*, software *R*, variabilidad espacial, agricultura de precisión.

1. Introducción

El uso de las tecnologías de la información (*TIC*) en la agricultura de precisión permite optimizar el rendimiento de las explotaciones agrarias. La asociación de la información obtenida en campo por medio de sensores, satélites, sistemas de posicionamiento global (*GPS*) junto con sistemas de información geográfica (*SIG*) posibilita la monitorización del rendimiento. Una de las principales tecnologías de agricultura de precisión es la generación de mapas de rendimiento [1]. Son una herramienta clave debido a su utilidad tanto en el desarrollo como en la evaluación de estrategias de gestión de precisión [2]. La representación espacial y temporal de estos datos a través de mapas es una de las técnicas más efectivas para presentar la información de manera útil y comprensible a los agricultores. La combinación de los mapas de rendimiento espaciales generados en diferentes franjas temporales presenta un valor añadido para la toma de decisiones de gestión más estratégica a medio y largo plazo [3].

Para la generación de los mapas con la información obtenida en campo asociada a la información del *GPS* se recurre a los *SIG*. Estos sistemas son herramientas informáticas específicas que mediante información espacialmente referenciada posibilitan el almacenamiento, manipulación, edición, análisis y presentación de gran cantidad de datos en diversas formas

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3369

(gráficos, figuras, mapas, etc.) [4]. En la actualidad existen multitud de programas comerciales *SIG* y también de gestión agrícola con módulos *SIG* incorporados (*QGIS, AFS, ArcGIS, Trimble Ag*, entre otros). Estos programas suelen ser utilizados por las empresas que prestan servicios a los productores agrícolas en el área de la agricultura de precisión [5]. Algunos investigadores han desarrollado herramientas propias con módulos *SIG* [6, 7, 8, 9, 10].

Todos estos sistemas necesitan una base de datos espacial para georreferenciar la información en los mapas. Esta base de datos es creada durante la obtención de las propiedades del cultivo mediante un sensor o un conjunto de sensores. Para componer la base de datos internamente, las propiedades del cultivo están vinculadas a las coordenadas espaciales obtenidas de un *GPS* integrado. Uno de los principales inconvenientes de este tipo de sistemas cerrados es que las mediciones capturadas por otros sensores que no forman parte del conjunto son difíciles de integrar, y, por ende, de ser utilizadas para generar mapas agrícolas combinados.

El presente trabajo se engloba en el marco de un objetivo general en el que se pretende desarrollar una nueva herramienta para monitorizar y generar mapas de rendimiento con información del cultivo obtenida desde diferentes sensores independientes. Esto representará una mejora significativa sobre los anteriores métodos de generación de mapas puesto que enlazará todas las propiedades medidas por cualquier sensor con la información espacial proporcionada por un *GPS* sin la necesidad de integrar todos estos componentes en un conjunto creando así una base de datos espacial combinada.

En este trabajo se presenta un caso práctico de la aplicación web haciendo uso de datos obtenidos en un ensayo de recolección de cítricos con un prototipo de plataforma móvil de asistencia a la recolección. La aplicación desarrollada tiene la capacidad de procesar, analizar y visualizar la información en un entorno intuitivo y fácilmente manejable. Proporciona información precisa, analiza los datos y crea mapas de rendimiento lo que aumentará la eficiencia de gestión en campo y la trazabilidad de la fruta.

2. Materiales y métodos

La aplicación web ha sido desarrollada utilizando el software de código abierto *R* por su alto potencial para el procesamiento, la extracción de datos y el análisis computacional de grandes cantidades de información.

2.1. Creación de la base de datos combinada

Para la creación de la base de datos espacial combinada cada sensor debe generar un archivo que asocie las mediciones capturadas con el momento en que se capturan. En la aplicación se ha de insertar el fichero que contiene los datos de ubicación *GPS* y los ficheros creados por los diferentes sensores que contienen información sobre el cultivo. Mediante tratamiento y procesado de datos, esta información se vincula en función del tiempo, descartándose los errores en la toma de datos por parte del *GPS*. La aplicación presenta la base de datos combinada embebida en su sistema.

Las variables contenidas en la base de datos se visualizan agrupadas según: tiempo (fecha y hora), ubicación (longitud, latitud y altitud), informativas (relacionadas con el método de obtención de los datos) y variables de calidad (información sobre el cultivo). Las variables cuantitativas se han medido en el Sistema Internacional de Unidades (*SI*). Las variables de longitud y latitud se muestran en el *World Geodetic System 1984 (WGS84).*

Esta base de datos puede ser filtrada mediante los controles presentes en la aplicación. La base de datos espacial, original y filtrada, puede ser descargada en un archivo con formato *csv*.

2.2. Georreferenciación de la información y análisis de datos en la aplicación

Una vez creada la base de datos, la aplicación permite mostrar la información del cultivo en mapas orográficos a nivel de planta, calle (o fila) de cultivo y parcela. Se ha optado por mostrar

cada dato georreferenciado sobre un mapa orográfico en función de las variables seleccionadas en lugar de agrupar conjuntos de datos con información de todas las variables en una cuadrícula de resolución determinada [11] ya que, con ello, se pierde la singularidad de los datos o en lugar de la superposición de un mapa de superficie de la distribución del rendimiento [12] con lo que se difuminan los datos perdiendo así información de posibles datos anómalos. Como complemento a los mapas, se muestran las tablas que resumen la información cuantitativa del cultivo según los diferentes niveles seleccionados.

Además, la distribución espacial de la información de acuerdo con las diferentes variables puede analizarse estadísticamente en los diferentes niveles, obteniendo así la variabilidad espacial de las propiedades medidas en el cultivo para ayudar a la toma de decisiones sobre el manejo del cultivo. La información se muestra en diversos gráficos interactivos a modo de apoyo visual, facilitando así la comprensión de la información.

2.3. Ensayo de recolección para obtención de datos y prueba de la aplicación

La aplicación ha sido probada utilizando los datos recopilados por un prototipo de plataforma móvil de asistencia a la recolección de cítricos creado en el IVIA (figura 1).



Figura 1. Prototipo de plataforma móvil.

La recolección se llevó a cabo en una de las parcelas de cultivo de cítricos en las instalaciones del IVIA. Para el ensayo se recolectaron un conjunto de árboles pertenecientes a tres calles contiguas. No se recolectaron filas de cultivo completas ya que la configuración de plantación no permitía el giro del prototipo al final de cada calle. En la figura 2 se muestra el esquema de recolección en la parcela.

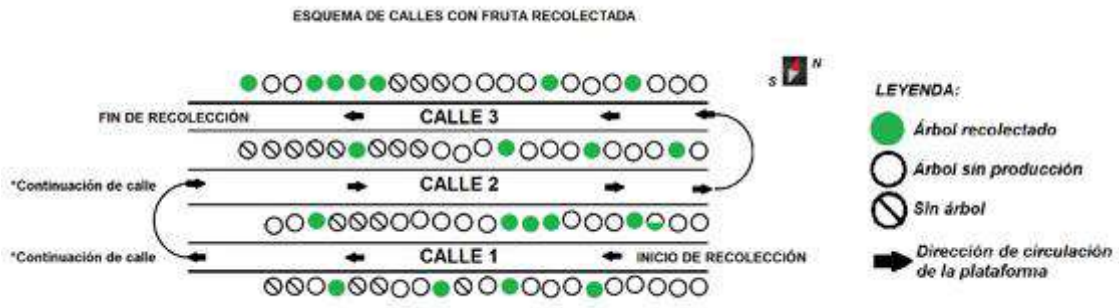


Figura 2. Esquema de recolección en parcela de IVIA.

En la plataforma móvil, la información se adquiere individualmente para cada fruta utilizando un sistema de visión instalado en la parte superior del prototipo. Las propiedades externas, como el área, el diámetro y el índice de color de la fruta se obtienen de las imágenes captadas en tiempo real durante la recolección. Los datos de ubicación geográfica se adquieren a través de un sistema global de navegación por satélite (*GNSS*) instalado en el prototipo. La información es almacenada en diferentes archivos en el ordenador industrial del prototipo.

Previo al comienzo de la recolección, el sistema de visión requiere insertar manualmente el valor numérico del diámetro según el cual se va a llevar a cabo la clasificación en campo en 2 categorías. En este ensayo, el valor insertado fue de 64 mm. Se consideró que aquella fruta cuyo diámetro fuera superior a 64 mm alcanzaba una alta calidad con destino el mercado en fresco, enviándose al contenedor exterior dispuesto sobre la plataforma ('Output 1'), y el resto, catalogadas de calidad inferior y, por tanto, con destino a industria, fueron enviadas al contenedor interior ('Output 2').

3. Resultados y discusión

La base de datos espacial se creó vinculando la información de las propiedades externas de los cítricos adquiridas en el momento de inspección (no en el momento de recolección del árbol) con los datos de ubicación del *GPS* (figura 3).

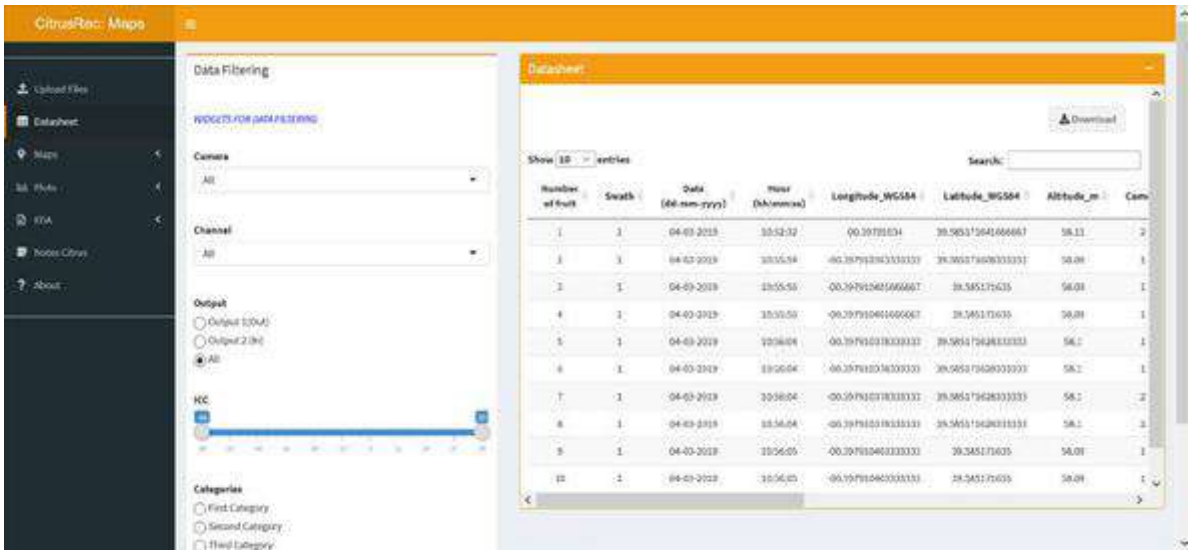


Figura 3. Base de datos espacial.

Para esta prueba las variables informativas fueron: número de cámara que adquiere las imágenes (denominado 'Camera'), carril que lleva la fruta hasta el sistema de inspección (denominado 'Channel') y contenedor al que se envía la fruta después de la inspección (denominado 'Output'). Respecto a las variables de calidad se tienen: diámetro, área, peso e índice de color.

Las opciones disponibles para filtrar los datos según las variables medidas permiten para este caso, por ejemplo, separar la información de las frutas cuyo destino es el consumo en fresco o la industria.

Cada mapa visualiza la fruta recolectada de acuerdo con cada una de las variables seleccionadas a nivel de calle y parcela para estos datos. Por tanto, con la información de este ensayo en la aplicación se crean tres mapas: uno denominado 'mapa de producción' donde se muestra la producción en función de la variable 'output', uno denominado 'mapa de color'

donde se muestra la producción en función de la variable 'índice de color' y uno denominado 'mapa de calibre' donde se muestra la producción según la variable 'diámetro'. En la figura 4 se muestra un ejemplo de un mapa que representa la información georreferenciada de las frutas recolectadas.



Figura 4. Mapa creado en la aplicación: mapa de producción.

Como se aprecia en la figura 4, dentro de cada fila se representa la ubicación concreta de cada dato. Con ello, se muestran áreas donde ninguna fruta ha pasado por el sistema de visión, lo cual índica la existencia de zonas con rendimiento nulo. En las tablas complementarias a cada uno de los mapas se muestra la información de producción en kilogramos, en unidades de fruta y en tanto por ciento del total de producción en función de la variable correspondiente para cada calle y para el total de calles donde se ha recolectado fruta. A modo de ejemplo, en la tabla 1 se muestra las tablas adyacentes al mapa de producción.

Swath	Production(Kg)/Swath	Production(%)/Swath	Production Output1(Kg)/Swath	Production Output1(%)/Swath	Production Output2(Kg)/Swath	Production Output2(%)/Swath
1	501.1	29.03	440.56	26.23	60.54	3.6
2	550.07	30.27	519.42	30.92	39.45	2.35
3	619.76	34.9	491.44	29.26	128.32	7.64
TOTAL	1670.73	100	1451.42	86.41	228.31	13.59

Showing 1 to 4 of 4 entries

Swath	Number of fruits(Uds)/Swath	Number of fruits(%)/Swath	Number of fruits Output1(Uds)/Swath	Number of fruits Output1(%)/Swath	Number of fruits Output2(Uds)/Swath	Number of fruits Output2(%)/Swath
1	2068	28.72	2337	22.83	629	8.03
2	3208	31.09	2826	27.37	382	3.7
3	4153	40.21	2766	26.78	1387	13.43
TOTAL	10327	100	7929	76.78	2398	23.22

Showing 1 to 4 of 4 entries

Figura 5. Tablas complementarias al mapa de producción creadas por la aplicación.

Comparando la información mostrada en el mapa de producción (figura 4) con el esquema de recolección (figura 2), se aprecia un desplazamiento longitudinal de los datos pues el prototipo inspecciona la fruta que ha sido recolectada de los árboles que se encuentran en la zona de trabajo posicionada en la parte delantera del prototipo.

La aplicación muestra de manera clara aquellas zonas con nula productividad, esto es, donde ninguna fruta ha pasado por el sistema de visión y los puntos de principio y fin de cada calle por donde se lleva a cabo la recolección.

En función del proceso de clasificación llevado a cabo en la plataforma móvil, en el zoom sobre el mapa de producción mostrado en la figura 5 se aprecian amplias zonas donde los frutos se han considerado válidos (áreas compuestas mayoritariamente con datos de color anaranjado) y algunas zonas de menor tamaño donde los frutos se han considerado no válidos (áreas compuestas mayoritariamente con datos de color azulado). De esta forma se representa la variabilidad espacial de los datos en función de la variable 'output'.



Figura 6. Zoom sobre el mapa de producción.

En la figura 6 se muestran los gráficos interactivos asociados al mapa de producción. En la gráfica de la izquierda se refleja la producción en función de la calle de cultivo y de la parcela. En la gráfica de la derecha se visualiza la producción en función de la variable 'output' por calle de cultivo y por parcela. Al interaccionar con los gráficos las etiquetas muestran la información cuantitativa relativa a cada variable.

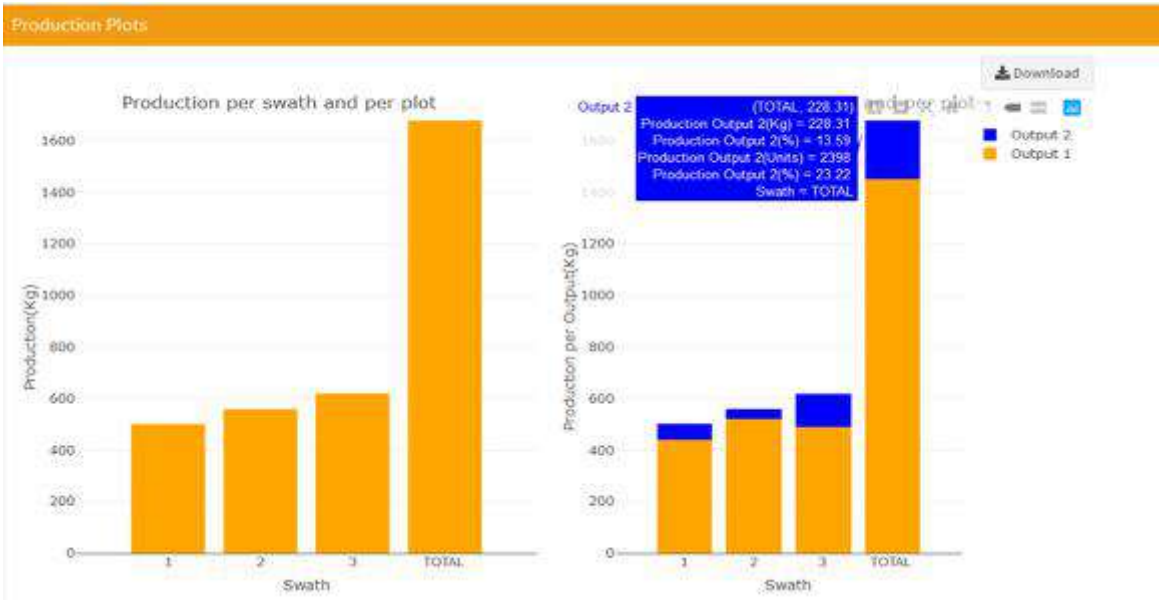


Figura 7. Gráfico interactivo asociado al mapa de producción.

4. Conclusiones

Se ha desarrollado una herramienta para generar mapas de rendimiento con información recopilada del cultivo que proporciona conocimiento práctico sobre la explotación agrícola. Esta aplicación presenta una importante ventaja: la creación de una base de datos integrando la información espacial con la información proporcionada por cualquier sensor o conjunto de sensores utilizando la variable tiempo como método de vinculación. La información contenida en esta base de datos es georreferenciada sobre un mapa en función de las variables medidas que se seleccionen y es analizada estadísticamente mostrando además la información cuantitativa en gráficos y tablas. La generación automática de informes permite hacer uso de esta información fuera de la aplicación.

Esta herramienta informática no almacena la información gestionada por lo que no infringe ninguna regulación, norma o ley relacionada con los derechos de la información y de su propiedad.

Esta aplicación web es capaz de simplificar al usuario el procesado de los datos y su análisis, obteniendo directamente información gráfica y cuantitativa expresada de manera comprensible a través de una aplicación web con interfaz intuitiva y visual. La herramienta proporciona información de trazabilidad en el campo pudiendo asociar cada dato con su ubicación.

Como proyección futura, se pretende ampliar este sistema para monitorizar y generar mapas de cualquier parámetro de cultivo como puede ser aplicación de fitosanitarios, detección de malezas, estado vegetativo, aplicación de nutrientes, aplicación de riego, entre otros. La combinación de la información referente al rendimiento de la recolección con otro tipo de información sobre el suelo y sobre el cultivo permitirá gestionar el campo de forma más eficiente.

5. Agradecimientos

Este trabajo se ha llevado a cabo dentro del proyecto "Aplicación de nuevas tecnologías para una estrategia integral de cosecha mecanizada de cítricos (CITRUSREC)" financiado por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) y el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España (proyectos RTA2014-00025-C05-01 y RTA2014-00025-C05-05) y cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Mª Gyomar González tiene concedida una beca predoctoral FPI-INIA. Este trabajo ha sido posible gracias a la ayuda del personal del Centro de Agroingeniería del IVIA y del personal del IDAL.

Referencias

1. Ping, J. L., Dobermann, A. Processing of yield map data. Precision Agriculture. 2005, 6(2), (193-212).
2. Sudduth, K. A., Drummond, S. T. Yield editor. Agronomy Journal. 2007, 99(6), (1471-1482).
3. Dobermann, A., Ping, J. L., Adamchuk, V. I., Simbahan, G. C., Ferguson, R. B. Classification of crop yield variability in irrigated production fields. Agronomy Journal. 2003, 95(5), (1105-1120).
4. Mantovani, E. C., & Magdalena, C. Manual de agricultura de precisión. Embrapa Milho e Sorgo-Livro científico (ALICE). 2014.
5. Zagórda, M., Walczykova, M. The application of various software programs for mapping yields in precision agriculture. In BIO Web of Conferences. EDP Sciences. 2018, 10, (01018).
6. Uva, M., Campanella, O. AP-SIG: un SIG con funciones específicas para Agricultura de Precisión. In XI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación. 2009.
7. Tan, L., Haley, R., Wortman, R. Cloud-based harvest management system for specialty crops. In IEEE Fourth Symposium on Network Cloud Computing and Applications (NCCA). 2015, (91-98).
8. Ampatzidis, Y., Tan, L., Haley, R., Whiting, M. D. Cloud-based harvest management information system for hand-harvested specialty crops. Computers and Electronics in Agriculture. 2016, 122, (161-167).

9. Gonzalez-de-Santos, P., Ribeiro, A., Fernandez-Quintanilla, C., Lopez-Granados, F., Brandstoetter, M., Tomic, S., Perez-Ruiz, M. Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture. Precision Agriculture. 2017, 18(4), (574-614).
10. Leroux, C., Jones, H., Pichon, L., Guillaume, S., Lamour, J., Taylor, J., Tisseyre, B. GeoFIS: una herramienta de código abierto para la toma de decisiones para datos de agricultura de precisión. Agricultura. 2018, 8 (6), (73).
11. Rovira-Más, F., Sáiz-Rubio, V. Crop biometric maps: The key to prediction. Sensors. 2013, 13(9), (12698-12743).
12. Tan, L., Wortman, R. Cloud-based monitoring and analysis of yield efficiency in precision farming. In Proceedings of the 2014 IEEE 15th International Conference on Information Reuse and Integration. IEEE. 2014, (163-170).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Integração da condutividade eléctrica do solo e de índices obtidos por imagens de satélite para gestão diferenciada da fertilização em pastagens

J. Serrano[1], José Marques da Silva[2], Shakib Shahidian[3], Christiane Santos[4], Mário de Carvalho[5]

[1] ICAAM, Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, P.O. Box 94, Évora 7002-554, Portugal; jmrs@uevora.pt
[2] ICAAM, Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, P.O. Box 94, Évora 7002-554, Portugal; jmsilva@uevora.pt
[3] ICAAM, Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, P.O. Box 94, Évora 7002-554, Portugal; shakib@uevora.pt
[4] ICAAM, Universidade de Évora, P.O. Box 94, Évora 7002-554, Portugal, kris_11crsmulek@hotmail.com
[5] ICAAM, Departamento de Fitotecnia, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, P.O. Box 94, Évora 7002-554, Portugal; mjc@uevora.pt

Resumo: As pastagens de sequeiro no Alentejo, região situada no Sul de Portugal, ocupam normalmente solos que apresentam reduzida fertilidade mas, simultaneamente, grande variabilidade espacial. A aplicação racional de fertilizantes pressupõe o conhecimento da variabilidade espacial do solo e da resposta da cultura, o que exige que tecnologias expeditas possam identificar "zonas homogéneas de gestão" (ZHG). Neste trabalho monitorizou-se, uma parcela de cerca de 25 ha de pastagem sob montado de azinho. Foram realizados dois levantamentos da condutividade eléctrica aparente do solo (CE_a) com um sensor de contacto Veris 2000 XA (em Novembro de 2017 e Outubro de 2018) e foram estabelecidos 24 pontos de amostragem (30m×30m) em zonas sem árvores para permitir as leituras dos registos históricos dos índices NDVI e NDWI obtidos a partir das imagens de satélite (Sentinel-2) no período de Inverno e Primavera de 2017 e de 2018. Os resultados obtidos ao nível da variabilidade espacial e da estabilidade temporal dos parâmetros medidos permitiram definir ZHG, as quais constituem a base para a elaboração de mapas de prescrição diferenciada de adubos com tecnologia de aplicação variável, tendo em conta a variabilidade das características do solo e do desenvolvimento da cultura e contribuindo para a sustentabilidade deste ecossistema.

Palavras-chave: variabilidade espacial, CE_a, NDVI, montado, tomada de decisão

1. Introdução

As pastagens de sequeiro no Alentejo, região situada no Sul de Portugal, constituem a base da alimentação dos animais em sistemas de produção extensivos. Ocupam normalmente solos que apresentam reduzida fertilidade mas, simultaneamente, grande variabilidade espacial. Esta resulta da conjugação de factores como: relevo ondulado, variabilidade intrínseca ao nível da rocha-mãe originária, existência de afloramentos rochosos, influência das árvores ou o efeito do pastoreio animal [1]. A variabilidade do substrato solo reflecte-se no heterogéneo desenvolvimento da pastagem [2]. A utilização de pastagens biodiversas (que incluem leguminosas, potencialmente fixadoras do azoto atmosférico) e o predomínio nesta região da rocha-mãe originária rica em potássio, determinam como prática comum em pastagens a

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3331

aplicação anual e homogénea de adubos fosfatados no final do Outono [3]. A primeira etapa para implementação de estratégias de gestão diferenciada dos factores de produção pressupõe determinar os padrões espaciais das principais propriedades do solo e do vigor da vegetação, o que requer o conhecimento da variabilidade do solo e da resposta da cultura, para além da utilização de tecnologias de aplicação variável (VRT) para fechar o ciclo. Estes distribuidores VRT são comuns, especialmente entre os prestadores de serviços, mas exigem que tecnologias expeditas, numa fase prévia, identifiquem zonas com características (do solo e do desenvolvimento da cultura) semelhantes, conhecidas como "zonas homogéneas de gestão (ZHG)".

A utilização da condutividade eléctrica aparente do solo (CE_a), por integrar as principais propriedades que afectam a produtividade das culturas (nomeadamente, a textura, a matéria orgânica e a capacidade de troca catiónica do solo), constitui uma das mais apropriadas variáveis do solo para caracterizar zonas de gestão de uma parcela, definir a amostragem inteligente e estabelecer mapas de prescrição da fertilização ou da correcção do solo [1]. Vários estudos demonstraram o interesse prático da monitorização da CE_a para estabelecimento de ZHG [4-6], quer pela utilização de sensores de indução electromagnética (como o EM38 ou o DUALEM), quer pela utilização de sensores de contacto (como é o exemplo da tecnologia Véris). Apesar destas tecnologias darem uma resposta expedita, têm um custo por hectare, variável consoante a área a levantar, que pode não ser compatível com a reduzida margem de lucro associada à produção animal extensiva.

Nos últimos anos, o acesso gratuito a imagens de satélite e à obtenção de índices vários, entre eles o NDVI ("normalized difference vegetation índex") e o NDWI ("normalized difference water índex"), proporciona informação com uma resolução espacial muito interessante (de "10m×10m" no NDVI e de "20m×20m" no NDWI) e com uma resolução temporal de apenas 5 dias.

O NDVI, baseado na medição da radiação reflectida pelas plantas em dois comprimentos de onda: o vermelho ("RED") e o infravermelho próximo ("NIR"), é o índice de vegetação mais utilizado para definição de ZHG [7,8]. Altos valores de NDVI reflectem maior vigor e capacidade fotossintética da vegetação, enquanto valores baixos de NDVI podem reflectir situações de stress das plantas [9,10].

Por outro lado, o NDWI, obtido a partir das bandas "B8A" (865 nm) e "B11" (1610 nm) do espectro do Sentinel-2 foi proposto para descrever o estado da vegetação em termos de teor em água [11,12] ou para descrever o teor de humidade superficial do solo [13]. Valores mais elevados de NDWI indicam maior humidade no solo e nas plantas, enquanto valores mais baixos e até negativos são comuns nas fases finais do ciclo vegetativo das plantas e em solos relativamente secos.

Neste trabalho procura-se demonstrar o interesse de associar o levantamento expedito da CE_a do solo à monitorização de séries temporais de índices obtidos a partir de imagens de satélite com o objectivo de definir e validar ZHG. São utilizadas técnicas para avaliar a variabilidade espacial e a estabilidade temporal dos parâmetros medidos, aspectos fundamentais no apoio à tomada de decisão no que confere à elaboração de mapas de prescrição diferenciada de adubo.

2. Materiais e métodos

2.1. Parcela experimental

Neste trabalho monitorizou-se uma parcela de cerca de 25 ha de pastagem sob montado de azinho situada na Herdade da Mitra, da Universidade de Évora (coordenadas 38°32,1'N; 7°59,8'W). O solo é classificado como Cambissolo derivado de granito [14]. Estes solos são

pouco férteis, normalmente ácidos e principalmente usados em sistemas mistos agro-silvo-pastoris.

Foram estabelecidos 24 pontos de amostragem geo-referenciados (cada um com uma área de 900 m^2, correspondente a um "pixel" do "Sentinel-2" de "30m×30m"). Estes foram seleccionados em zonas sem árvores para permitir as leituras dos índices obtidos a partir das imagens de satélite sem interferência da vegetação arbórea.

2.2. Levantamento altimétrico

Em Novembro de 2017 foi realizado um levantamento topográfico da área de ensaio utilizando um GPS-RTK (Trimble RTK/ PP - 4700 GPS, Trimble Navigation Limited, USA). O mapa altimétrico da parcela experimental foi criado a partir de interpolação linear em ArcGIS 9.3 com uma grelha de 1 m de resolução.

2.3. Levantamento da condutividade eléctrica aparente do solo

Foram realizados dois levantamentos da condutividade eléctrica aparente do solo com um sensor Veris 2000 XA (em Novembro de 2017 e em Outubro de 2018) na camada de solo de 0-0,30m. O sensor foi puxado por um tractor agrícola, tendo realizado passagens sucessivas espaçadas 10m entre si. O espaçamento entre passagens foi garantido por um sistema GPS de apoio à condução do tractor. Em cada um dos levantamentos da CE_a foram recolhidas 12 amostras de solo (em metade dos pontos de amostragem) para determinação da humidade volumétrica na camada superficial (0-0,30m) de acordo com procedimento standard.

2.4. Determinação das características do solo

Em Novembro de 2017 foram recolhidas amostras de solo nos 24 pontos de amostragem. A recolha foi realizada manualmente com uma sonda "meia-cana" e um maço na camada de solo 0-0,30m. As amostras compósitas (resultantes de 5 sub-amostras recolhidas na área do pixel), devidamente codificadas, foram transportadas para o Laboratório de Química Agrícola da Universidade de Évora onde se procedeu à determinação da textura, dos teores de matéria orgânica, do pH, do fósforo, do potássio e da capacidade de troca catiónica de acordo com procedimentos standard.

2.5. Determinação de índices obtidos a partir das imagens de satélite

Através da plataforma electrónica "http://agromap.agroinsider360.com" da empresa "AgroInsider" (uma "spin-off" da Universidade de Évora) foram capturados os registos históricos do NDVI e do NDWI no período de Inverno e Primavera de 2017 e de 2018 nos 24 pontos de amostragem (pixeis do "Sentinel-2"). Foram eliminados os registos obtidos em dias com nebulosidade.

2.6.Tratamento dos dados

A análise estatística dos resultados incluiu a análise descritiva com o cálculo da média, do desvio padrão (DP), do coeficiente de variação (CV) e do intervalo de variação de cada conjunto de dados.

A estabilidade temporal da CE_a, do NDVI e do NDWI foi determinada calculando o CV de cada ponto de amostragem entre os dois momentos de avaliação (2017 e 2018), método utilizado previamente por outros autores [15-17]. O CV médio para o período de ensaio (2 anos) e para o conjunto de todos os pontos de amostragem foi calculado com o objectivo de evidenciar a magnitude relativa da variação temporal dos parâmetros em análise. A conjugação da análise da variabilidade espacial (com base no valor relativo; identifica se o valor está acima ou abaixo

da média) com a estabilidade temporal (tendo em conta o CV) permitiu a elaboração de mapas de classes de gestão. Foram estabelecidas 5 classes [16]: classe 1- valor superior à média do parâmetro na parcela e estável (CV<15%); classe 2- valor superior à média do parâmetro na parcela e moderadamente estável (15%<CV<25%); classe 3- valor inferior à média do parâmetro na parcela e estável (CV<15%)l; classe 4- valor inferior à média do parâmetro na parcela e moderadamente estável (15%<CV<25%) ; e classe 5- instável (CV>25%).

Os mapas foram elaborados com o módulo "ArcMap"/Spatial Analyst" do programa ARCGIS 9.3 [18], tendo sido utilizado como interpolador o "inverso do quadrado da distância" ("IDW, Inverse Distance Weighting").

2.7. *Correlação entre parâmetros*

A análise de correlação entre parâmetros foi realizada com o pacote de estatística do "20.0 SPSS package for Windows" (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) com um nível de significância de 95% ($p < 0,05$).

3. Resultados e discussão

A Figura 1 ilustra, à esquerda (a), os limites da parcela e a localização dos 24 pontos de amostragem, e à direita (b), o mapa altimétrico. É evidente o relevo ondulado característico da região, o qual tem influência na dinâmica dos nutrientes no solo [17].

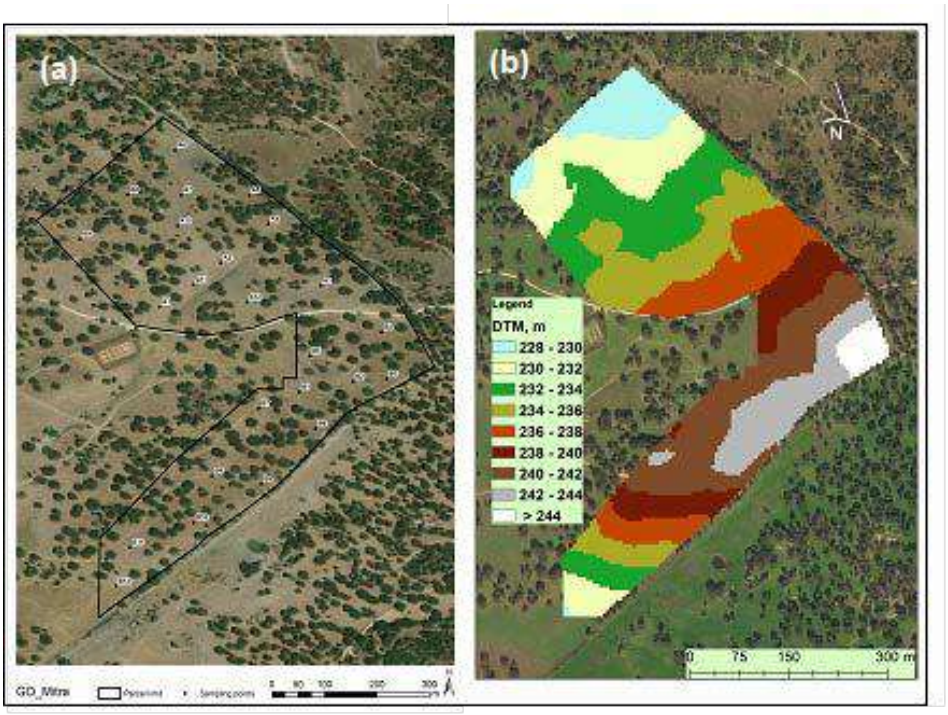


Figura 1. À esquerda limite exterior da parcela de ensaio e localização aproximada dos 24 pontos de amostragem (a); à direita mapa altimétrico (b) da parcela experimental.

A Tabela 1 resume as características da camada superficial do solo (0-0,30m) na parcela do campo experimental em Novembro de 2017. Os resultados confirmam as limitações destes tipos de solos, com textura franco-arenosa (teores de argila da ordem dos 10%), ácidos (pH da ordem dos 5,5), pobres em fósforo, com fraca capacidade de troca catiónica e baixos teores de matéria orgânica (1,5% em média).

Tabela 1. Características do solo na camada superficial (0-0,30 m) da parcela experimental (Novembro de 2017).

Parâmetros do solo	Média±DP	CV, %	Intervalo de variação
Areia total, %	78,4±4,0	5,0	[71,5-84,6]
Limo, %	11,2±2,2	19,9	[7,4-15,3]
Argila, %	10,4±1,8	17,3	[7,2-13,9]
P2O5, mg/kg	32,6±21,5	65,8	[7,8-81,0]
K2O, mg/kg	94,0±72,1	76,7	[18,0-380,0]
M.O., %	1,5±0,3	21,5	[0,9-2,1]
pH	5,5±0,2	4,4	[5,0-5,8]
CTC, meq/100g	10,8±2,8	26,4	[5,2-17,9]

DP- Desvio padrão; CV- Coeficiente de variação; M.O.- Matéria orgânica; CTC- Capacidade de troca catiónica;

A Figura 2 ilustra os mapas da CE_a na parcela experimental em Novembro de 2017 (a) e em Outubro de 2018 (b).

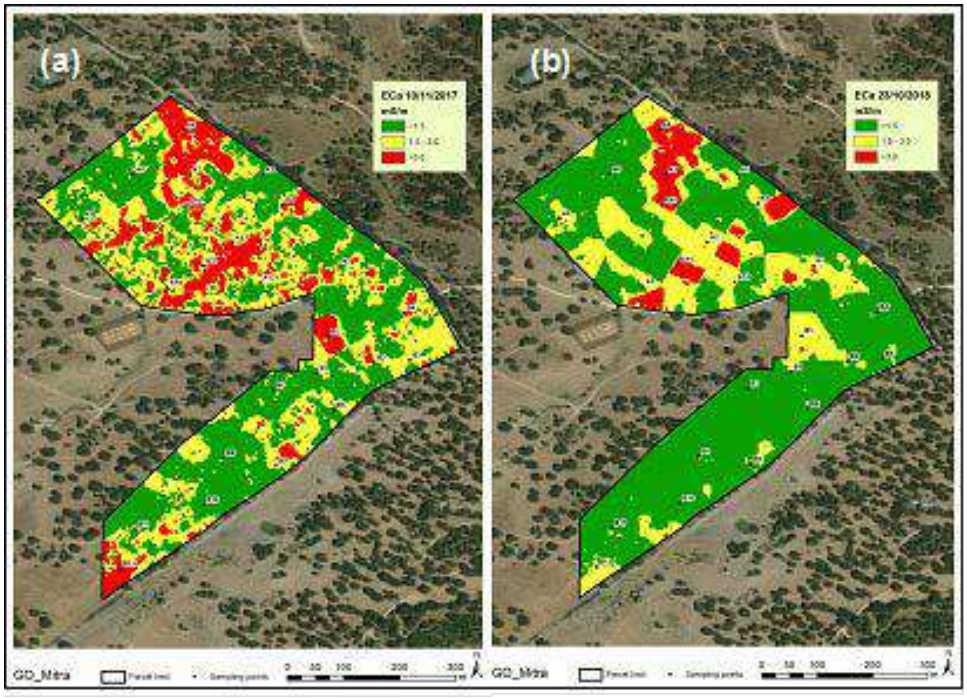


Figura 2. Mapas da CE_a na camada superficial do solo (0-0,30m) da parcela.

A Tabela 2 mostra, por um lado, que os valores médios da CEa na parcela experimental são relativamente baixos, o que reflecte a fraca textura do solo [6] e, por outro, uma acentuada variabilidade espacial da CEa (CV da ordem dos 50%).

É possível verificar, de 2017 para 2018, uma ligeira diminuição dos valores médios da CEa na parcela experimental, facto que pode estar associado à diminuição dos teores médios de humidade do solo [19]. A Figura 3 ilustra a forte correlação (R2=0,71) verificada entre estas duas variáveis (humidade e CEa) na parcela experimental. A acentuada variabilidade espacial da CEa na parcela experimental mostra o interesse potencial desta técnica e da informação resultante para efeitos de apoio à tomada de decisão em termos de definição de ZHG.

Tabela 2. Condutividade eléctrica aparente e humidade do solo na camada superficial (0-0,30 m) da parcela experimental.

Parâmetros do solo	Média±DP	CV, %	Intervalo de variação
CE_a, mS/m			
10/11/2017	2,3±1,3	56,5	[0,8-5,5]
23/10/2018	1,8±0,9	50,0	[0,6-3,7]
Humidade, %			
10/11/2017	9,4±1,7	19,1	[7,4-12,5]
23/10/2018	7,9±1,0	12,7	[6,4-9,8]

DP- Desvio padrão; CV- Coeficiente de variação; CE_a- Condutividade eléctrica aparente do solo;

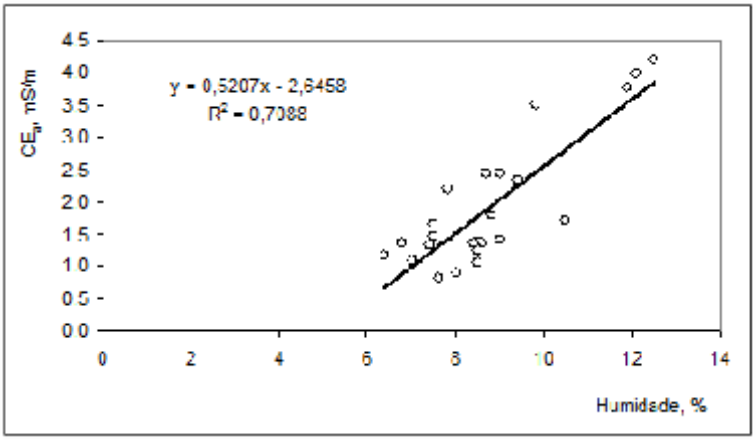


Figura 3. Relação entre a humidade e a condutividade eléctrica aparente do solo (CE_a) na camada superficial (0-0,30m) da parcela experimental.

A Figura 4 ilustra os mapas do NDVI (a) e do NDWI (b) médios na parcela experimental obtidos a partir das imagens de satélite (Sentinel-2) em séries temporais ao longo do Inverno e da Primavera de 2017 e de 2018. A Tabela 3 mostra que a variabilidade do solo (expressa pelos mapas da CE_a) não se reflecte na variabilidade espacial do desenvolvimento da pastagem (CV da ordem dos 4 a 8%, respectivamente para o NDVI e para o NDWI) no período de maior vigor vegetativo (Outono e Primavera).

A Figura 5 mostra uma forte correlação (R^2=0,75) entre os dois índices (NDVI e NDWI), o que demonstra que ambos podem ser utilizados para monitorizar a evolução do estado desenvolvimento da pastagem, uma vez que o primeiro reflecte fundamentalmente o teor de clorofila e o segundo o teor de água das plantas, ambos indicadores do vigor vegetativo da pastagem [19].

A Figura 6 ilustra os mapas de classes de gestão da CE_a do solo (a), do NDVI (b) e do NDWI (c) da parcela experimental e ainda o mapa do potencial produtivo acumulado. O mapa de classes de gestão resultante da análise da variabilidade espacial e da estabilidade temporal da CE_a do solo (Figura 6 (a)) mostra instabilidade numa área significativa da parcela, o que pode dificultar a tomada de decisão quanto à definição das ZHG. O padrão da humidade do solo, que sofre influência do relevo do terreno, pode assim perturbar e sobrepor-se a outras variáveis associadas às características do solo (nomeadamente os teores de argila, a CTC, o pH ou os teores de matéria orgânica).

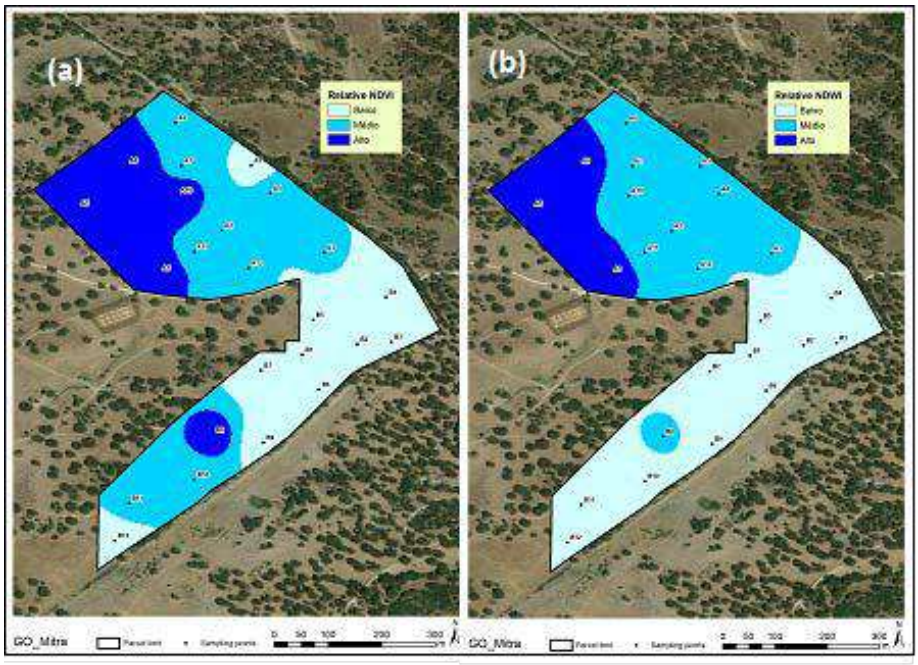


Figura 4. Mapas do NDVI (a) e do NDWI (b) médios da parcela experimental obtidos a partir das imagens de satélite (Sentinel-2) em séries temporais ao longo do Inverno e da Primavera de 2017 e de 2018.

Tabela 3. NDVI e NDWI da parcela experimental obtidos a partir das imagens de satélite (Sentinel-2) em séries temporais ao longo do Inverno e Primavera de 2017 e de 2018.

Índices	Média±DP	CV, %	Intervalo de variação
NDVI	0,630±0,024	3,8	[0,588-0,684]
NDWI	0302±0,025	8,3	[0,235-0,352]

DP- Desvio padrão; CV- Coeficiente de variação; NDVI- "Normalized difference vegetation index" ; NDWI- "Normalized difference water index";

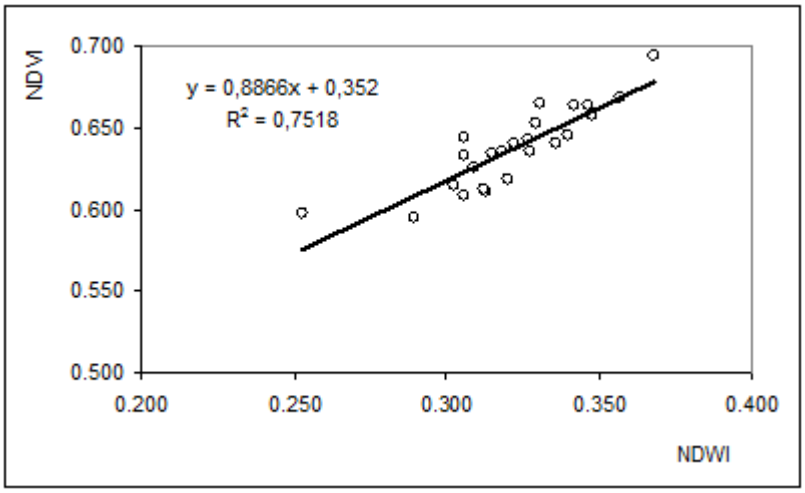


Figura 5. Relação entre os valores médios do NDWI e do NDVI obtidos nos períodos de Inverno e de Primavera de 2017 e 2018 a partir das imagens de satélite ("Sentinel-2") no conjunto dos pontos de amostragem da parcela experimental.

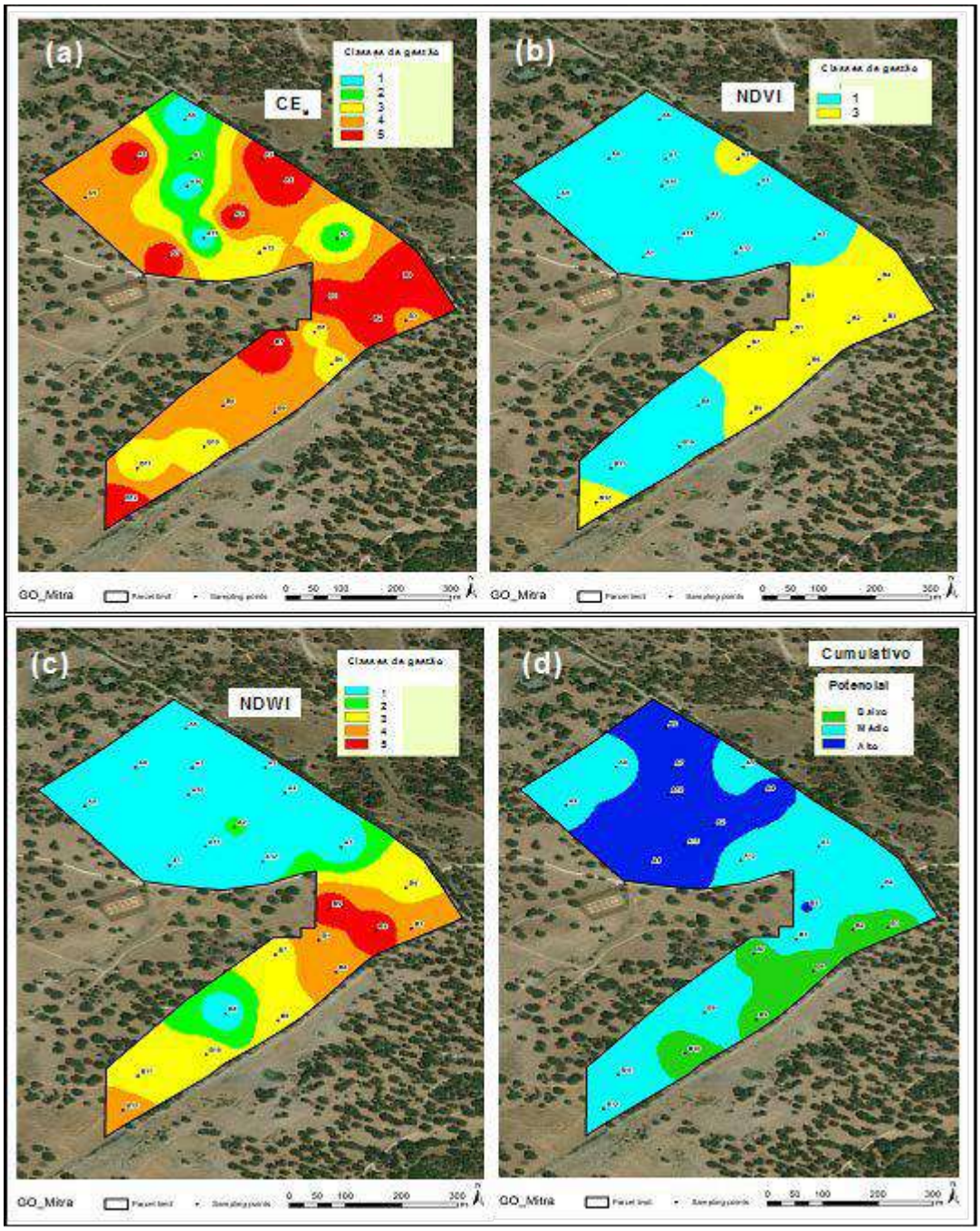


Figura 6. Mapas de classes de gestão da CEa do solo (a), do NDVI (b) e do NDWI (c) da parcela experimental e mapa do potencial produtivo acumulado (d).(Classe 1- superior à média e estável; Classe 2- superior à média e moderadamente estável; Classe 3- inferior à média e estável; Classe 4- Inferior à média e moderadamente estável; Classe 5- instável).

No caso concreto, mais do que definir padrões de variabilidade espacial, o levantamento da CE_a do solo permitiu identificar uma área de deficiente drenagem, a que correspoderam valores mais elevados da CE_a na zona central da parcela, num gradiente N-S (zonas de amostragem, 6, 7, 10 e 11). Será importante repetir o levantamento da CE_a do solo nesta parcela experimental para perceber se os padrões de variabilidade espacial estabilizam. A área restante mostra uma tendência para valores mais elevados da CE_a na zona mais a Norte, em contraste com a zona mais a Sul. Por outro lado, os mapas de classes de gestão do NDVI e do NDWI

mostram, por um lado, uma predominância clara das áreas estáveis ou moderadamente estáveis, relativamente às áreas instáveis e, por outro, confirmam o maior vigor vegetativo da pastagem na zona a Norte da parcela, indiciando uma boa relação com a CE_a do solo [6].

A integração em simultâneo das 3 variáveis consideradas (CE_a, NDVI e NDWI) ilustra uma proposta de 3 ZHG (Figura 6, (d)) tendo por base o potencial produtivo de cada zona da parcela: zonas com potencial alto correspondem a valores relativamente elevados das 3 variáveis; zonas com potencial médio terão pelo menos uma das variáveis com valores relativamente elevados; zonas de potencial baixo apresentam todas as variáveis com valores relativamente baixos.

Estes resultados mostram o interesse em integrar a informação da CE_a do solo com os índices obtidos a partir das imagens de satélite para identificar e validar ZHG para apoio à tomada de decisão na gestão diferenciada da fertilização. A decisão final do gestor deverá ser no sentido de aplicar maiores quantidades de adubo nas zonas com maior potencial produtivo.

4. Conclusões

A aplicação racional de fertilizantes em pastagens utilizando tecnologia VRT pressupõe, numa fase prévia, a identificação de "zonas homogéneas de gestão" (ZHG). Neste trabalho a avaliação da variabilidade espacial e da estabilidade temporal da condutividade eléctrica aparente do solo e da resposta da cultura (através dos índices NDVI e NDWI obtidos a partir das imagens de satélite) em dois anos consecutivos (2017 e 2018) permitiram primeiro identificar e depois validar a definição de ZHG. Estas ZHG serão a base para a recolha inteligente de amostras de solo e de pastagem de forma a quantificar as necessidades de fertilização diferenciada, constituindo assim o mapa final de prescrição.

5. Agradecimentos

Este trabalho foi suportado através do "Programa 1.0.1.-Grupos Operacionais" no âmbito dos projectos "PDR2020-101-030693" e "PDR2020-101-031244" e através da FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia) no âmbito do projecto "UID/AGR/00115/2019".

Referências

1. Serrano J., Shahidian S., Marques da Silva J. Gestão diferenciada das pastagens baseada na monitorização da condutividade eléctrica aparente do solo. Revista de Ciências Agrárias. 2018, 41(4), 881–892.
2. Efe Serrano J. Pastures in Alentejo: technical basis for characterization, grazing and improvement. Universidade de Évora – ICAM (Ed.), Évora, Portugal: Gráfica Eborense. 2006, 165–178.
3. Serrano J., Peça J., Marques da Silva J., Shahidian S. Avaliação de tecnologias para aplicação diferenciada de fertilizantes: novos conceitos de gestão em pastagens permanentes. Revista de Ciências Agrárias. 2014, 37(3), 253–269.
4. Moral F., Terrón J., Marques da Silva J. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. Soil & Tillage Research. 2010, 106, 335–343.
5. Peralta N. R., Costa J. L. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. Computers and Electronics in Agriculture. 2013, 99, 218–226.
6. Serrano J., Peça J., Marques da Silva J., Shahidian S. Mapping soil and pasture variability with an electromagnetic induction sensor. Computers and Electronics in Agriculture. 2010, 73, 7–16.
7. Lumbierres M., Méndez P. F., Bustamante J., Soriguer R., Santamaria L. Modeling biomass production in seasonal wetlands using Modis NDVI land surface phenology. Remote Sensing. 2017, *9*, 392.

8. Louhaichi M., Hassan S., Clifton K., Johnson D. E. A reliable and non-destructive method for estimating forage shrub cover and biomass in arid environments using digital vegetation charting technique. Agroforestry Systems. 2018, 92, 1341–1352.
9. Gu Y., Hunt E., Wardlow B., Basara J. B., Brown J. F., Verdin J. P. Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data. Geophysical Research Letters. 2008, 35, L22401.
10. Serrano J., Shahidian S., Marques da Silva J. Monitoring seasonal pasture quality degradation in the Mediterranean montado ecosystem: proximal versus remote sensing. Water. 2018, 10(10), 1422.
11. Jackson T. J., Chen D., Cosh M., Li F., Anderson M., Walthall C., Doriaswamy P., Hunt E. R. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. Remote Sensing of Environment. 2004, 92, 475–482.
12. Serrano J., Shahidian S., Marques da Silva J. Evaluation of normalized difference water index as a tool for monitoring pasture seasonal and inter-annual variability in a Mediterranean agro-silvo-pastoral system. Water. 2019, 11(1), 62.
13. Sánchez-Ruiz S., Piles M., Sánchez N., Martínez-Fernández J., Vall-llossera M., Camps A. Combining SMOS with visible and near/shortwave/thermal infrared satellite data for high resolution soil moisture estimates. Journal of Hydrology. 2014, 516, 273–283.
14. FAO. World reference base for soil resources. Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Soil Resources Reports N º 103. 2006, Rome, Italy.
15. Blackmore, S. The interpretation of trends from multiple yield maps. Computers and Electronics in Agriculture. 2000, 26, 37–51.
16. Xu H.-W., Wang K., Bailey J., Jordan C., Withers A. Temporal stability of sward dry matter and nitrogen yield patterns in a temperate grassland. Pedosphere. 2006, 16, 735–744.
17. Serrano J., Peça J., Marques da Silva J., Shahidian S. Spatial and temporal stability of soil phosphate concentration and pasture dry matter yield. Precision Agriculture. 2011, 12, 214–232.
18. ESRI (Environmental Systems Research Institute) Inc. ArcView 9. 3 GIS Geostatistical Analyst. ESRI, Redlands, CA, USA. 2009.
19. Serrano J., Shahidian S., Marques da Silva J. Apparent electrical conductivity in dry versus wet soil conditions in a shallow soil. Precision Agriculture. 2013, 14, 99–114.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Nebulizador Tecnovid Qi H3O: Inteligente y conectado

Federico Pérez Salvador[1], Enrique Blat[1], Lars T. Berger[1]

[1] Pulverizadores Fede S.L., C/ Carr. de Liria, 1, 46380 Cheste (Valencia), www.fedepulverizadores.com

Resumen: El Nebulizador Tecnovid Qi permite realizar un tratamiento de precisión adaptando la aplicación en función del estado fenológico de la viña y al grado de afectación por plaga o enfermedad de la misma gracias a su sistema inteligente y conectado. Este nebulizador cuenta con un compensador de aire regulado con fórmulas agronómicas, gracias al cual se destina a las salidas de pulverización la cantidad de aire más conveniente para cada estado fenológico de la viña, eliminando así cualquier riesgo mecánico y logrando un consumo de potencia lineal, es decir, no incrementa la cantidad de consumo de combustible. El Nebulizador Tecnovid está conectado a Internet, lo que supone una relación directa y a tiempo real entre el equipo, el operario y el técnico/ingeniero agrónomo a través de la Specialty Crops Platform (SCP). La SCP es una herramienta digital de gestión agronómica que permite realizar un tratamiento de precisión y controlar de forma exacta el trabajo realizado en el campo gracias al registro de los datos de la pulverización. La visualización de dichos tratamientos supone una mejora exponencial del trabajo de los técnicos y asesores de las plantaciones de viña ya que permite tomar mejores decisiones a las empresas agrícolas.

Palabras clave: agricultura de precisión, digitalización, agronomía, viña

1. Introducción

Las tierras de cultivo cubren casi el 25% de la Unión Europea (4.4 millones de km2) y parte de esa área está sujeta a tratamientos fitosanitarios. La aplicación de tratamientos fitosanitarios representa el 30% de los costes en la producción de cultivos especiales y tiene un impacto directo en la calidad de la cosecha y el precio de venta en el mercado. Con el equipo de aplicación convencional, aproximadamente el 80% del fracaso del tratamiento es consecuencia del error humano. Dichos errores pueden conllevar una aplicación excesiva de productos que ingresan en la cadena alimentaria y contaminan el medio ambiente. Además, causa peligrosas resistencias a las plagas, ya que en muchos casos más del 50% de los pesticidas no llegan a los organismos objetivo pero contaminan el medio ambiente, con efectos negativos considerables para la biodiversidad y el ecosistema en general [1].

En un mundo cada vez más poblado, tenemos el reto de ayudar a conseguir una agricultura productiva, rentable para el agricultor y sostenible con el medio ambiente. Las innovaciones incorporadas por el Nebulizador Tecnovid Qi H3O dan respuesta a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, para ofrecer soluciones innovadoras que tengan un impacto ambiental positivo a la vez que generan beneficios económicos y sociales. Así, la tecnología implementada en este equipo se ha desarrollado dentro de un proyecto aprobado por la Unión Europea en el marco del Horizonte 2020, y su instrumento Pyme en el reto "Resource-efficient ecoinnovative food production and processing (SFS-08-2014)".

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3350

En la actualidad, hemos contrastado que en la protección de cultivos en frutales y viñedos existe una emisión de producto fitosanitario al ambiente, conocido como deriva, que en muchos casos supera el 50% del volumen de producto aplicado (Ensayo de balance de masas. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, IVIA) [2]. El Nebulizador Tecnovid Qi H3O resuelve esta problemática ya que es capaz de adaptar el tratamiento de forma precisa en función del estado fenológico de la viña. La adaptación exacta del tratamiento según la necesidad de la viña supone un importante impulso para los estándares de seguridad agroalimentaria, en beneficio de la sociedad, además de traducirse en mayor sostenibilidad y respeto al medio ambiente.

A ello se suma la necesidad actual que tienen las empresas agrícolas de mejorar su eficacia y eficiencia, tanto en la realización de las tareas en el campo como en la gestión del tiempo. De este modo, cada vez son más necesarios los avances tecnológicos que permitan obtener una mayor productividad que conlleve de forma pareja el aumento de rentabilidad. Así nuestro trabajo de I+D+I está enfocado a dar respuesta a la necesidad de reducir el impacto ambiental de la agricultura, a mejorar la productividad y rentabilidad de las empresas agrícolas y a satisfacer la demanda social de alimentos de calidad y cada vez más saludables.

En la actualidad, los equipos de aplicación para viñedos están diseñados de forma que siempre generan la misma cantidad de aire, ligados a su vez a la falsa creencia que se vive en la batalla comercial de "cuanto más, mejor". Este hecho, en la mayoría de los casos es causante de esta tremenda deriva por exceso de aire, con el consecuente consumo de potencia completamente innecesario.

Además, con los equipos de aplicación para la vid, al realizar los tratamientos con la técnica actual, no hay un criterio definido del volumen de caldo a aplicar por hectárea. No se tiene en cuenta el estado fenológico del viñedo como base para el cálculo del volumen de caldo a aplicar, y es por esto que se utiliza una cantidad desmesurada de producto fitosanitario para intentar asegurar la calidad del tratamiento. Esto implica un incremento en los costes productivos de los agricultores, así como la problemática ambiental generada por la deriva, teniendo vinculado el posible problema de detección de fitotoxicidad de la uva, lo que imposibilita su venta.

La falta de control, a tiempo real, sobre algunos de los parámetros de la pulverización es la mayor causa de fracaso en un tratamiento. La pulverización es una de las labores agrícolas más importantes ya que supone una gran inversión de los costes de producción y de ella depende directamente la calidad de la cosecha. Con el actual estado de la técnica, gran parte del fracaso en un tratamiento es consecuencia del uso incorrecto del nebulizador, traduciéndose estos en un aumento de costes para el agricultor por verse obligado a repetir el tratamiento, y las pérdidas que supone no poder vender la producción posteriormente por una calidad deficiente. Podemos citar como causas de fracaso más habituales las siguientes: velocidad de trabajo mayor de la recomendada, una agitación de los productos fitosanitarios insuficiente o incorrecta, revoluciones de toma de fuerza del tractor menores o mayores que originan volúmenes de aire y volumen de caldo diferentes a las esperadas, o tratamientos realizados con un clima totalmente adverso.

Actualmente, los agricultores no cuentan con información y visualización precisa de los tratamientos por lo que no existe la posibilidad de corregir errores en el momento de la pulverización para evitar una problemática mayor: proliferación de plaga y enfermedades o retirada del mercado de la fruta por exceso de residuo de pesticidas. Este problema lo comparten los técnicos/ingenieros agrónomos que trabajan para las empresas agrícolas como técnicos y asesores, cuya labor es vital para conseguir cosechas de calidad. Hasta el momento no existía ningún sistema que mostrara con precisión la realización de los tratamientos. Así, los errores derivaban en proliferación de plaga o en repetición de tratamiento, traduciéndose ambas en importantes pérdidas económicas para las empresas agrícolas.

Junto con los factores del medio ambiente y falta visibilidad de los tratamientos se perfila el concepto de trazabilidad de los cultivos. Actualmente, el registro de los tratamientos se realiza de forma manual, con la burocracia que la cumplimentación del cuaderno de campo conlleva y la carencia de una trazabilidad real que refleje con total precisión y exactitud los tratamientos realizados.

En este contexto, hemos diseñado el Nebulizador Tecnovid Qi H3O para afrontar el reto de mejorar la protección de los viñedos y dar respuesta a la necesidad que tienen las empresas agrícolas de realizar una aplicación eficaz y eficiente de los tratamientos fitosanitarios que les permita obtener una cosecha de óptima calidad. Se trata de un proyecto está totalmente alineado con la Directiva 2009/128/CE para el Uso Sostenible de Plaguicidas, que ayuda al mejor cumplimiento de la misma y a la mejora de la sostenibilidad y seguridad agroalimentaria.

2. Innovaciones estructurales del Nebulizador Tecnovid Qi H3O

El diseño del Nebulizador Tecnovid Qi H_3O implementa mejoras que incrementan la mejora de la distribución del aire y la direccionalidad de la aplicación de los tratamientos fitosanitarios.

2.1. Optimización del aire

El Nebulizador Tecnovid Qi H_3O incorpora unas nuevas bajantes Qi que realizan un reparto uniforme del aire en todas las salidas para generar la pantalla de aplicación necesaria en el viñedo. El diseño de las bajantes dota de direccionalidad al flujo de aire para que este sea constante durante toda la aplicación y que esta sea homogénea. Asimismo, el control del aire permite aumentar la presión para enfatizar el tratamiento en puntos críticos del viñedo en los que es clave la protección para evitar la proliferación de plagas y enfermedades.

La eficiencia y aprovechamiento del aire de la bajante Qi se ven incrementados por la implementación del Sistema Venturi en las salidas de aire. El Sistema Venturi produce la suma del aire ambiente, efecto físico que consigue aumentar en un +40,8% el caudal de aire de forma natural, sin incrementar el consumo de potencia. Este incremento del volumen de aire permite llegar con mayor precisión a las zonas internas de la viña, consiguiendo una cobertura uniforme.

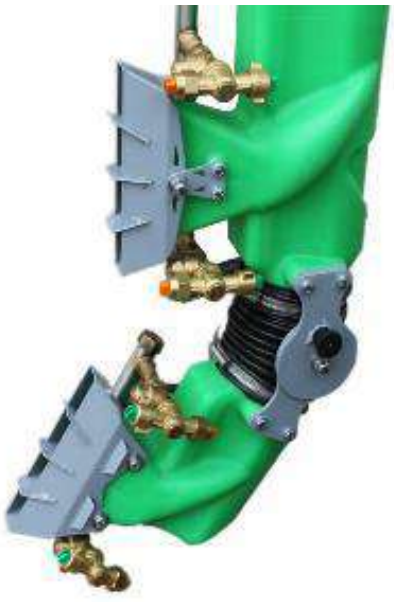


Figura 1: Sistema anti-Botrytis.

Asimismo, dispone de un Sistema antiBotrytis [Figura 1] para añadir una nueva corriente de aire que favorece la ventilación de las hojas. El extremo inferior de las bajantes es adaptable y modificable para cambiar la dirección perpendicular a una dirección abajo-arriba. Esta forma de aplicar el tratamiento que favorece la aireación de los viñedos es beneficiosa para combatir enfermedades fúngicas como la Botrytis. Esta adaptabilidad permite cambiar el ángulo de ataque sin perder volumen de aire por lo que facilita el trabajo de los agricultores y operarios, quienes encuentran dificultades en tratar con eficiencia las zonas bajas e internas de la viña.



Figura 2: Geometría variable.

El nebulizador presenta además una estructura mejorada que le otorga mayor estabilidad y robustez, manteniéndose a su vez ligero y fácilmente adaptable. La mejora estructural que incorpora busca favorecer su manejo y usabilidad dotándolo, al mismo tiempo, de mayor resistencia y durabilidad. Asimismo, el nebulizador permite la instalación de geometría variable [Figura 2], la cual otorga a las bajantes elevación y descenso hidráulicos de forma individual. Además, cuenta con una amortiguación estructural regulable e independiente para cada brazo. Esta amortiguación es regulable en intensidad para adaptarse según el terreno con el fin de aumentar la vida útil del nebulizador y evitar averías ocasionadas por los impactos en cambios bruscos del terreno. A estos avances se suma un mecanismo de seguridad mediante un pistón neumático en las bajantes, es decir, de anti rotura. Con este sistema, en caso de que la bajante se tope con un obstáculo, esta se elevará para sobrepasarlo.

Todas las mejoras implementadas en este nebulizador buscan adaptar la aplicación del tratamiento con mayor precisión para mejorar la focalización del tratamiento en la viña. Con todo ello, el Nebulizador Tecnovid Qi H_3O se traduce en rentabilidad para los viticultores ya que ayuda a que su trabajo sea más productivo y eficiente, a la vez que contribuye a reducir las emisiones al medio ambiente.

2.2. Sistema de regulación inteligente

Los nebulizadores que encontramos actualmente en el mercado aplican el producto con un volumen de aire fijo, independientemente del estado de crecimiento de la vid y su volumen de vegetación, el cual puede variar hasta en 9 veces en sus distintos estados fenológicos. Esto hace que en ocasiones el volumen de aire sea excesivo o, por el contrario, en otras que el volumen sea insuficiente para conseguir una aplicación correcta tanto en las zonas externas como internas de la vid. Para dar solución a este problema, el Nebulizador Tecnovid Qi H_3O incorpora un sistema

inteligente capaz de adaptar el volumen de aire y cantidad de producto aplicado en función del estado fenológico de la viña.

Este nebulizador incluye un compensador de aire (*Patente ES 201531754*), gracias al cual se destina a las salidas de pulverización la cantidad de aire más conveniente para cada estado fenológico de la viña, y se deriva el aire restante que produce la turbina, eliminando así cualquier riesgo mecánico y logrando un consumo de potencia lineal, es decir, no incrementa la cantidad de consumo de combustible [Figura 3]. El aire necesario lo calcula el equipo en base a unas fórmulas agronómicas propias que determinan la idoneidad del caudal en función del estado fenológico del viñedo. El sistema sugiere al técnico el volumen de aire necesario para tratar el viñedo de forma eficaz y eficiente de modo que él tenga en consideración dichos parámetros a la hora de configurar la orden de trabajo para realizar el tratamiento. En el siguiente apartado de la memoria se explica en detalle cómo se realiza dicha configuración para enviarla al Nebulizador de modo que él mismo se autorregule para realizar la aplicación.

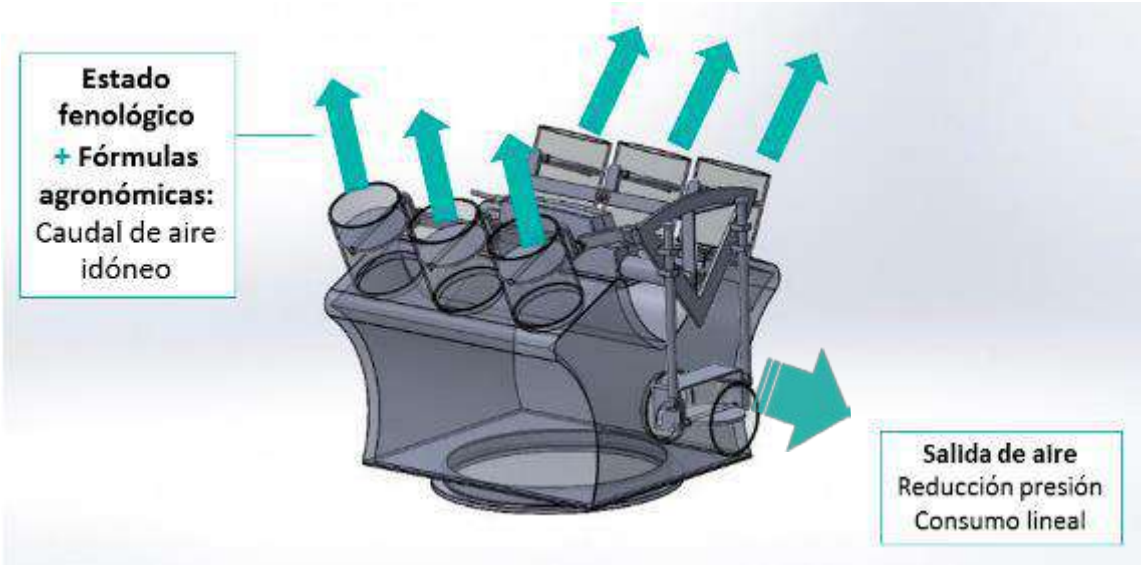


Figura 3: Sistema de regulación de aire en función del estado fenológico de la viña.

Los equipos estándar aplican el producto con un volumen de aire fijo, independientemente del estado de crecimiento de la vid y su volumen de vegetación, el cual puede variar hasta en 9 veces en sus distintos estados fenológicos. En cambio, el nebulizador Tecnovid Qi H_3O es capaz de adaptar de forma eficiente su flujo de aire en función del estado fenológico de la viña, aplicando el producto necesario según el porte de la planta. Así, el sistema de control proporcional al avance del equipo, para la regulación del líquido pulverizado, junto con el sistema de regulación del aire, permiten la adaptación global del trabajo del nebulizador para cubrir las diferentes necesidades de la viña, por el volumen de vegetación de cada uno de sus estados fenológicos.

Por lo tanto, esta adaptación permite la reducción de la deriva de hasta un 50% de producto fitosanitario ya que la regulación del aire en función del objetivo evita eficientemente la pérdida que se da en el caso de los equipos que generan una cantidad excesiva de aire en relación a la vegetación de la viña sobre la que se está trabajando.

3. Precisión y digitalización de los tratamientos con Tecnovid Qi H_3O

En el presente apartado se especifican todos los avances relativos a la conectividad, a la aplicación de tratamientos de precisión, a lectura de mapas y a la trazabilidad real.

3.1. Conectividad

El nebulizador Tecnovid Qi H_3O está conectado a Internet, lo que supone una relación directa ya tiempo real entre el equipo, el operario y el técnico/ingeniero agrónomo. El nebulizador está conectado a la Specialty Crops Platform (http://fede.specialtycropsplatform.com), herramienta digital de gestión agronómica, la cual permite la cumplimentación y envío de órdenes de trabajo al equipo así como el registro de todos los datos precisos de la pulverización. De este modo, el Nebulizador Tecnovid Qi H_3O detecta en todo momento las variaciones que puedan producirse durante el trabajo para señalar al operario cuándo los parámetros establecidos en la orden de trabajo del técnico se desvíen.

Esto representa, por tanto, una nueva forma de trabajar ya que da la posibilidad de que los técnicos envíen directamente al atomizador las órdenes de trabajo de forma remota permitiendo llevar a cabo un control total de los tratamientos con un registro íntegro de los parámetros del trabajo en campo y, por consiguiente, de los datos precisos de la trazabilidad y del trabajo realizado. Por tanto, los datos registrados se convierten en información de valor para los técnicos ya que las fórmulas agronómicas que hemos desarrollado gracias a nuestro *know-how* dotan de gran valor a los análisis de los tratamientos. El análisis de los datos dota de poder de decisión a los técnicos, quienes pueden decidir si repiten el tratamiento y determinar las áreas exactas de dicha repetición. Esta anticipación y toma de decisiones es una clave de valor sin precedentes en la protección de cultivos frutales para las empresas agrícolas [Figura 4].



Figura 4: Nebulizador Tecnovid conectado.

A continuación, se exponen paso a paso las funcionalidades de la conectividad del Nebulizador Tecnovid Qi H_3O y sus beneficios para la realización de un trabajo de protección de viñedos de forma ágil y precisa tanto para técnicos agrícolas como para los operarios:

3.1.1. Registro de la plantación/campo, tractores y Nebulizadores Tecnovid en la plataforma Specialty Crops

Hemos desarrollado una plataforma digital (**Specialty Crops Platform**) para trabajar con el Nebulizador Tecnovid Qi H_3O. Las plantaciones quedan perfectamente delimitadas en la plataforma, pudiéndose visualizar en su totalidad con el mapa del satélite. Asimismo, se registran los tractores y nebulizadores que trabajarán en la plantación y se programan los calendarios de trabajo para la realización de tratamientos [Figura 5].

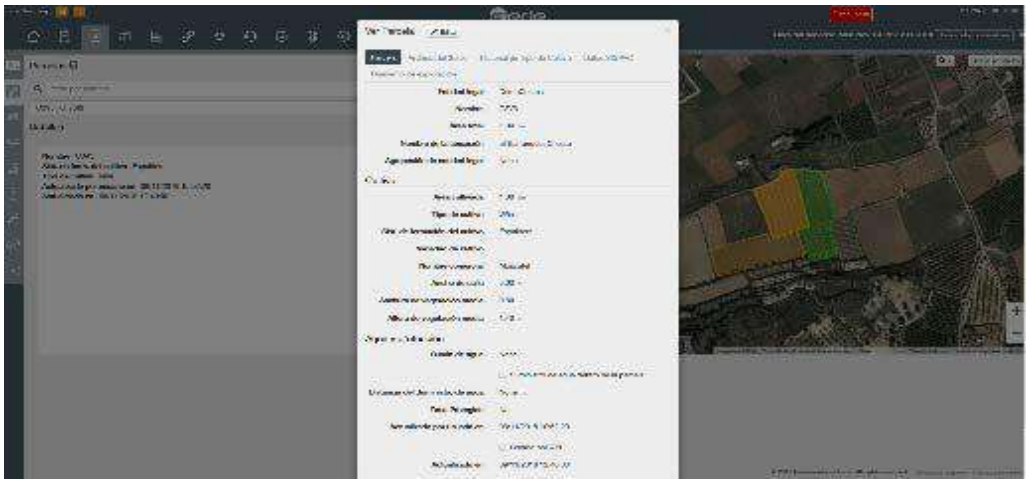


Figura 5: Registro de parcela con detalles de la plantación

De este modo, la Specialty Crops Platform representa una herramienta de gestión de trabajo y almacenamiento de datos para las empresas agrícolas, que pueden controlar tanto parcelas como los tractores y nebulizadores que trabajan en ellas [Figuras 6a y 6b].

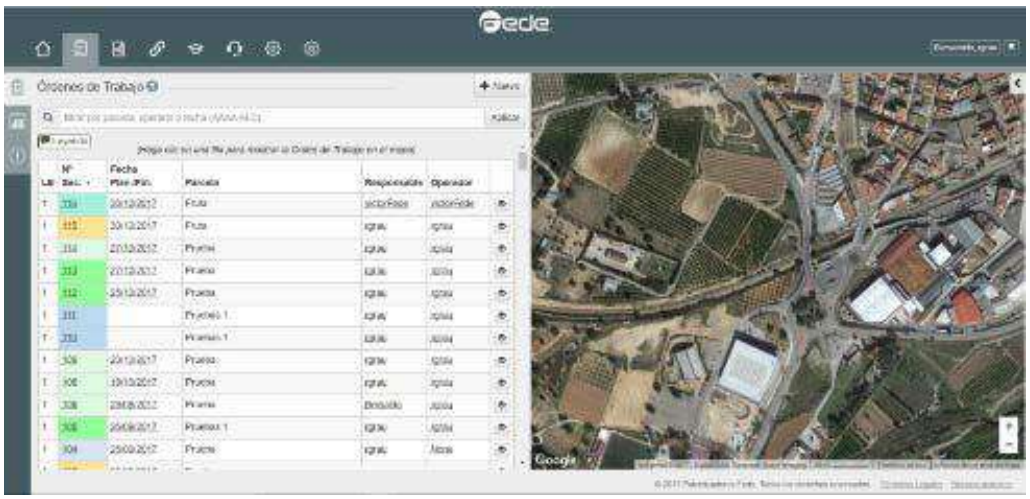


Figura 6a: Listado de órdenes de trabajo generadas.

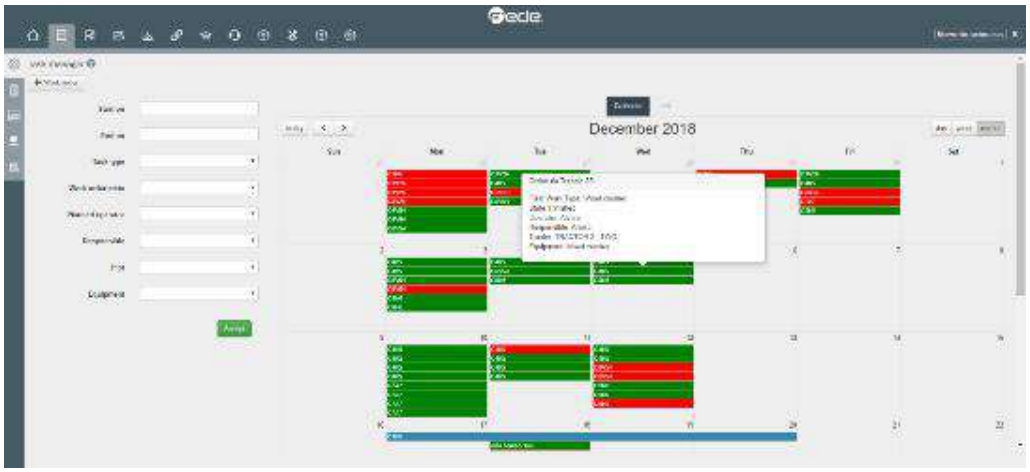


Figura 6b: Organizador de tareas de la Specialty Crops Platform.

3.1.2. Configuración del tratamiento en la plataforma

El sistema – que tiene integradas las fórmulas agronómicas que hemos desarrollado- sugiere al técnico/ingeniero agrónomo el volumen de caldo y el volumen de aire según el estado fenológico de la viña para la realización de un tratamiento óptimo.

El técnico/ingeniero agrónomo supervisa los valores para ajustarlos en caso de ser necesario en función de las necesidades de los cultivos en el momento de realizar la aplicación. Así, cumplimenta la orden de trabajo [Figura 7], especificando los parámetros del tratamiento, identificando la parcela, equipo de pulverización y tractor.

El Nebulizador Tecnovid Qi H_3O está conectado a Internet, es decir, permite conexión directa entre los técnicos/ingenieros agrónomos y los operarios del equipo. Gracias a la conectividad del equipo, los técnicos/ ingenieros agrónomos pueden configurar y enviar órdenes de trabajo al atomizador para que los operarios las descarguen.

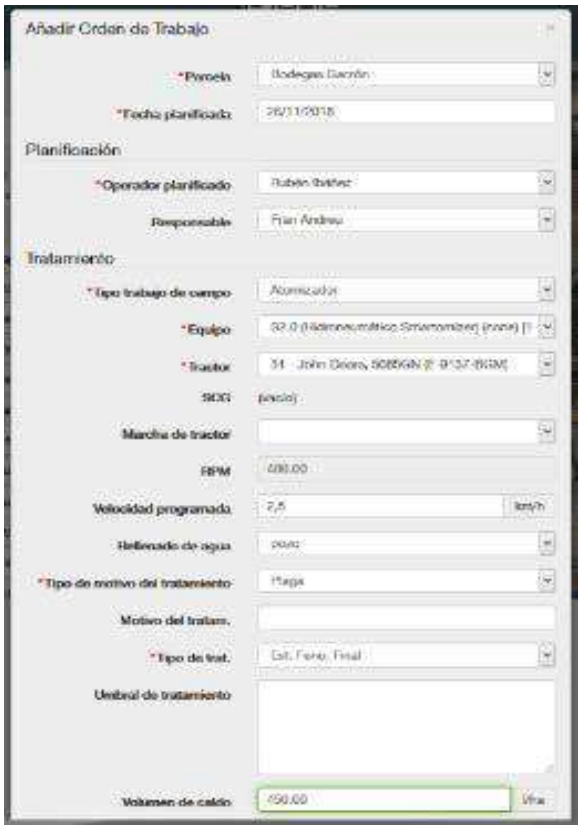


Figura 7: Cumplimentación y envío de orden de trabajo.

3.1.3. Envío directo del tratamiento al Nebulizador Tecnovid Qi H_3O

De este modo, a través de esta plataforma, el técnico/ingeniero agrónomo envía directamente las órdenes de trabajo con los parámetros exactos para la aplicación del tratamiento al nebulizador. La orden de trabajo llega a la *tablet* asociada al equipo y lo notifica al operario a través de un aviso para que este la pueda visualizar. Una vez descargada la orden de trabajo, el Nebulizador Tecnovid Qi H_3O se autorregula (Ver punto "Sistema de regulación inteligente") para realizar el tratamiento siguiendo los parámetros establecidos por el técnico. La *tablet* cuenta con una APP muy fácil de gestionar para que el operario pueda manejarla con facilidad desde la cabina del tractor [Figura 8].



Figura 8: Diagrama envío de órdenes.

3.1.4. Proactividad

El sistema proactivo del Nebulizador Tecnovid Qi H_3O está basado en la orden del técnico: en caso de que durante el trabajo de pulverización alguno de los parámetros no sea correcto, el operario recibirá avisos a tiempo real para corregir aquello que sea necesario (velocidad, RPM, agitación, presión). El hecho de poder recibir avisos minimiza el riesgo de cometer errores durante el tratamiento y permite al operario conocer en todo momento los parámetros de pulverización que está aplicando durante el tratamiento [Figura 9}.

El operario a su vez visualiza el tratamiento que está realizando en la *tablet* gracias a la geolocalización del equipo para saber si ha dejado alguna calle sin tratar o si ha superado el volumen de caldo adecuado.



Figura 9: Pantalla de visualización de tratamiento en la cabina del tractor y sistema proactivo (Volumen de aire no adecuado).

3.1.5. Sistema visualización de tratamiento a tiempo real en el tractor

Durante la realización del tratamiento, el operario visualiza en la *tablet* [Figura 10] si está realizando el tratamiento correctamente de forma gráfica. Gracias a la geolocalización del nebulizador, la *tablet* muestra en distintas franjas de color las zonas en las que el tratamiento es correcto, incorrecto o no realizado:

- **Verde:** Zonas en las que se ha aplicado correctamente.
- **Rojo:** Zonas en las que el volumen de caldo aplicado es igual a 0. El equipo ha pasado pero no ha pulverizado. El tractorista puede determinar volver a aplicar en estas zonas. Si lo hace, se quedarán marcadas en verde.
- **Gris:** Zona por la que no se ha pasado, o se ha pasado con sesión suspendida.



Figura 10: Visualización del tratamiento a tiempo real.

3.1.6. Visualización del tratamiento realizado con datos precisos y detallados

Una vez finalizado el tratamiento, el técnico puede visualizarlo detalladamente en la plataforma. La conexión técnico-Nebulizador-operario ofrece un avance sin precedentes: todos los parámetros del tratamiento quedan registrados y almacenados en la nube una vez finalizado el tratamiento. De este modo, los técnicos pueden analizar los datos para comprobar que se han realizado correctamente y tomar decisiones que ayuden a mejorar la calidad de los tratamientos.

La plataforma a la que está conectada el nebulizador registra y almacena todos los datos decisivos para la correcta realización de los tratamientos: Volumen de caldo, RPM de la toma de fuerza, velocidad, presión y agitación. Además, podemos controlar por geolocalización las áreas de trabajo con fechas y hora ya que las órdenes de trabajo se envían con ubicación. El indicador del tratamiento ofrece una información muy gráfica y rápida de interpretar (rojo, se ha producido alguna incidencia; verde, el tratamiento se ha realizado de forma correcta) [Figura 11]. Toda esta información es fundamental para la toma de decisiones.



Figura 11: Indicador de tratamiento, volumen de caldo aplicado.

3.2. Lectura de mapas para realizar tratamientos selectivos

El Nebulizador inteligente Tecnovid es capaz de interpretar mapas y pulverizar en zonas selectivas según lo indicado por dichos mapas. Esta innovación se ha desarrollado con el objetivo de pulverizar los viñedos de forma acotada para conseguir efectos beneficiosos tanto desde el punto de vista económico como medioambiental.

De este modo, facilitando al sistema mapas que indique las zonas con, por ejemplo, plagas, el Nebulizador Tecnovid Qi H_3O es capaz de realizar los tratamientos en las zonas indicadas.

A continuación, podemos ver esta tecnología aplicada a un viñedo con zonas afectadas por la yesca de la vid. Este ensayo se realizó en Viñas del Vero, en la D.O. Somontano, con la Escuela Politécnica Superior (Huesca) de la Universidad de Zaragoza y la Universidad de La Rioja, quienes proporcionaron los siguientes mapas con zonas infectadas [Figuras 12 y 13].

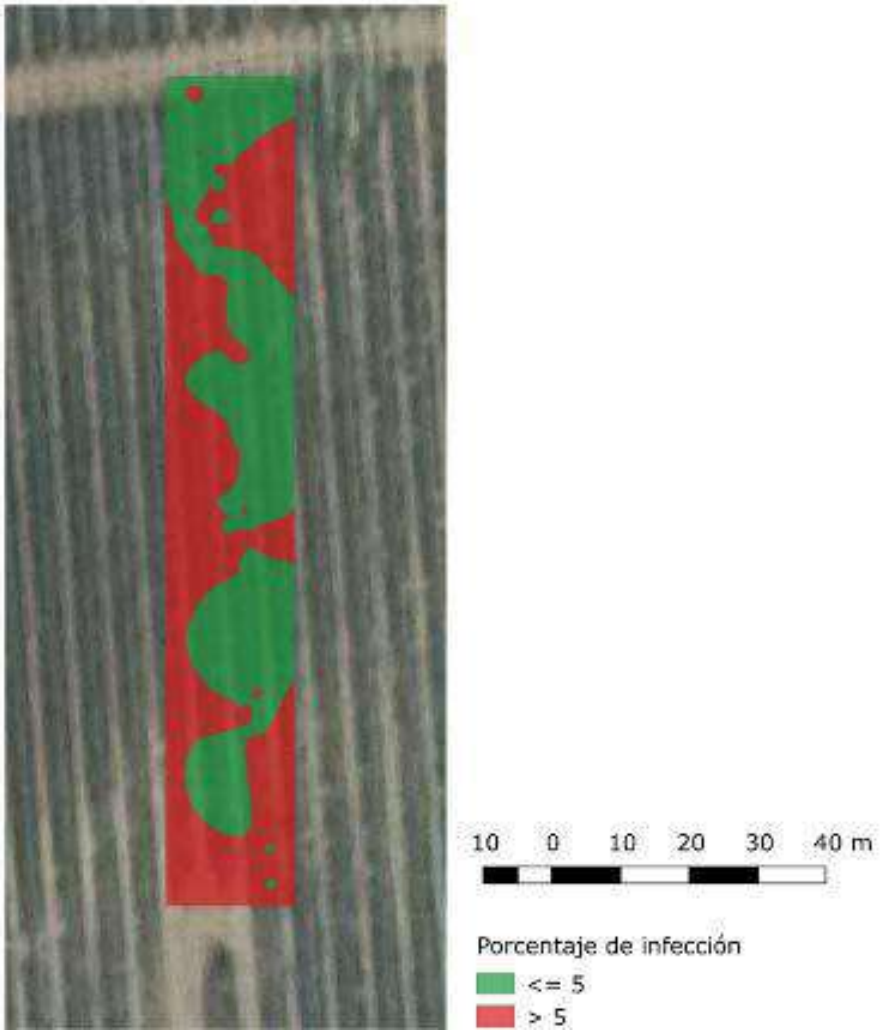


Figura 12: Mapa mostrando porcentaje de infestación.

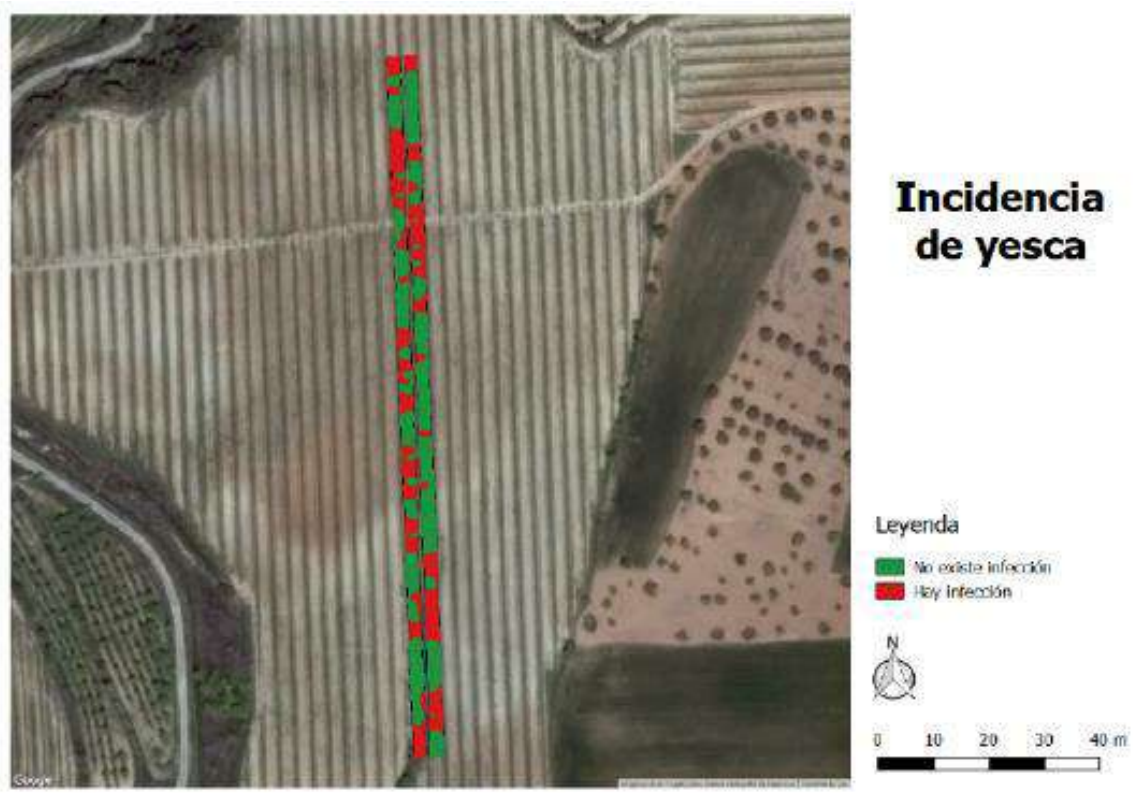


Figura 13: Mapa mostrando porcentaje de infestación.

En este caso, determinamos cargar en la Specialty Crops Platform las zonas con un nivel de infestación por encima de un 5% [*p.ej.* los ficheros mostrados en figura 12 y figura 13]. A continuación, se muestran las imágenes de la plataforma correspondientes a esta delimitación de zonas afectadas [Figuras 14 y 15]:



Figura 14: Captura de pantalla de la Specialty Crops Platform, mostrando órdenes de trabajo a la izquierda, y el mapa de infestación según el mapa cargado, a la derecha. Las áreas en naranja muestran niveles de infestación mayores al 5%.

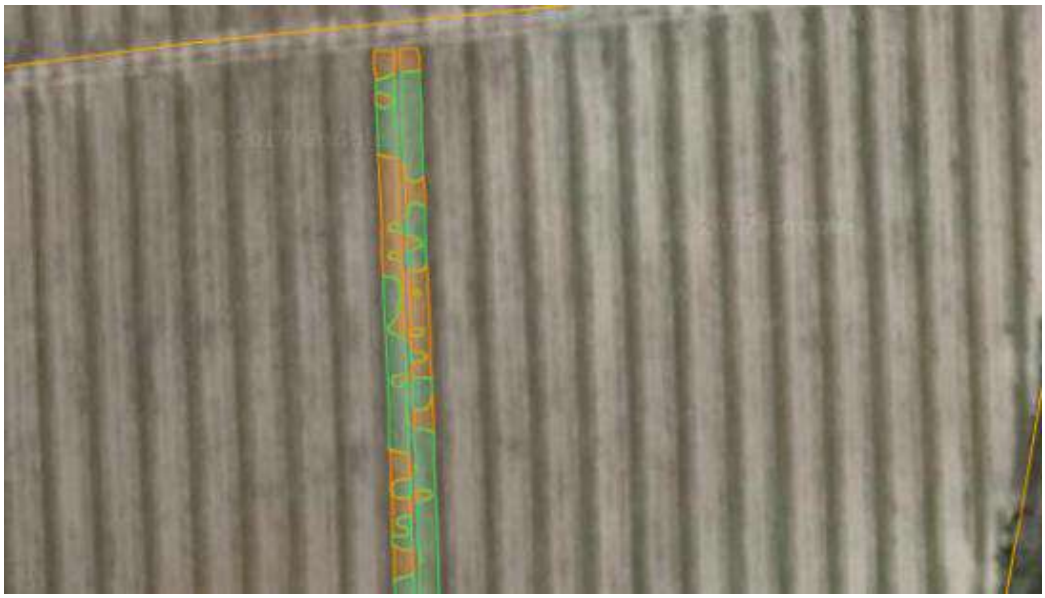


Figura 15: Zoom del mapa de infestación en el campo. Las áreas en naranja muestran niveles de infestación mayores al 5%.

Gracias a la delimitación de las zonas, el Nebulizador Tecnovid Qi H_3O realizó el tratamiento aplicando únicamente el volumen de caldo necesario en áreas precisas. Este avance tecnológico de lectura de mapas con el objetivo de tratar únicamente las zonas afectadas tiene un impacto económico muy importante para las empresas agrícolas:

Por ejemplo, el coste del producto para tratar la yesca es de 25 euros/hectárea cada año. El porcentaje de superficie afectada por la yesca oscila entre 10% - 20 %. Considerando una superficie afectada de un 20%, el 80% de la superficie no habría que tratarla; por lo que de los 25 euros/hectárea, con el sistema on/off ahorraríamos 20€ por hectárea/año. Así, un agricultor con 35 ha ahorraría en producto: 35 ha*20 €/(ha*año) = 700€/año

Además, gracias al sistema de visualización que hemos visto anteriormente, el operario visualiza en la tablet el tratamiento de forma que puede ir directamente a las zonas afectadas. El resultado de esto es que, además del ahorro en producto, hay ahorro en mano de obra del tractorista y en gasóleo, así como un incremento de la eficacia y eficiencia de los tratamientos [Figura 16].



Figura 16: Nebulizador Tecnovid Qi H3O John Deere trabajando en viñedos.

3.3. Cuaderno de campo y trazabilidad real

Todos los datos registrados durante los tratamientos quedan almacenados de forma ordenada en la plataforma. Este registro pormenorizado de datos y coordenadas, además de servir como base de datos para analizar y mejorar toma de decisiones en un futuro, permite emitir un cuaderno de campo con total precisión.

Tomando la información necesaria de la plataforma, el sistema emite de forma automática el cuaderno de campo, documento obligatorio para que las empresas agrícolas puedan comercializar sus productos. Hasta el momento, el cuaderno de campo se ha cumplimentado de forma manual con la inversión de tiempo que ello supone y los posibles riesgos de imprecisión en el registro de datos.

Por lo tanto, el cuaderno de campo del Nebulizador Tecnovid Qi H_3O ofrece trazabilidad real ya que representa el reflejo de los datos exactos registrados durante los tratamientos, lo cual representa una importante mejora de los estándares de la seguridad agroalimentaria [Figura 17].



Figura 17: Nebulizador Tecnovid Qi H3O de John Deere.

4. Conclusiones

El Nebulizador Tecnovid Qi H_3O supone un considerable ahorro para los viticultores haciendo que su trabajo sea más productivo, rentable y eficiente, a la vez que contribuyen a reducir las emisiones al medio ambiente. Como consecuencia, a su vez, este equipo impulsa la mejora de los estándares de la seguridad agroalimentaria para que los consumidores puedan adquirir una fruta de calidad habiendo sido expuesta a un 25% menos de productos fitosanitarios.

Las innovaciones de conectividad, lectura de mapas y trazabilidad real del Nebulizador Tecnovid Qi H_3O se han desarrollado desde una perspectiva inclusiva que permita mejorar de forma conjunta factores agrícolas, medio ambientales y sociales. Entendemos la agricultura como un prisma global en el que el futuro de las empresas agrícolas está estrechamente relacionado con la reducción del impacto ambiental y con su capacidad para ofrecer alimentos saludables mediante la mejora continuada de la seguridad agroalimentaria.

El Nebulizador Tecnovid Qi H_3O supone un avance disruptivo sin precedentes en el sector de vitivinícola ya que permite realizar tratamientos de eficacia y eficiencia óptimas de forma precisa a la vez que genera datos de gran valor para la toma de decisiones agrícolas. Todos estos

beneficios y la gran calidad del equipo han hecho que la multinacional de tractores más importante del mundo, John Deere, se interese por la tecnología desarrollada por Pulverizadores Fede. Es por ello que mediante la firma de un acuerdo global el Nebulizador Tecnovid Qi H_3O de Pulverizadores Fede también se comercializa mundialmente bajo la marca John Deere.

Así, el Nebulizador Tecnovid Qi H_3O se presenta como un nuevo aliado fundamental para la protección de viñedos en sus distintas facetas, tanto en el trabajo en el campo como en las labores agronómicas de planificación y análisis de tratamientos. La plataforma Specialty Crops Platform abre una nueva forma de trabajo para los técnicos/ingenieros agrónomos, que ya pueden estar conectados con los equipos y los operarios de forma remota. El registro de los datos de pulverización representa una valiosa herramienta y fuente de información para la toma de decisiones y da la oportunidad de solucionar problemas de forma pro-activa. Con la visibilidad de los tratamientos, los técnicos podrán tener control total de los mismos para evitar proliferación de plagas por tratamientos deficientes y evitar un exceso de aplicación de producto fitosanitario. Del mismo modo, el trabajo en el campo de los operarios se agiliza contando con mayor asistencia ya que la comprobación de parámetros y recepción de avisos durante el tratamiento les permite desarrollar su trabajo de forma más efectiva y segura. Todas estas mejoras repercuten en un significativo aumento de la rentabilidad de las empresas agrarias debido a la reducción y control de costes (tratamientos y operarios) y a la posibilidad de prevenir problemas derivados de un tratamiento deficiente.

A su vez, la capacidad del Nebulizador Tecnovid Qi H_3O para regular el volumen de caldo de aplicación en función de la masa vegetal con la consiguiente reducción de la deriva supone un gran impulso para la mejora de la sostenibilidad y respeto al medio ambiente. No podemos obviar que gran parte de las emisiones al medio ambiente provienen del sector agrícola por lo que el futuro tiene como imperativo la disminución de las emisiones y la reducción del consumo de recursos.

Asimismo, estos avances tecnológicos tienen un impacto directo sobre la sociedad. Esta innovación permite contar con información precisa de los tratamientos realizados, una trazabilidad real que la uva llega al mercado en óptimas condiciones de consumo y sin excesos de producto fitosanitario, mejorando la seguridad agroalimentaria y con ella nuestra salud.

En resumen, podemos afirmar con seguridad que el Nebulizador Tecnovid Qi H_3O supone un importante ahorro para los agricultores haciendo que su trabajo sea más productivo, rentable y eficiente, a la vez que contribuyen a reducir las emisiones al medio ambiente y mejorar los estándares de la seguridad agroalimentaria.

5. Agradecimientos

El proyecto H_3O ha recibido financiación del programa de investigación e innovación de la Unión Europea Horizonte 2020 bajo el acuerdo de subvención nº 672231.

Viñas del Vero, en la D.O. Somontano. Los trabajos se realizaron en el marco de un programa de I+d de la convocatoria Retos Colaboración del MINECO que se llamó Retmavid y que pretendía investigar las técnicas de dosificación variable con el objeto de optimizar los tratamientos y minimizar los fitosanitarios necesarios de manera simultánea y específicamente en los tratamientos antifúngicos empleados contra enfermedades de madera.

Los ensayos en campo se realizaron en estrecha colaboración con la Escuela Politécnica Superior (Huesca) de la Universidad de Zaragoza y la Universidad de la Rioja.

El desarrollo de la tecnología de tratamiento por zonas está co-financiado por el proyecto FieldCompanion (E! 11884), *Operator guidance and proactive application error prevention in speciality crop Smart farming*, el cual cuenta con el apoyo del programa **Eurostars.**

Referencias

1. Cunha JP, Chueca P, Garcerá C, Moltó E. Risk assessment of pesticide spray drift from citrus applications with airblast sprayers in Spain. Crop Protection. 2012, 42, pp. 116-123.
2. Garcerá, C., Berger, L. T., Chueca, P. (2018). Efficiency assessment of H3O Smartomizer in citrus. Aspects of Applied Biology 137, International Advances in Pesticide Application, pp. 93-100.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Olivar en superintensivo; la máxima rentabilidad en un cultivo tradicional

MD Gómez-López [1], T Pérez[2], J López[3], JF Martínez-Tornero[4], J Albadalejo[5], J Cuenca[6], F Blaya[7], LM Pelegrin[8], A Ostos[9]

[1] Cátedra AgritechMurcia, Universidad Politécnica de Cartagena; lola.gomez@upct.es
[2] Sistemas AZUD
[3] Industrias David, SL,
[4] Nutricontrol
[5] Novagric
[6] Olea Fyton
[7] ICL-Fuentes fertilizantes
[8] RITEC
[9] Ados Olea

Resumen: Desde hace unos años y sobre todo a partir de la última crisis económica estamos viendo el interés de los inversores por la agricultura, buscando rendimientos que ni bancos ni sector inmobiliario pueden proporcionar en este momento. Uno de los principales objetivos está siendo el olivar en superintensivo. En la actualidad existen en el mundo alrededor de 180.000 ha de olivar en seto o en sistema superintensivo, de las cuales más del 50% se encuentran en España. Desde la cátedra AgritechMurcia de la Universidad Politécnica de Cartagena junto con técnicos y productores estamos estudiando desde hace algo más de un año este cultivo, sus posibilidades y rentabilidad. Su éxito radica tanto en su elevada producción por hectárea como en la precocidad y la mejora de las características organolépticas, abaratándose los costes de producción por la mecanización de podas y recolecciones. Los datos de explotaciones comerciales son claros y coincidentes, podemos decir que en fincas sin limitaciones se pueden obtener medias de 12000 kg/ha, llegando a valores superiores en muchas explotaciones. La aceituna proviene de vuelo y se recoge en un corto periodo de tiempo, por lo que se puede recolectar en el momento óptimo de maduración, obteniendo un rendimiento graso más elevado y por tanto una extraordinaria calidad del aceite. Con rendimientos grasos netos cercanos al 16% se obtienen unos 2000 kg de aceite por hectárea. Pero el gran hecho diferenciador de este cultivo es la mecanización, tanto de podas como de recolecciones, ya que hace disminuir los costes de mano de obra, unido al sobreprecio obtenido por la precocidad y la calidad. Y aunque los costes de implantación son mayores, cercanos a 6000 €/ha a diferencia de un sistema en intensivo, que están cercanos a los 4000 €/ha, podemos afirmar que, en el cultivo de olivar en seto, la inversión inicial se recupera en unos 6 años, llegando a tener beneficios medios anuales a partir de ese año de 2500 €/ha, en condiciones óptimas de clima y cultivo, frente a los 850 €/ha que se obtiene el olivar intensivo. La inversión inicial es del doble, pero el beneficio se triplica.

Palabras clave: olivar en seto; calidad del aceite; productividad; inversión rentable

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3470

1. Introducción

Desde hace años la Universidad Politécnica de Cartagena, en especial la Escuela de Ingenieros Agrónomos, ha colaborado con la plataforma AgritechMurcia en numerosos proyectos de diversa índole. La plataforma AgritechMurcia agrupa a 15 empresas tecnológicas de la Región de Murcia y centros de investigación que, con el apoyo de la Administración autonómica, ofrecen soluciones integrales, flexibles y eficientes a los agricultores de todo el mundo.

La Región de Murcia lleva más de 40 años adaptando la tecnología agrícola a la demanda de los mercados más exigentes, así como a las necesidades específicas de agricultores de todo el mundo, buscando la optimización en el uso de recursos naturales, incluso en las condiciones más adversas. Las empresas de AgritechMurcia constantemente crean avanzados equipamientos y soluciones tecnológicas, para adaptarse a cada circunstancia particular, independientemente de la zona geográfica y consolidando así un modelo de trabajo de confianza e implicación directa entre productores, fabricantes y centros de investigación, demostrando con ello una clara apuesta por la innovación.

Estas empresas que son líderes mundiales en los sectores de Maquinaria agrícola, Riego localizado, Filtración y tratamiento de agua de riego, Tecnología y equipamiento agrícola, Software y automatismos, Semilleros y viveros, Fertilizantes, Fertirrigación, Control de drenajes en hidroponía, Impermeabilización de embalses, Invernaderos, Plásticos, Control de clima, Proyectos integrales en ingeniería y biotecnología, han puesto su confianza en la Universidad Politécnica de Cartagena mediante la creación de la cátedra AgritechMurcia-UPCT.

La cátedra nace con el objetivo de generar la simbiosis de los ámbitos docente, investigador y empresarial, para crear un entorno que constituya un referente internacional en formación y difusión de conocimiento en el campo de la tecnología agrícola.

Nuestro objetivo es tener una oferta activa y continuada, estando atentos en todo momento a las necesidades del mercado para así poder satisfacerlas. Basándonos en la experiencia de las empresas y buscando a los mejores profesionales en cada campo pretendemos trasladar los conocimientos en tecnología agrícola, tanto a técnicos en activo como a recién titulados. En los dos años que llevamos trabajando han sido numerosos los trabajos, jornadas, cursos y material audiovisual generado en torno a la Tecnología agrícola. Uno de los que mayor repercusión ha tenido han sido la serie de vídeos que estamos desarrollando en torno a la revolución que ha supuesto la tecnificación en el cultivo del olivar, llevada a su máxima expresión en el sistema de cultivo superintensivo.

Este sistema de cultivo se ha ido expandiendo en diferentes países como Túnez, Chile, Marruecos, Italia y hasta Australia y recientemente otros países están empezando a incorporar esta tecnología: Argentina, Arabia Saudita, Turquía, Irán, Libia, Argelia [1]. En la actualidad existen en el mundo alrededor de 180.000 ha, de las cuales más del 50% se encuentran en España. Juan Villar [2], consultor estratégico preconiza que en 2030 más del 20% de las plantaciones de olivar se harán en superintensivo, llegando a un porcentaje similar al de superficie en intensivo, augurando con ello que ésta será la única estrategia para mantener la rentabilidad del olivar.

2. Materiales y métodos

Desde hace mas de 25 años este sistema de cultivo lleva siendo implantado por agricultores emprendedores que han ido aprendiendo y probando técnicas y manejo y hoy en día podemos decir que es un sistema con un elevado grado de madurez para poder ser abordado de una manera sencilla por cualquier agricultor.

Desde la Universidad Politécnica de Cartagena estamos recogiendo este conocimiento, pautas y recomendaciones de la mano de empresas, técnicos expertos en la materia y de agricultores con experiencia y se muestra a los interesados en un soporte audiovisual de una manera sencilla de consultar y comprender. Los vídeos recogen en una primera edición tres capítulos que se centran en la rentabilidad de la inversión y los primeros años del cultivo, desde la plantación hasta las primeras podas. En una segunda edición, que se lanzará en otoño de 2019, se van a abordar los aspectos relativos a la fertirrigación, las podas de mantenimiento, el manejo del suelo, las recolecciones y la sanidad vegetal. A continuación presentamos los datos mas relevantes obtenidos en esta primera edición.

3. Resultados y discusión

3.1. Sistema de cultivo y características

El sistema de olivar en superintensivo se llama así porque alcanza unas densidades de plantación de entre 1.000 y 2.000 árboles por hectárea. Para conseguir esto se plantan los olivos en forma lineal y en seto a una distancia en la línea entre 1,35 y 1,5 metros, y una separación entre calles de entre 3,5 y 4 metros. En altura no se deja crecer más de 2,5 metros.

Una de sus fuentes de éxito es su sencillo manejo propiciado con una elevada mecanización de labores y recolecciones, necesitando unas dotaciones hídricas de entre 1.500-2.500 m3/ha.

Este tipo de disposición hace que el comportamiento de la planta varíe respecto al cultivo tradicional y se obtenga una alta eficiencia productiva, debido a que tiene una mayor superficie productiva (m2/ha) que el olivar tradicional. Esto es debido a que, a igual volumen de copa, todo el volumen es superficie exterior y por tanto productiva, al disminuirse el sombreo. Además, en un olivar en seto bien podado se consigue una adecuada relación hoja-madera, lo que se traduce en un menor consumo de agua y nutrientes, al contrario de lo que se pensaba al principio de instalar este sistema, cuando se creía que una mayor densidad de plantación llevaría a un mayor gasto en insumos.

Otra de las principales características de este cultivo es tener una elevada precocidad, es decir, una rápida entrada en producción, aproximadamente, a los dos años de la plantación, según fechas de plantación y tamaños de la planta. Por ello podemos afirmar que, con la primera recolección, se consigue que los ingresos anuales sean ya mayores que los gastos.

Pero la característica más destacable de este sistema de cultivo es, sin duda, la completa mecanización de la recolección, obteniendo una importante reducción del coste de recolección y menor dependencia de la mano de obra.

Respecto a las mejoras en la calidad, con este sistema de cultivo toda la aceituna proviene de vuelo y se recoge en un corto periodo de tiempo, por lo que se puede recolectar en el momento óptimo de maduración obteniendo un rendimiento graso más elevado, y por tanto una extraordinaria calidad del aceite.

Hablar de datos concretos de producción es complicado, pero podemos decir que en fincas sin limitaciones se pueden obtener medias de 12.000 kg/ha, que con rendimientos grasos netos cercanos al 16%, supondrían unos 1.900 kg de aceite por hectárea.

3.2. Costes y rentabilidad

Para llegar a ver la magnitud de los beneficios que se pueden conseguir con este sistema de cultivo en seto, hemos comparado los costes y rentabilidad obtenidos frente a los del sistema de cultivo de olivar en intensivo a mayores marcos, normalmente 7x5 m. Los valores presentados son fruto de los trabajos de años de dedicación de técnicos en explotaciones comerciales.

En las tablas 1 y 2 podemos ver los valores de producción tanto en kg de aceituna/olivo, kg de aceituna/ha y finalmente kg aceite/ha, considerando en ambos casos un rendimiento graso neto del 15,5%, pero con densidades de 286 olivos/ha en intensivo y 1852 olivos/ha en superintensivo.

Tabla 1. Producción de aceituna y aceite en sistema intensivo de variedad Arbequina (marco 7x5 m; densidad de plantación 286 olivos/ha; rendimiento graso 15,5%)

Año	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
kg aceituna/árbol	3	7	12	18	24	28	32	36	34	37	35	36	35
kg aceituna/ha	858	2002	3432	5148	6864	8008	9152	10296	9724	10582	10010	10296	10010
kg aceite/ha	133	310	532	798	1064	1241	1419	1596	1507	1640	1552	1596	1552

Tabla 2. Producción de aceituna y aceite en sistema superintensivo de variedad Arbequina (marco 4x1,35 m; densidad de plantación 1852 olivos/ha; rendimiento graso 15,5%)

Año	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
kg aceituna/árbol	4	5,5	6	7	8	6	7	6	7	6	7	6	7
kg aceituna/ha	7408	10186	11112	12964	14816	11112	12964	11112	12964	11112	12964	11112	12964
kg aceite/ha	1148	1579	1722	2009	2296	1722	2009	1722	2009	1722	2009	1722	2009

En las tablas 3 y 4 podemos observar los datos relativos a los gastos e ingresos obtenidos en sistema de cultivo extensivo (en marco 7x5 m) y cultivo en seto (marco 4 x 1,35 m), respectivamente. En ambos casos se ha considerado un precio medio del aceite de 2,4 €/kg y unos costes de molturación y transporte de 0.035 €.

Como podemos ver existen grandes diferencias de producción afectando a costes y rentabilidad como cabe esperar. Relativo a los costes de implantación y manejo, tal y como se aprecia en las tablas 3 y 4, los gastos de plantación en el cultivo en seto oscilan entre los 6.000 y 7.000 €/ha, a diferencia del sistema en intensivo que ronda los 3.500 €/ha, es decir aproximadamente la mitad del coste de implantación. Sin embargo, en el sistema en seto o superintensivo con la primera cosecha (> 7.500 kg/ha), que se produce al tercer año, ya obtenemos un beneficio anual, hecho que se produce en el sistema intensivo hasta el año 8, cinco años después (Tabla 1 y 2).

Tabla 3. Evolución anual de gastos, ingresos y beneficio del olivar en sistema intensivo por hectárea de variedad Arbequina (marco 7x5 m; densidad de plantación 286 olivos/ha; rendimiento graso 15,5%)

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Plantación[1,2]	3400														
Gastos directos	850	900	950	1000	1100	1150	1200	1200	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
Recolección[3,4]			154	360	618	927	824	961	1098	1236	1167	1270	1201	1236	1201
Molturación transporte[5]			34	80	137	206	275	320	366	412	389	423	400	412	400
Gastos (€/ha año)	4250	900	1139	1440	1855	2283	2298	2481	2714	2897	2806	2943	2852	2897	2852
Ingresos (€/ha año)			319	745	1277	1915	2553	2979	3405	3830	3617	3973	3724	3830	3724
Beneficio (€/ha año)	-4250	-900	-820	-696	-578	-368	255	498	690	933	811	993	872	933	872

* costes de: [1]riego= 1500 €/ha; [2]plantación: 1900 €/ha; [3]recolección del año 3 al 6: 0,18 €/kg; [4]del año 7 en adelante: 0,12 €/kg; [5]molturación y transporte: 0,04 €/kg

Respecto a la plena producción se produce en el sistema en seto a los 6-7, recuperándose en ese momento la inversión (Tabla 3 y 4), debido a la elevada eficiencia productiva. Sin embargo, en el cultivo en intensivo la plena producción se alcanza a los 12 años, 6 años después y amortizándose la inversión, aproximadamente, en el año 16, 10 años después. Tras esta recuperación de la inversión se pueden llegar a tener beneficios medios anuales de 2.500 €/ha, en condiciones óptimas de clima y cultivo, frente a los 850 €/ha que se obtiene el olivar intensivo, debido sobre todo a que este último soporta mayores gastos de recolección al no poder mecanizarse. Por tanto, podemos decir que la inversión inicial es del doble, pero el beneficio se triplica.

Tabla 4. Evolución anual de gastos, ingresos y beneficio del olivar en sistema superintensivo por hectárea de variedad Arbequina (marco 4x1,35 m; densidad de plantación 1852 olivos/ha; rendimiento graso 15,5%)

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Plantación[1,2]	6000														
Gastos directos	1000	1000	1100	1100	1150	1200	1150	1200	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
Recolección[3,4]			185	255	278	324	370	278	389	333	389	333	389	333	389
Molturación transporte[5]			259	357	389	454	519	389	454	389	454	389	454	389	454
Gastos (€/ha año)	7000	1000	1544	1711	1817	1978	2039	1867	2093	1972	2093	1972	2093	1972	2093
Ingresos (€/ha año)			2756	3789	4134	4823	5512	4134	4823	4134	4823	4134	4823	4134	4823
Beneficio (€/ha año)	-7000	-1000	1211	2078	2317	2845	3473	2267	2730	2161	2730	2161	2730	2161	2730

* costes de: [1]riego= 2200 €/ha; [2]plantación: 3800 €/ha; [3]recolección del año 3 al 6: 0,025 €/kg; [4]del año 7 en adelante: 0,03 €/kg; [5]molturación y transporte: 0,035 €/kg

Y en cuanto al manejo, los costes propios del cultivo son similares a otros tipos de olivar, destacando sin embargo que en la recolección estos costes se reducen a la mitad. Pasando de 0,1 €/kg de aceituna en olivar intensivo, a la mitad, 0,05 €/kg de aceituna en olivar en seto.

3.3. Difusión en forma de vídeo

Esta información, unida a las pautas de manejo a nivel agronómico, se han recogido en unos vídeos de divulgación promovidos por la cátedra AgritechMurcia-UPCT y financiados por las empresas firmantes de este trabajo. Los vídeos han tenido una gran repercusión en las redes sociales de las empresas patrocinadoras, llegando a contar con más de 30.000 visualización en la suma del conjunto de redes sociales donde se han expuesto. Los vídeos finalmente se han recopilado en un canal youtube propio de la cátedra y pueden consultarse en: (https://www.youtube.com/channel/UCr_BwXhLbJRfYybTSJeaTcA).

4. Conclusiones

Tal y como se ha expuesto nos encontramos ante un cultivo que en condiciones adecuadas presenta una recuperación de la inversión en 6-7 años, alcanzando beneficios medios anuales de 2.500 €/ha, llegando a una rentabilidad mucho mayor que la proporcionada por los bancos.

Aumento de producciones, de calidad, disminución de mano de obra y fácil manejo son los secretos de su éxito, impulsando a grandes, medianos y pequeños agricultores a adoptar este tipo de sistemas.

La difusión y el seguimiento experimentado por los materiales que hemos generado, tanto por alumnos, técnicos y agricultores, nos ha hecho afianzarnos en la necesidad de exponer estos detalles agronómicos y que la mejor manera de difundirlos es a través de materiales audiovisuales.

Referencias

1. Olint (2019) Historia y trayectoria del sistema-superintensivo. http://www.olint.com/es/olint-rinde-tributo-a-los-pioneros-del sistema-superintensivo
2. Villar J. (2018) https://www.juanvilar.com/blog/

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

RICA (Red de Intercambio de Conocimiento Agroalimentario): un nuevo modo de trasferir conocimiento usando medios digitales (ricagroalimentacion.es)

L.M. Albisu[1], A. Yubero[1], T. Juan[1], M. Carracedo[1], M.A. Santillán[2]

[1] CITA - Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón; lmalbisu@cita-aragon.es
[2] Colegio de Ingenieros Agrónomos de Aragón, Navarra y País Vasco;

Resumen: La transferencia de conocimientos es una sentida necesidad desde el sector público y el privado. Internet ha añadido nuevas posibilidades que es imprescindible explorar. La Red de Intercambio de Conocimiento Agroalimentario (RICA) recoge secciones relacionadas con la información y con el conocimiento. Las primeras atraen un gran flujo de visitas con lo que hace que muchos usuarios se familiaricen con los contenidos de la red. Sin embargo, el elemento diferencial son los contenidos relacionados con el conocimiento. De un total de 3 millones de visitas, en 2 años y con la plataforma en construcción, más de medio millón están relacionadas con el conocimiento. Mientras que la divulgación de los expertos se ha expandido de una manera creciente, las preguntas de los profesionales y usuarios del sector agroalimentario todavía son limitadas. El reconocimiento nacional e internacional de RICA es un buen indicativo de la trascendencia de la comunicación que se transmite.

Palabras clave: intercambio conocimiento, sector agroalimentario, información, Internet

1. Introducción

Al Sistema de Investigación se añadió la necesidad de complementarlo con la etapa posterior del desarrollo buscando una aplicación a la investigación, con lo que se generó el I+D. No parecía suficiente y la puesta en práctica del desarrollo suponía tener que pensar en la innovación, con lo cual quedó la expresión de I+D+i. Pero toda esta evolución se basaba en un sistema lineal que partía de la investigación para llegar a la innovación. Este planteamiento ha resultado insuficiente y confuso porque la realidad es mucho más compleja, ya que el que el conocimiento no solo va desde la investigación al usuario de conocimiento, sino que también recorre el camino inverso. Todo ello a través de la cadena agroalimentaria en la que intervienen gran cantidad de agentes relacionados con los distintos eslabones.

En todo tipo de comunicación la implantación de Internet ha supuesto una verdadera revolución tanto por la penetración del mensaje como por la cobertura que se puede alcanzar. Ha habidos dos aspectos de particular importancia, por una parte, conceptual en lo que respecta a cómo afrontar el transvase de la información y sus necesarias interacciones, pero, por otra parte, los medios tecnológicos para que el proceso sea lo más efectivo posible.

RICA, la Red de Intercambio de Conocimiento Agroalimentario, recoge estos dos aspectos. Su propio nombre explica que opera en Red, con multitud de agentes del sector agroalimentario; es de Intercambio porque opera de una manera bidireccional, incorpora no solo el Conocimiento formal y científico sino también el empírico que se genera mediante la observación; y, finalmente,

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3361

con la palabra Agroalimentario envía el mensaje de que no solo se preocupa de las materias primas sino también de su transformación agroindustrial.

En este trabajo se explica la generación y desarrollo de la Red, en primer lugar, para comprender por qué se creó y qué es lo que pretende, así como su desarrollo. A continuación, se explica su desarrollo. Posteriormente, se exponen los resultados. Finalmente, se exponen unas reflexiones acerca de las experiencias recogidas en todo el proceso.

2. Generación y desarrollo de RICA

Hay una parte institucional que ha jugado un importante papel en la generación de RICA. En primer lugar, la existencia de los Programas de Desarrollo Rural (PDR), una pieza importante en lo que se llama el Segundo Pilar de la Política Agraria Común (PAC) que finalmente los gestionan las administraciones de las comunidades autónomas. La preocupación por el desarrollo rural es creciente por el papel que juega en las producciones agrarias, en la transformación agroalimentaria y en el cuidado del medio ambiente. Todos estos aspectos dentro del contexto de la generación de suficientes ingresos para las personas que viven en el medio rural ya que la despoblación es un problema muy candente. Pero, todo el desarrollo productivo se basa, en gran medida, en la innovación. Los Programas de Cooperación, dentro de los PDR, tienen en la innovación su último objetivo.

Los Programas de Cooperación tienen que estar generados desde el sector privado para solucionar problemas existentes, aunque se apoyan en los centros tecnológicos públicos para la implantación de las innovaciones. Dentro de este planteamiento, la Alianza Agroalimentaria Aragonesa (AAA), que está compuesta por las Cooperativas Agro-Alimentarias de Aragón, la Asociación de Industrias de la Alimentación de Aragón (AIAA), las principales asociaciones profesionales agrarias (ASAJA, UAGA y UPA), y los colegios profesionales (Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Aragón, Navarra y País Vasco - COIAANPV, Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Agrícolas de Aragón – COITA, y los colegios de veterinarios de Zaragoza, Huesca y Teruel) tomó la iniciativa de presentar el proyecto RICA (Red de Intercambio de Conocimiento Agroalimentario) en 2016.

En especial, los beneficiarios u organizaciones que han estado aportando fondos para que se desarrolle el proyecto han sido el COIAANPV, que actúa como coordinador, y el COITA. La palabra beneficiario, tal como se expresa en la convocatoria de los proyectos, se denominan de esa manera porque serían las instituciones que finalmente se benefician de las soluciones que se encuentren a través de los proyectos. En este caso, no es así porque las acciones que han programado son para beneficio del sector agroalimentario, con lo que estas instituciones han estado jugando el papel de benefactores.

La primera fase de RICA abarcó desde 2016 a 2018 y fue una prueba piloto con 3 subsectores: frutas de hueso, vacuno de carne y cereales. La segunda fase de RICA, también como Proyecto de Cooperación dentro de los PDR, se está desarrollando entre 2018 y 2020, por lo que se está en pleno proceso y no es una tarea finalizada. El planteamiento es el mismo que en la primera fase, pero extendido a todo el sector agroalimentario y forestal sin ninguna excepción.

RICA es una plataforma de intercambio de conocimiento entre los expertos (investigadores y técnicos) y los usuarios (agricultores y empresarios agroalimentarios). Los expertos transmiten sus conocimientos formales y los usuarios los conocimientos empíricos mayormente relacionados con los problemas que tienen que afrontar. El objetivo es que haya una comunicación fluida que finalmente termine en innovaciones sostenibles en el sector agroalimentario. Un mejor conocimiento de los problemas hará que la investigación esté más focalizada y los esfuerzos tengan unos mayores resultados prácticos.

RICA, aunque su principal objetivo es la transmisión de conocimiento, se apoya en la transmisión de información, con dos secciones: Noticias y Eventos. Estas secciones generan

mucho flujo de visitas lo que permite que los usuarios se familiaricen con la plataforma y tengan contacto con ella, lo que debiera promover otro tipo de búsqueda de conocimiento.

Las Noticias diarias están relacionadas con el sector agroalimentario y forestal que se genera regional, nacional e internacionalmente. No se generan noticias, sino que se hace un pequeño resumen de las fuentes originales y se ponen referencias para acudir a las mismas. La experiencia indica que se han ido cubriendo alrededor de 25 a 30 noticias si bien se debería poner un tope en las principales 25 noticias para tener más tiempo para el desarrollo de otras secciones. Los Eventos están relacionados con Aragón y depende de lo que ocurra, pero las estadísticas indican que suele haber una media entre 5 y 7 eventos diarios dependiendo de la época y la intensidad de actividades en el sector agroalimentario.

Las secciones relacionadas con el conocimiento son: Consultas, Documentos, Podcasts, Vídeos y, Opiniones y Experiencias. La sección de Consultas recoge preguntas que provienen de los usuarios que formulan sus problemas. La experiencia indica que, dada la novedad del sistema, así como probablemente la escasa familiaridad con Internet de muchos de los usuarios, no se están recibiendo muchas consultas a pesar de la gran difusión que se ha hecho entre diversos colectivos. Las Consultas también las pueden realizar los técnicos que buscan soluciones a sus problemas en otros expertos. Pero también los expertos pueden formular preguntas que son respondidas por ellos mismos recogiendo sus experiencias con los usuarios. Es como si con las preguntas formuladas, a través de los expertos, se genere una sección de las preguntas más frecuentes que posiblemente tengan mayor impacto. En la sección de Consultas se pone el nombre de la persona que lo responde, así como su adscripción institucional para su mejor localización para futuras consultas.

Los Documentos son de carácter divulgativo y se han salvado las barreras para que se puedan consultar en abierto y sin restricciones. Los Podcasts, son fundamentalmente emisiones de radio y los Vídeos son provenientes de canales youtube, pero en la actualidad su número es limitado. En cuanto a la sección de Opiniones y Experiencias son escritos con una longitud entre 600 y 900 palabras. Intervienen expertos del sector público y privado. Es muy plural, tanto en temas como personas. Los expertos del sector público trabajan en las instituciones que están en Aragón. Sin embargo, los expertos del sector privado o son independientes o pertenecen a empresas que no necesariamente tienen su sede central en Aragón.

El desarrollo de RICA se ha realizado desde el CITA (Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón) que ha sido la contraparte tecnológica que exige la convocatoria de los proyectos de cooperación. La coordinación técnica la ha realizado Luis Miguel Albisu y han estado colaborando 4 personas. El Área de Información, Documentación y Cultura Científica del CITA ha supuesto una importante contribución al proyecto, dada su experiencia anterior en el manejo de la documentación especializada y la existencia de boletines diarios informativos en el que se recogían noticias del sector agroalimentario. El desarrollo informático se realiza desde el portal "chil.org" que está especializado en el sector agroalimentario.

Hay un particular esfuerzo en la divulgación acudiendo a jornadas y congresos para su difusión, así como creando pequeñas publicaciones en las que periódicamente se han ido recogiendo los escritos generados desde la sección de Opiniones y Experiencias. Estas publicaciones se han remitido, a través de Internet, a los autores de los escritos y a potenciales interesados tanto en el ámbito de los expertos como de los usuarios. A pesar de los continuados esfuerzos de difusión se observa que su penetración es lenta debido a la gran cantidad de información que los ciudadanos manejan, lo que hace difícil penetrar con nuevos productos e ideas.

3. Resultados de RICA

Una de las maneras más habituales en la evaluación de las actividades realizadas en Internet se contabiliza por el número de visitas y por el número de descargas, entre otros parámetros. Se supone que cuantas más visitas, mayor es la satisfacción de los contenidos que leen, aunque es importante también el número de personas que repiten y los perfiles profesionales de los visitantes. Es más fácil tener un conocimiento cuantitativo que cualitativo, así como también no es fácil analizar cómo han llegado los visitantes a RICA.

Google Analytics proporciona estadísticas gratuitas de relevancia. También la plataforma Chil que soporta RICA recoge sus propias estadísticas. Entre ambos sistemas de recopilación del uso es posible obtener bastante información, si bien es importante analizar la evolución de las estadísticas a lo largo del tiempo.

Las cifras de finales abril, aunque hay una dinámica muy importante que en el momento de presentar esta comunicación en septiembre ya no serán válidas, indican que el número de contenidos estaba cercano a los 18.000. Se entienden por contenidos cada unidad de las distintas secciones de las que consta RICA. Es decir, que han pasado dos años desde su inicio con una continua incorporación de contenidos y, por lo tanto, de visitantes desde que comenzó a principios de 2017. Hay que comprender que una noticia o un evento no tiene la misma trascendencia que un documento o un escrito de la sección de Opiniones y Experiencias.

Las visitas totales desde su comienzo ya suman más 4,5 millones. El ritmo actual es de alrededor de 250.000 visitas por mes lo que supone 3 millones de visitas al año. Conviene reseñar que la sección de Consultas, a pesar de su limitado número ya que hay 80, ha recibido más de 25.000 visitas. La sección de Documentos, que todavía no ha llegado a los 1.500 tiene 250.000 descargas, y la sección de Opiniones y Experiencias con 180 escritos ha atraído a cerca de 335.000 visitas.

Es lógico que las secciones con información más estable vayan incrementando sus visitas, en mayor medida, con el paso del tiempo. Las más efímeras son las relacionadas con la información (Noticias y Eventos) aunque las estadísticas indican que los usuarios hacen búsquedas retrospectivas. Es decir, aquellos que están interesados, por un tema en particular, buscan las noticias relacionadas, aunque hayan ocurrido hace un cierto tiempo por lo que las visitas se van también incrementando con el paso del tiempo.

En este análisis global, los contenidos relacionados con la información (Noticias y Eventos) suponen alrededor del 90% de los contenidos, pero atraen el 80% de las visitas. Sin embargo, los contenidos relacionados con el conocimiento (Consultas, Documentos, Podcasts y Opiniones y Experiencias) tienen el 20% de las visitas con el 10% de los contenidos. En particular, hay que resaltar que los escritos de la sección de Opiniones y Experiencias, que sólo suponen alrededor del 1% de los contenidos alcanzan el 10% de las visitas, lo que supone que hay un gran interés por la divulgación científica, así como por la localización de los expertos que puedan ser capaces de resolver problemas.

El origen de las visitas es en un 25% de Aragón, un 35% del resto de España y un 40% desde el extranjero. Las visitas de fuera de España provienen de países hispanoparlantes como México y Colombia, que son habitualmente los dos primeros, pero también de otros hasta alcanzar más de 70 países. El número de visitantes de Estados Unidos suele alcanzar una posición dentro de los 5 primeros países.

Todo indica que la mayoría de los visitantes no acuden a RICA directamente, sino que ante la existencia de un problema acuden a los buscadores, como Google mayoritariamente pero también otros, para encontrar información y se encuentran con los contenidos de RICA. Es lógico que los usuarios que vayan conociendo RICA vayan usándolo posteriormente.

Alrededor de un 60% de las visitas lo hacen desde un ordenador, un 35% desde aparatos móviles y el 5% desde tablets. A lo largo de la semana el número de visitas disminuye ostensiblemente durante el fin de semana. Asimismo, se observó una notable disminución de

visitas desde principios del mes de diciembre que se prolongó durante el mes de enero. Si se considera el periodo de un año se puede concluir que hay una clara progresión.

4. Reflexiones finales

En esta fase del proyecto se puede decir que se ha mejorado enormemente las secciones relacionadas con la información, aunque se desearía una mayor colaboración por parte de las instituciones que celebran eventos. De tal manera que no hubiera que rastrear los eventos que van a ocurrir para reflejarlos en RICA, sino que fueran los propios organizadores los que enviaran la información.

RICA está sirviendo para que se conozca mejor a los expertos, técnicos e investigadores, que hay en Aragón relacionados con el sector agroalimentario y forestal. Hay un gran número de expertos, pero su actividad no alcanza a ser visualizada por los usuarios. Gracias a la labor de la plataforma su localización es mucho más fácil hoy que hace dos años. Esto es posible gracias al esfuerzo divulgativo de los propios expertos. Esta labor debiera incentivar futuros contactos y allanar el proceso conducente a la innovación.

Sin embargo, la mayor carencia se ha detectado en la falta de consultas de los agricultores y empresarios agroalimentarios a pesar de la amplia divulgación del sistema RICA. Esta carencia ha hecho cambiar de estrategia y dirigir la sección de Consultas hacia los técnicos que están en contacto más directo con los usuarios finales, tanto en la transmisión de conocimientos formales como en la generación de preguntas más frecuentes que ellos se encuentran en sus labores habituales de consulta. La convivencia entre el sector público y privado es perfectamente compatible cumpliendo diferentes objetivos.

Un análisis más pormenorizado debería indicar cuáles son los contenidos que tienen más atractivo para los lectores. Facilitaría la selección de noticias y la divulgación de conocimientos. Aunque los indicadores de número de visitas no reflejan necesariamente el impacto final de los conocimientos. Así, pueden existir temas muy novedosos de una gran relevancia pero que pueden ser asimilados por un número relativamente pequeño de lectores, pero muy cualificados y que posteriormente pueden divulgarlo a otras muchas personas.

En definitiva, se puede considerar que RICA es una herramienta válida para la transmisión de información y conocimientos. Internet ha cambiado la comunicación y su potencialidad muy bien puede aplicarse en la comunicación de conocimientos agroalimentarios.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Robot de campo para detectar enfermedades en cultivos hortícolas mediante imágenes multiespectrales

S. Cubero[1*], S. López[1], E. Marco-Noales[2], S. Sanjuan[3], V. Alegre[4], S. Barbé[2], C. Ruiz[4], E. Aguilar[4], I. Navarro[2], N. Aleixos[5], J. Blasco[1]

[1] Centro de Agroingeniería. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). CV-315, km 10,7 – 46113 Moncada (Valencia), España; cubero_ser@gva.es
[2] Centro de Protección Vegetal y Biotecnología. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). CV-315, km 10,7 – 46113 Moncada (Valencia), España.
[3] Agrícola Villena S. Coop. Carretera del Puerto, S/N, 03400 Villena (Alicante), España.
[4] TRAGSA. CV-315, km 10,7 – 46113 Moncada (Valencia), España.
[5] Departamento de Ingeniería Gráfica. Universitat Politècnica de València (UPV). Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España.

Resumen: Se ha construido un robot eléctrico asistido por control remoto para inspeccionar cultivos hortícolas mediante teledetección, embarcando tres cámaras réflex (dos modificadas para NIR y BNDVI), una térmica, otra multiespectral (ocho bandas entre 550 y 850 nm) y otra hiperespectral (400-1000 nm). Las cámaras están colocadas mirando al suelo (plantas) y para controlar la iluminación se utilizan cuatro focos halógenos en la zona de inspección que ha sido protegida de la luz exterior con una lona. Las imágenes se han georeferenciado utilizado un receptor GNSS (resolución de 3 cm). Para controlar el avance del robot y sincronizar la adquisición de imágenes, se ha desarrollado una placa electrónica a medida utilizando un sensor inductivo acoplado a las ruedas del robot y un software a medida instalado en un computador industrial. Se han realizado inspecciones mensuales en dos parcelas experimentales de zanahorias en Villena (España) para detectar plantas asintomáticas infectadas por *Candidatus* Liberibacter solanacearum. Se han creado mapas del campo utilizando índices vegetativos a partir de los datos espectrales con resoluciones entre 1 y 2,5 mm por píxel. Durante el último ensayo, se etiquetaron 100 plantas que se recolectaron y analizaron utilizando PCR en tiempo real para comparar los resultados con el análisis de las imágenes.

Palabras clave: visión por computador, imagen espectral, agricultura de precisión, teledetección.

1. Introducción

Candidatus Liberibacter solanacearum (CaLsol) es una bacteria que afecta al floema de las plantas. La transmisión de la enfermedad se produce principalmente a través de insectos vectores, aunque también puede ocurrir mediante injertos o semillas [1]. En Europa está causando daños principalmente en cultivos de zanahoria, pero también en patata, apio, chirivía, perejil o hinojo. También otros haplotipos afectan en diversas zonas a cultivos de tomates, pimientos, berenjenas, tabaco, buena hierba o menta. En España está afectando a varias comunidades autónomas causando daños sobre todo en cultivos de zanahoria.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3473

Los síntomas más destacados en estas plantas son las arrugas de las hojas, la clorosis generalizada, la decoloración purpurea y el crecimiento atrofiado de los brotes y raíces. La enfermedad se muestra en la parte aérea de estos cultivos causando retraso en el crecimiento, aparición de exceso de follaje, clorosis generalizada, coloración purpurea del follaje con ahuecamiento basal de las hojas e interrupción de la formación de frutos. Sin embargo, los síntomas pueden ser confundidos por aquellos causados por otros patógenos como fitoplasma o spiroplasma citri, y en otros casos, mientras que los frutos están afectados, la zona aérea permanece asintomática, lo que dificulta su detección visual. Por lo tanto, es necesario realizar muestreos frecuentes y análisis de laboratorio para determinar la presencia de la enfermedad en las plantas, lo que resulta difícil y costoso para grandes áreas del cultivo.

El uso de sensores remotos espectrales en agricultura de precisión puede ayudar en este sentido a estudiar grandes extensiones de terreno con una alta resolución para detectar enfermedades de plantas [2]. Estas técnicas han evolucionado durante las últimas tres décadas y actualmente se pueden realizar en diferentes escalas, dependiendo del área a monitorizar y la resolución espacial y espectral requerida [3]. A gran escala, el uso de datos espectrales proporcionados por satélites ha sido utilizado desde hace varias décadas, ofreciendo gran cantidad espectral de información pero con poca resolución espacial y sin posibilidad de programación de la adquisición. Por otro lado, la reducción de precios y la miniaturización hacen que los sistemas aéreos no tripulados (UAV) sean cada vez más populares para una rápida monitorización a nivel de cultivo en cualquier momento. A nivel de hoja, la información espectral se puede recopilar con una alta resolución espacio-temporal utilizando sensores manuales o montados en vehículos agrícolas [4]. Este trabajo tiene como objetivo ayudar en la detección temprana de cultivos infectados por CaLsol a nivel de planta y cultivo, utilizando sensores de detección proximal de alta resolución montados en un robot eléctrico diseñado y desarrollado a medida para este fin.

2. Materiales y métodos

Para lograr el objetivo, se ha creado un robot eléctrico terrestre (Figura 1) operado mediante control remoto en el que se ha embarcado un conjunto completo de sensores capaces de monitorizar campos completos. El vehículo tiene la capacidad de adaptarse al ancho de plantación mediante un sistema telescópico en un rango entre 100 y 200 cm, de forma que las ruedas puedan desplazarse a lo largo del cultivo y del mismo modo al que lo haría cualquier tractor. Además, este sistema permite reducir su tamaño para facilitar su transporte por carretera, ya que el vehículo completamente abierto tiene unas dimensiones mayores a las de cualquier vehículo habitual. Tanto el robot como todos los sensores son alimentados por una batería de polímero de litio (LiPo).

Los sensores están situados en la parte superior central de la zona de inspección, alineados en la dirección de avance del vehículo, de forma que todos ellos puedan capturar toda el área de inspección. Para iluminar dicha zona, se han situado cuatro lámparas halógenas, cada una en una esquina de la escena. Resulta muy recomendable utilizar iluminantes para capturar las imágenes bajo condiciones controladas, evitando los problemas como brillos y sombras causados por las condiciones naturales cambiantes de la luz solar. El uso de lámparas halógenas es necesario para cubrir todo el rango espectral de los sensores e iluminar de forma lo más homogénea posible toda la escena. Sin embargo, dado el alto consumo energético de este tipo de iluminantes (4 x 400 W), resulta necesario utilizar un generador eléctrico que, además de alimentar las lámparas, permite recargar la batería principal del vehículo. Para conseguir unas condiciones de iluminación completamente controladas, toda la zona de inspección ha sido aislada del exterior utilizando lonas alrededor del robot con unas aberturas en las zonas delantera y trasera que permiten el paso de las plantas por dichas aberturas sin dañarlas.



Figura 1. Robot de campo desarrollado

Para capturar las imágenes en los momentos adecuados mientras se desplaza el robot, evitando espacios sin capturar y grandes superposiciones, se desarrolló un sistema programable que permite sincronizar el disparo de las cámaras con el avance del vehículo utilizando dos codificadores ópticos acoplados a las ruedas motrices. Esta señal de los codificadores ópticos también se utiliza para guiar el vehículo a través de un controlador proporcional, integral y derivativo (PID) sobre los motores. Para almacenar las imágenes que proporcionan todas las cámaras, se ha desarrollado una aplicación a medida que se ejecuta en el ordenador industrial.

Para conseguir geolocalizar cada una de las imágenes en el campo, se instaló en el vehículo un receptor GNSS (Hiper SR, TOPCON Corp. Japón) con corrección RTK, que permite identificar cada una de las plantas del cultivo en las imágenes con una precisión de aproximadamente 3 cm.

El conjunto de sensores embarcados en el vehículo terrestre (Figura 1b) incluye tres cámaras DSLR (Digital Single Lens Reflex) (EOS 600D, Canon Inc, Japón), dos de ellas modificadas para capturar imágenes en el infrarrojo cercano (NIR) de 700 a 1000 nm e imágenes BNDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada en el azul), una cámara térmica (A320, FLIR Systems, EE.UU.), una cámara multiespectral (CMS-V, Silios Technologies, Francia) capaz de capturar ocho imágenes monocromáticas en 558, 589, 623, 656 , 699, 732, 769 y 801 nm y un sistema hiperespectral de barrido en el rango entre 400 y 1000 nm compuesto por un espectrógrafo (Imspector V10, Specim Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finlandia) y una cámara (Eye5220CP, iDS Imaging Development Systems GmbH, Obersulm, Alemania).

Las cámaras DSLR permiten capturar imágenes del recorte con una resolución de 1 mm / píxel y las cámaras térmica, multiespectral e hiperespectral podrían obtener imágenes con una resolución espacial de aproximadamente 2,5 mm / píxel. Todas las cámaras se configuraron para capturar imágenes sincronizadas aproximadamente por cada metro de avance del vehículo y se utilizaron tiempos de integración de menos de 4 ms para evitar imágenes en movimiento o borrosas.

Los experimentos se han llevado a cabo en un cultivo de zanahoria ubicado en la localidad de Villena, Alicante (España) durante dos temporadas, aunque siguen en curso en 2019. Las líneas rojas delimitan el área monitorizada que contiene 27 filas cultivadas. Dentro de esta área, algunas zonas fueron tratadas con diferentes productos fitosanitarios para prevenir las infecciones. Cada una de las 27 filas cultivadas estaba compuesta por tres líneas de plantas que

hacen un ancho total de 1,5 m aproximadamente que se inspeccionaron al mismo tiempo. En cada una de las dos temporadas que duraron los experimentos ya terminados, se llevaron a cabo seis inspecciones de toda el área, una cada mes durante el ciclo de cultivo desde la siembra hasta la cosecha (junio-noviembre) para observar la evolución de las plantas durante su crecimiento e intentar detectar la enfermedad lo antes posible. Durante el último ensayo de campo, se marcaron 100 plantas con discos rojos para identificarlas posteriormente en las imágenes. Estas plantas se recolectaron por separado una vez monitorizadas por el vehículo y se llevaron al laboratorio para realizar un análisis espectral utilizando un espectrómetro (AvaSpec, Avantes BV, Apeldoorn, Paises Bajos) con un rango entre 200 y 1800 nm, un sistema hiperespectral compuesto por una cámara NIR (CoolSnap ES, Photometrics, Tucson, Arizona, EE.UU.) y dos filtros sintonizables de cristal líquido (LCTF) (CRi VariSpec, Waltham, Massachusetts, EE.UU.) en el rango entre 400 y 1100 nm, y también utilizando un sistema de iluminación por fluorescencia visible inducida por luz ultravioleta. Finalmente, se realizó un análisis molecular utilizando la reacción en cadena de la polimerasa en tiempo real (q-PCR) para determinar la presencia o ausencia de infección en las hojas y usar estas plantas como referencia en la creación de modelos estadísticos.

3. Resultados y discusión

El principal resultado ha sido la creación de un robot operado mediante un control remoto que es capaz de embarcar diferentes equipos de teledetección para inspeccionar cultivos hortícolas, iluminando la escena para evitar la radiación solar directa. El robot avanza a una velocidad precisa, sincronizando la adquisición de datos, y permite la creación de mapas precisos de alta resolución de los cultivos. A partir de las imágenes de alta resolución recogidas por cada cámara de todo el cultivo, se crean mapas uniendo todas las imágenes con todas las bandas espectrales disponibles. En la Figura 2 se observa una imagen de una de las filas cultivadas en las distintas bandas y con los diferentes índices espectrales.

Los resultados de los análisis de campo realizados en estos dos primeros años de ensayos no muestran signos claros de CaLsol en la información espectral adquirida durante el período de monitorización. Sin embargo, no se obtuvo información de las muestras negativas para poder compararlas en las imágenes, ya que la gran mayoría de las muestras presentaron resultados positivos en la detección de la bacteria CaLsol. Los resultados del análisis de laboratorio (tanto espectral como molecular) junto con el análisis de estas plantas específicas capturadas en el campo, servirán para crear mapas de cultivos con diferentes índices vegetativos que muestren infecciones potenciales que se compararán con la información recopilada por la Unidad de Bacteriología del IVIA y la inspección visual proporcionada por los técnicos de la cooperativa Agrícola Villena.

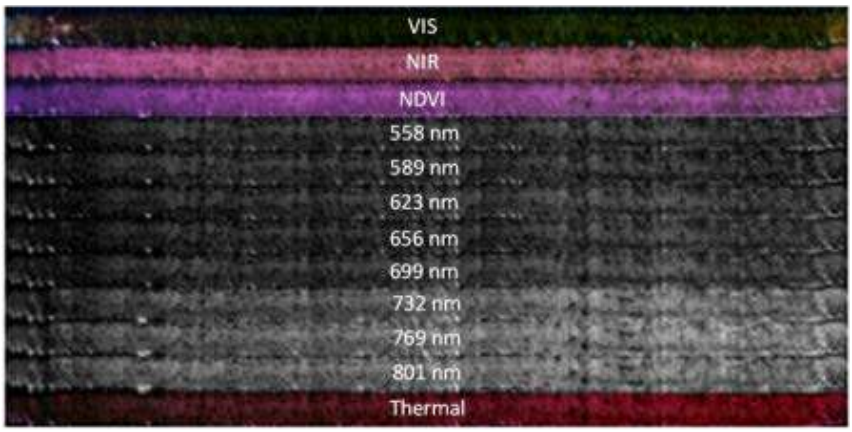


Figura 2. Imagen de una fila capturada en diferentes bandas espectrales

La Figura 3 muestra uno de los mapas que se han creado de todo el cultivo, en este caso utilizando el índice de vegetación NDVI. En el recuadro se observa la alta resolución de 2,5 mm/píxel de las imágenes. Estos mapas se compararon con las inspecciones visuales, pero no se pudieron lograr resultados ya que no se encontró relación entre los síntomas apreciables en la inspección visual y las plantas infectadas. En 2017, los resultados del análisis molecular de estas plantas específicas alcanzaron el 97% de la infección en las muestras recolectadas en una parcela de ensayos con síntomas claros de la infección. Sin embargo, en otra parcela visualmente asintomática, la infección alcanzó el 100% en las muestras recolectadas. Además, las plantas no tenían síntomas visibles claros de la enfermedad en el campo, excepto cuando se observaban con detenimiento, y en ocasiones, los síntomas aparecieron durante las últimas etapas del crecimiento de la planta, aproximadamente un mes antes de la cosecha.

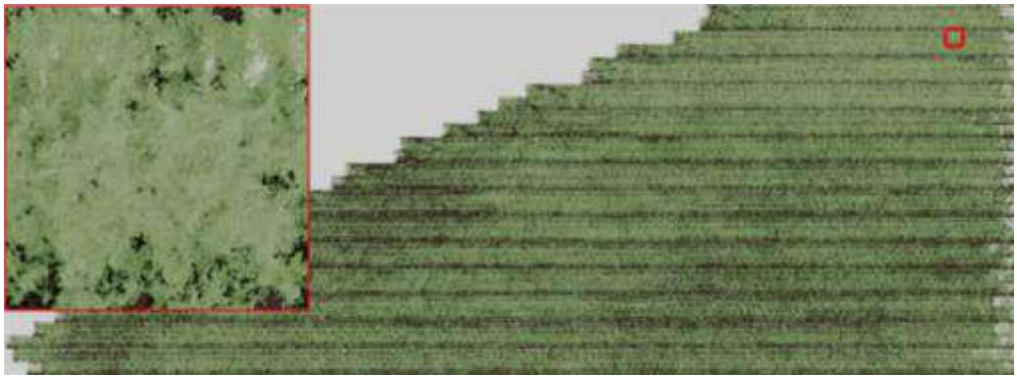


Figura 3. Mapa del cultivo utilizando el índice NDVI y detalle de resolución

Al final de la campaña se recolectaron 100 plantas de muestra, se llevaron a laboratorio para tomar imágenes con diferentes sensores y posteriormente se realizó un análisis molecular. También se realizó el análisis de los datos espectrales recopilados en el campo con algunas de las cámaras de las mismas plantas, pero los resultados de la detección correcta de las plantas infectadas fueron de alrededor del 57%, lo cual es claramente insuficiente para indicar que esta infección en particular puede detectarse utilizando el equipo de detección remota.

Los datos de las cámaras termográfica e hiperespectral ofrecen una alta cantidad de información espectral pero todavía no han sido analizados, por lo que no es posible decir con rotundidad si se puede o no detectar la infección de forma remota. Durante este 2019 se están realizando nuevos ensayos con el vehículo y todos los sensores para tratar de obtener una mayor cantidad de datos, así como la previsión de realizar un análisis molecular en diferentes momentos de la temporada y con un mayor número de plantas geolocalizadas en la parcela y en las imágenes para tratar de establecer una relación entre la información espectral obtenida por los sensores y las plantas que se encuentren afectadas por la enfermedad.

4. Conclusiones

Uno de los principales retos de este trabajo era crear un vehículo o robot eléctrico conducido a través de un mando por control remoto que permitiera embarcar diferentes sensores ópticos para monitorizar cultivos hortícolas en condiciones de iluminación controladas.

La alta resolución de los sensores permite obtener información con una resolución espacial de entre 1 y 2,5 mm por píxel, mucho mayor que la obtenida con sensores embarcados en drones, permitiendo un análisis a nivel de hoja y no a nivel de planta como logran estos últimos. Además, gracias a la información espectral que proporcionan los sensores utilizados, es posible crear mapas utilizando multitud de índices espectrales basados en algunas de estas

bandas espectrales obtenidas. Estos índices resultan muy útiles para la estimación de características de la vegetación y ofrecen información del estado en el que se encuentra. Toda la información recopilada del cultivo ha sido posible referenciarla geográficamente gracias a un receptor GNSS con corrección RTK que permite una gran precisión en la creación de mapas.

Los ensayos realizados en parcelas de zanahorias presumiblemente afectadas por la baceteria CalSol, han permitido la creación de una base de datos de imágenes y mapas espectrales que pretenden seguir ayudando en la detección de la enfermedad de forma remota. Durante este año se esperan conseguir resultados comparando la información espectral con la obtenida a través de los análisis moleculares y la inspección visual para tratar de establecer relaciones ente las imágenes y la enfermedad y ofrecer, de forma no destructiva, una alternativa en la detección precoz de las plantas que pudieran estar afectadas por la enfermedad.

5. Agradecimientos

Este trabajo está parcialmente financiado por fondos de la Unión Europea a través del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 bajo el proyecto Nº. 635646 POnTE (Pest Organisms Threatening Europe).

Referencias

1. Antolinez CA., Fereres A., Moreno A. Risk assessment of 'Candidatus Liberibacter solanacearum' transmission by the psyllids Bactericera trigonica and B. tremblayi from Apiaceae crops to potato. Scientific Reports. 2017. 7, article number: 45534
2. Vicent A., Blasco J. When prevention fails. Towards more efficient strategies for plant disease eradication. New Phytologist. 2017, 214 (905-908)
3. Martinelli F., Scalenghe R., Davino S., Panno S., Scuderi G., Ruisi P., Villa P., Stroppiana D., Boschetti M., Goulart LR., Davis CE., Dandekar AM. Advanced methods of plant disease detection. A review. Agronomy for Sustainable Development. 2015, 35 (1-25)
4. Rey B, Aleixos N, Cubero S, Blasco J (2019) XF-ROVIM. A field robot to detect olive trees infected by Xylella fastidiosa using proximal sensing. Remote Sensing. Special Issue Advances in Remote Sensing Applications for the Detection of Biological Invasions, 11(3), 221. DOI: 10.3390/rs11030221. Open access

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Sistema LiDAR para evaluar la deriva. Medidas con diferentes tipos y calibres de boquilla

Eduard Gregorio[1], Xavier Torrent[1], Santiago Planas[1], Joan R. Rosell-Polo[1]

[1] Grupo de Investigación en AgróTICa y Agricultura de Precisión (GRAP), Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universitat de Lleida (UdL) – Agrotecnio Center, Lleida, España; egregorio@eagrof.udl.cat

Resumen: La deriva es uno de los principales problemas asociados a la aplicación de productos fitosanitarios en tanto que conlleva importantes riesgos para la salud de personas y animales, y supone una fuente de polución de primera magnitud. Los métodos habitualmente utilizados para evaluar la deriva en campo resultan muy costosos tanto en términos de recursos humanos como de tiempo, requiriendo además la realización de análisis químicos a posteriori. Ante la necesidad de disponer de métodos de evaluación más eficientes, se ha desarrollado un sistema LiDAR (*light detection and ranging*) ocularmente seguro y específicamente diseñado para la detección y medida de la deriva en campo. Se trata de un instrumento de teledetección activa basado en un emisor láser pulsado con 1.5 µm de longitud de onda y 3 mJ de energía, y con un área receptora de 80 mm de diámetro. El sistema es capaz de monitorizar las nubes de deriva en tiempo real y con elevada resolución en distancia. En este trabajo se presentan 23 ensayos de pulverización realizados con la máquina estática y donde se utilizó el sistema LiDAR para medir la deriva generada. Las medidas LiDAR permitieron diferenciar claramente las boquillas convencionales de las boquillas de reducción de deriva, proporcionando estas últimas una disminución de la deriva comprendida entre el 88.6% y el 93.6%. Por otro lado, fue posible ordenar las boquillas convencionales de distinto calibre de acuerdo con los potenciales de reducción determinados con el LiDAR.

Palabras clave: láser, pulverizador, teledetección, productos fitosanitarios, boquillas de reducción de deriva.

1. Introducción

La deriva se define como aquella cantidad de producto fitosanitario que es arrastrada fuera de la zona pulverizada por la acción de corrientes de aire durante el proceso de aplicación [1]. Con objeto de minimizar los efectos de la deriva, resulta fundamental comprender los mecanismos que gobiernan este fenómeno. Por otro lado, es necesario clasificar los equipos de aplicación de acuerdo a la deriva generada en condiciones operativas reales. En respuesta a estas necesidades, se han desarrollado numerosos métodos para estudiar la deriva y que pueden clasificarse en dos grupos: métodos directos y métodos indirectos. En los métodos directos se utilizan colectores puntuales, activos o pasivos, en combinación con trazadores, para medir la deriva generada durante operaciones reales de pulverización. Estos ensayos demandan una gran cantidad de personal y de tiempo, están sujetos a la variabilidad de las condiciones meteorológicas imperantes, y requieren la realización de análisis químicos a posteriori. La complejidad de los métodos directos, junto con su baja repetitividad, provoca que actualmente se plantee una revisión en profundidad de los mismos [2]. Por su parte, los métodos indirectos

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3405

permiten evaluar el potencial de deriva [3] mediante la realización de ensayos en condiciones controladas, ya sea en túneles de viento [4] o a partir de la distribución del tamaño de gota de la pulverización [5]. Pese a sus ventajas en términos de repetitividad, los métodos indirectos son incapaces de reproducir en su totalidad las condiciones que intervienen en las aplicaciones reales.

La tecnología LiDAR (*light detection and ranging*) supone una alternativa para la medida de la deriva, tal como ha sido demostrado por diversos autores [6-8] atendiendo a sus ventajas en términos de capacidad de monitorización. Sin embargo, hasta el momento, los sistemas LiDAR han sido poco utilizados en los estudios de deriva debido a que suele tratarse de instrumentos diseñados para el sondeo atmosférico, siendo complejos, costos, y, habitualmente, ocularmente no seguros. En los últimos años, el Grupo de Investigación en Agrótica y Agricultura de Precisión (GRAP) de la UdL ha desarrollado un nuevo instrumento para la medida de la deriva en campo, basado en tecnología LiDAR (*light detection and ranging*) [9]. El sistema desarrollado permite medir la deriva en tiempo real y con elevada resolución en distancia, pudiendo generar mapas 2D de la misma gracias a su capacidad de escaneo. Además, se trata de un instrumento portátil, ocularmente seguro y que puede ser operado por un único usuario. Se han comparado las medidas de deriva utilizando el sistema LiDAR con las realizadas mediante métodos directos e indirectos [10,11], obteniéndose elevadas correlaciones en ambos casos.

En este trabajo se presentan los últimos avances en el desarrollo del sistema LiDAR y se evalúa su capacidad para diferenciar y clasificar boquillas de pulverización en función de su potencial de reducción de deriva.



(a) **(b)**

Figura 1. (a) Subsistema emisor y receptor: 1) emisor láser; 2) expansor del haz; 3) telescopio receptor; 4) ópticas de focalización; 5) módulo fotoreceptor APD. (b) Sistema LiDAR dispuesto en campo: 6) cabezal protector; 7) posicionador (*pan & tilt*); 8) electrónica de control y tarjeta de adquisición; 9) ordenador.

2. Materiales y métodos

2.1. Sistema LiDAR

Este instrumento está constituido por un emisor láser (*Erbium glass laser*) con una longitud de onda de 1534 nm, 3 mJ de energía por pulso y frecuencia de repetición ajustable hasta 10 Hz. La seguridad ocular se consigue gracias a un expansor que incrementa el diámetro del haz láser emitido por un factor 20. Parte de la señal retrodispersada por el blanco (en este caso, la nube de deriva) es capturada mediante un telescopio con una apertura de 80 mm. La luz recogida por el telescopio es filtrada y focalizada por medio de un conjunto de ópticas hasta la superficie del módulo fotoreceptor APD (*avalanche photodiode*) que se encarga de convertir la señal óptica en una señal eléctrica. Esta señal es muestreada mediante una tarjeta de adquisición (500 MS/s, 12 bits) y enviada al ordenador de control.

En la Fig. 1(a) se muestra la configuración interna de los subsistemas emisor y receptor, mientras que la Fig 1(b) presenta el sistema LiDAR dispuesto en campo durante la realización de un ensayo de deriva. Puede observarse que los subsistemas emisor y receptor se ubican en el interior de un cabezal protector, el cual es fijado a un posicionador (*pan & tilt unit)* que permite apuntar el sistema, o bien programar secuencias de escaneo en azimut o elevación a diferentes velocidades. Se ha desarrollado un software ad-hoc que facilita el control de todo el sistema (láser, posicionador, adquisición de señal) por parte de un único usuario y que, además, permite visualizar la señal retrodispersada en tiempo real o bien almacenarla para su post-procesado. El sistema presenta una estructura modular que facilita su transporte, así como una rápida instalación en campo.

2.2. Ensayos de pulverización

Con el objetivo de estudiar la capacidad del sistema LiDAR para diferenciar tipos y calibres de boquillas, se llevaron a cabo 23 ensayos con un pulverizador hidroneumático (Teyme Eolo 2091, Teyme Tecnología Agrícola SL, Torre-Serona, España), el cual se mantuvo en posición estática durante todos los ensayos. Tal como se muestra en la Tabla 1, se evaluaron 10 boquillas de cono hueco de las series ATR (boquilla estándar) y TVI (boquilla de reducción de deriva) de la marca Albuz (Solcera, Evreux, Francia). Los ensayos se realizaron, mayoritariamente, a una presión de trabajo de 700 kPa y con la velocidad baja del ventilador (velocidad del aire de 5.7 ± 2.7 m^{-1}, medida a una distancia de 2.4 m del eje central del ventilador), si bien el día 11/11/15 se llevaron a cabo dos ensayos a 1000 kPa y dos más con la velocidad elevada del ventilador. La experimentación se repitió en invierno y en verano, para verificar la consistencia de los resultados obtenidos, así como la posible influencia de las condiciones meteorológicas.

Tabla 1. Descripción de los ensayos de pulverización.

Fecha	Boquillas	Presión (kPa)	Velocidad ventilador
11/11/15	ATR 80 Gris TVI 8003 Azul	700 / 1000	Baja / Alta
25/1/16	ATR 80 Lila, Marrón, Amarilla, Naranja, Roja, Gris, Verde	700	Baja
4/7/17	ATR 80 Lila, Marrón, Amarilla, Naranja, Roja, Gris, Verde	700	Baja
4/7/17	TVI 8003 Azul, 8002 Amarilla, 8001 Naranja	700	Baja

3. Resultados y discusión

3.1. Efecto del tipo de boquilla

En la Fig. 2 se muestran las curvas de medidas LiDAR (integradas en el tiempo) en función de la distancia, correspondientes a cuatro ensayos realizados en otoño (11/11/15), donde se testearon una boquilla convencional (ATR 80 gris) y una boquilla de reducción de deriva (TVI 8003 azul) con caudales de pulverización similares. Al comparar las señales obtenidas con la boquilla TVI (área bajo la curva) con las resultantes para la boquilla ATR, se obtuvieron atenuaciones del 88.6 % y 87.7% para las presiones de 700 y 1000 kPa, respectivamente. Los dos picos que aparecen en cada una de las curvas corresponden a la pulverización generada por cada uno de los lados del atomizador. Reducciones similares se presentaron en los ensayos de verano (4/7/17), al comparar de nuevo las boquillas ATR 80 gris y TVI 8003 azul (92.3%), las boquillas ATR 80 naranja y TVI 8002 amarilla (93.6%) y las boquillas ATR 80 marrón y TVI 8001 naranja

(91.5%). Estos resultados ponen de manifiesto que el sistema LiDAR es capaz de diferenciar claramente entre boquillas convencionales y boquillas de reducción de deriva.

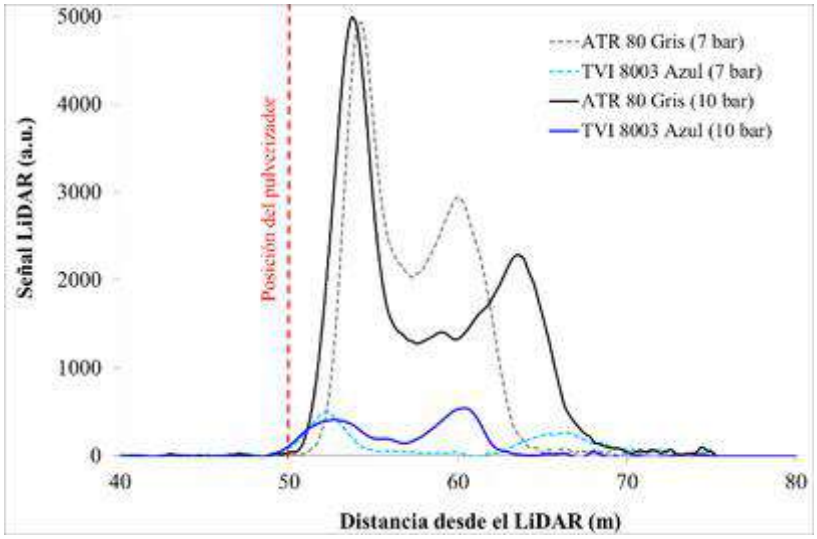


Figura 2. Medidas LiDAR (integrada en el tiempo) de la deriva versus distancia. Ensayos del día 11/11/15 con las boquillas ATR 80 gris y TVI 8003 azul a presiones de trabajo de 700 y 1000 kPa y velocidad baja del ventilador.

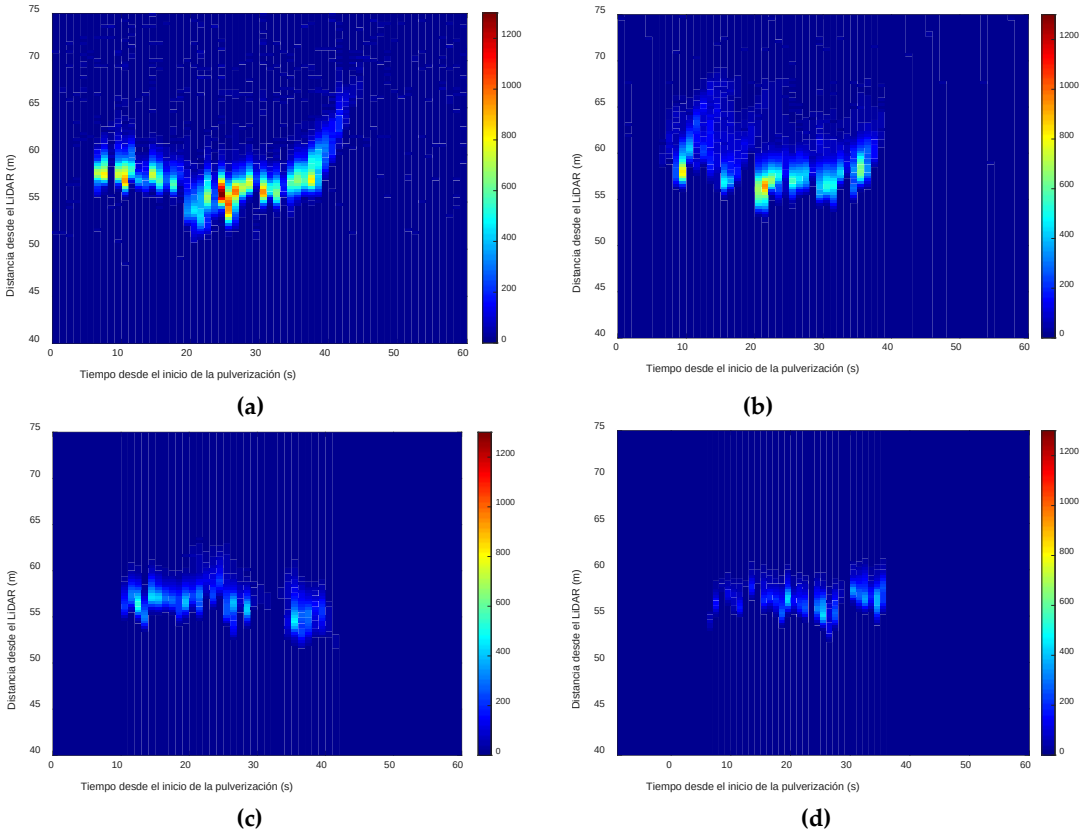


Figura 3. Medidas LiDAR de la evolución temporal y en distancia de la deriva. Ensayos del día 4/7/17 con las siguientes boquillas: (a) ATR 80 lila, (b) ATR 80 amarilla, (c) ATR 80 roja, (d) ATR 80 verde. Presión de trabajo de 700 kPa y velocidad baja del ventilador.

3.2. Efecto del calibre de boquilla

Tal como se muestra en la Fig. 3, una alternativa para visualizar la señal LiDAR es mediante gráficas RTI (*range-time intensity*). Este tipo de gráficas se generan a partir de la señal LiDAR recibida para cada distancia e instante de tiempo y permiten conocer la evolución temporal y en distancia de la nube de deriva. También se obtiene información acerca de la concentración, puesto que está relacionada con la intensidad de la señal LiDAR.

La Fig. 3 presenta las gráficas RTI correspondientes a cuatro ensayos de pulverización realizados en verano (4/7/17) con diferentes calibres de boquillas convencionales (ATR 80 lila, amarilla, roja, verde). Para poder comparar las gráficas, éstas han sido normalizadas considerando los volúmenes de caldo pulverizados en cada ensayo. De forma cualitativa se observa que a medida que se incrementa el calibre de la boquilla, se va atenuando la correspondiente nube de deriva, disminuyendo su concentración, dimensiones y tiempo de remanencia en el aire. Estos resultados también pueden evaluarse cuantitativamente, calculando la señal integrada para todo el período ensayado y rango de distancias en el que se ubica la nube. Así, tomando como referencia la boquilla ATR 80 lila (Fig. 3a) por ser la de menor calibre, se obtiene una reducción de señal del 32.3% para la ATR 80 amarilla (Fig. 3b), del 58.1% para la ATR 80 roja (Fig. 3c) y del 64.3% para la ATR 80 verde (Fig. 3d). Estos resultados son razonables puesto que boquillas con mayor calibre, generan gotas de mayor diámetro y, por tanto, con menor tendencia a ser arrastradas por el aire (menor deriva).

Cabe indicar que en los ensayos realizados en invierno (25/1/16), se obtuvieron resultados muy similares a los presentados en Fig. 3 para verano. En ambos casos, el sistema LiDAR fue capaz de diferenciar y ordenar los calibres de las boquillas ATR atendiendo a su potencial de reducción de deriva.

4. Conclusiones

Se ha demostrado la capacidad del sistema LiDAR desarrollado para diferenciar la deriva generada por diferentes tipos y calibres de boquillas. Estos resultados, junto con la posibilidad de que un solo operador pueda llevar a cabo medidas de deriva con elevada resolución temporal y en distancia, y sin necesidad de análisis químicos posteriores, posicionan la tecnología LiDAR como una clara alternativa a los actuales métodos basados en colectores puntuales.

Trabajos futuros incluirán la extensión en campo de estudios comparativos con el sistema LiDAR, donde se evaluarán diferentes estrategias de medida (escaneo en elevación, azimut, estático) bajo condiciones reales de pulverización. Este trabajo experimental debe conducir al desarrollo de un nuevo protocolo para medir la deriva basado en la tecnología LiDAR, que permita realizar este tipo de ensayos de una forma menos costosa que la actual. En relación al prototipo desarrollado, se plantea llevar a cabo una miniaturización del mismo, que, además de reducir los costes, incremente la versatilidad de este instrumento.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Secretaria d'Universitats i Recerca del Departament d'Empresa i Coneixement de la Generalitat de Catalunya, el Ministerio de Economía y Competitividad de España, y el European Regional Development Fund (ERDF) a través de los proyectos 2017 SGR 646, AGL2007-66093-C04-03, AGL2010-22304-04-C03-03, y AGL2013-48297-C2-2-R. Deseamos agradecer a la Universitat de Lleida por la beca pre-doctoral de X. Torrent. Agradecemos al Institut de Recerca en Tecnologia Agrària (IRTA) por permitir la utilización de sus campos experimentales, y a Vicenç Maquinària Agrícola por proporcionar el tractor. Los autores desean dar las gracias a A. Checa (Randex Iberica, S.L.) por facilitarnos gratuitamente las boquillas Albuz necesarias para los ensayos. También deseamos dar las gracias a R. Lavilla, E. Ordoño y F. Solanelles por su colaboración en el trabajo experimental.

Referencias

1. ISO 22866, 2005. Equipment for crop protection - Methods for field measurement of spray drift. International Organization for Standardization, Geneva.
2. Gil E., Llorens J., Gallart M., Gil-Ribes J.A., Miranda-Fuentes A., 2018. First attempts to obtain a reference drift curve for traditional olive grove's plantations following ISO 22866. Sci Total Environ 627, 349–360.
3. ISO 22856, 2008. Equipment for crop protection - Methods for the laboratory measurement of spray drift - Wind tunnels. International Organization for Standardization, Geneva.
4. Nuyttens D., Taylor W.A., De Schampheleire M., Verboven P., Dekeyser D., 2009. Influence of nozzle type and size on drift potential by means of different wind tunnel evaluation methods. Biosyst. Eng. 103, 271–280. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.04.001.
5. Van de Zande J.C., Holterman H.J., Wenneker M., 2008. Nozzle classification for drift reduction in orchard spraying: Identification of drift reduction class threshold nozzles. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript ALNARP 08 0013. Vol. X.
6. Hoff R.M., Mickle R.E., Froude F.A., 1989. A rapid acquisition lidar system for aerial spray diagnostics. Trans. ASAE 32(5), 1523–1528.
7. Stoughton T.E., Miller D.R., Yang X., Ducharme K.M., 1997. A comparison of spray drift predictions to lidar data. Agric. For. Meteorol. 88, 15–26. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00056-7.
8. Hiscox A.L., Miller D.R., Nappo C.J., Ross J., 2006. Dispersion of fine spray from aerial applications in stable atmospheric conditions. Trans. ASABE 49, 1513–1520.
9. Gregorio E., Rocadenbosch F., Sanz R., Rosell-Polo J.R., 2015. Eye-Safe lidar system for pesticide spray drift measurement. Sensors (Switzerland) 15, 3650-3670. https://doi.org/10.3390/s150203650.
10. Gregorio E., Torrent X., Planas S., Solanelles F., Sanz R., Rocadenbosch F., Masip J., Ribes-Dasi M., Rosell-Polo J.R., 2016. Measurement of spray drift with a specifically designed lidar system. Sensors (Switzerland) 16, 499. https://doi.org/10.3390/s16040499.
11. Gregorio E., Torrent X., Planas S., Rosell-Polo J.R., 2019. Assessment of spray drift for hollow-cone nozzles: Part 2. Lidar technique (Submitted for publication).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Tecnologias para monitorização da interacção entre solo – pastagem – árvores – animais no ecossistema *montado*

J. Serrano[1], Shakib Shahidian[2], José Marques da Silva[3], Emanuel Carreira[4], Mário de Carvalho[5]

[1] ICAAM, Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, P.O. Box 94, Évora 7002-554, Portugal; jmrs@uevora.pt
[2] ICAAM, Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, P.O. Box 94, Évora 7002-554, Portugal; shakib@uevora.pt
[3] ICAAM, Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, P.O. Box 94, Évora 7002-554, Portugal; jmsilva@uevora.pt
[4] ICAAM, Departamento de Zootecnia, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, P.O. Box 94, Évora 7002-554, Portugal; emanuel.ruben@hotmail.com
[5] ICAAM, Departamento de Fitotecnia, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, P.O. Box 94, Évora 7002-554, Portugal: mjc@uevora.pt

Resumo: O montado é um sistema agro-silvo-pastoril caracterizado por uma elevada complexidade resultante das interacções entre o clima, o solo, a pastagem, as árvores e os animais. É neste contexto que o gestor agrícola tem que tomar decisões relacionadas com a correcção da acidez e da fertilidade do solo, a ressementeira de espécies botânicas, o encabeçamento e a rotação entre parcelas ou a suplementação alimentar dos animais. Neste trabalho faz-se a avaliação e calibração de tecnologias para monitorizar variáveis relevantes ao nível dos diferentes estratos do ecossistema. Resultados de 3 anos de ensaios realizados numa parcela experimental de 2,5 ha permitiram estabelecer relações entre variáveis adaptadas às características da região e que demonstram: (i) as limitações físicas e químicas dos solos destinados às pastagens sob montado; (ii) o efeito da variabilidade inter-anual da precipitação sobre a composição florística, a qualidade e a produtividade da pastagem; (iii) o efeito significativo das árvores e dos animais sobre o solo e sobre a pastagem; (iv) o potencial das tecnologias associadas ao conceito de Agricultura de Precisão como ferramentas expeditas para optimizar o estrato herbáceo e a gestão dinâmica do pastoreio numa perspectiva holística e sustentável para este ecossistema.

Palavras-chave: agro-silvo-pastoril, tomada de decisão, variabilidade espacial, estabilidade temporal

1. Introdução

O ecossistema *montado* (conhecido como *dehesa* em Espanha) ocupa uma área importante na região Sul de Portugal, e estende-se por vários países da orla Mediterrânica (Espanha, Itália, Grécia, Argélia e Marrocos) [1]. Trata-se de um sistema agro-silvo-pastoril, cuja complexidade resulta das interacções entre o clima, o solo, a pastagem, as árvores e os animais [2].

A pastagem sob *montado* é a base da alimentação animal (especialmente ovinos, bovinos, caprinos e suínos) em regime extensivo e as árvores predominantes são azinheiras (*Quercus ilex ssp. rotundifolia* Lam.) e sobreiros (*Quercus suber* L.). Os solos são normalmente pobres em

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3332

nutrientes, com pH ácido, delgados e pedregosos, todos factores limitantes da produtividade das culturas [3] e reflexo de várias décadas de sistemas de produção baseados na monocultura de cereais que integravam itinerários técnicos envolvendo a mobilização profunda do solo. O *montado* constitui, por isso, uma forma de utilização da terra que se enquadra numa estratégia integrada de conservação do solo, reduzindo o efeito da erosão, a perda de água e de nutrientes, e aumentando a qualidade e a fertilidade do solo [4].

Acresce como factor indutor de variabilidade a acentuada irregularidade do clima Mediterrânico no que respeita à distribuição da precipitação, o que condiciona e determina a evolução do ciclo vegetativo das pastagens, criando incerteza quanto à disponibilidade de alimento para os animais e a eventual necessidade de suplementação alimentar [3].

É neste contexto complexo que o gestor agrícola tem que tomar decisões relacionadas com a correcção da acidez e da fertilidade do solo, a ressementeira de espécies botânicas, o encabeçamento e a rotação entre parcelas ou a suplementação alimentar dos animais, sendo fundamental o conhecimento da interacção entre as variáveis que constituem o ecossistema. Vários trabalhos têm abordado a influência das árvores e dos animais sobre o solo e sobre a pastagem no *montado* [2,4-5], no entanto, o desenvolvimento do conceito de "Agricultura de Precisão" e a consequente incorporação de tecnologias no sector agrícola colocam hoje à disposição dos empresários agrícolas informação detalhada sobre variáveis relevantes. Os sensores de indução electromagnética (por exemplo, "EM38", "DUALEM", etc.) ou os sensores de contacto (por exemplo, "Veris") medem a condutividade eléctrica do solo e são hoje uma ferramenta de trabalho muito comum ao nível dos prestadores de serviços na agricultura para delimitação de zonas com características semelhantes e potencialmente com gestão idêntica [6]. Por outro lado, sensores ópticos próximos ou transportados em "Drones" ou mesmo em satélites permitem aceder a índices a partir da medição da radiação reflectida pelas plantas, sendo o mais comum (NDVI, "normalized difference vegetation índex") utilizado para avaliar o vigor vegetativo das culturas [7]. Especificamente ao nível das pastagens, vários sensores próximos têm sido propostos para estimar de forma relativamente expedita a produtividade da pastagem, entre eles a sonda "Grassmaster II" [8].

Este trabalho teve como objectivo avaliar e calibrar tecnologias para monitorizar variáveis relevantes ao nível dos diferentes estratos do ecossistema *montado*, procurando: (i) caracterizar a variabilidade do solo; (ii) o efeito das árvores e dos animais sobre o solo e sobre a pastagem; (iii) o efeito da distribuição da precipitação na composição florística, na qualidade e na produtividade da pastagem.

2. Materiais e métodos

2.1. Parcela experimental

Neste trabalho monitorizou-se, uma parcela de 2,5 ha de pastagem permanente sob montado de azinho situada na Herdade da Mitra, da Universidade de Évora (coordenadas 38°32,2'N; 8°01,1'W).

O clima Mediterrânico da região é caracterizado por uma forte sazonalidade, com a temperatura a apresentar uma acentuada amplitude (a ultrapassar os 40°C no Verão e a descer a valores perto dos 0°C no Inverno), e a precipitação (em média entre 400 e 600 mm) a distribuir-se de forma irregular nas estações de Outono, Inverno e Primavera. A Figura 1 mostra a precipitação acumulada por trimestre nos períodos de Outono, Inverno e Primavera, registada na Estação Meteorológica da Mitra nos últimos três anos (2015-2016, 2016-2017 e 2017-2018). No período de 9 meses entre Setembro e Maio, a precipitação total acumulada foi de 542mm, 408mm e 586mm, respectivamente em 2015-2016, 2016-2017 e 2017-2018.

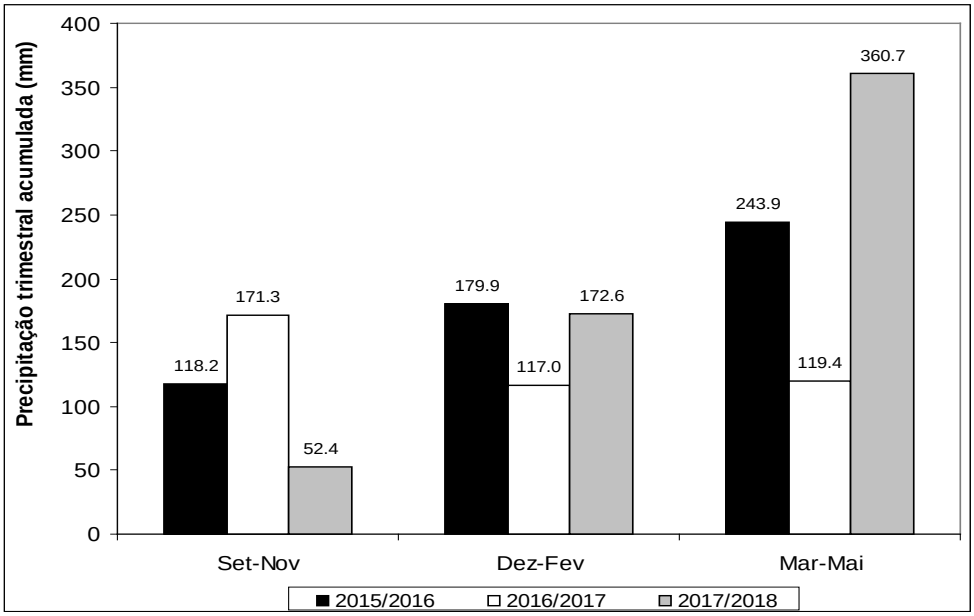


Figura 1. Distribuição da precipitação acumulada por trimestre (Outono, Inverno e Primavera) nos últimos três anos (2015-2016, 2016-2017 e 2017-2018).

O solo é classificado como Cambissolo derivado de granito [9]. Estes solos são pouco férteis, normalmente ácidos e principalmente usados em sistemas mistos agro-silvo-pastoris. A densidade de árvores é baixa (8 árvores por hectare) e um encabeçamento animal médio de 10 ovinos adultos por hectare em pastoreio rotacional.

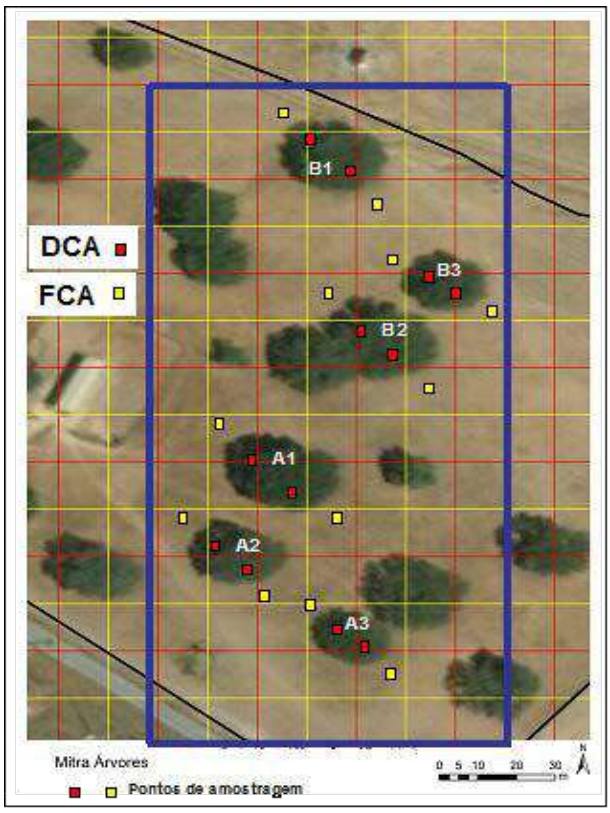


Figura 2. Localização dos 24 pontos de amostragem na parcela experimental (12 debaixo da copa - DCA; 12 fora da copa - FCA).

Foram estabelecidos 24 pontos de amostragem geo-referenciados (Figura 2), 4 em cada uma das 6 árvores seleccionadas, metade debaixo da copa das árvores (DCA) e metade fora da copa (FCA). Em cada ponto de amostragem foi colocada uma caixa de exclusão de pastoreio com dimensões de "0,50m×0,50m"). Atendendo ao relevo ondulado da parcela, metade das árvores (A1-A3; Figura 2) foram seleccionadas numa zona alta e a outra metade numa zona baixa (B1-B3; Figura 2).

2.2. Levantamento da condutividade eléctrica aparente do solo

Foram realizados dois levantamentos da condutividade eléctrica aparente do solo com um sensor Veris 2000 XA (em Novembro de 2017 e em Outubro de 2018) na camada de solo de 0-0,30m. O sensor foi puxado por um tractor agrícola, tendo realizado passagens sucessivas espaçadas 10m entre si. O espaçamento entre passagens foi garantido por um sistema GPS de apoio à condução do tractor. Em cada um dos levantamentos da CE_a foram recolhidas amostras de solo com uma sonda "meia-cana" e um maço para determinação da humidade na camada superficial (0-0,30m) de acordo com procedimento standard.

2.3. Determinação das características do solo

Em Outubro de 2015 foram recolhidas amostras de solo nos 24 pontos de amostragem. Este processo foi realizado manualmente com uma sonda "meia-cana" e um maço na camada de solo 0-0,30m. As amostras compósitas (resultantes de 4 sub-amostras recolhidas dentro da área da caixa de exclusão de pastoreio), devidamente codificadas, foram transportadas para o Laboratório de Química Agrícola da Universidade de Évora onde se procedeu à determinação da textura, dos teores de matéria orgânica, do pH, do azoto, do fósforo e do potássio, de acordo com procedimentos standard.

2.4. Medições na pastagem

2.4.1. Medições com sensores próximos

As medições na pastagem foram realizadas mensalmente entre Fevereiro (ou Março) e Junho de cada no (2016-2018) nos 24 pontos de amostragem. Foram utilizados dois sensores próximos comerciais: a sonda de capacitância "Grassmaster II" e o sensor óptico activo (SOA) "OptRx". Foram realizadas 10 medições com a sonda de capacitância na área de amostragem de cada ponto, sendo registado o valor médio destas medições. Maior detalhe sobre o funcionamento da sonda pode ser encontrado em Serrano et al. [8].

O SOA colocado cerca de 0,5m acima da pastagem mediu as bandas espectrais na área de cada ponto de amostragem durante 2 minutos (cerca de 120 valores). Com base nas bandas do vermelho ("RED, 670 nm) e do infravermelho próximo ("NIR", 775 nm) foi calculado o NDVI ("normalized difference vegetation índex", Equação 1) para cada ponto de amostragem.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

2.4.2. Recolha e análise de amostras de pastagem

Após as medições efectuadas com os sensores próximos em cada ponto, foi colocado um aro metálico com uma área de 0.1 m² área, onde se procedeu ao corte da pastagem com uma tesoura eléctrica portátil até cerca de 1-2 cm acima do nível do solo. As amostras foram colocadas em sacos de plástico devidamente codificados e transportados para o Laboratório de Nutrição e Metabolismo do ICAAM (Universidade de Évora) onde foram pesadas, desidratadas

(72h a 65°C) e pesadas novamente para estabelecer a produtividade da pastagem em termos de matéria verde (kg MV/ha) e o teor de humidade da pastagem (THP, em %). As amostras desidratadas foram analisadas para determinar os teores de proteína bruta (PB, em %) e de fibra (NDF, "neutral detergent fiber", em %). A partir destes dois parâmetros foi calculado o índice de degradação da qualidade da pastagem ("IDQP", Equação 2). No período de floração (entre Abril e Maio de 2016 e de 2018), um especialista procedeu à identificação das espécies botânicas presentes em cada ponto de amostragem, informação que foi convertida em percentagem de cobertura da área de amostragem.

$$\mathrm{IDQP} = \frac{\mathrm{NDF}}{\mathrm{PB}} \tag{2}$$

2.5. Análise estatística

A análise estatística descritiva determinou, para cada conjunto de dados dos parâmetros do solo e da pastagem, a média e o desvio padrão (DP). A análise inferencial determinou as diferenças significativas entre médias DCA e FCA. A análise de regressão linear foi usada para estudar as relações entre parâmetros da pastagem e estimativas obtidas por sensores próximos. Os procedimentos estatísticos foram realizados no software 'MSTAT-C' com um nível de significância de 95% ($p < 0,05$).

3. Resultados e discussão

3.1. Efeito das árvores e do pastoreio animal sobre o solo

A Tabela 1 mostra que o solo da parcela experimental apresenta uma textura fraca (com mais de 80% de areia) e pH ácido, factores limitantes da produtividade das culturas [3]. Nos parâmetros do solo referidos não se verificaram diferenças significativas por efeito da copa das árvores, aspecto também identificado por Benavides et al. [5]. No entanto, verificou-se um efeito positivo e significativo da copa sobre os teores de M.O. e sobre os macronutrientes principais na camada superficial do solo, aspecto que pode ser atribuído à abdorção de nutrientes pelas raízes das árvores, ao efeito da deposição de folhas das árvores [5] e à acumulação de dejectos dos animais [11] que tendem a permanecer mais tempo sob coberto das árvores.

Tabela 1. Características do solo (média ± desvio padrão) na camada superficial (0-0,30 m) da parcela experimental (Outubro de 2015).

Parâmetros do solo	DCA	FCA	Prob.
Areia total, %	80,8±2,0	80,4±3,1	ns
Limo, %	9,8±1,5	9,5±3,3	ns
Argila, %	9,4±1,0	10,1±3,7	ns
M.O., %	3,1±0,5	1,7±0,4	0,0000
pH	5,4±0,4	5,3±0,2	ns
N_t, %	0,16±0,03	0,09±0,03	0,0001
P_2O_5, mg kg^{-1}	117,7±77,0	68,2±29,5	0,0471
K_2O, mg kg^{-1}	359,3±112,8	180,5±91,9	0,0012

DCA- Debaixo da copa das árvores; FCA- Fora da copa das árvores; Prob.- Probabilidade; ns- Não significativo;

3.2. Efeito das árvores, do pastoreio animal e da distribuição da precipitação sobre a pastagem

A Tabela 2 mostra a evolução da produtividade (MV) e do índice de degradação da qualidade da pastagem (IDQP) da parcela experimental entre Fevereiro (ou Março) e Junho de cada ano (entre 2016 e 2018).

A produtividade mais elevada da pastagem (33149 kg/ha; Tabela 2) verificou-se na Primavera de 2016 (Maio), o que reflecte uma distribuição da precipitação equilibrada entre as 3 estações (Outono, Inverno e Primavera; Figura 1). A variabilidade inter-anual da precipitação teve efeito na produtividade, aspecto também referido por Murray et al. [11], com quebra tanto na Primavera de 2017 (relativamente seca) como na Primavera de 2018, neste caso em resultado de um período de Outono-Inverno muito seco, apesar de ter verificado uma Primavera chuvosa. No que respeita ao efeito da copa, é evidente uma maior produtividade fora da copa das árvores, o que reflectirá, por um lado o efeito positivo da radiação solar e, consequentemente sobre a taxa de fotossíntese na situação FCA [5, 12] e, por outro, o efeito negativo sobre a compactação do solo resultante do pisoteio animal na situação DCA [13].

A evolução progressiva do IDQP (que traduz a degradação da qualidade da pastagem) ao longo do ciclo vegetativo reflecte o processo fisiológico normal, tanto DCA como FCA. No entanto, na Tabela 2 é evidente um efeito positivo da copa das árvores sobre a qualidade da pastagem durante a Primavera, alargando o período de maior vigor vegetativo [11], especialmente em 2017 e 2018, anos em que a distribuição da precipitação foi relativamente desequilibrada e a produtividade mais baixa.

Tabela 2. Média ± desvio padrão da produtividade (MV) e do índice de degradação da qualidade da pastagem (IDQP) entre Fevereiro (ou Março) e Junho de cada ano (entre 2016 e 2018).

Parâmetros da pastagem	**MV, kg/ha**			**IDQP**		
Data	**DCA**	**FCA**	**Prob.**	**DCA**	**FCA**	**Prob.**
15/03/2016	8747±4210	14106±7095	0,0307	2,9±0,8	2,8±0,4	ns
28/04/2016	12403±3910	21403±9128	0,0002	4,6±1,5	5,1±1,5	ns
25/05/2016	15148±5856	33149±13221	0,0000	5,6±1,6	8,2±2,7	0,0071
16/06/2016	6017±3122	15990±4888	0,0000	9,0±3,3	10,1±2,6	ns
21/02/2017	6875±2500	6300±3802	ns	2,6±0,9	4,0±2,1	0,0355
21/03/2017	10808±4876	11292±6041	ns	3,4±0,8	3,6±1,2	ns
18/04/2017	10975±5227	14567±8440	ns	5,7±1,1	8,5±1,9	0,005
23/05/2017	4717±2080	5767±2178	0,0765	6,7±1,2	9,7±2,0	0,0002
14/06/2017	1483±737	1725±763	ns	9,5±2,0	14,9±2,5	0,0001
08/02/2018	5000±2733	3973±3193	ns	1,7±0,6	2,6±1,9	0,0109
07/03/2018	7267±3601	7587±5448	ns	1,8±0,4	2,5±1,4	0,0498
09/04/2018	18160±7067	16880±11256	ns	2,9±0,6	3,6±0,9	0,0137
02/05/2018	13350±3504	10642±4566	ns	3,0±0,5	3,4±1,1	ns
04/06/2018	9875±1794	17650±5800	0,0011	5,4±1,2	6,7±1,3	0,082

DCA- Debaixo da copa das árvores; FCA- Fora da copa das árvores; Prob.- Probabilidade; ns- Não significativo;

A Figura 3 mostra a composição florística da pastagem no conjunto dos pontos de amostragem nas duas situações DCA e FCA, em 2016 (a) e 2018 (b). Verificaram-se, por um lado, diferenças significativas na composição florística da pastagem DCA e FCA, e, por outro, uma quebra da biodiversidade na pastagem de 2016 (com 33 espécies botânicas presentes) para 2018 (com apenas 20 espécies botânicas presentes). Vários são os factores que podem justificar

estes resultados, desde logo a distribuição da precipitação, tendo sido equilibrada ao longo das estações Outono-Inverno-Primavera em 2016, enquanto em 2018 o Outono e o Inverno foram relativamente secos, com a Primavera extremamente chuvosa. De acordo com Benavides et al. [5], modificações da composição florística por efeito das árvores são causadas pelo microclima proporcionado, pelas diferenças nas propriedades do solo e pelo efeito do pastoreio animal. Por outro lado a acidez do solo pode ter criado condições desfavoráveis ao desenvolvimento de algumas espécies, o que parece indicar a necessidade de proceder a correcção do solo, com a aplicação de calcário dolomítico, por exemplo. Uma questão pode levantar-se: a diminuição da biodiversidade pode traduzir a tendência para a degradação pontual da qualidade da pastagem, ou antes, reflecte um processo de adaptação das espécies mais resistentes às condições adversas que as alterações climáticas colocam?

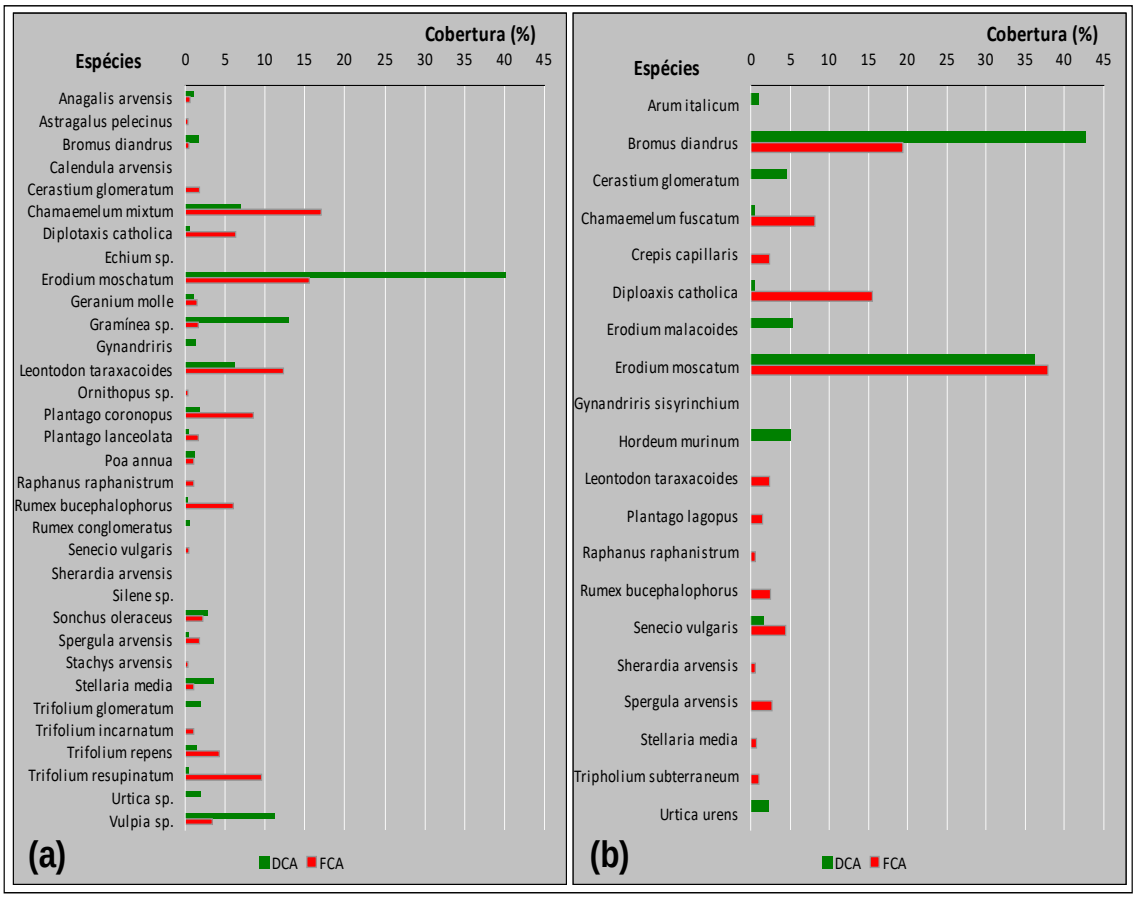


Figura 3. Composição florística da pastagem no conjunto dos pontos de amostragem debaixo (DCA) e fora (FCA) da copa das árvores, em 2016 (a) e em 2018 (b).

3.3. Avaliação das tecnologias na monitorização do solo e da pastagem

Um dos aspectos mais importantes ao nível da gestão das pastagens no *montado* tem a ver com a fertilização e correcção da acidez do solo. Numa perspectiva de optimização de recursos é fundamental identificar zonas homogéneas quanto às características do solo [6]. A Figura 4 ilustra o mapa da CE_a do solo da parcela experimental em dois anos consecutivos, 2017 (a) e 2018 (b). O coeficiente de variação (CV) médio dos 24 pontos de amostragem e no conjunto dos dois anos foi de 27%, o que traduz uma aceitável variabilidade espacial deste parâmetro. Por outro lado, o CV temporal médio (na comparação do valor da CE_a do solo dos 24 pontos de amostragem entre anos) foi de 14%. É evidente a estabilidade dos padrões espaciais da CE_a, não

se tendo verificado diferenças significativas nos pontos de amostragem nas situações debaixo e fora da copa das árvores, nos dois anos de avaliação (DCA: 1,6±0,4 mS/m em 2017; 1,6±0,3 mS/m em 2018; FCA: 1,3±0,5 mS/m em 2017; 1,5±0,3 mS/m em 2018), com teores de humidade do solo de 7,4 ±1,4% em 2017 e 10,7±1,5% em 2018. A conjugação da variabilidade espacial e da estabilidade temporal são fundamentais para a implementação do conceito de "Agricultura de Precisão" associado à gestão diferenciada da fertilização [14].

A gestão do pastoreio animal, que envolve a definição do encabeçamento, a rotação dos animais entre parcelas, exige o conhecimento ou a estimativa da produtividade da pastagem. A Figura 5 ilustra a correlação linear significativa da capacitância medida pela sonda "Grassmaster II" (CMR), com a produtividade (MV) e com o teor de humidade da pastagem (THP) entre 2016 e 2018. Estes resultados estão em linha com outros trabalhos [8] e mostram o interesse potencial desta ferramenta expedita no apoio à tomada de decisão do agricultor.

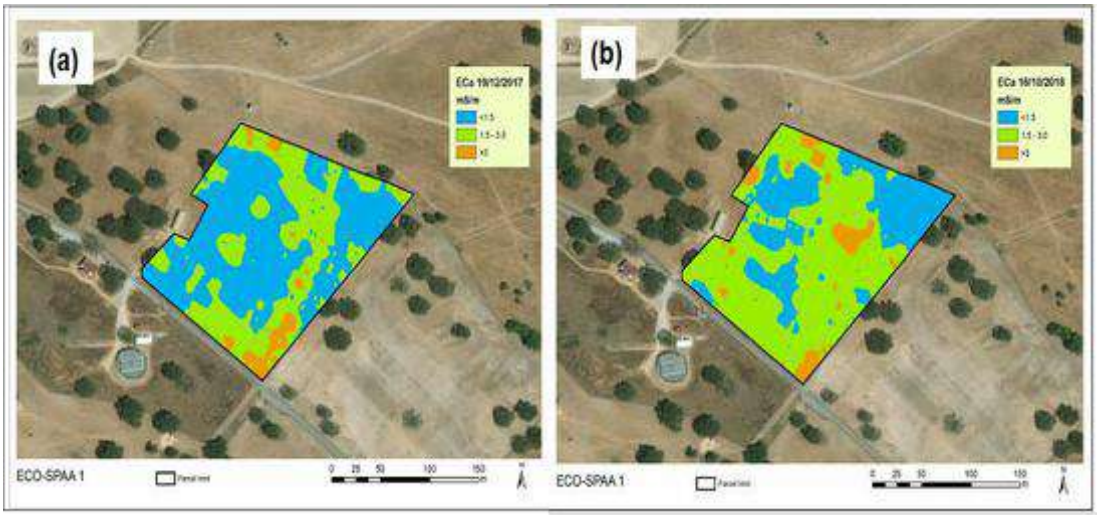


Figura 4. Mapa da condutividade eléctrica aparente do solo (CE_a) da parcela experimental em 2017 (a) e em 2018 (b).

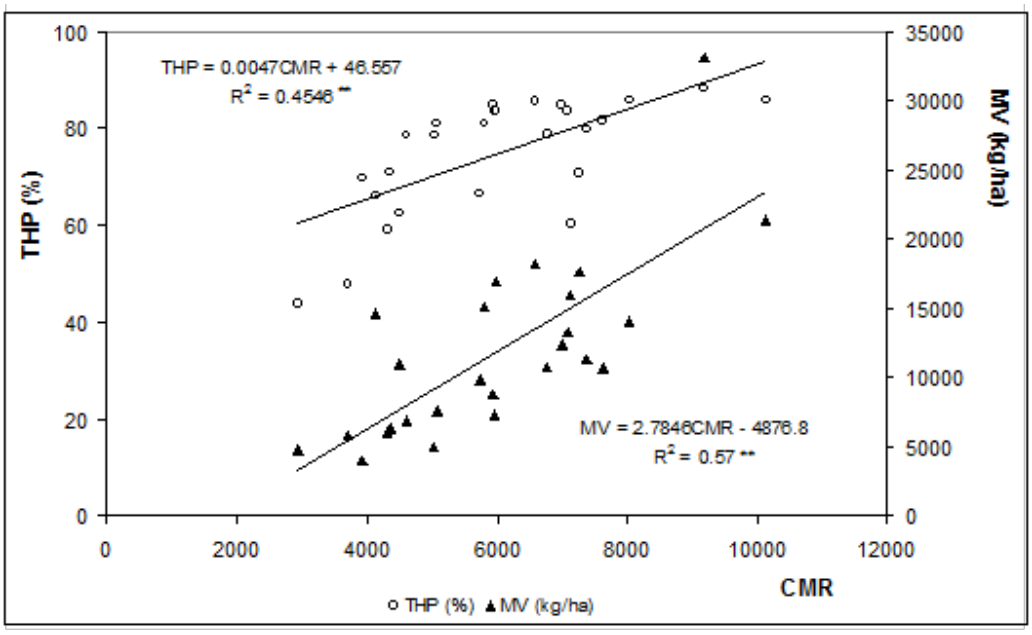


Figura 5. Correlação entre a capacitância medida pela sonda "Grassmaster II" (CMR), a produtividade (MV) e o teor de humidade da pastagem (THP) entre 2016 e 2018.

No Alentejo, o período crítico de Verão, caracterizado pela ausência de precipitação e a ocorrência de temperaturas superiores a 30°C, requer invariavelmente a suplementação alimentar dos animais com alimentos conservados ou concentrados [3]. Muitas vezes, dependendo de como corre o ano agrícola em termos de distribuição da precipitação, é necessário antecipar a suplementação ainda durante a Primavera. É, portanto, fundamental o acompanhamento do vigor da pastagem ao longo do ciclo vegetativo. A Figura 6 ilustra a correlação linear significativa entre o NDVI medido pelo sensor "OptRx", o teor de humidade da pastagem (THP) e o índice de degradação da qualidade da pastagem (IDQP), entre 2016 e 2018. Estes resultados reforçam o interesse potencial deste sensor óptico próximo na monitorização da qualidade da pastagem, especialmente atendendo às possibilidades que levantam as imagens de satélite (por exemplo "Sentinel-2") na obtenção de um conjunto muito diverso de índices, entre eles o NDVI [15] ou o NDWI [16].

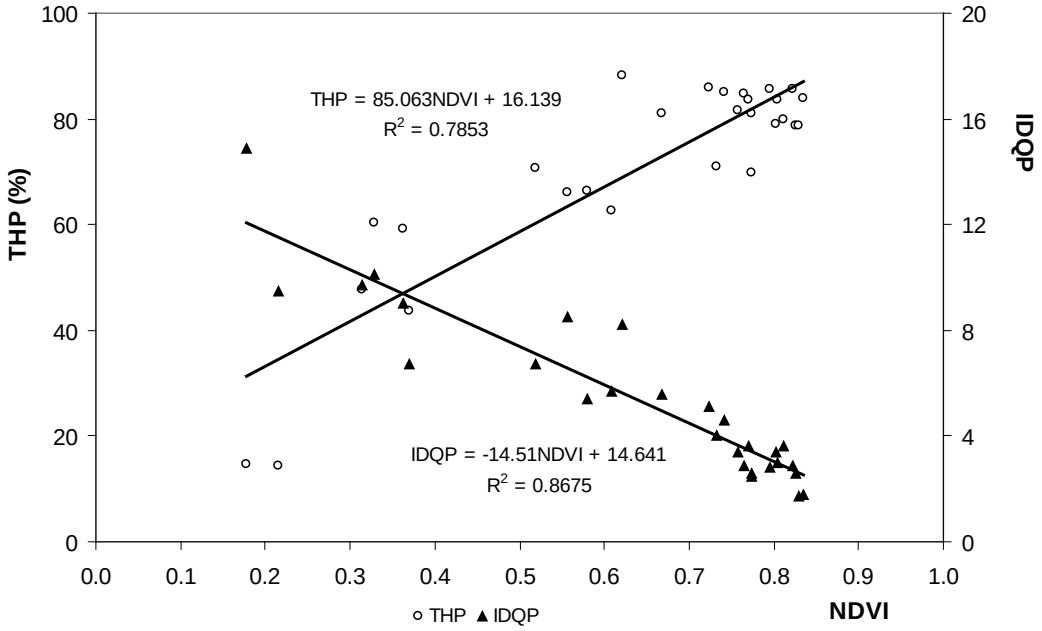


Figura 6. Correlação entre o NDVI medido pelo sensor "OptRx", o teor de humidade da pastagem (THP) e o índice de degradação da qualidade da pastagem (IDQP), entre 2016 e 2018.

4. Conclusões

Este trabalho confirmou as limitações físicas e químicas dos solos destinados às pastagens de sequeiro sob montado em Portugal, aspecto agravado pela irregularidade inter-anual da distribuição da precipitação e seu efeito no ciclo vegetativo. O efeito positivo das árvores e dos animais sobre o solo constituem indicadores do potencial deste ecossistema. Numa perspectiva de sustentabilidade, de melhoria da produtividade da pastagem e, em consequência, da produção animal e das mais valias resultantes, é fundamental o conhecimento das variáveis envolvidas e respectivas interacções, pelo que a utilização de ferramentas expeditas para monitorização do solo, da pastagem, das árvores e dos animais constitui o ponto de partida para uma gestão diferenciada e racional dos factores de produção, nomeadamente correctivos e fertilizantes. Os resultados obtidos permitiram calibrar equipamentos e desenvolver equações adaptadas às características da região e que poderão apoiar de forma sustentada as decisões do gestor agrícola no que respeita à dinâmica do pastoreio animal e à identificação de necessidades de suplementação. Outros indicadores, como a composição florística da pastagem, poderão indiciar perda de biodiversidade num processo acelerado de adaptação às alterações climáticas.

5. Agradecimentos

Este trabalho foi suportado através do "Programa 1.0.1.-Grupos Operacionais" no âmbito dos projectos "PDR2020-101-030693" e "PDR2020-101-031244" e através da FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia) no âmbito do projecto "UID/AGR/00115/2019".

Referências

1. Seddaiu G., Porcua G., Luigi L., Roggero P.P., Agnelli A., Cortic G. Soil organic matter content and composition as influenced by soil management in a semi-arid Mediterranean agro-silvo-pastoral system. Agriculture, Ecosystems and Environment. 2013, 167, 1–11.
2. Serrano J., Shahidian S., Marques da Silva J., Sales-Baptista E., Ferraz de Oliveira I., Lopes de Castro J., Pereira A., Cancela de Abreu M., Machado E., Carvalho M. Tree influence on soil and pasture: Contribution of proximal sensing to pasture productivity and quality estimation in montado ecosystems. International Journal of Remote Sensing. 2018, 39, 4801–4829.
3. Efe Serrano J. Pastures in Alentejo: technical basis for characterization, grazing and improvement. Universidade de Évora – ICAM (Ed.), Évora, Portugal: Gráfica Eborense. 2006, 165–178.
4. Marcos G.M., Obrador J.J., Garcia E., Cubera E., Montero M.J., Pulido F., Dupraz C. Driving competitive and facilitative interactions in oak dehesas through management practices. Agroforestry Systems. 2007, 70, 25–40.
5. Benavides R., Douglas G.B., Osoro K. Silvopastoralism in New Zealand: review of effects of evergreen and deciduous trees on pasture dynamics. Agroforestry Systems. 2009, 76, 327– 350.
6. Moral F., Terrón J., Marques da Silva J. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. Soil & Tillage Research. 2010, 106, 335–343.
7. Jackson T. J., Chen D., Cosh M., Li F., Anderson M., Walthall C., Doriaswamy P., Hunt E. R. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. Remote Sensing of Environment. 2004, 92, 475–482.
8. Serrano J., Shahidian S., Marques da Silva J. Calibration of GrassMaster II to estimate green and dry matter yield in Mediterranean pastures: Effect of pasture moisture content. Crop & Pasture Science. 2016, 67, 780–791.
9. FAO. World reference base for soil resources. Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Soil Resources Reports N º 103. 2006, Rome, Italy.
10. Somarriba E. Pasture growth and floristic composition under the shade of Guava (Psidium Guajava L.) trees in Costa Rica. Agroforestry Systems. 1988, 6, 153–162.
11. Murray R., Yule I. J., Gillingham A.G. Developing variable rate application technology: modelling annual pasture production on hill country. New Zealand Journal of Agricultural Research. 2007, 50, 41–52.
12. Guevara-Escobar A., Kemp P. D., Mackay A. D., Hodgson J. Pasture production and composition under poplar in a hill environment in New Zealand. Agroforestry Systems 2007, 69 (3), 199–213.
13. Gómez-Rey M. X., Garcês A., Madeira M. Soil organic-C accumulation and N availability under improved pastures established in Mediterranean Oak Woodlands. Soil Use and Management. 2012, 28, 497–507.
14. Xu H.-W., Wang K., Bailey J., Jordan C., Withers A. Temporal stability of sward dry matter and nitrogen yield patterns in a temperate grassland. Pedosphere. 2006, 16, 735–744.
15. Serrano J., Shahidian S., Marques da Silva J. Monitoring seasonal pasture quality degradation in the Mediterranean montado ecosystem: proximal versus remote sensing. Water. 2018, 10(10), 1422.
16. Serrano J., Shahidian S., Marques da Silva J. Evaluation of normalized difference water index as a tool for monitoring pasture seasonal and inter-annual variability in a Mediterranean agro-silvo-pastoral system. Water. 2019, 11(1), 62.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Uso de la herramienta *boundary detection* para la detección de malas hierbas en el cultivo

José Marin [1], Pedro V. Mauri[2], Lorena Parra[2, 3], Jaime Lloret[3] y Alberto Masaguer[4]

[1] Areaverde MG Projects SL. C/ Oña, 43 28933 Madrid, jmarin@areaverde.es
[2] Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario, Finca El Encin, Autovía del Noreste A-2, Km. 38.200, 28805 Alcalá de Henares, Madrid, pedro.mauri@madrid.org, loparbo@doctor.upv.es
[3] Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC), Universitat Politècnica de València (UPV). C/ Paranimf, 1, 46730 Grau de Gandia, Gandia, jlloret@dcom.upv.es
[4] Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas. Av. Puerta de Hierro, 2, 28040 Madrid, alberto.masaguer@upm.es

Resumen: La rápida detección de malas hierbas en un cultivo es crucial para asegurar su erradicación minimizando la cantidad de productos fitosanitarios utilizados. En este trabajo pretendemos mostrar las posibilidades que nos ofrecen las tecnologías de la información para el control de procesos y la automatización en la detección de malas hierbas en las praderas urbanas. Mientras que muchas soluciones para detectar estas especies solo son aplicables para detectarlas fuera de la línea de cultivo, la solución que presentamos en este artículo puede ser aplicada a otro tipo de casos como las praderas urbanas. En estos cultivos, la pradera cubre toda la superficie, no solo una línea de cultivo. En anteriores trabajos ya presentamos una herramienta que utilizaba los valores RGB de una fotografía para detectar la presencia de dichas especies. En esta ocasión se empleará una herramienta matemática conocida como boundary detection. Para evaluar los resultados trabajaremos con distintas fotografías, las fotografías serán tomadas en distintas condiciones de iluminación a distintas horas del día y en distintos días del año. Para evaluar los resultados estudiaremos el número de falsos positivos y falsos negativos tras el análisis de la fotografía con la herramienta boun1.dary detection. Los resultados confirmar la utilidad de esta herramienta para la detección de malas hierbas.

Palabras clave: Tratamiento de imagen, edge detection, agricultura, maleza, pradera urbana

1. Introducción

La detección de las llamadas malas hierbas en los cultivos es de vital importancia cuando se está gestionando dicho cultivo [1]. Pese a que en algunos modelos de agricultura, como la agricultura ecológica, se promueve la formación de una cubierta vegetal; en otros modelos, como la agricultura intensiva, se tiene a la eliminación de dicha cubierta. De igual forma, en la jardinería urbana donde se realiza muchas veces un cultivo de césped se trata de evitar la aparición y la proliferación de otras especies en el cultivo. Hay una serie de razones por las cuales en las praderas urbanas de gramíneas se controla el crecimiento de otras especies. La primera de ellas es garantizar la uniformidad de la pradera. Los usuarios prefieren una pradera uniforme en su coloración y su apariencia. La aparición de otras especies supone una alteración visual de la misma. Por otro lado, las especies que aparecen de forma espontánea pueden tener un impacto negativo en el desarrollo de las gramíneas compitiendo por los nutrientes y el agua o incluso por la radiación solar [2].

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3403

Generalmente las especies que aparecen de forma espontánea en las praderas, también llamadas malas hierbas o especies silvestres, tienen un crecimiento más rápido que las especies que forman la pradera. Es por ello que, de no ser detectadas y tratadas de forma temprana pueden propagarse velozmente, infestando gran parte de la zona ajardinada. Llegados a este punto, su erradicación será mucho más costosa y requerirá de un tratamiento con productos fitosanitarios específicos que serán aplicados en toda la zona afectada. Hay que tener presente que estos productos son dañinos para el medio ambiente y su uso está controlado en muchos países. Es por tanto nuestro deber usarlos de forma racional y minimizar su uso en la medida de nuestras posibilidades. Si detectamos la presencia de las malas hierbas de forma temprana, la cantidad de productos tóxicos a utilizar se reducirá de forma considerable.

A la vista del estado actual de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) y el uso de dispositivos como los sensores y los drones, no es de extrañar la cantidad de propuestas para monitorizar la agricultura. Algunas de esas propuestas tienen como objetivo la detección temprana de malas hierbas. En algunos casos, se ha utilizado una combinación de valor de pixeles en cada una de las bandas [3], mientras que en otros se ha utilizado la herramienta boundary detection [4, 5]. Sin embargo, la herramienta boundary detection se ha utilizado siempre en cultivos lineales como puede ser el maíz y hasta la fecha nunca ha sido usada en cultivos que cubren toda la superficie.

Por consiguiente, el propósito de este artículo es evaluar el uso de la herramienta boundary detection en un cultivo que cubra toda la superficie del terreno, como pueda ser el caso del césped en la jardinería urbana. La finalidad de nuestro estudio es analizar la viabilidad de esta herramienta para en un futuro integrarla en el análisis de las fotografías tomadas por los drones. El estudio está hecho con imágenes tomadas a distinta altura, incluyendo distintas especies de cespitosas y distintas especies silvestres. Se comprobará la eficacia en la detección de malas hierbas de varias metodologías comúnmente usadas para la detección de bordes. Para minimizar posibles errores se utilizará la una técnica de agregación tras el análisis. La eficacia vendrá dada como la cantidad de falsos positivos y falsos negativos en el análisis.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. La Sección 2 muestra los materiales y métodos empleados. Los resultados y su discusión se muestran en la Sección 3. Finalmente, las conclusiones se detallan en la Sección 4.

2. Materiales y métodos

En esta sección detallaremos el material y métodos utilizados en el análisis de las herramientas para la detección de bordes. También mostraremos brevemente los trabajos relacionados.

2.1. Trabajos relacionados

El uso del procesamiento de imágenes para determinar la presencia de malezas en los campos de maíz fue presentado por X. P. Burgos-Artizzu en 2011 [4]. En su artículo, detallaron un sistema de visión por computadora que puede ser utilizado con videos. Ellos comprobaron la eficacia de su sistema bajo diferentes condiciones de luz. El sistema detecta el 95% de las malezas y el 80% de los cultivos. Por otro lado, A. Paikekari et al. presentó en 2016 [5] una metodología de procesamiento de imágenes para la detección de malezas. Primero, usaban el color para diferenciar el suelo y la hierba. Luego, la imagen resultante se convierte en una imagen en escala de grises para aplicar una técnica de detección de bordes. Finalmente, la imagen resultante de la detección de bordes se divide en 25 bloques. El análisis de cada bloque determina si contiene maleza con hojas estrechas, maleza con hojas anchas o cultivo. Esta metodología es muy similar a la que detallamos en este artículo. Está idea es muy similar a la que desarrollamos en este artículo, sin embargo, en nuestro caso pretendemos utilizarla para cultivos no lineales.

En 2018, J. Gao et al. [6] presentó el uso de imágenes aéreas con ultra-alta resolución para detectar malezas intra-hileras e inter-hileras. Utilizaban un análisis de imágenes semiautomático basado en objetos con bosques aleatorios. Además, utilizan técnicas para clasificar el suelo, la maleza y el cultivo. Los autores aplicaron esta propuesta a los campos de cultivo de maíz. Las imágenes utilizadas muestran el maíz en los primeros días de crecimiento. Sus resultados tienen un coeficiente de correlación de 0,895 y un error medio al cuadrado de 0,026. Esta metodología, pese presentar buenos resultados, requiere de un software potente que realice el reconocimiento de objetivos. Nuestro objetivo es implementar el sistema en un dispositivo de tipo Arduino o Raspeberry, que pese a ser capaces de procesar datos, no tienen la capacidad de procesamiento necesaria para el tipo de análisis descrito en esta propuesta.

Por otro lado, existen otros tipos de estudios centrados en identificar diferentes afecciones de las hojas. Un ejemplo es el trabajo desarrollado por V. Khanaa y K. P. Thooyamani en 2017 [7]. Propusieron un algoritmo basado en el procesamiento de imágenes. Su algoritmo fue capaz de detectar diferentes enfermedades como la necrosis de la médula bacteriana, el tizón temprano, el rastro blanco entreotras.

J. Marín et al. en 2017 aplicaron técnicas simples de procesamiento de imágenes en diferentes publicaciones para detectar la cobertura de césped en céspedes [8], [9]. Trabajan con los histogramas de las imágenes de la hierba para determinar el peso de la hierba y el nivel de cobertura (alto, bajo, muy bajo). Por último, L. Parra et al. En 2019 [1] mostraron el uso de una nueva forma de detección de malas hierbas basados en fotografías tomadas desde drones. En su artículo usaron la combinación de los valores de pixel en las tres bandas (Rojo, Verde y Azul) para diferenciar distintos tipos de cubiertas (suelo, césped y mala hierba). Sus resultados fueron prometedores y ofrecen distintos tipos de fórmulas en función de las necesidades con diferentes porcentajes de falsos positivos y falsos negativos.

2.2. Material utilizado

Las imágenes incluidas en este estudio provienen de diferentes zonas. Algunas de las fotografías empleadas han sido tomadas en la Finca El Encín, perteneciente al IMIDRA, donde se estaban llevando a cabo otros estudios y durante los cuales aparecieron malas hierbas en sus parcelas experimentales. Otras imágenes han sido tomadas en diferentes zonas ajardinadas de la ciudad de Gandia (Valencia). Se ha tratado de tener una representación de diferentes situaciones, incluyendo distintas especies de cespitosas y distintas especies de plantas silvestres. Además, se han tomado imágenes de praderas urbanas donde no existe la presencia de malas hierbas, que se emplearán para evaluar si esta herramienta da falsos positivos.

Así mismo, incluimos distintas cámaras con las que se tomaron las fotografías, para asegurarnos que los resultados fueran aplicables a todo tipo de imágenes. Para tomar las imágenes en el IMIDRA la cámara fue una Sony DSC-W120, cuyas características se muestran en la Tabla 1. Todas las fotografías se tomaron a 1.5m del suelto. Por otro lado, para las fotografías tomadas en Gandia se utilizó una cámara Samsung, modelo SM-G955F (cuyas características se muestran en la Tabla 1). En el caso de las fotos realizadas en Gandia se tomaron a diferentes alturas. Las fotos tomadas a menos altura fueron tomadas a 0.5m y las tomadas a mayor altura a 5m de altura.

Algunas de las fotografías han sido recortadas antes de iniciar el tratamiento de imagen para eliminar zonas de la fotografía que no sean vegetación. Esto ha sido muy importante en las fotografías tomadas en el IMIDRA donde aparecía la lona que dividía sus parécelas experimentales. De la misma forma, en las fotografías tomadas en Gandia a 5m de altura, aparecían elementos arquitectónicos como bancos y calzadas que han sido eliminadas.

2.3. Métodologia para la detección de bordes

Existen numerosas opciones que pueden emplearse para la detección de bordes y vamos a describir los principios básicos.

Tabla 1. Características de las cámaras utilizadas

Características	Fotos en el IMIDRA	Fotos en el Gandía
Dimensiones de la fotografía	2048x1536 pixels	4032x3024 pixels
Resolución horizontal y vertical	72 ppp	72 ppp
Profundidad en bits	24	24
Punto f	f/7.1	f/1.7
Distancia focal	5mm	4mm
Tiempo de exposición	1/400 s	1/100 s
Velocidad ISO	ISO - 125	ISO - 80

En primer lugar, debemos destacar que cada imagen tomada por una cámara como las mencionadas en la Tabla 1 se puede descomponer en tres imágenes en blanco y negro (B/N), una para cada uno de los colores: Rojo, Verde y Azul o en ingles *Red*, *Green* y *Blue* (RGB). Las herramientas para la detección de bordes trabajan con esas imágenes en B/N, no con la imagen RGB que acostumbramos a usar para visualizar las fotografías.

Lo más importante es saber que estas herramientas nos ayudan a encontrar los puntos de la fotografía donde hay un cambio en los valores de los píxeles. Generalmente, esas zonas suelen representar los bordes de un objeto, o en nuestro caso de una hoja. Para detectar ese cambio se realiza una operación matemática con los valores del pixel y los valores de los pixeles más cercanos, tambien llamados vecinos. La operación a realizar dependerá de la herramienta específica o filtro utilizado. La mayoría de ellos utilizan para el cálculo del nuevo valor asignado a un pixel el valor de ese pixel (PI) y el de sus 8 vecinos más próximos (N1, N2,…, N8), formando una matriz de 3x3. tal como se ve en la Figura 1.

Sea cual sea el filtro utilizado el resultado será un nuevo raster (una nueva imagen) en B/N donde los pixeles que no eran bordes tendrán valores muy bajos, cercanos a 0. Los pixeles que representaban una zona de cambio, es decir un borde, tendrán valores elevados que serán mayores o menores en función del filtro utilizado. Nuestro objetivo será determinar qué zonas de la imagen tienen valors muy bajos. En las imágenes tomadas, las zonas cubiertas por césped presentan numerosas aristas, mientras que las zonas donde hay malas hierbas son zonas con una mayor uniformidad en los pixeles.

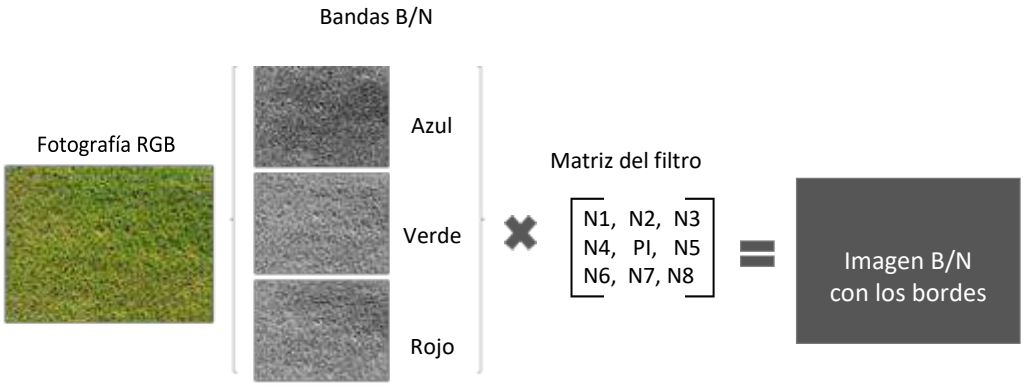


Figura 1. Uso de los filtros en la fotografía

A continuación detallamos los filtros que han sido utilizados en este estudio. En primer lugar, están los filtros de detección de arista, entre los que encontramos los filtros de gradiente, filtro Laplaciano, filtros de detección de línea y los filtros Sobel. Los filtros de gradiente son los mejores cuando lo que pretendemos es detectar aristas en incrementos de 45º. Basados en este tipo de filtro encontramos los filtros de gradiente norte, este, sur y oeste. En segundo lugar, usaremos los filtros de tipo Laplaciano, usaremos solo una de las variantes que usa una matriz de 3x3. Este filtro es útil para detectar aristas, sea cual sea la orientación de la arista. Se recomienda del filtro Laplaciano para el realce de rasgos lineales, especialmente en entornos urbanos. El siguiente filtro que se utiliza es el filtro de detección de línea, muy similar al filtro de gradiente. Existen cuatro variantes de este filtro, atendiendo a la dirección en la que se resaltan las aristas, línea vertical, línea horizontal, línea diagonal izquierda y línea diagonal derecha. El último tipo de filtro de detección de arista es el filtro Sobel. Dado que la matriz que utilizan estos filtros son idénticas a algunas utilizadas en los filtros de gradiente, no se van a incluir los filtros Sobel. Todos los filtros de detección de arista usan una matriz de 3x3 como las que se pueden ver en la Figura 2.

En segundo lugar, se pueden usar los filtros de nitidez y suavizado, en nuestro caso usaremos solo los de nitidez. Estos filtros es recomendable usarlos para resaltar la diferencia comparativa de los valores con sus vecinos. Nos permiten realzar los límites entre objetos en la fotografía. En este caso y pese a la existencia de otros filtros en nuestro estudio hemos incluido solamente tres de ellos, dos filtros que utilizan una matriz de 3x3 y uno de 5x5, los cuales pueden verse en la Figure 3.

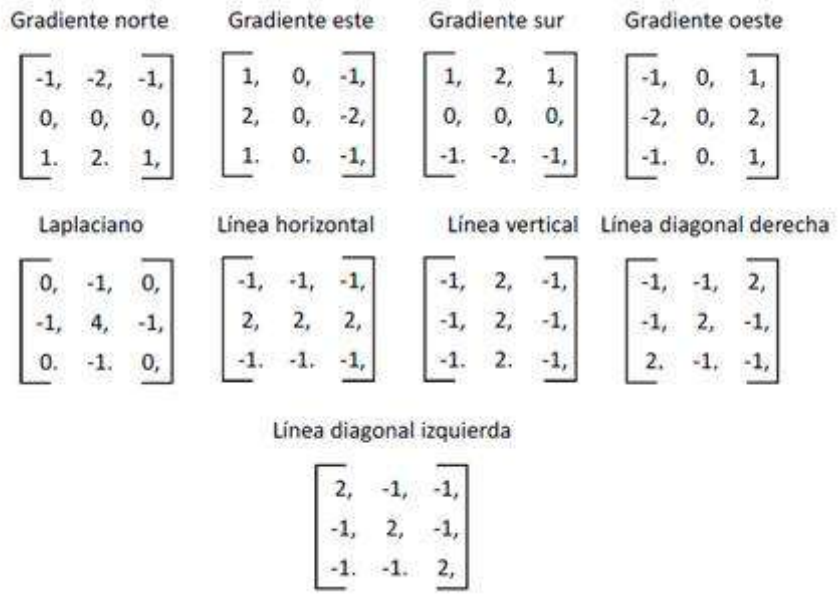


Figura 2. Tipos de filtros de detección de arista utilizados.

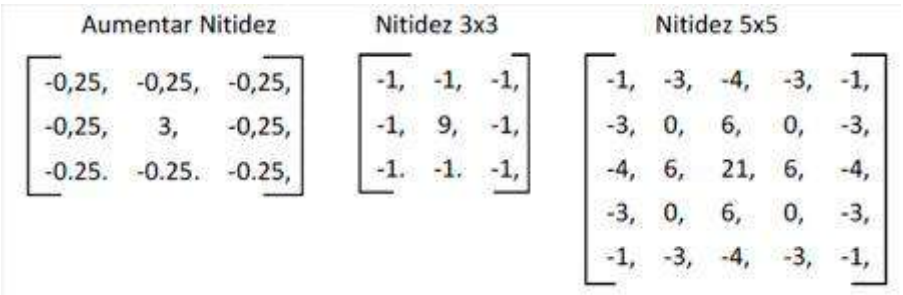


Figura 3. Tipos de filtros nitidez.

2.4. Métodologia para el análisis de las fotografías

En esta seccione se detallará el proceso llevado a cabo para el análisis fotográfico, el cual constará de varios pasos.

El primer paso a seguir será el recorte manual de la fotografía para extraer del análisis aquellos elementos que aparezcan y no sean el objeto de estudio. Este paso se lleva a cabo de forma manual, sin realizarlo de forma automática, ya que en la aplicación real del sistema propuesto en las fotos solo aparecerá la zona ajardinada con la cubierta vegetal.

Una vez las fotografías solo contienen la cubierta vegetal, procedemos a aplicar uno de los filtros. Como algunos filtros pueden usarse de forma conjunto para detectar aristas de distintos tipos como los filtros de gradiente o los filtros de línea, en estos casos se aplican los 4 filtros a la imagen original y posteriormente se suman los 4 rasters obtenidos. Esto se realizará con los filtros de línea y de gradiente.

Tras esto, se multiplicarán los raster resultantes por un raster que ha sido calculado a partir de la ecuación presentada en [1] para eliminar el suelo. Al multiplicar los raster resultantes por el mencionado, somos es capaces de eliminar de la fotografía aquellos pixeles que corresponden a suelo sin cobertura. Ya que las zonas que presentan calvas en el césped son zonas con pocos cambios y podrían dar falsos positivos. De esta forma eliminamos dichas zonas del análisis final.

Por último, para asegurarnos que nos quedamos solo con aquellas zonas en als que hay hojas anchas, es decir que no hay cambios en una región relativamente grande de la imagen, usaremos una técnica de agregación. Estás técnicas permiten, en primer lugar combinar el valor de un pixel y sus vecinos dando como resultado un nuevo pixel y en segundo lugar, el nuevo pixel será de tamaño mayor. El valor del nuevo pixel, asi como su tamaño en comparación a los pixeles anteriores, dependerá de la técnica que utilizamos. En nuestro caso y dado que buscamos identificar las áreas que tengan una agregación de pixeles con valores bajos, usaremos como operación para calcular el valor del nuevo pixel tanto la suma de todos los pixeles como el valor máximo de los pixeles incluidos. En cuanto al tamaño del pixel resultante, o tamaño de celda, usamos los valores de 3, 5 y 10.

Con el raster anterior debemos tomar unos valores umbral de que consideramos positivo (mala hierba) y que consideramos negativo (césped). Existen multitud de técnicas y en el pasado, las que han demostrado mejores resultados en condiciones de iluminación cambiantes han sido la creación de clases basados en parámetros estadísticos, como mostraron en [1]. Está opción ofrecía mejores resultados que tomar un valor umbral y aplicarlos a todos los casos como se hizo en [7].

Para evaluar la bondad del sistema utilizaremos los siguientes parámetros. Los falsos negativos (FN), consideraremos cuantas malas hierbas no han sido indicadas por ningún pixel. Por otro lado, los falsos positivos (FP) serán dados como el total de pixeles que, según la metodología empleada, indican la presencia de malas hierbas sin embargo se trata de césped. Finalmente, los verdaderos positivos (VP) se considerarán como el número de malas hierbas que están indicados por uno o más pixeles.

3. Resultados y discusión

En esta sección mostramos el análisis de los resultados obtenidos en el trabajo. Primero mostraremos el ajuste del sistema con las fotografías obtenidas en el IMIDRA. Posteriormente, con las fotografías tomadas en Gandía verificaremos el sistema

3.1. Puesta a punto del sistema

En esta subsección mostraremos los resultados de la puesta a punto del sistema, en la cual hemos evaluado los rasters resultantes tras aplicar los distintos filtros y las diferentes técnicas de agregación. Para la puesta a punto del sistema hemos usado diferentes imágenes, tomadas a

la misma altura y que contienen en algunos casos solo césped y en otros césped y malas hierbas. Para simplificar los resultados analizaremos la efectividad de cada filtro tal como se ha presentado en la sección anterior y se mostrarán los mejores resultados. Lo primero, indicar que la mejor técnica de agregación para todos los casos ha sido el valor máximo, con un tamaño de celda igual a 5. Cuando hemos usado como resultado el valor de la suma, la cantidad de FP aumentada de forma drástica.

También se ha observado que no existen diferencias en los resultados cuando se los filtros se aplican a las distintas bandas (rojo, verde o azul) de la imagen. Por tanto, para minimizar la cantidad de información procesada, los resultados mostrados en esta sección corresponden a usar los filtros siempre en la banda roja.

Los filtros de gradiente, al ser usados de forma individual han dado resultados muy malos. Pese a aplicar las técnicas de agregación, los resultados no indicaban claramente la presencia de malas hierbas. Sin embargo, cuando se usaron todos los filtros de gradiente de forma conjunta (aplicándose cada uno por separado y sumando los 4 rasters obtenidos), los resultados mejoraron de forma notable, ver Tabla 2 método A). En la Tabla 2 podemos observar por un lado el resultado tras aplicar el filtro y por otro lado las zonas indicadas como malas hierbas (pixeles rojos). Lo mismo sucede con los filtros de línea, al sumar los rasters resultantes de los filtros los resultados mejoran considerablemente (Tabla 2 3 Método B)). En ambos casos, se han detectado la presencia de malas hierbas dicotiledóneas y en el caso del filtro por líneas ha detectado la mala hierba monocotiledónea en la imagen con malas hierbas (VP=4 en ambos casos). Sin embargo, en ambos casos dos de las malas hierbas no han sido detectadas, FN=2. Por tanto, tenemos falsos negativos, que provocarían la no detección de una planta silvestre. No hay en ningún caso FP en la imagen con malas hierbas. En cuanto a la imagen sin malas hierbas, ambos filtros dan un número considerablemente alto de FP, 20 con el método A y 24 con el método B.

Por otro lado, el filtro Laplacian (Método C) en Tabla 2) ha ofrecido muy buenos resultados sin necesidad de ser combinado con otros filtros. Siendo el que menos FP genera cuando no hay malas hierbas, FP=2. En el caso de la imagen con malas hierbas, los resultados son iguales a los filtros anteriores, detecta 4 de las 6 plantas, VP=4 FN=2.

Por último, la suma de los filtros de gradiente más los filtros lineales presenta gran capacidad para detectar las malas hierbas con más detalle que los anteriores (Tabla 2 Método D)). En la fotografía con las malas hierbas es capaz de detectar la presencia de todas ellas por tanto tiene como resultado VP=6. Sin embargo, en dicha fotografía da como resultado dos FP, ambos localizados en zonas de sombra. Por otro lado, su resultado en la fotografía sin plantas silvestres, muestran que es la peor opción con un total de 39 FP.

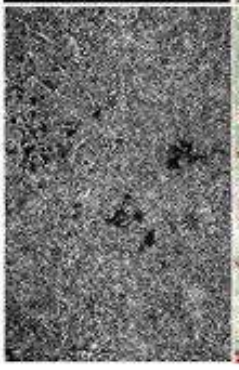
Los filtros de nitidez no han dado buenos resultados en ningún caso, daban una alta cantidad de FP y los VP no eran tan elevados como los filtros de detección de arista. Por lo tanto, estos filtros han sido excluidos del análisis.

Hay que considerar que hasta este punto se ha trabajado con la opción de clasificar el rastes resultante en función de la desviación estándar de los datos del propio raster. Sin embargo, se ha podido observar que en este caso el uso de un valor umbral sería más adecuado. En la Tabla 3 presentamos los valores mínimos (Mín.) y máximos (Máx.) de la clase que se considera positiva en las fotografías de las Tabla 2. Podríamos por tanto proponer usar un valor umbral en función del método, y se proponen los siguientes umbrales 75, 100, 18, 100 para los métodos A a D.

3.2. Verificación del sistema

En esta subsección aplicaremos los resultados de la sección anterior a nuevas fotografías para verificar nuestro sistema.

Tabla 2. Resultados de los filtros de detección de artista

Fotografía con malas hierbas		Fotografía sin malas hierbas		Método
Resultado filtro	Malas hierbas según resultado	Resultado filtro	Malas hierbas según resultado	
				A)
				B)
				C)
				D)

Como la metodología que mejor resultados ha dado ha sido el método C, filtro Laplaciano, vamos a comprobar los resultados cuando se utiliza el valor umbral propuesto con las fotografías anteriores a nuevas fotografías obtenidas en el Gandía. De las fotografías empleadas, 3 se han tomado en condiciones de luz similares a las fotografías del IMIDRA. Dos de ellas tenían mala hierbas (Fotografías 1 y 2), mientras que la última está tomada en una pradera formada solo por cespitosas. La última fotografía empleada ha sido tomada en condiciones de menor iluminación. El objetivo de introducir una fotografía tomada en otro entorno es verificar si el uso del valor umbral podrá ser aplicado con resultados similares sean cuales sean las condiciones de iluminación. Esta última fotografía pertenece a una pradera con presencia de malas hierbas. Con estas 4 fotografías cubrimos una serie de escenarios con distintas iluminaciones e incluimos la presencia y ausencia de malas hierbas. Las fotografías empleadas se han seleccionado al azar de entre un banco de imágenes propio de praderas. Primero se han fijado las condiciones que debían tener las praderas y tras clasificar las imágenes del banco se han seleccionado las utilizadas para el test de verificación.

En la Tabla 4 podemos ver los resultados de la verificación de nuestro sistema. Lo primero que hay que destacar es, que en condiciones de iluminación similares a las fotografías trabajadas en el apartado anterior, el uso del valor umbral = 18 mejora los resultados. Se reduce la cantidad de FP en todos los casos al utilizar el valor umbral. Si bien es cierto que la cantidad de FN ha aumentado en uno de los casos, este hecho no es tan preocupante. Pensemos que un FN en una imagen donde ya se ha detectado la presencia de malas hierbas no tiene ninguna repercusión ya que dicha área iba a ser tratada con el fitosanitario de todas formas. Por otro lado, un FP en una imagen sin malas hierbas provocará que una zona sea tratada sin necesidad alguna. Por lo que estaríamos realizando un mal uso del producto fitosanitario.

Sin embargo, al analizar los datos de la Fotografía 4, la cual ha sido tomada en condiciones de menor iluminación, observamos que los resultados cuando clasificamos basándonos en la desviación típica son mejores. Al clasificar con el valor umbral establecido el número de FP es casi 4 veces superior. Por tanto, se deberán generar valores umbrales para distintas condiciones de iluminación, o bien utilizar la desviación estándar como método de clasificación.

Tabla 3. Valor umbral para las distintas clases (mala hierba o césped) con distintos métodos

		Método			
Tipo de fotografía	**Valores**	**A)**	**B)**	**C)**	**D)**
Fotografía sin malas hierbas	Máx.	96	138	19	187
	Mín.	147	214	26	357
Fotografía con malas hierbas	Máx.	0	36	10	36
	Mín.	67	90	19	79

Tabla 4. Resultados verificación con nuevas fotografías con el método C)

Método de clasificación usado		**Fotografía**			
	Medida	**1)**	**2)**	**3)**	**4)**
Desviación estándar	VP	5	8	0	4
	FP	1	≈ 40	2	≈ 60
	FN	2	4	0	0
Valor umbral	VP	5	4	0	2
	FP	0	0	1	≈ 200
	FN	0	8	0	2

4. Conclusiones

En este trabajo hemos presentado un estudio sobre el uso de diferentes herramientas de detección de bordes para detectar la presencia de malas hierbas. Se han empleado diferentes tipos de filtro capaces de detectar diferentes cambios. También se ha comprobado el efecto de variar el tamaño de celda al usar una técnica de agregación. Se han elegido distintas fotografías al azar de un banco de fotografías para tener diferentes condiciones de iluminación.

Hemos comprobado como usando el filtro Laplaciano y tomando el valor máximo como técnica de agregación, con un tamaño de celda de 5, obtenemos los mejores resultados. Hemos mostrado la comparación de este filtro con otros y se ha propuesto el uso de un valor umbral para clasificar los valores del raster resultante en lugar de una clasificación en base a la desviación estándar. Se ha demostrado que el uso de un valor umbral establecido mejora los resultados siempre y cuando las condiciones de iluminación sean similares a las de las fotografías usadas para obtener dicho umbral. Cuando las condiciones son cambiantes será mejor usar el valor de la desviación para hacer las clases (mala hierba o césped).

Como trabajos futuros nos gustaría generar una serie de valores umbral para distintas condiciones de iluminación. Así mismo, pretendemos combinar esta metodología para la clasificación con el método propuesto en [1] con el fin de mejorar los resultados.

5. Agradecimientos

This work is partially found by the European Union with the Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) – Europa invierte en zonas rurales, the MAPAMA, and Comunidad de Madrid with the IMIDRA, under the mark of the PDR-CM 2014-2020" project number PDR18-XEROCESPED.

Referencias

1. Christensen, S., Søgaard, H. T., Kudsk, P., Nørremark, M., Lund, I., Nadimi, E. S., & Jørgensen, R. (2009). Site-specific weed control technologies. Weed Research, 49(3), (233-241).
2. Chauhan, B. S., & Johnson, D. E. (2011). Row spacing and weed control timing affect yield of aerobic rice. Field Crops Research, 121(2), (226-231).
3. Parra, L., Torices, V., Marín, J., Mauri, P.V., Lloret, J. (2019). The Use of Image Processing Techniques for Detection of Weed in Lawns. Proccedings of the Fourteenth International Conference on Systems (ICONS 2019), Valencia, Spain, 24-28 March, 2019.
4. Burgos-Artizzu, X. P., Ribeiro, A., Guijarro, M., & Pajares, G. (2011). Real-time image processing for crop/weed discrimination in maize fields. Computers and Electronics in Agriculture, 75(2), (337-346).
5. Paikekari, A., Ghule, V., Meshram, R., Raskar, V. B. (2016). Weed detection using image processing. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 3(3), (1220-1222)
6. Gao, J., Liao, W., Nuyttens, D., Lootens, P., Vangeyte, J., Pižurica, A., ... & Pieters, J. G. (2018). Fusion of pixel and object-based features for weed mapping using unmanned aerial vehicle imagery. International journal of applied earth observation and geoinformation, 67, (43-53).
7. Khanaa, V., Thooyamani, K. P. (2015). An Efficient Weed and Pest Detection System. Indian Journal of Science and Technology, 8(32).
8. Marín Peira, J. F:, Rocher, J., Parra, L., Plaza, A., Mauri, P. V., Ruiz Fernández, J., Sendra, S., Lloret, J. (2017). Automation in the characterization of the cultivation of lawns in urban grasslands", Proccedings of the IX Congresso Ibérico de Agroengenharia, Braganza, Portugal, 4 – 9 Sept. 2017.
9. Marín, J., Parra, L., Rocher, J., Sendra, S., Lloret, J., Mauri, P. V., & Masaguer, A. (2018). Urban Lawn Monitoring in Smart City Environments. Journal of Sensors, 2018 (1-16).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Uso de redes neuronales convolucionales para la detección remota de frutos con cámaras RGB-D

J. Gené-Mola[1], V. Vilaplana[2], J.R. Rosell-Polo[1], J.R. Morros[2], J. Ruiz-Hidalgo[2], E. Gregorio[1]

[1] Grupo de Investigación en AgróTICa y Agricultura de Precisión, Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universitat de Lleida (UdL) – Agrotecnio Center, Lleida, España; j.gene@eagrof.udl.cat
[2] Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

Resumen: La detección remota de frutos será una herramienta indispensable para la gestión agronómica optimizada y sostenible de las plantaciones frutícolas del futuro, con aplicaciones en previsión de cosecha, robotización de la recolección y elaboración de mapas de producción. Este trabajo propone el uso de cámaras de profundidad RGB-D para la detección y la posterior localización 3D de los frutos. El material utilizado para la adquisición de datos consiste en una plataforma terrestre autopropulsada equipada con dos sensores Kinect v2 de Microsoft y un sistema de posicionamiento RTK-GNSS. Con este equipo se escanearon 3 filas de manzanos Fuji de una explotación comercial. El conjunto de datos adquiridos está compuesto por 110 capturas que contienen un total de 12,838 manzanas Fuji. La detección de frutos se realizó mediante los datos RGB (imágenes de color proporcionadas por el sensor). Para ello, se implementó y se entrenó la red neuronal convolucional de detección de objetos Faster R-CNN, la cual está compuesta por dos módulos: red de propuesta de regiones de interés y red de clasificación. Ambos módulos comparten las primeras capas convolucionales siguiendo el modelo VGG-16 pre-entrenado con la base de datos ImageNet. Los resultados de test muestran un porcentaje de detección del 91.4% de los frutos con un 15.9% de falsos positivos (F1-score = 0.876). La evaluación cualitativa de las detecciones muestra que los falsos positivos corresponden a zonas de la imagen que presentan un patrón muy similar a una manzana, donde, incluso a percepción del ojo humano, es difícil de determinar si hay o no manzana. Por otro lado, las manzanas no detectadas corresponden a aquellas que estaban ocultas casi en su totalidad por otros órganos vegetativos (hojas o ramas) o a manzanas cortadas por los márgenes de la imagen. De los resultados experimentales se concluye que el sensor Kinect v2 tiene un gran potencial para la detección y localización 3D de frutos. La principal limitación del sistema es que el rendimiento del sensor de profundidad se ve afectado en condiciones de alta iluminación.

Palabras clave: Cámaras de profundidad, RGB-D, Detección de frutos, Redes neuronales convolucionales, Robótica agrícola

1. Introducción

Para garantizar las necesidades alimentarias en una población mundial creciente será imprescindible incrementar la producción actual de frutos y vegetales [1]. Esto supone un reto para las comunidades agrícolas, especialmente en un contexto de mano de obra escasa y elevados costes de los insumos agrícolas. La aplicación de nuevas tecnologías al campo puede ser de gran ayuda para el manejo eficiente y sostenible de la producción frutícola, con aplicación a distintos procesos como la poda, la fertilización, el aclareo y la recolección [2], [3].

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3325

Los últimos avances en los campos de la informática, robótica y visión artificial han facilitado el desarrollo de sistemas de detección remota de frutos, herramientas de gran utilidad en aplicaciones como la predicción de cosecha, la elaboración de mapas de producción y la recolección automatizada [4]–[6]. Los sensores más utilizados hasta el momento para la detección remota de frutos son las cámaras de color o RGB [7]. Sin embargo, la principal desventaja de estos sensores es que están influenciados por las condiciones de iluminación y que solamente proporcionan información 2D de la plantación. Otros sensores 2D como las cámaras térmicas, multi-espectrales e hiperespectrales también han demostrado tener potencial [7], aunque su uso es menor debido a su mayor precio y a la necesidad de personal especializado para su manejo y operación.

Los avances en fotónica han dado paso a sensores 3D, tales como los sistemas LiDAR (Light Detection and Ranging), que se han utilizado en la agricultura para obtener modelos 3D de las plantaciones [8]. Estos sensores trabajan bajo el principio de *time-of-flight* (ToF – Tiempo de vuelo), que consiste en medir distancias a partir del tiempo requerido por un pulso láser para recorrer el viaje de ida y vuelta entre el sensor y el blanco. Por otro lado, los sensores RGB-D o cámaras de profundidad proporcionan información 3D y de color, permitiendo la detección y la posterior localización 3D de los frutos. Su principio de funcionamiento puede basarse en estereoscopía [9], o en la combinación de una cámara RGB y un sensor de profundidad, ya sea de luz estructurada [10] o ToF [11].

Respecto a las técnicas de procesado, las herramientas de visión artificial más habituales utilizan características tradicionales para codificar las imágenes mediante un número limitado de descriptores y luego clasificarlas mediante algoritmos tales como K-medias (conocido en inglés como K-means), K vecinos más próximos (en inglés K-NN o K-nearest neighbours) o máquinas de soporte vectorial (SVM - Support Vector Machines) [7]. Más recientemente, el desarrollo de redes neuronales profundas ha supuesto un importante avance para la detección remota de objetos, y, por consiguiente, para la detección de frutos. La red neuronal Faster R-CNN [12] es la red más utilizada para la detección remota de frutos [13]–[15].

En este trabajo se implementó la red neuronal Faster R-CNN para la detección de manzanas Fuji mediante el uso del sensor de profundidad Kinect v2 (Microsoft, Redmond, WA, USA). Para ello, se propone utilizar los datos RGB para detectar las manzanas, con la posibilidad de inferir posteriormente la localización 3D de cada detección mediante los datos de profundidad. En la sección 2 se describe el equipamiento y la metodología utilizada para la adquisición de datos, así como la red neuronal implementada para la detección de manzanas Fuji. En la sección 3 se muestran y se discuten los resultados obtenidos, evaluando de forma cualitativa y cuantitativa la bondad del sistema de detección propuesto. Finalmente, las conclusiones que se desprenden de este trabajo se presentan en la sección 4.

2. Materiales y métodos

2.1. Adquisición y preparación de datos

Los datos utilizados en este trabajo se adquirieron en una plantación comercial de manzanas Fuji (*Malus domestica* Borkh. cv. Fuji) localizada en Agramunt (provincia de Lleida, España). Las capturas se realizaron entre los días 25 y 28 de Setiembre de 2017, tres semanas antes de la cosecha. Para ello, se utilizaron dos cámaras de profundidad instaladas en una plataforma móvil a 1 m y 3 m de altura (Figura 1) para poder capturar datos de toda la altura de los árboles. Las cámaras RGB-D utilizadas fueron dos Microsoft Kinect v2 (Microsoft, Redmond, WA, USA), las cuales incorporan una cámara de color RGB y un sensor de profundidad que trabaja bajo el principio de ToF. Ambas cámaras fueron conectadas y sincronizadas con un sensor de posicionamiento RTK-GNSS mediante un ordenador de campo que se comunica con los sensores vía un software desarrollado ad-hoc. Este software permite la adquisición automática de datos y

la georreferenciación de cada una de las capturas. Dado que el rendimiento del sensor de profundidad se ve afectado en condiciones de exposición directa al sol, las imágenes fueron capturadas en horario nocturno mediante luz artificial.



Figura 1. Equipamiento de adquisición de datos mostrando los sensores Kinect v2 montados en una plataforma autopropulsada.

Una vez adquiridos los datos, se etiquetaron manualmente las imágenes, identificando un total de 12,839 manzanas mediante la herramienta de etiquetaje *Pychet Labeller toolbox* [16]. Debido al elevado número de manzanas que aparecen por imagen (más de 100 frutos/imagen), y dado que las dimensiones de los frutos (44 ± 6 píxeles de diámetro) son relativamente pequeñas con respecto al tamaño de la imagen (1600 x 1080 píxeles), cada captura se dividió en 9 sub-imágenes de 548 x 373 píxeles (px), con un solapamiento de 20 px entre sub-imágenes (Figura 2).

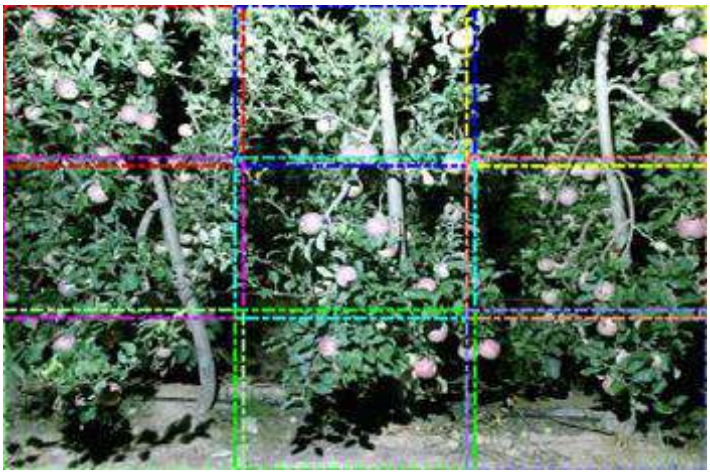


Figura 2. Subdivisión de imágenes. Cada imagen original fue dividida en 9 sub-imágenes para obtener una mejor relación entre el tamaño de las manzanas y la imagen.

2.2. Implementación de la red neuronal

En este trabajo, se utilizó la red neuronal Faster R-CNN [12] para la detección remota de frutos. Esta red fue desarrollada originalmente para detectar objetos en imágenes. La implementación original se testeó con las bases de datos PASCAL VOC [17] y COCO [18], presentando una precisión media (AP) de 78.8% y 42.7% con los datos de test de VOC 2007 y COCO, respectivamente.

Faster R-CNN está compuesta por dos módulos: (1) red de propuesta de regiones (en inglés *Region Proposal Network*, RPN), la cual pretende identificar las regiones de interés con mayor probabilidad de contener un objeto; (2) red de clasificación, que clasifica cada región propuesta por la RPN. Ambos módulos comparten las primeras capas convolucionales, aumentando así la eficiencia computacional de la red. En este trabajo, para estas primeras capas convolucionales, se utilizó el modelo VGG-16 [19] pre-entrenado con la base de datos ImageNet [20].

Para generar propuestas, la RPN evalúa distintas regiones rectangulares en cada posición de la imagen. Los diferentes tipos de regiones evaluadas (llamadas *anchors*) se caracterizan por su escala (área de la región) y la relación de aspecto (relación entre la altura y la anchura de la región). La implementación original de Faster R-CNN propone utilizar escalas de 8, 16 y 32, correspondientes a una superficie de región de 128^2, 256^2 y 512^2 pixeles, y relaciones de aspecto de 1:2, 1:1 y 2:1. Dado que las manzanas a localizar en el presente conjunto de datos son más pequeñas que los objetos localizados en la implementación original de [12], en este trabajo se utilizaron escalas de 2, 4 y 8 (superficie de región de 32^2, 64^2 y 128^2 píxeles, respectivamente), debido a que se adaptan mejor al tamaño de las manzanas objetivo. Se han mantenido las mismas relaciones de aspecto para facilitar la detección de manzanas ocluidas por hojas, ramas u otras manzanas.

3. Resultados y discusión

3.1. Entrenamiento de la red

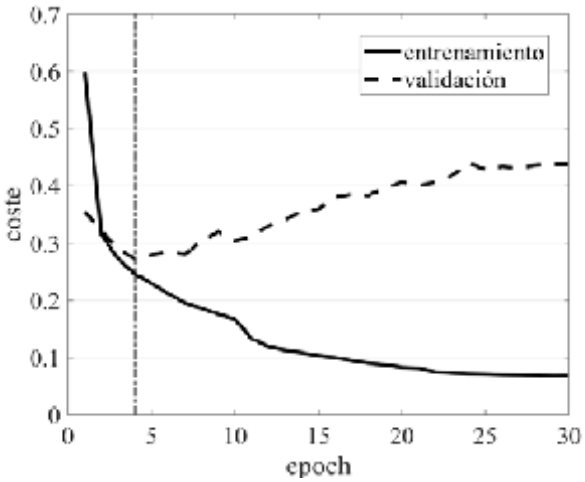


Figura 3. Función de coste en los datos de entrenamiento (línea continua) y de validación (línea discontinua) en función del número de iteraciones de entrenamiento.

La red neuronal fue entrenada utilizando la función de coste propuesta en [12]. Para actualizar los pesos durante el entrenamiento se utilizó el optimizador Adam [21] con una tasa de aprendizaje de 0.0001. El número de imágenes utilizadas para el entrenamiento, validación y test fue de 619, 155 y 193, respectivamente. La Figura 3 ilustra la evolución de la función de coste para el conjunto de datos de entrenamiento y de validación. Se observa que en la iteración (*epoch*) 4, la función de coste de validación alcanza el valor mínimo. Esto significa que a partir de esta

iteración se produce un sobre-entrenamiento de los datos que no generaliza con el conjunto de datos de validación; por este motivo, para evaluar los resultados de test (sección 3.2) se utilizaron los pesos entrenados con las 4 primeras iteraciones.

3.2. Resultados de test

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos con el conjunto de datos de test (193 imágenes). Las métricas utilizadas para evaluar estos resultados son: el porcentaje de detección (DR); porcentaje de falsos positivos (FDR); F1-score, definido como la media armónica entre los resultados de precisión (1-FDR) y porcentaje de detección (DR); precisión media (AP); y número de imágenes inferidas por segundo. Para esta evaluación se consideraron detecciones correctas (*true positives*) aquellas que presentan un solapamiento entre la detección y una manzana etiquetada superior a 0.4 (IoU>0.4).

Tabla 1. Evaluación de los resultados de detección de manzanas Fuji.

DR*	FDR*	F1-score	AP*	imágenes/s
91.4 %	15.9 %	0.876	93.9 %	17.3

*DR: porcentaje de detección // FDR: porcentaje de falsos positivos // AP: precisión media.

Los resultados muestran un porcentaje de detección (DR) del 91.4 % de los frutos con un 15.9% de falsos positivos (F1-score=0.876). El tiempo de computación medio fue de 17.3 imágenes por segundo, lo que permite su aplicación en tiempo real. Aunque es difícil comparar metodologías testeadas con distintos conjuntos de datos, los resultados demuestran una robustez similar a otros trabajos del estado del arte basados en redes neuronales como [13]–[15], los cuales reportaron valores de F1-score entre 0.838 y 0.929. Sin embargo, el uso de sensores RGB-D tiene como ventaja adicional que, aunque la detección se realiza en imágenes 2D, se puede inferir la localización 3D de cada detección.

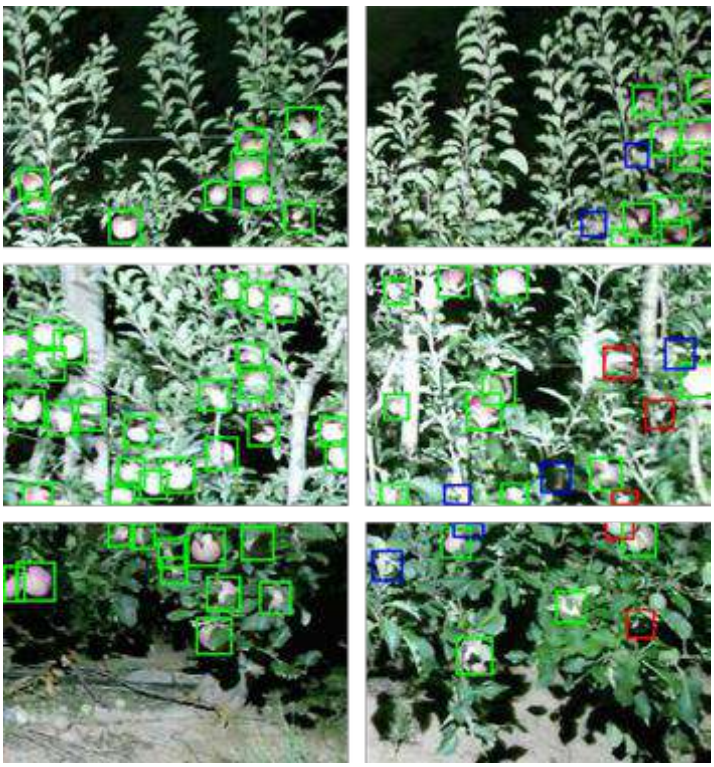


Figura 4. Detecciones obtenidas con la red neuronal Faster R-CNN. Las detecciones correctas se muestran de color verde, los falsos positivos de color rojo y los falsos negativos de color azul.

La Figura 4 ilustra ejemplos de las detecciones obtenidas utilizando la presente metodología. Las imágenes fueron seleccionadas para mostrar casos donde la red neuronal funciona con éxito (primera columna), y casos donde falla (segunda columna). Se observa que la mayoría de los falsos positivos (cuadrados rojos) corresponden a regiones de la imagen que son muy similares a una manzana o bien a manzanas que no fueron etiquetadas debido a errores humanos durante el etiquetado. Por otra parte, muchos de los falsos negativos (manzanas no detectadas, cuadrados azules) corresponden a manzanas altamente ocluidas por otros órganos vegetativos (ramas u hojas) o bien a manzanas que fueron cortadas en los bordes de la imagen.

4. Conclusiones

Este trabajo presenta un sistema de detección remota de manzanas mediante sensores RGB-D y el uso de la red neuronal convolucional Faster R-CNN. Los resultados muestran un porcentaje de detección del 91.4% de los frutos con un 15.9% de falsos positivos. De estos resultados se concluye que el sensor Kinect v2 presenta un gran potencial para la detección y localización 3D de frutos, ya que se obtienen resultados similares a otros trabajos del estado del arte, con la ventaja que con los sensores RGB-D se puede obtener la localización 3D de cada detección. Esto lo que lo hace interesante para aplicaciones como mapeo de la producción y robotización de la cosecha. La evaluación cualitativa de las detecciones muestra que los frutos no detectados corresponden a aquellos que estaban ocultos casi en su totalidad o bien a manzanas cortadas por los bordes de la imagen. Por otra parte, los falsos positivos corresponden a manzanas que no fueron etiquetadas (por errores humanos durante el etiquetaje) o bien a zonas de la imagen que presentan un patrón muy similar a una manzana y donde, incluso según la percepción del ojo humano, es difícil determinar si hay o no una manzana. La principal limitación del sistema es que el desempeño del sensor de profundidad se ve afectado en condiciones de iluminación de elevada intensidad, lo que limita su uso a días poco soleados o a trabajar en horario nocturno con luz artificial. Dado que los sensores RGB-D permiten medir distancias de las escenas capturadas, trabajos futuros podrían estudiar la capacidad de estos sensores para medir las dimensiones de los frutos de forma remota.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Secretaria d'Universitats i Recerca del Departament d'Empresa i Coneixement de la Generalitat de Catalunya, el Ministerio de Economía y Competitividad de España, y the European Regional Development Fund (ERDF), mediante los proyectos 2017 SGR 646, AGL2013-48297-C2-2-R, MALEGRA TEC2016-75976-R. Se agradece al Ministerio de Educación de España por la beca pre-doctoral de J. Gené (FPU15/03355). También queremos agradecer a Nufri y Vicens Maquinària Agrícola S.A. por su apoyo durante la adquisición de datos, así como a Adrià Carbó por su colaboración en la implementación de la red neuronal.

Referencias

1. K. R. Siegel, M. K. Ali, A. Srinivasiah, R. A. Nugent, and K. M. V. Narayan, "Do we produce enough fruits and vegetables to meet global health need?," *PLoS One*, vol. 9, no. 8, 2014.
2. F. A. Auat Cheein and R. Carelli, "Agricultural robotics: Unmanned robotic service units in agricultural tasks," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 7, no. 3, pp. 48–58, 2013.
3. S. Bargoti and J. P. Underwood, "Image Segmentation for Fruit Detection and Yield Estimation in Apple Orchards," *J. F. Robot.*, vol. 00, no. 0, pp. 1–22, 2017.
4. J. P. Underwood, C. Hung, B. Whelan, and S. Sukkarieh, "Mapping almond orchard canopy volume, flowers, fruit and yield using lidar and vision sensors," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 130, pp. 83–96, 2016.
5. R. Linker, "Machine learning based analysis of night-time images for yield prediction in apple orchard," *Biosyst. Eng.*, 2018.

6. C. W. Bac, E. J. Van Henten, J. Hemming, and Y. Edan, "Harvesting Robots for High-value Crops: State-of-the-art Review and Challenges Ahead," *J. F. Robot.*, vol. 31, no. 6, 2014.
7. A. Gongal, S. Amatya, M. Karkee, Q. Zhang, and K. Lewis, "Sensors and systems for fruit detection and localization: A review," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 116, pp. 8–19, 2015.
8. A. Escolà *et al.*, "Mobile terrestrial laser scanner applications in precision fruticulture/horticulture and tools to extract information from canopy point clouds," *Precis. Agric.*, vol. 18, no. 1, pp. 111–132, 2017.
9. D. Font *et al.*, "A proposal for automatic fruit harvesting by combining a low cost stereovision camera and a robotic arm," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 7, pp. 11557–11579, 2014.
10. T. T. Nguyen, K. Vandevoorde, N. Wouters, E. Kayacan, J. G. De Baerdemaeker, and W. Saeys, "Detection of red and bicoloured apples on tree with an RGB-D camera," *Biosyst. Eng.*, vol. 146, pp. 33–44, 2016.
11. E. Barnea, R. Mairon, and O. Ben-Shahar, "Colour-agnostic shape-based 3D fruit detection for crop harvesting robots," *Biosyst. Eng.*, vol. 146, pp. 57–70, 2016.
12. S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, "Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 39, no. 6, pp. 1137–1149, 2017.
13. S. Bargoti and J. Underwood, "Deep Fruit Detection in Orchards," *2017 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 3626–3633, 2017.
14. H. Gan, W. S. Lee, V. Alchanatis, R. Ehsani, and J. K. Schueller, "Immature green citrus fruit detection using color and thermal images," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 152, no. July, pp. 117–125, 2018.
15. I. Sa, Z. Ge, F. Dayoub, B. Upcroft, T. Perez, and C. McCool, "DeepFruits: A Fruit Detection System Using Deep Neural Networks," *Sensors*, vol. 16, no. 8, p. 1222, 2016.
16. S. Bargoti, "Pychet Labeller. Available online: https://github.com/acfr/pychetlabeller." https://github.com/acfr/pychetlabeller, 2016.
17. M. Everingham, L. Van Gool, C. K. I. Williams, J. Winn, and A. Zisserman, "The pascal visual object classes (VOC) challenge," *Int. J. Comput. Vis.*, 2010.
18. T. Y. Lin *et al.*, "Microsoft COCO: Common objects in context," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2014.
19. K. Simonyan and A. Zisserman, "Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition," pp. 1–14, 2014.
20. J. Deng, W. Dong, R. Socher, L.-J. Li, K. Li, and L. Fei-Fei, "ImageNet: A large-scale hierarchical image database," in *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009.
21. D. P. Kingma and J. L. Ba, "Adam: A method for stochastic gradient descent," *ICLR Int. Conf. Learn. Represent.*, 2015.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Utilización de modelos mixtos lineales generalizados en el análisis de la velocidad del fluido en el interior de un pulverizador agrícola

A. J. Aguirre[1]; G. Guevara-Viera[2]; C. S. Torres-Inga[3]; R. Guevara-Viera[2]; J. Badules[4]; A. Boné[4]; M. Vidal[4] y F. J. García-Ramos[4]

[1] CPIFP Montearagón. Huesca, España; angeljavieraguirre65@gmail.com
[2] Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca. Ecuador.
[3] Departamento de Matemáticas y Estadística de la Universidad de Nuevo México. Albuquerque, USA.
[4] Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Zaragoza. Huesca, España.

Resumen: Este trabajo tiene por objetivo formular el mejor modelo mixto lineal generalizado para inferir la velocidad del fluido en el interior de un pulverizador agrícola bajo parámetros operacionales: llenado del depósito, presión interior y número de boquillas abiertas, teniendo en cuenta la geometría del depósito. Se llevó a cabo una formulación de modelos de complejidad creciente, sin transformar la variable, ni eliminar o corregir los numerosos datos extremos y atípicos. El mejor modelo incluyó como efectos fijos: la cantidad de líquido dentro del depósito, la presión interior y el número de boquillas, y como efecto aleatorio la sección de la cuba. La bondad de ajuste de los modelos fue evaluada a través de los menores valores de AICc, BIC y la estima de la varianza residual. La distribución Gamma y la función de enlace logarítmica mejoraron la bondad de ajuste del mejor modelo. El análisis conjunto de los tres efectos fijos puso en evidencia que la mayor influencia sobre la velocidad del fluido la ejercen los litros que contiene el depósito, seguido de la presión del sistema de agitación y, por último, el número de boquillas activas. El modelo sobre estima la velocidad, pero modera los valores elevados.

Palabras clave: AICc; varianza residual; efectos aleatorios; función de enlace; regresión lineal.

1. Introducción

La velocidad del fluido en el interior de un pulverizador agrícola, necesaria para la mezcla homogénea de la materia activa, está determinada por el sistema de agitación interna, de tipo hidráulico en la mayoría de los casos. Esta velocidad varía según (a) algunos parámetros de trabajo: presión, número de boquillas, y nivel de llenado del depósito; y (b) la geometría de la cuba: altura, anchura, tipología de la sección y presencia de obstáculos e irregularidades en el interior del depósito y la ubicación de las boquillas.

Estos dos conjuntos de parámetros dificultan que los datos observados de la velocidad del fluido se ajusten a una distribución normal. Lo que obliga a la utilización de métodos no paramétricos a la hora de evaluar las posibles variaciones de velocidad según parámetros de trabajo y geometría [1]. Esta aproximación analítica permite conocer el efecto de los parámetros por separado, enmascarando las posibles interacciones entre ellos, así como el peso que cada cual ejerce sobre las variaciones de velocidad.

Los modelos lineales generalizados mixtos (GLMM, por sus siglas en inglés) amplían el conjunto de modelos lineales generalizados con la adición de efectos aleatorios al estimador lineal [2], los cuales permiten modelizar observaciones correlacionadas. De igual forma que los modelos

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3346

lineales generalizados, los GLMM pueden ser formulados usando una secuenciación en tres partes [3], donde Y_{ij} representa la observación del j-ésimo individuo (j = 1; 2; …; n_i) dentro del i-ésimo conglomerado (i = 1; 2; …; m).

Este trabajo tiene como objetivo ajustar y describir un modelo mixto lineal generalizado apropiado para el análisis de la influencia que cada variable (geométricas y de regulación del sistema de agitación) ejerce sobre la velocidad interior del fluido. Teniendo en cuenta que estos modelos permiten que la variable dependiente no tenga una distribución normal, que las observaciones estén correlacionadas y que tenga una relación lineal con las variables independientes y covariables a través de una función de enlace determinada.

2. Materiales y métodos

2.1. Orígen de los datos

Los datos provienen del ensayo llevado a cabo por [4] con el depósito de un pulverizador hidroneumático en el que midieron la velocidad del fluido (cm/s) con un velocímetro acústico Doppler 3D, en 32 puntos repartidos en varias posiciones de su interior, y variando la presión del sistema de agitación (8, 10, 12 bar), el número de boquillas activas (2, 4), y el nivel de llenado de la cuba (1000, 2000, 3000 L).

2.2. Secuenciación del modelo

La distribución condicional de cada Y_{ij}, dado un vector q × 1 de efectos aleatorios b_i, pertenece a la familia exponencial de distribuciones (binomial, binomial negativa, Poisson, normal, gamma, entre otras). La $\mathrm{Var}(Y_{ij}|b_i) = \phi\upsilon(E(Y_{ij}|b_i))$, donde $\upsilon(\cdot)$ es una función conocida para la varianza, una función de la media condicional $E(Y_{ij}|b_i)$, y ϕ es un parámetro escalar que puede ser conocido o ser necesario estimarlo. En adición, dado los efectos aleatorios b_i, se asume que los Y_{ij} son independientes entre sí, lo cual supone la asunción de independencia condicional.

La media condicional de Y_{ij}, que depende de los efectos fijos β y los efectos aleatorios b_i, se relaciona con el predictor lineal η_{ij}, a través de la aplicación de una función de enlace conocida, $g(\cdot)$, la cual es monótona y diferenciable [5], de la siguiente manera (Ecuación 1):

$$g\{E(y_{ij}|b_i; x_{ij}; z_{ij})\} = \eta_{ij} = x_{ij}^T\beta + z_{ij}^T b_i \quad (1)$$

donde x_{ij} y z_{ij} son dos vectores de covariables p + 1 dimensionales y q dimensionales, respectivamente.

Aunque cualquier función puede ser escogida para $g(\cdot)$, cada distribución perteneciente a la familia exponencial tiene una función de enlace especial llamada función de enlace canónica. Esta función es definida como esa función $g(\cdot)$ tal que (Ecuación 2):

$$g\{E(y_{ij})\} = \theta_i \quad (2)$$

donde θ_i es el parámetro de localización canónico.

En principio, cualquier distribución multivariada puede ser admitida para los b_i. En la práctica, es común asumir que los bi tienen una distribución normal multivariada, con media cero y matriz de covarianza D de dimensiones q × q. Adicionalmente los efectos aleatorios b_i son asumidos para ser independientes de las covariables X_i, en el caso de haberlas.

En este trabajo se asume como función de enlace canónica la identidad, asumiendo una distribución normal de los errores del modelo y de la variable objetivo en la formulación de los modelos para su comparación. Una vez elegido el mejor modelo y, teniendo en cuenta que la variable objetivo muestra valores de escala positivos que se desvían hacia valores positivos más

grandes, se ensayó hasta obtener la combinación "forma de distribución-función de enlace" que brindó una mayor bondad de ajuste. Se realizó una regresión lineal entre los valores predichos y los observados (Ecuación 3 y Figura 3), valorando su significación a través de un análisis de varianza del modelo de regresión, la constante y la pendiente.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de la distribución de la variable

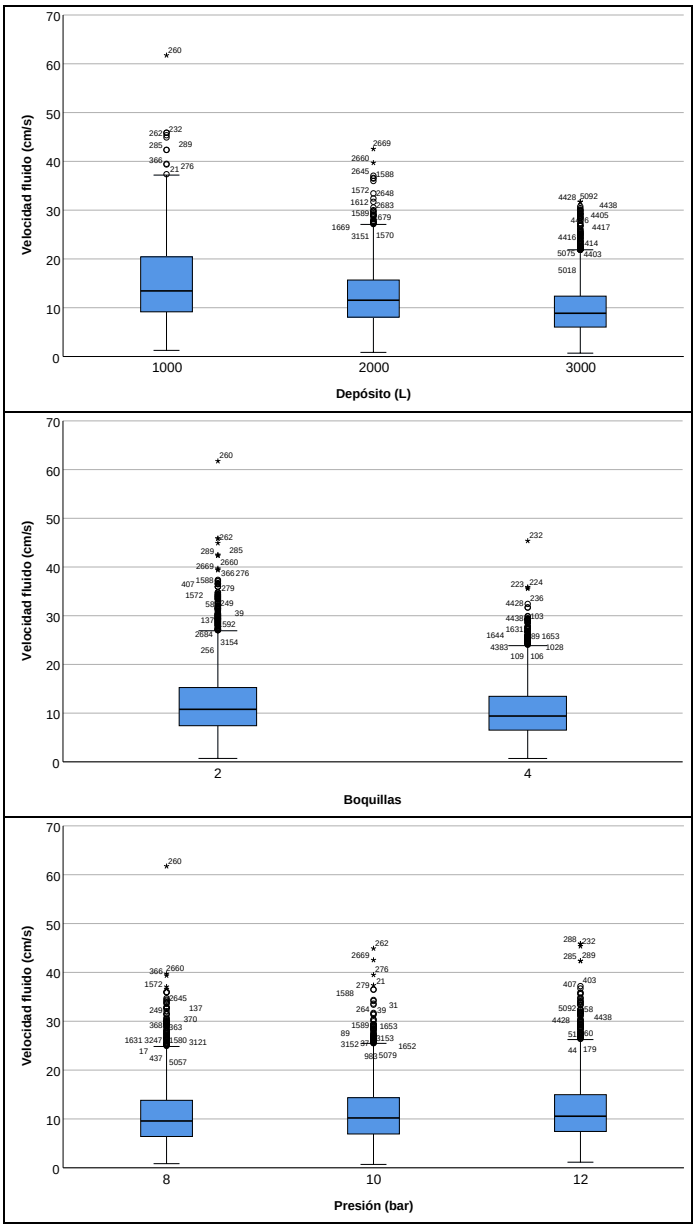


Figura 1. Representación de los diagramas de cajas para la velocidad del fluido (cm/s) observada en el interior del depósito del pulverizador según la cantidad de fluido, número de boquillas abiertas y presión en su interior.

El análisis de la variable velocidad del fluido (cm/s) en su conjunto (n = 7200) revela un valor promedio de 11,25 ± 6,08 cm/s dentro de un rango de valores desde los 0,69 cm/s hasta los 61,73 cm/s, poniendo en evidencia un desajuste con la distribución normal (K-S = 0,080; p < 0,001).

La representación de los datos según los parámetros operacionales de interés: llenado del depósito, número de boquillas abiertas y presión dentro del depósito, muestra una gran cantidad de datos extremos y atípicos en la cola derecha de la distribución, Asimetría: 1,242, y Curtosis: 2,680 (Figura 1). Con el objeto de elaborar modelos que describan lo observado en la realidad, ni se procederá a transformar la variable ni se tratarán y/o eliminarán los datos extremos y atípicos [6].

3.2. Comparación de modelos

Se procede a la construcción de modelos con un nivel creciente de complejidad cuya bondad de ajuste se compara (a) con el criterio de información Akaike (AICc) corregido [7], a pesar de tratarse de un elevado número de observaciones en relación con el número de parámetros del modelo (K), de modo que n/K > 40; y (b) con el criterio de información Bayesiano (BIC) [8] que modifica la puntuación de los parámetros del modelo respecto del AICc.

Tabla 1. Criterio de información Akaike corregido (AICc) y Bayesiano (BIC) para los modelos planteados y numerados.

Modelo	Nº	Criterio información Akaike corregido (AICc)	Criterio información Bayesiano (BIC)
VF = f(ninguna variable)	1	46.439,097	46.445,978
VF = f(Efectos Fijos: DP, NB, PI)	2	45.440,384	45.447,265
VF = f(Efectos Fijos: DP, NB, PI, SC)	3	44.656,549	44.663,429
VF = f(EF(DP, NB, PI, SC) + EA(AT, LD))	4	44.314,359	44.328,118
VF = f(EF(DP, NB, PI) + EA(SC))	5	43.681,507	43.695,267
VF = f(EF(DP, NB, PI) + EA(SC, AT))	6	43.684,507	43.698,267
VF = f(EF(DP, NB, PI) + EA(SC, AT, LD))	7	43.687,525	43.701,285
VF = f(EF(DP, NB, PI) + EA(AT, LD))	8	45.137,793	45.151,553

1: Sólo el intercepto (modelo nulo).
2: Efectos fijos (EF): llenado deposito (DP), número de boquillas (NB) y Presión interior (PI).
3: EF: DP, NB, PI y la Sección (SC).
4: EF: DP, NB, PI, SC, más la Altura (AT) y el Lado (LD) como efectos aleatorios (EA).
5: EF: DP, NB, PI, más SC como efecto aleatorio (EA).
6: EF: DP, NB, PI, más la SC y la Altura (AT) como efectos aleatorios.
7: EF: DP, NB, PI, más la SC, AT y el Lado (LD) como efectos aleatorios.
8: EF: DP, NB, PI, más la AT y LD como efectos aleatorios.

Como se observa en la Tabla 1 el mejor modelo, es decir, aquel que mejor representa la realidad mostrada por los datos, es el número 5, el que incluye los parámetros operacionales: llenado del depósito, número de boquillas abiertas y presión en el interior del depósito, como efectos fijos, y la sección de la forma geométrica del depósito como efecto aleatorio.

El modelo 5, siendo el que muestra un menor coeficiente de los criterios de información AIC y BIC, además muestra el mayor peso relativo Akaike (w_i; Tabla 2), seguido de los modelos 6 y 7 respectivamente, con una plausibilidad menor y decreciente en lo relativo a su ajuste con los datos observados.

Tabla 2. Incrementos del criterio de información Akaike corregido de cada modelo respecto del mejor modelo (mínimo) y la verosimilitud relativa de cada modelo expresada a través de su peso relativo Akaike (w_i).

Modelo	$\Delta_i = AIC_i - AIC_{min}$	$w_i = \exp(-0,5 \cdot \Delta_i) / \Sigma(\exp(-0,5 \cdot \Delta_i))$
1	2.757,59	0,00000E+00
2	1.758,88	0,00000E+00
3	975,04	1,47120E-212
4	632,85	2,97363E-138
5	0,00	7,85872E-01
6	3,00	1,75352E-01
7	6,02	3,87757E-02
8	1.456,29	0,00000E+00

El modelo 5, junto a los modelos 6 y 7, son los que realizan una estima de la varianza residual menor dentro del conjunto de modelos (Tabla 3).

Tabla 3. Valores de la estima de la varianza residual de cada modelo, su error estándar, el valor del estadístico, el p-valor de la prueba de significación y los valores de los límites inferior y superior del intervalo de confianza al 95% de la estima de la varianza residual.

Modelo	Estima Varianza Residual ($\hat{S}r$)	Error estándar	Z	p	Límite Inferior	Límite Superior
1	37,017	0,617	59,996	< 0,001	35,827	38,246
2	32,202	0,537	59,975	< 0,001	31,167	33,272
3	28,868	0,481	59,962	< 0,001	27,940	29,827
4	27,405	0,457	59,933	< 0,001	26,523	28,316
5, 6, 7	24,761	0,414	59,845	< 0,001	23,964	25,586
8	30,743	0,513	59,945	< 0,001	29,754	31,765

Aquellos modelos en los que no se ha incluido la Sección (SC), ni en los efectos fijos ni en los aleatorios (modelos 1, 2 y 8), han mostrado los menores pesos relativos (wi) en el conjunto, así como las mayores estimas de la varianza residual. Teniendo en cuenta que los valores más pequeños de varianza residual corresponden a los modelos que mejor se ajustan a lo descrito por las observaciones [9], se pone en evidencia la importancia de la SC, como descriptor de la geometría del depósito del pulverizador, a la hora de evaluar la velocidad del fluido en su interior, y más aún, la necesidad de su inclusión como efecto aleatorio y no como efecto fijo.

En esta clase de modelos generalizados de efectos mixtos se ha supuesto la distribución paramétrica normal [10] para los efectos aleatorios, fundamentalmente por razones convencionales [11], entendiendo que, a pesar de haber elegido cuatro secciones transversales para la localización de los puntos de control dentro del depósito del pulverizador, la sección podría tomar cualquier valor desde un extremo hasta el otro.

No se aporta más información acerca de la forma de la distribución conjunta de los efectos aleatorios (SC, AT, LD), de modo que el supuesto de la distribución normal para estos efectos aleatorios en conjunto no ha sido evaluada directamente en los modelos 6, 7 y 8 [12]. Su no elección soslaya en parte la preocupación natural por la especificación incorrecta de los efectos aleatorios en los modelos GLMM [13], y su posible influencia en la inferencia de los efectos fijos [14].

3.3. Descripción del mejor modelo

Los datos se estructuran a partir de los puntos de control, como unidades de observación. Son independientes entre sí. En ellos se han llevado a cabo las mediciones según los distintos niveles de los efectos fijos: llenado del depósito, presión y abertura de pares de boquillas; en cuatro secciones y a tres alturas y distancias del perímetro (lados).

La variable objetivo (dependiente) es la velocidad del fluido en el interior del depósito. Como ya se advirtió anteriormente, atendiendo a la forma de la distribución de la variable objetivo y, fruto de los diversos ensayos realizados, la combinación que mejor se ajusta a lo observado resulta de una distribución tipo Gamma [15] con una función de enlace logarítmica ($f(x) = \log(x)$). Al tener un elevado número de observaciones y una estructura de covarianza sencilla como la identidad escalada (por tener sólo un efecto aleatorio), se eligió el método residual (fijo para todas las pruebas) para el cálculo de los grados de libertad. En el cálculo de la matriz de covarianzas de las estimaciones de los parámetros se seleccionó la estimación robusta, a la vista de los datos extremos y atípicos cuyo efecto podría vulnerar la premisa de homoscedasticidad del modelo [2]. De este modo, los indicadores de bondad de ajuste son los siguientes: (a) AICc = 8.371,421; (b) BIC = 8.385,182; y (c) $\hat{S}_r = 0{,}183$; $p < 0{,}001$.

Tabla 4. Estadístico de contraste y p-valor para el Modelo completo y cada uno de los efectos fijos (EF). Medias estimadas para los distintos niveles de los efectos fijos. Letras distintas ponen en evidencia diferencias significativas ($p < 0{,}05$).

Origen	F	p	Medias estimadas Velocidad del Fluido (cm/s)							
			Niveles de los efectos fijos							
Modelo	130,423	< 0,001	1000 L	8 bar	2	2000 L	10 bar	4	3000 L	12 bar
EF DP	38,865	< 0,001	15,048c			12,698b			9,296a	
EF PI	28,052	< 0,001		11,511a			12,073a			12,782b
EF NB	6,403	0,011			12,944b			11,331a		

Como se observa en la Tabla 4 el modelo resulta significativo, así como los tres EF, siendo el llenado del depósito (DP) el que más influencia tiene sobre la velocidad del fluido, seguido de la presión interior (PI) del mismo y, muy por detrás, pero también significativamente, el número de boquillas abiertas (NB). Cabe señalar que son significativamente distintas las velocidades del fluido en los tres niveles estudiados, disminuyendo según se va llenando el depósito; en lo relativo a la presión interior, la velocidad del fluido no es significativamente distinta a 8 bar o 10 bar, pero sí a estas dos presiones es significativamente menor que con una presión de 12 bar; y, por último, la velocidad del fluido disminuye significativamente cuando se duplica el número de boquillas abiertas (Figura 2) debido en este caso a la ubicación geométrica de las mismas, enfrentadas entre sí.

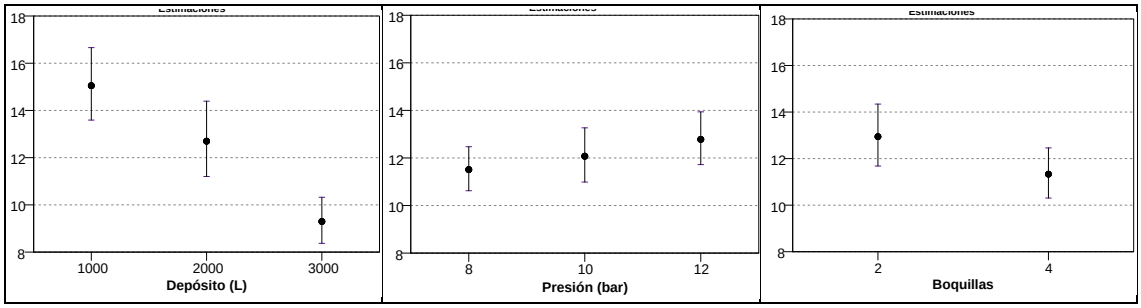


Figura 2. Medias estimadas por el modelo para la velocidad del fluido (cm/s) e intervalos de confianza al 95% según el nivel de llenado del depósito, la presión interior y el número de boquillas abiertas.

En el modelo elegido el residuo tipificado (Pearson) se distribuye $f \sim (0{,}00;\ 0{,}995)$, con una asimetría = 0,545 y curtosis = 0,417. Su distribución es significativamente distinta de una normal (K-S = 0,034; $p < 0{,}001$). Los valores predichos reproducen los mayores valores en el sentido positivo de la variable objetivo (VF), sobre estimando las predicciones desde los 2 cm/s hasta los 35 cm/s, pero reduciendo la velocidad máxima predicha al menos en 15 cm/s (Figura 3).

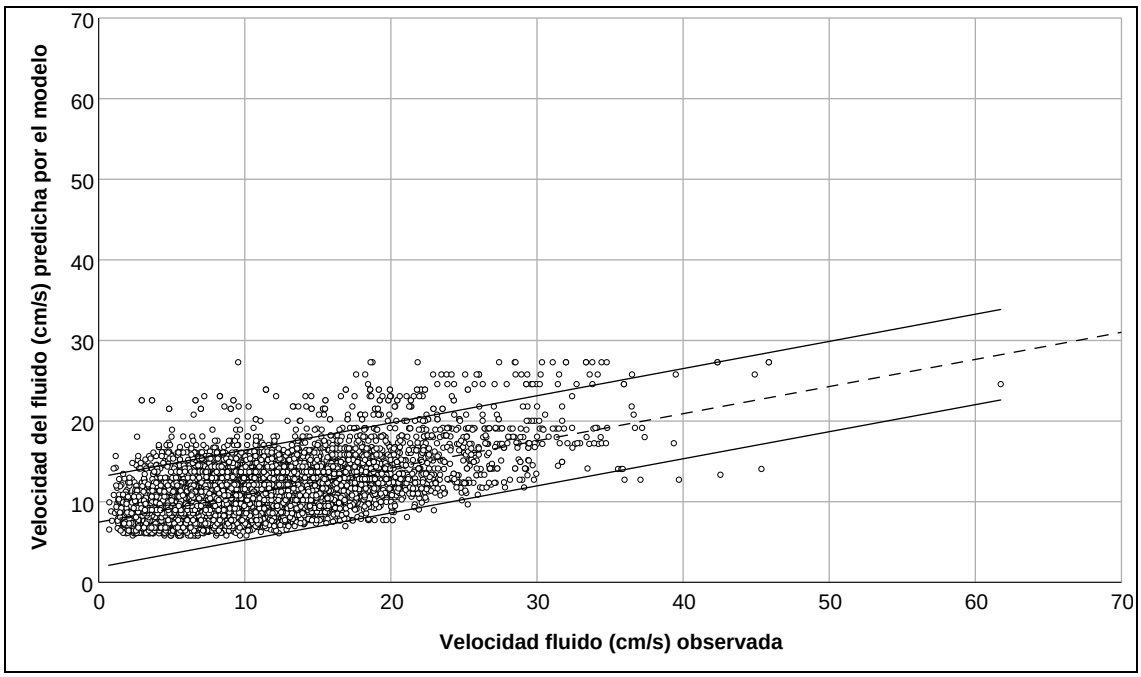


Figura 3. Regresión lineal entre la velocidad del fluido (cm/s) predicha por el modelo y la observada durante el ensayo.

La regresión entre los valores predichos y los observados (Figura 3) permite formular una relación lineal significativa ($p < 0{,}001$) con un coeficiente de determinación ajustado $R^2_{aj} = 0{,}340$ (Ecuación 3).

$$\widehat{VF}\ (cm/s) = 7{,}459 + (0{,}336 \times VF\ (cm/s)) \quad (3)$$

4. Conclusiones

El mejor modelo de los ensayados incluyó como efectos fijos el nivel de líquido en el interior del depósito, la presión interior y el número de boquillas abiertas, y como efecto aleatorio, únicamente la sección de la cuba, resultando irrelevantes la altura y el lado de los puntos de control.

A través de este modelo mixto lineal generalizado se han podido evaluar conjuntamente efectos fijos y aleatorios, de modo que el efecto fijo que más importancia ejerce sobre la velocidad del fluido es el llenado del depósito, seguido de la presión interior, para terminar con el número de boquillas abiertas; parámetros instrumentales para el operador.

Este modelo suaviza y modera los datos extremos y atípicos observados en el ensayo, pero no elimina totalmente su influencia, de modo que sobre estima las predicciones, pero limita los valores más elevados.

Referencias

1. Armenante P.M., Luo C., Chou C., Fort I., Medek J. Velocity profiles in a closed unbaffled vessel: comparison between experimental LDV data and numerical CFD predictions. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52(20), 3483-3492.
2. McCulloch C.E., Searle, S.R. *Generalized, Linear, and Mixed Models*. 2001. New York, USA: John Wiley and Sons, Inc.
3. Fitzmaurice G.M., Laird N.M., Ware J.H. *Applied Longitudinal Analysis*. 2012. Boston, Massachusetts, USA: John Wiley and Sons.
4. García-Ramos F.J., Badules J., Boné A., Gil E., Aguirre A.J., Vidal M. Application of an Acoustic Doppler Velocimeter to Analyse the Performance of the Hydraulic Agitation System of an Agricultural Sprayer. *Sensors*, 2018, 18(11), 3715.
5. Gad A.M., El Kholy R.B. Generalized Linear Mixed Models for Longitudinal Data. *International Journal of Probability and Statistics*, 2012, 1(3), 41-47.
6. Krishnaiah, P.R. (Ed.). *Handbook of Statistics 1: Analysis of Variance*. 1980. Amsterdam, Netherlands: North-Holland Publishing Company.
7. Akaike H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, 19(6), 716–723.
8. Burnham K.P., Anderson D.R. Multimodel inference: understanding AIC and BIC in Model Selection. *Sociological Methods and Research*, 2004, 33, 261–304.
9. Litière S., Alonso A., Molenberghs G. The impact of a misspecified random-effects distribution on the estimation and the performance of inferential procedures in generalized linear mixed models. *Statistics in Medicine*, 2008, 27(16), 3125-3144.
10. Abad A.A., Litière S., Molenberghs G. Testing for misspecification in generalized linear mixed models. *Biostatistics*, 2010, 11(4), 771-786.
11. Tsonaka R., Rizopoulos D., Verbeke G., Lesaffre, E. Nonignorable Models for Intermittently Missing Categorical Longitudinal Responses. *Biometrics*, 2010, 66(3), 834-844.
12. Xiang L., Yau K.K.W., Lee A.H. The robust estimation method for a finite mixture of Poisson mixed-effect models. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2012, 56(6), 1994-2005.
13. Huang X. Diagnosis of Random-Effect Model Misspecification in Generalized Linear Mixed Models for Binary Response. *Biometrics*, 2009, 65(2), 361-368.
14. Komárek A., Lesaffre E. Generalized linear mixed model with a penalized Gaussian mixture as a random effects distribution. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2008, 52(7), 3441-3458.
15. Montgomery D.C., Runger G.C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*, (3rd ed.). 2003. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

XF-ROVIM, un robot para la detección de enfermedades en campo mediante teledetección. Aplicación a la detección de *Xylella fastidiosa*

S. Cubero[1], S. López[1], N. Aleixos[2], V. Alegre[3], B. Rey[2], C. Ruiz[3], E. Aguilar[3], J. Blasco[1]

[1] Centro de Agroingeniería. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). CV-315, km 10,7 – 46113 Moncada (Valencia), España; cubero_ser@gva.es
[2] Departamento de Ingeniería Gráfica. Universitat Politècnica de València (UPV). Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España.
[3] TRAGSA. CV-315, km 10,7 – 46113 Moncada (Valencia), España.

Resumen: Se ha desarrollado un robot flexible y económico, fácil de transportar y capaz de embarcar equipos de teledetección, con el objetivo de inspeccionar cultivos arbóreos en el marco del proyecto H2020 XF-ACTORS, financiado por la UE (#727987). El robot XF-ROVIM se maneja por control remoto y se impulsa gracias a dos motores eléctricos. Permite equipar dos cámaras réflex (una modificada para imágenes BNDVI), una cámara multiespectral (ocho bandas entre 550 y 850 nm), una cámara hiperespectral de barrido (rango 400 - 1000 nm) y una cámara térmica. Además, se ha montado un escáner LiDAR 2D para obtener características estructurales tridimensionales de los árboles, un receptor GNSS para geolocalizar las imágenes y datos obtenidos, y una unidad de medida inercial (IMU) para corregir los datos capturados por el LiDAR influenciados por las irregularidades del terreno.Se ha utilizado para detectar olivos infectados por *Xylella fastidiosa* mediante teledetección en una parcela potencialmente afectada en la región de Lecce (sur de Italia). El robot recorrió el cultivo monitorizando las cuatro caras de cada árbol (más de 400 árboles) con cámaras (más de 35000 imágenes) y la información LiDAR. Los datos ya analizados se pueden visualizar sobreimpresos en el mismo campo utilizando la aplicación Google Earth®.

Palabras clave: visión por computador, imagen espectral, agricultura de precisión, LiDAR

1. Introducción

Xylella fastidiosa (*Xf*) es una peligrosa bacteria que llegó hace relativamente poco tiempo a Italia donde ha causado daños muy graves y enormes pérdidas en los cultivos de olivos [1]. Posteri0ormente se ha extendido por el sur de Francia y Córcega y más recientemente se ha detectado en Mallorca, Alicante y Madrid en España [2]. Por ello, *Xf* se está convirtiendo en una amenaza para toda Europa y las medidas preventivas contra esta enfermedad se están fortaleciendo mediante la implementación, entre otras medidas, de programas de vigilancia y contención impulsadas por la UE.

Para diagnosticar correctamente los cultivos afectados, es necesario realizar un muestreo adecuado. Por ejemplo, en árboles infectados, el análisis de solo unas pocas hojas puede devolver un diagnóstico negativo si el muestreo no se realiza adecuadamente. Además, para conocer la gravedad del problema, es necesario hacer muestreos de grandes extensiones, a nivel de parcela o incluso de región, con una alta resolución, lo que implica un coste elevado que en la mayoría de los casos puede ser inviable.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3474

Una alternativa complementaria a los sistemas de muestreo tradicionales a pie de campo, es el uso de sensores remotos capaces de detectar problemas en los cultivos y mapear la distribución de la enfermedad. Estos sensores han evolucionado considerablemente durante las últimas décadas y actualmente permiten realizar muestreos a diferentes escalas, dependiendo del área que se va a monitorear, así como de la resolución espacial y espectral requerida [3]. Para grandes extensiones, se pueden utilizan imágenes de satélite que ofrecen altas resoluciones espectrales, pero con una resolución espacial relativamente escasa. Hoy en día, la reducción de precios y la miniaturización de los equipos hacen que los sistemas aéreos no tripulados (UAV) sean cada vez más populares para monitorizar áreas con resoluciones más altas, ofreciendo información espectral en el momento que se precise y en relativamente poco tiempo. Sin embargo, la autonomía y el radio de acción de estos equipos de estos equipos es todavía pequeño y su uso limitado para realizar campañas de vigilancia a nivel regional. Una alternativa reside en el uso de avionetas tripuladas, que permiten cubrir grandes extensiones [4]. Sin embargo, a veces es necesario realizar observaciones a nivel de campo para obtener información de las plantas individuales a una resolución muy alta. Para obtener esta información se utilizan dispositivos manuales o sensores montados en vehículos agrícolas, ya sean estándar como tractores o desarrollados a medida para cada caso.

Este trabajo presenta el desarrollo de un robot de campo, XF-ROVIM [5], que incorpora equipos para el sensado remoto. Este robot se está utilizando para la detección temprana de *Xf* y se ha probado en campos de olivos potencialmente infectados por *Xf* en la región de Apulia (Italia). Los datos del cultivo recolectados en el campo están bajo estudio, por lo que en este trabajo se presenta únicamente el desarrollo del robot, sus equipos y sus componentes y los ensayos realizados.

2. Materiales y métodos

Se ha diseñado y construido un pequeño vehículo eléctrico terrestre que permite embarcar un conjunto de sensores para monitorizar cultivos arbóreos (Figura 1). El vehículo tiene unas dimensiones de 100 x 60 cm, lo que permite que sea fácilmente transportable en el interior de una furgoneta. Además de los sensores, el vehículo alberga en su interior dos baterías de gel fácilmente reemplazables que dotan de autonomía a todo el sistema. También en su interior se encuentra un ordenador industrial, una pantalla de visualización que puede abatirse y quedar oculta durante los ensayos con el vehículo y toda la electrónica y cableado desarrollado a medida para controlar el movimiento del vehículo, la sincronización de los equipos y la alimentación de los sensores.

El vehículo se conduce a través de un mando a distancia remoto y tiene una autonomía real de unas 6-8 horas de funcionamiento ininterrumpido a pleno rendimiento. Debido a la gran altura de los árboles en los campos de ensayo (unos 6 m), las cámaras se han colocado en una plataforma que se puede elevar hasta 3 m sobre el nivel del suelo, de forma que una imagen pueda abarcar toda la copa del árbol. Para sincronizar la adquisición de datos con el avance del vehículo y para alimentar todos los sensores, se ha desarrollado una placa electrónica que recibe los pulsos de dos codificadores ópticos situados en los ejes de los motores de tracción, generados según avanza el vehículo. De este modo, las imágenes se puedan adquirir a distancias establecidas de avance configurables desde el mando remoto, con el objetivo de conseguir imágenes del campo con el menor solapamiento posible. La información proporcionada por los codificadores ópticos también se utiliza para la gestión del movimiento del vehículo debido a la integración de un controlador proporcional, integral y derivativo (PID) que actúa sobre los motores de tracción, permitiendo un funcionamiento manual a través de un mando joystick o un funcionamiento automático a velocidad constante prefijada desde el propio mando.

El conjunto de sensores montados en el vehículo terrestre está formado por dos cámaras réflex, una Canon EOS 600D (Canon Inc, Japón) estándar y otra Canon EOS 550D (Canon Inc,

Japón) modificada para obtener imágenes BNDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en el azul), una cámara multiespectral Silios CMS-V (Silios Technologies, Peynier, Francia), un sistema hiperespectral de barrido en el rango entre 400 y 1000 nm compuesto por un espectrógrafo (Imspector V10, Specim Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finlandia) y una cámara (Eye5220CP, iDS Imaging Development Systems GmbH, Obersulm, Alemania) y una cámara térmica (A320, FLIR Systems, Wilsonville, OR, EE.UU.).

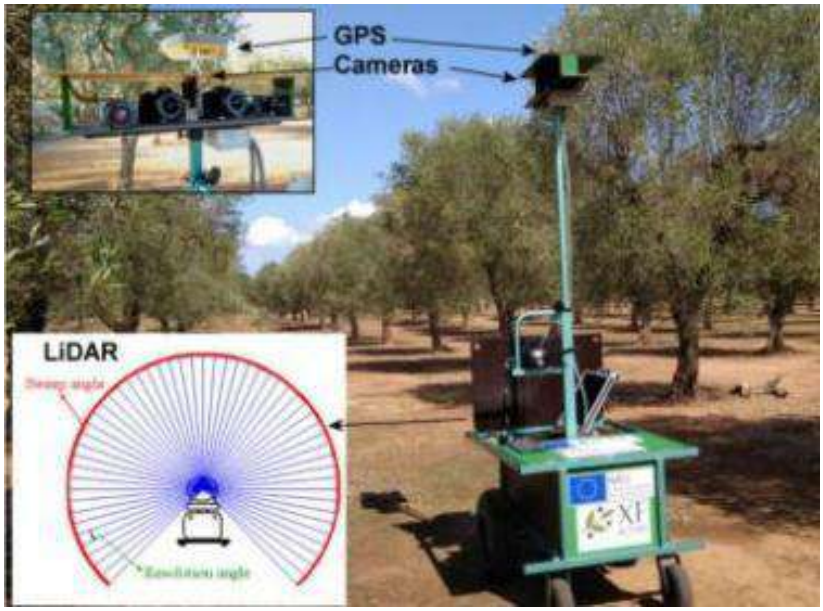


Figura 1. XF-ROVIM, conjunto de sensores y rango LiDAR

Las cámaras réflex tienen sensores de 18 megapíxeles y lentes EF-S de 10 mm que pueden ofrecer imágenes con una resolución de 0,5 mm/píxel. El rango de la cámara multiespectral está entre 550 y 830 nm y puede obtener imágenes en 8 longitudes de onda diferentes (558, 589, 623, 656, 699, 732, 769 y 801 nm). Esta cámara tiene un tamaño de sensor de 1280 x 1024 píxeles y monta una lente de 6 mm que ofrece una resolución de 2,5 mm por píxel. Utilizando las bandas 656 y 801 obtenidas por esta cámara, se ha calculado el índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). Estas cámaras están configuradas para tomar imágenes sincronizadas con el avance del vehículo, con un intervalo de aproximadamente una imagen por metro, utilizando tiempos de integración de menos de 4 ms para evitar imágenes en movimiento o borrosas.

La cámara hiperespectral proporciona una resolución efectiva de 1288 píxeles espaciales por 1028 bandas espectrales en todo el rango espectral (400 - 1000 nm) que corresponden a una única línea vertical, por lo que es necesario sincronizar la adquisición con el movimiento del vehículo para unir todas las líneas formando las imágenes hiperespectrales de los árboles. La resolución espectral del sistema es de 9 nm y el tiempo de integración de 4 ms. Por su parte, la cámara termográfica proporciona imágenes térmicas con una resolución de 320x240 píxeles, aunque para esta aplicación en movimiento, dado que la frecuencia de adquisición de la cámara utilizada no es muy alta, no han resultado útiles.

Además, el robot incorpora un sensor LiDAR (LMS 111, Sick AG, Reute, Alemania), un receptor GNSS (Hiper SR, Topcon Positioning Group, Tokyo, Japón) y un sensor de medición inercial (IMU) de 9 ejes (BNO055, Bosch Sensortech GmbH, Reutlingen, Alemania) para la geolocalización y corrección de la información escaneada con el LiDAR provocada por las irregularidades del terreno. Estos tres dispositivos se configuraron para muestrear a una frecuencia de 25 Hz. La sincronización entre los datos proporcionados por estos tres equipos y del

sistema de geolocalización con las imágenes se realiza utilizando un código de hora (con resolución de ms) en la que se adquiere cada dato y se almacenan en un archivo para cada fila escaneada.

Las coordenadas LiDAR (originalmente en mm) se han corregido utilizando los datos de la IMU como son los ángulos de inclinación y giro. Posteriormente, se geolocalizaron los puntos utilizando los datos proporcionados por el receptor GNSS que cuenta con corrección en tiempo real (RTK) y una precisión en torno a 3 cm, y se transforman en coordenadas UTM (m). En la Figura 2 se muestra la información proporcionada por el LiDAR en tiempo real de uno de los árboles mientras el vehículo (cuadrado rojo a la derecha) se desplaza en la dirección de la flecha. Uniendo la información de las cuatro caras escaneadas de cada árbol, es posible crear una imagen reconstruida del mismo en 3D. Todo el software se ha desarrollado en MATLAB (Mathworks, Natick, Massachusetts, EE.UU.).

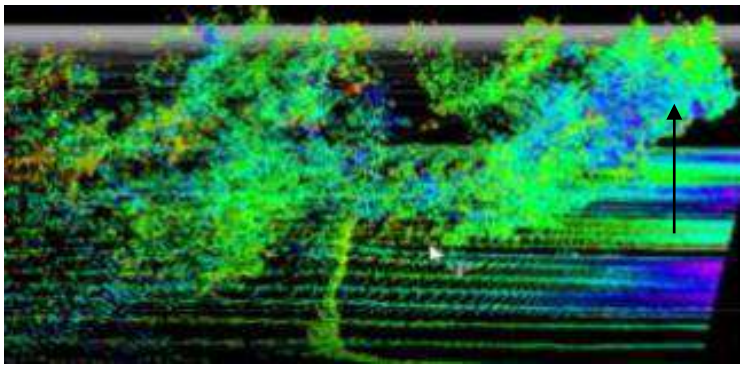


Figura 2. Información on-line proporcionada por el LiDAR

Los ensayos se han realizado en un campo de olivos a disposición del proyecto en la región de Lecce, Apulia (Italia) (Figura 3a). El campo tenía un total de 430 árboles cuyos síntomas visuales fueron anotados de forma individual para cada una de las caras de cada árbol, con un nivel de severidad entre 0 (sin síntomas) y 4 (árbol desecado). Para monitorizar todo el campo, el vehículo siguió un recorrido en dirección norte-sur desde el punto de origen, monitorizando los olivos en el lado izquierdo según avanza el vehículo, para posteriormente hacer el recorrido en sentido contrario y escanear el árbol del otro lado de la fila, como muestran las flechas en la Figura 3b. Una vez terminado el recorrido en dirección norte-sur, se procede a realizar del mismo modo el recorrido en direcciones oeste-este, logrando monitorizar las cuatro caras de cada árbol.

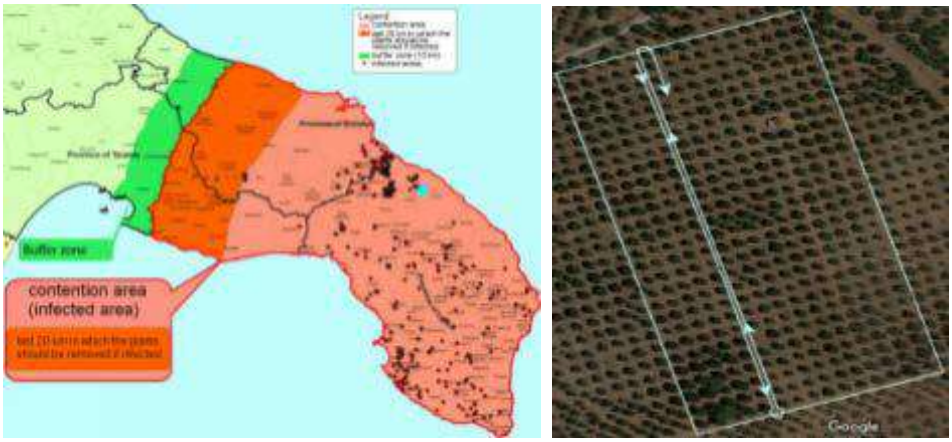


Figura 3. a) Zona infectada en Apulia (Italia); b) Parcela de ensayos en Lecce (Italia)

Después de la reconstrucción 3D, los puntos de cada árbol en el campo se proyectan en la zona UTM como una vista superior del campo. Luego, se extrajo el contorno (calculado como un área convexa) de la vista superior de cada árbol, que se utiliza para calcular el índice de área foliar (LAI), la densidad foliar (LAD) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

3. Resultados y discusión

XF-ROVIM funcionó correctamente durante las pruebas en un campo de olivos relativamente altos, siendo capaz de inspeccionar todo el campo sin interrupciones mientras capturaba datos válidos. En cada ensayo se capturaron alrededor de 35000 imágenes con las cinco cámaras. La unidad de conducción remota resultó ser una herramienta flexible y fácil de usar para mover el robot por todo el campo. Se realizaron algunas pruebas de manejo, que mostraron la posibilidad de rodear cada árbol para una inspección individualizada completa. Sin embargo, se tomó la decisión de inspeccionar filas enteras. Como el control remoto podía programarse para mantener la velocidad y la dirección una vez establecido, no se necesitaba ninguna intervención durante la inspección de las filas. Las baterías duraron más de seis horas de funcionamiento continuo y podrían cambiarse por otro juego en menos de 15 minutos.

Visualmente, la mayoría de los árboles no mostraban síntomas de la enfermedad, probablemente debido al proceso de limpieza llevado a cabo por el propietario, pero algunos otros árboles mostraban síntomas leves a moderados. En total, 174 árboles mostraron algún síntoma, principalmente aquellos en los lados oeste y norte. Los datos recolectados por los sensores se encuentran bajo estudio. Sin embargo, los primeros resultados del análisis automatizado de los índices NDVI y BNDVI de los árboles de las imágenes capturadas (Figura 4) lograron un coeficiente de determinación R^2 en relación con los síntomas observados inferiores a 0,45 en ambos casos, lo que indica que estos índices no son adecuados para este problema. Además, como se ha demostrado en [3], otros índices vegetativos relacionados con diferentes pigmentos que involucran longitudes de onda en el rango VIS / NIR (400–1000 nm) pueden ofrecer resultados más prometedores en la detección de la infección por *Xf* en olivos.

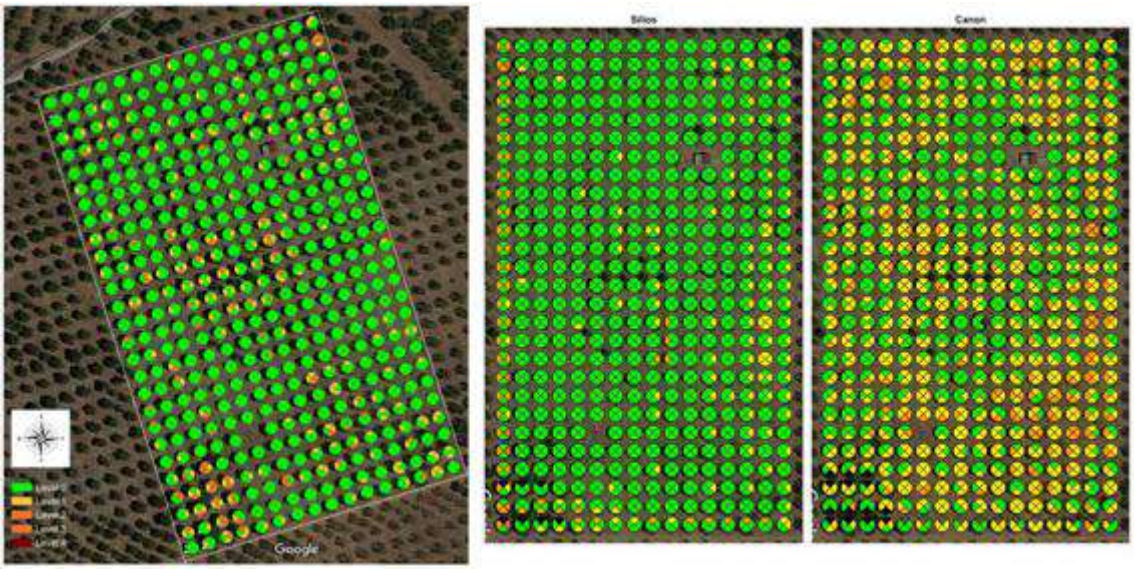


Figura 4. Severidad observada visualmente en el campo (izquierda), y predicha por los índices BNDVI (centro) y NDVI (derecha)

4. Conclusiones

XF-ROVIM ha demostrado ser una herramienta flexible, económica, fácil de transportar y capaz de transportar equipos de detección remota o proximal para la inspección de cultivos de árboles. Puede inspeccionar un campo de 4 ha sin interrupciones en menos de seis horas, lo que permite la captura y almacenamiento de datos de campo de alta resolución que se geolocalizan y sincronizan con su avance.

Se ha diseñado un sistema de control remoto para conducirlo a través del campo, lo que permite que la velocidad y la dirección se preajusten automáticamente. Permite la instalación de diferentes cámaras de color, térmicas, multiespectrales e hiperespectrales, así como un escáner LiDAR y un dispositivo de geolocalización para georreferenciar todos los datos adquiridos. El diseño permite elevar las cámaras hasta 300 cm para adaptarlas a la altura de diferentes árboles. El sistema se ha probado en un campo de olivos potencialmente infectados por *Xf* ubicado en un área de Italia. Las primeras pruebas de campo se realizaron satisfactoriamente y tanto el robot como el equipo funcionaron correctamente sin ningún problema durante las pruebas. Los datos adquiridos han permitido que las imágenes de todos los árboles en el campo se recopilen en los cuatro lados, además de la creación de mapas de campo que muestran la estructura 3D de los árboles, así como diferentes índices vegetativos.

5. Agradecimientos

Este trabajo se ha financiado parcialmente por la UE a través del proyecto H2020 Nº *727987 Xylella Fastidiosa* Active Containment Through a Multidisciplinary-Oriented Research Strategy (XF-ACTORS).

Referencias

1. Martinelli F., Scalenghe R., Davino S., Panno S., Scuderi G., Ruisi P., Villa P., Stroppiana D., Boschetti M., Goulart LR., Davis CE., Dandekar AM. Advanced methods of plant disease detection. A review. Agronomy for Sustainable Development. 2015, 35 (1-25)
2. Olmo, D.; Nieto, A.; Adrover, F.; Urbano, A.; Beidas, O.; Juan, A.; Marco-Noales, E.; López, M. M.; Montes Borrego, Miguel; Navas Cortés, Juan Antonio; Landa, Blanca B. First Detection *of Xylella fastidiosa* Infecting Cherry (Prunus avium) and Polygala myrtifolia Plants, in Mallorca Island, Spain, Plant Disease 2017, 101, 1820. DOI: 10.1094/PDIS-04-17-0590-PDN
3. Vicent, A.; Blasco, J. When prevention fails. Towards more efficient strategies for plant disease eradication. New Phytologist, 2017, 214, 905-908.
4. Zarco-Tejada, P.J.; Camino, C.; Beck, P.S.A.; Calderon, R.; Hornero, A.; Hernández-Clemente, R.; Kattenborn, T.; Montes-Borrego, M.; Susca, L.; Morelli, M.; Gonzalez-Dugo, V.; North, P.R.J.; Landa, B.B.; Boscia, D.; Saponari, M.; Navas-Cortes, J.A. Pre-visual symptoms of Xylella fastidiosa infection revealed in spectral plant-trait alterations, Nature Plants, 2018, 4,432-439
5. Rey B, Aleixos N, Cubero S, Blasco J (2019) XF-ROVIM. A field robot to detect olive trees infected by Xylella fastidiosa using proximal sensing. Remote Sensing. Special Issue Advances in Remote Sensing Applications for the Detection of Biological Invasions, 11(3), 221. DOI: 10.3390/rs11030221. Open Access.

Área temática:

Tecnología de la producción animal / Acuicultura



X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Evolución de la concentración de NH_3 en función de la temperatura de consigna en alojamientos porcinos de transición

M.R. Rodríguez[1], E. Losada[2], R. Besteiro[1], T. Arango[1], M.D. Fernández[1]

[1] Departamento de Enxeñaría Agroforestal, Universidad de Santiago de Compostela; manuelramiro.rodriguez@usc.es
[2] Xunta de Galicia. Consellería de Educación e Ordenación Universitaria

Resumen: Las explotaciones porcinas de transición requieren unas condiciones ambientales muy estrictas y cambiantes, controladas fundamentalmente mediante la modificación de la temperatura de consigna (TS). En la actualidad, la concentración de NH_3 no es una variable ambiental comúnmente utilizada en el control, aunque es particularmente relevante ya que su repercusión en la calidad del aire afecta al medioambiente, al bienestar animal y a la salud de los trabajadores. Este trabajo tiene como objetivo determinar la influencia de la TS sobre la evolución diaria de la concentración de NH_3 en la zona animal. Se llevó a cabo un ensayo experimental, en una granja convencional, con la estrategia de control ambiental basada en la temperatura. La concentración de NH_3 en la zona animal depende de la TS ya que controla el funcionamiento del sistema de ventilación, el cual elimina eficazmente el NH_3 del alojamiento debido a su volatilidad. Las máximas concentraciones de NH_3 se producen durante la noche y las mínimas durante el día, respondiendo a un ajuste sinusoidal, con valores de R^2 entre 0.71 y 0.93. Una disminución en TS origina un retraso de la onda y una disminución de su amplitud. Estas ecuaciones permitirán estimar las concentraciones de NH_3, pudiendo ser implementadas en controladores convencionales para el control ambiental en tiempo real, lo que proporcionará una mejora ambiental, del bienestar animal y de la productividad.

Palabras clave: Variación diaria, patrón sinusoidal, control ambiental, zona animal

1. Introducción

La liberación de amoníaco (NH_3) en los alojamientos para ganado se origina a partir del contenido de nitrógeno en la orina y las heces depositadas en las fosas o en la superficie del alojamiento, con o sin material de cama [6]. Este gas, junto con el sulfuro de hidrógeno (H_2S) es uno de los gases contaminantes más importantes en la producción porcina actual [8, 34, 45] por su relación directa con el bienestar de los animales y los trabajadores [26, 34, 45, 46]. Numerosos estudios se han llevado a cabo sobre los efectos de la concentración de amoníaco en el comportamiento, la salud y la productividad de los animales [11, 13, 14, 16, 27, 29, 40, 42]. Generalmente, los efectos negativos de las altas concentraciones de NH_3 sobre el estado fisiológico de los cerdos en términos de crecimiento y de salud son reconocidos, pero los resultados experimentales no han sido consistentes. Así, se obtuvieron distintas conclusiones entre los estudios de [16] y [11] o entre los de [27] y [40].

Sin embargo, fueron obtenidas concentraciones de NH_3 muy superiores a las habituales en alojamientos, comprobando disminuciones en el crecimiento del cerdo entre el 12 y el 30% [14]. Por otra parte, se concluyó que en cerdos entre 20 y 85 kg de p.v. debería haber poca

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3307

preocupación, en términos de rendimiento, para concentraciones dentro de los límites legales actuales de la Unión Europea, aunque, cuando éstas superaban los 20 ppm, podrían tener una influencia adversa en el bienestar [27]. Asimismo, durante la fase de transición, otros autores no encontraron efectos directos sobre el crecimiento y la eficiencia de conversión de los alimentos [42], ni sobre la salud respiratoria [13].

Desde el punto de vista ambiental, el mayor impacto de la producción animal son los olores y el NH_3 [8, 21]. Las emisiones de NH_3 a la atmósfera y su deposición en el ambiente juegan un papel crucial en la acidificación y eutrofización de los ecosistemas y contribuye a las emisiones indirectas de óxido nitroso [35]. Los efectos adversos, como la eutrofización y acidificación de los ecosistemas [24], van a provocar la reducción de la biodiversidad [12], constituyendo un importante precursor de la formación de partículas finas en la atmósfera [4, 5, 19]. En las proximidades de las granjas de cerdos se observaron concentraciones ambientales importantes [15, 22, 44].

El NH_3 es importante para determinar la calidad del aire en el alojamiento y, en consecuencia, contribuye de forma importante al bienestar animal y a la duración de los equipos e instalaciones [43], por lo que constituye una preocupación en el control ambiental. La mayoría de los países europeos han enfatizado la importancia de la reducción del amoníaco y del olor para limitar su impacto negativo en el medio ambiente y en la sociedad local [34].

Las concentraciones de NH_3 en alojamientos porcinos pueden variar mucho y se relacionan, entre otros factores, con la edad, actividad y densidad de los animales, la temperatura exterior, el control de la ventilación, la hora del día y la época del año [26, 36, 41]. Aunque el rango típico de concentraciones de NH_3 en los alojamientos para cerdos de engorde es de 0 a 40 ppm [18], numerosos autores obtuvieron valores promedio mucho más bajos, entre 12.10 y 18.20 ppm [20], 6.50 ppm [34] e incluso entre 2.10 y 3.40 ppm en el verano y entre 4.20 y 4.30 ppm en el invierno, en salas experimentales con sistema de fosa parcialmente ventilada [47].

Debido a las reducciones en las tasas de ventilación, como consecuencia del incremento de la temperatura exterior, se observaron variaciones estacionales en las concentraciones de NH_3, con valores, en general, más altos en invierno que en verano [26, 31, 44, 47]. Sin embargo, otros autores obtuvieron resultados opuestos, destacando que las circunstancias que aumentan las tasas de generación tienen un mayor efecto sobre las concentraciones que los factores que reducen las tasas de concentración [3]. Justificados por idéntico motivo, la reducción de las tasas de ventilación, numerosos autores informaron de mayores concentraciones de NH_3 durante la noche o a primeras horas del día y entre las 16:00 y las 20:00 h debido a la acumulación de purín en la fosa [26, 41]. La concentración de NH_3 no mostró un patrón diario obvio, comprobando que los picos más bajos tendieron a ser durante la mitad de la noche [2]. Este estudio demostró, contrariamente a la creencia general de la estrecha asociación con las tasas de ventilación, que los niveles de NH_3 están más estrechamente asociados con los niveles de evaporación, los que se encuentran en el máximo a temperaturas más altas. Los requerimientos térmicos en la fase de transición pueden llegar a descender más de 10ºC a lo largo del ciclo [23, 25, 32], generalmente controlados por sistemas convencionales constituidos por instalaciones de calefacción y ventilación reguladas por uno o más sensores de temperatura [39], sin control directo de otros parámetros como la humedad relativa u otros contaminantes [28]. En este trabajo se pretende determinar los patrones de variación diaria de la concentración de NH_3 en la zona ocupada por los animales en edificios de transición y su variación con la temperatura de consigna establecida en el control de los sistemas de climatización. Con ello se persigue que los sistemas convencionales de control, con la temperatura como única variable, puedan considerar la concentración de NH_3 aplicando un algoritmo sencillo basado en variables propias del sistema de climatización. Como resultado, los sistemas de control ambiental contribuirían a la

disminución del impacto ambiental de la producción ganadera [38] al tiempo que proporcionarían un estándar más alto de bienestar animal [17] manteniendo la productividad.

Esto profundizará en los resultados de estudios anteriores, donde se investigaron las concentraciones y emisiones de NH_3, en alojamientos de distintas especies, y sus factores influyentes para verificar los niveles de contaminación y diseñar estrategias de reducción [7, 9, 10, 30, 33, 37].

2. Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en una explotación convencional, con una capacidad autorizada de 4895 cerdas para la producción de lechones de 20 kg de p.v. La granja está situada en Abegondo, A Coruña (43º10'12''N, 8º19'30''W), donde las temperaturas son suaves y las heladas infrecuentes (temperatura media anual de 13.20ºC, humedad relativa media anual del 86.67% y 17 días de helada en el año 2013, Meteogalicia). La prueba experimental se realizó en una sala de transición, donde los lechones entran con un peso medio de 6 kg y salen con 20 kg de p.v. Las dimensiones interiores de la sala, con suelo de rejilla de polipropileno, son de 11.82 m de largo por 5.86 m de ancho y una altura entre 2.25 y 2.50 m. La sala dispone de seis corrales, a ambos lados del pasillo central, y alberga un máximo de 300 lechones, a razón de 50 lechones por corral. La fosa de purín estaba vacía al principio del ciclo y las operaciones de manejo del mismo se limitaron a su extracción al final del ciclo.

El sistema de climatización fue el propio de la explotación. Está constituido por las instalaciones de ventilación y calefacción por suelo radiante de agua caliente. El control ambiental del alojamiento fue mediante sonda de temperatura sin alteración con respecto a las condiciones de la explotación. El sistema de ventilación está compuesto por un extractor helicoidal, de 500 mm de diámetro, con las siguientes especificaciones: 230 V AC, 50 Hz, 1330 rpm, 480 W de potencia, cos φ = 0.96, 8746 $m^3\ h^{-1}$. El sistema de calefacción por suelo radiante está compuesto por dos placas para agua cliente, de poliéster, de 1.20 x 0.40 m y una capacidad de 2.90 l cada una. El rango de temperaturas del fluido calefactor osciló entre 37 y 41ºC. Se realizó una regulación manual del caudal de entrada del fluido calefactor en las fechas de modificación de las temperaturas de consigna (TS) para la ventilación. Las TS definidas para el control ambiental estuvieron entre 26 y 23ºC, disminuyendo con la edad y el peso de los animales. El aire fresco entraba a la sala a través de dos ventanas con deflectores de aire en la pared opuesta al ventilador, a ambos lados de la puerta de entrada a la sala.

Las variables ambientales medidas en el interior del alojamiento y los sensores empleados fueron:

- Concentración de NH_3 en la zona animal (C_{NH_3}): detector electroquímico, con rango de medición de 0 a 100 ppm, 5% de precisión, compensación de temperatura y autocero calibrado por el fabricante antes de su instalación, modelo ST – IAM IP66 con protección contra salpicaduras (Murco Ltd, Dublín, Irlanda), implementado con filtro de partículas (malla de 0.168 mm de luz e hilo de 0.110 mm).
- Humedad relativa (RH_{az}) y temperatura (T_{az}) en la zona animal: sensor de temperatura y humedad relativa, con rangos de medición de -40 a 75ºC, precisión +/- 0.21°C de 0ºC a 50ºC, y de 0% - 100%, precisión de ± 2.50% de 10 a 90% (sensor modelo S-THB-M008, Onset Computer Corporation, Bourne, MA, EE UU).
- Temperatura del aire en el pasillo exterior de la sala (T_{ac}): sensores de coeficiente de temperatura negativo, modelo 107, con rango de medición de -35 a 50ºC y error de intercambiabilidad del termistor <± 0.20°C de 0°C a 50°C (Campbell Scientific Ltd., Loughborough, Reino Unido).

Los sensores utilizados para medir la humedad relativa (RH_{az}), la concentración de NH_3 (C_{NH_3}) y la temperatura en la zona animal (T_{az}) se instalaron en un corral central, a 0.40 m de altura, en el interior de una estructura metálica que protegía los equipos contra las agresiones

de los animales (Figura 1). El sensor utilizado para medir la temperatura del aire en el pasillo exterior (T_{ac}) se colocó en la entrada de aire a la sala, 2.40 m de altura (Figura 1). Esta temperatura fue utilizada para caracterizar el clima exterior, junto con la temperatura exterior (T_{ao}), obtenida con datos proporcionados por la red pública de estaciones meteorológicas, Meteogalicia, estación de Abegondo, A Coruña (43º24'14''N, 8º26'22''W; altitud: 94 m).

Tabla 1. Temperaturas de consigna para el control ambiental y periodos de medición

	Temperatura de consigna (TS) (ºC)			
	26	**25**	**24**	**23**
Fecha de inicio	2 Mar.	8 Mar.	19 Mar.	27 Mar.
Fecha de finalización	6 Mar.	17 Mar.	25 Mar.	7 Apr.
Nº de días	5	10	7	12

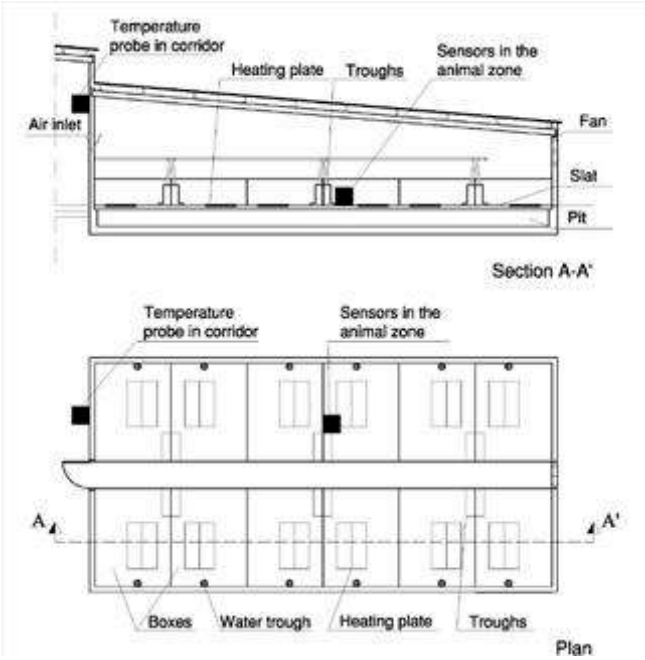


Figura 1. Localización de los sensores empleados para la medición de las distintas variables.

Las temperaturas medias medidas con la sonda de temperatura 107 se almacenaron en un colector de datos CR-10X (Campbell Scientific Ltd., Loughborough, Reino Unido). Las C_{NH_3}, RH_{az}, T_{az} y la tensión y la intensidad proporcionada al ventilador se almacenaron en un colector de datos HOBO H – 22 (Onset Computer Corporation, Bourne, MA, EE UU). Todas las variables se muestrearon a intervalos de 1 segundo y se almacenó su media cada 600 s.

2.1. Análisis matemático

Para cada temperatura de consigna, se realizó la media de las concentraciones de NH_3, cada diez minutos, obteniendo una evolución diaria media, la cual se ajustó mediante la siguiente expresión:

$$C_{NH_3}(t) = Asin(\omega t + \varphi) + B \qquad (3)$$

donde:

C_{NH_3}: concentración NH_3 (ppm)

A: amplitud (ppm)

Ω: velocidad angular (rad min^{-1})

Φ: ángulo de fase inicial (rad)

B: variable independiente o variación vertical (ppm)

Para ajustar la serie de valores de concentración de NH_3 a la ecuación 3, los valores característicos de A, ω, φ y B se obtuvieron de las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{C_{NH_3MAX} - C_{NH_3MIN}}{2} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 4.36E-3 \quad (5)$$

$$\varphi = \omega t_0 \quad (6)$$

$$B = C_{NH_3AVE} = \frac{\sum_1^n C_{NH_3 i}}{n} \quad (7)$$

donde:

C_{NH_3MAX}: concentración máxima de NH_3 en la zona ocupada por los animales (ppm)

C_{NH_3MIN}: concentración mínima de NH_3 en la zona ocupada por los animales (ppm)

T: período de la onda, 1440 min

t_0: tiempo durante el cual la onda toma el valor promedio (min)

B=C_{NH_3AVE}: concentración media diaria de NH_3 en la zona ocupada por animales (ppm)

El tiempo, t_0, se considera positivo si la onda está adelantada o negativo si la onda se retrasa. La hora aproximada se obtuvo a partir de los datos experimentales, a través de los cuales fue maximizado el coeficiente de determinación R^2 para el ajuste senoidal de la función.

La bondad de ajuste se define por el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y la desviación estándar del error (SDE), en ppm. Las expresiones de RMSE y SDE se pueden escribir como:

$$RMSE = \left(\frac{1}{N}\sum_1^N \left(C_{NH_3C} - C_{NH_3M}\right)^2\right)^{0.5} \quad (8)$$

$$SDE = \left[\frac{1}{N}\left(\sum_1^N \left(C_{NH_3C} - C_{NH_3M}\right)^2 - \left(\sum_1^N \left(C_{NH_3C} - C_{NH_3M}\right)\right)^2\right)\right]^{0.5} \quad (9)$$

donde:

N: número de observaciones

C_{NH_3C}: concentración calculada de NH_3 (ppm)

C_{NH_3M}: concentración medida de NH_3 (ppm)

3. Resultados

Se ha analizado la evolución diaria de la concentración de NH_3 en la zona animal en un alojamiento de transición, donde los animales permanecieron 44 días. Durante este tiempo los animales pasaron de un peso medio de 5.36 a 20.34 kg de p.v. Los requisitos térmicos en esta fase son muy estrictos y cambiantes, por lo que la temperatura de consigna se ha modificado siguiendo el proceso productivo habitual. Los días en los que se modificó esta temperatura no se tuvieron en cuenta en el análisis, ya que las instalaciones de calefacción y ventilación estuvieron controladas por dos temperaturas distintas.

La menor densidad del NH_3 con respecto del aire lo sitúa en las zonas más altas de la sala, siendo más fácilmente extraíble, al contrario que otros gases, como el CO_2, que se acumulan en las capas más bajas. Por tanto, la evolución de la concentración de NH_3 se ve muy afectada por la ventilación, que a su vez va a estar condicionada por las temperaturas de consigna definidas, las cuales oscilaron entre 26 y 23ºC, disminuyendo con la edad y el peso de los animales.

Los días analizados se agruparon según la temperatura de consigna establecida (tabla 2). En general, las concentraciones medias de NH_3 disminuyeron con esta temperatura y oscilaron entre 3.79 y 0.30 ppm para 26 y 23ºC respectivamente. Sin embargo, cuando la temperatura de consigna fue de 25ºC, la concentración media de NH_3 fue de 5.24 ppm. Además, se puede

comprobar una fuerte reducción de las concentraciones de NH_3 cuando la temperatura de consigna baja a 24 y 23ºC.

Tabla 2. Valores estadísticos para variables ambientales a diferentes temperaturas de consigna

TS (ºC)	C_{NH3} (ppm)				RH_{az} (%)	T_{az} (ºC)	T_{ac} (ºC)	T_{ao} (ºC)
	AVE	SD	MAX	MIN	AVE	AVE	AVE	AVE
26	3.79	2.48	6.84	1.38	58	28.07	14.51	11.74
25	5.24	2.55	7.82	2.45	57	27.88	10.74	8.33
24	1.00	0.78	2.00	0.25	59	26.56	10.97	10.69
23	0.30	0.48	0.72	0.05	61	24.56	11.05	10.88

donde:

TS: temperatura de consigna

C_{NH3}: concentración de NH_3

RH_{az}: humedad relativa en la zona animal

T_{az}: temperatura en la zona animal

T_{ac}: temperatura en el pasillo exterior de la sala

T_{ao}: temperatura ambiente exterior

AVE: media

SD: desviación estándar

MAX: máximo

MIN: mínimo

Por otra parte, la concentración media de NH_3 mostró un comportamiento inverso a la humedad relativa, para todas las temperaturas que se ajusta por mínimos cuadrados a una función potencial (Figura 2).

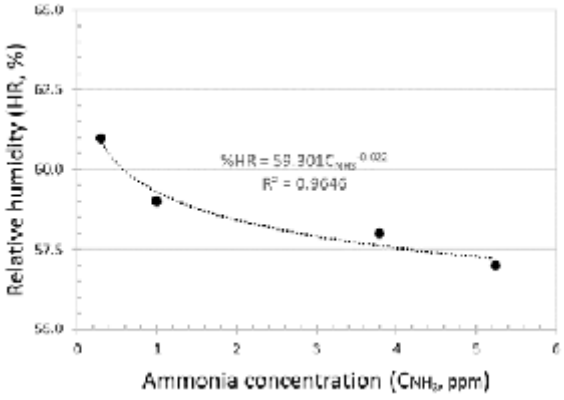


Figura 2. Ajuste exponencial de la concentración de NH3 y la HR en la zona animal.

Vista la evolución diaria de la concentración de NH_3 (Figura 3) se procedió a su ajuste a una función sinusoidal. Para ello se determinaron la amplitud (A), el ángulo de fase inicial (φ) y el valor medio (B) de la onda sinusoidal. La tabla 3 resume los valores obtenidos para cada temperatura de consigna (Figura 4).

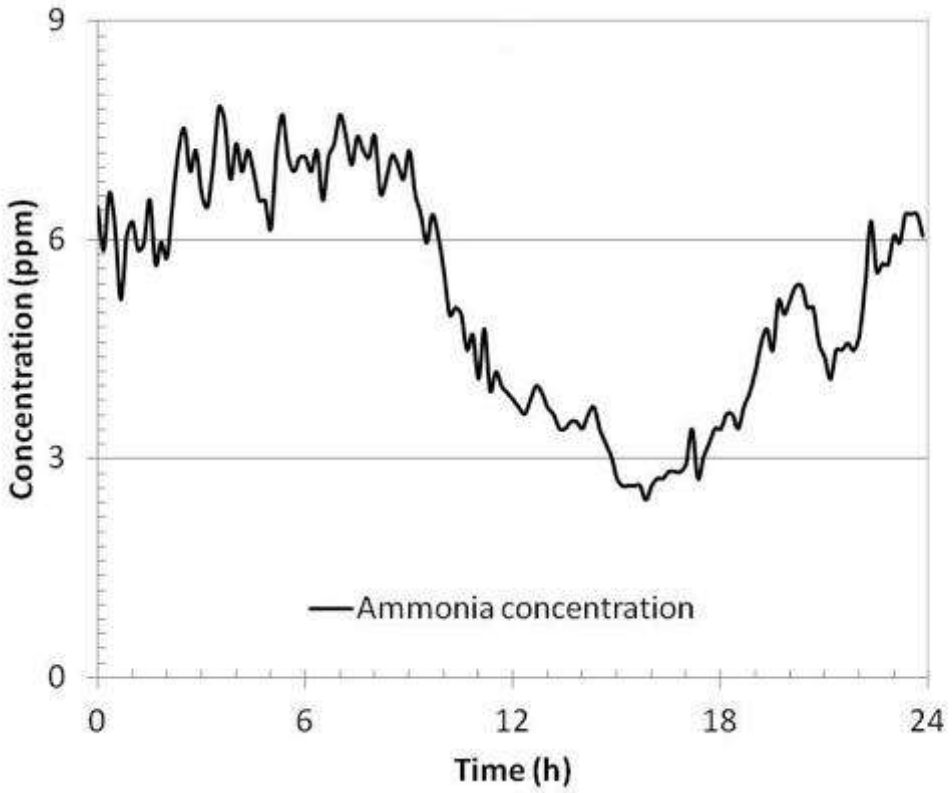


Figura 3. Evolución diaria de la concentración media de NH_3 en la zona animal para una temperatura de consigna de 25ºC.

Tabla 3. Valores característicos de la curva sinusoidal a diferentes temperaturas de consigna

TS (ºC)	A (ppm)	B (ppm)	φ (rad)	Hora de inicio da onda
26	2.73	3.79	0.26	23:00 h
25	2.69	5.24	0.44	22:20 h
24	0.87	1.00	-0.17	00:40 h
23	0.33	0.30	-0.31	01:10 h

donde:

TS: temperatura de consigna

A: amplitud

Φ: ángulo de fase inicial

B: variable independiente o variación vertical obtenido como concentración media diaria de NH_3 en la zona animal.

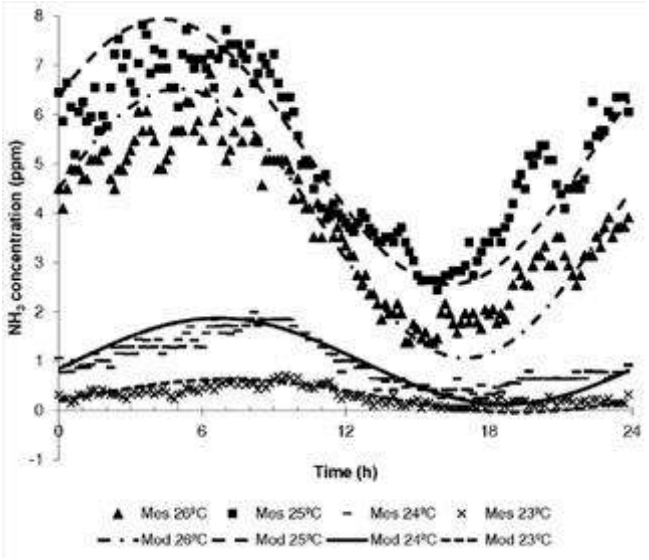


Figura 4. Ajuste sinusoidal modelizado (Mod) y medido (Mes) para la evolución diaria de la concentración de NH_3 a diferentes temperaturas de consigna.

La amplitud de la función sinusoidal disminuyó con la temperatura de consigna debido a los niveles más bajos de concentración de NH_3. Sin embargo, casi no hubo diferencia entre los valores obtenidos para las temperaturas de consigna de 26 y 25ºC, en torno a 2.70 ppm, mientras que la amplitud disminuyó drásticamente a temperaturas de consigna más bajas, alcanzando 0.33 ppm para la temperatura de 23ºC. Además, la temperatura en la zona animal fue superior a la temperatura de consigna, en todos los casos, con valores superiores a los 1.50ºC (Tabla 2), lo que muestra la inercia térmica de la instalación de calefacción.

El ángulo de fase inicial fue positivo para las temperaturas de consigna de 26 y 25ºC y negativo para 24 y 23ºC. Para la temperatura de consigna de 26 y 25ºC, la concentración inicial de NH_3 fue superior a su valor promedio en un 19% y 22%, respectivamente. Para las temperaturas de consigna de 24 y 23ºC, la concentración inicial fue un 15 y un 34% menor que la concentración media, respectivamente.

Los estadísticos resumidos en la tabla 4 muestran la bondad del ajuste del patrón sinusoidal a los datos de variación diaria de la concentración de NH_3 en edificios de transición en función de la temperatura de consigna.

Tabla 4. Ajuste de la evolución diaria de la concentración de NH3 a una curva sinusoidal, a diferentes temperaturas de consigna

TS (ºC)	R^2	SDE (ppm)	RMSE (ppm)	RME (%)
26	0.93	0.64	0.64	-5
25	0.88	0.70	0.70	-1
24	0.84	0.26	0.26	-6
23	0.71	0.13	0.13	-9

donde:

TS: temperatura de consigna

SDE: desviación estándar del error

RMSE: error cuadrático medio

RME: error medio relativo.

El grado de ajuste de los datos a una función sinusoidal se caracterizó por el coeficiente de determinación, R^2, que mostró valores razonables, en el rango de 0.71 a 0.93 para las temperaturas de consigna de 23 y 26ºC, respectivamente. Los valores de R^2 aumentaron con la TS, lo que sugiere un mejor ajuste y mayores variaciones para altas concentraciones de NH_3. Estos resultados fueron respaldados por otros estadísticos, entre las cuales la desviación estándar del error (SDE) osciló entre 0.70 y 0.13. Los errores medios relativos (RME) están en el rango de -1 a -9%.

4. Discusión

La temperatura ambiental recomendada para lechones destetados alojados en corrales con el suelo de enrejado plástico varía de 30–32ºC para 5 kg de peso vivo a 19–25ºC para 20 kg de peso vivo [25, 32]. Numerosos autores [26, 41] relacionaron el efecto de la temperatura de consigna sobre la concentración de NH_3 por su influencia en la ventilación y, en consecuencia, en la eliminación de NH_3 del edificio. Durante los primeros días de la fase de transición, los cuales se corresponden con el período crítico, con una duración aproximada de dos semanas [23], con temperaturas de consigna de 26 y 25ºC, la ventilación fue fuertemente restringida debido a los estrictos requisitos térmicos para el crecimiento de los lechones y su susceptibilidad a las corrientes de aire. Es en este período cuando se producen las mayores concentraciones de NH_3. Durante el período poscrítico, donde ya se establece la ingesta regular de alimentos [23], con temperaturas de consigna de 24 y 23ºC y en consecuencia menores restricciones en la ventilación, la concentración de NH_3 disminuye considerablemente, pasando de valores medios de 5.24 a 1.00 ppm para 25 y 24ºC de temperatura de consigna respectivamente. Estas bajadas de la temperatura de consigna, de 25 a 23ºC supuso una disminución en la temperatura media en el alojamiento 1.32 y 2.00ºC, respectivamente, sin que las temperaturas exterior y del pasillo muestren grandes diferencias (2.55 y 0.31ºC respectivamente). Además, como se muestra en la Tabla 2, la temperatura en la zona ocupada por los animales (T_{az}) fue siempre superior a la temperatura de consigna, variando entre 2.07 y 1.56ºC para temperaturas de consiga de 26 y 23ºC respectivamente, lo que muestra la inercia térmica de la instalación de calefacción. Es decir, se observa una mejor respuesta de la instalación de control ambiental con temperaturas de consigna más bajas.

Por otra parte, la concentración media de NH_3 también mostró un comportamiento inverso a la humedad relativa, en consonancia con [2], donde se demostró que los niveles de NH_3 están más estrechamente asociados con los niveles de evaporación que a la tasa de ventilación, los cuales se encuentran en el máximo a temperaturas más altas.

Numerosos autores midieron concentraciones superiores a las presentadas en este trabajo, aunque en cerdos de mayor edad. Para cerdos, con un peso inicial de 36.80 kg, se midieron concentraciones medias de 0.83 ± 0.68 ppm [41]. Con anterioridad, se presentaron valores promedio de NH_3 entre 12.10 y 18.20 ppm en el norte de Europa [20]. Otros autores obtuvieron una concentración promedio de 6.50 ppm a partir de la medición en las etapas iniciales y medias del período de engorde [33]. Por otra parte, en salas experimentales con sistema de fosa parcialmente ventilada, se obtuvieron valores mucho más bajos, de 2.10 a 3.40 ppm en verano y de 4.20 a 4.30 ppm en el invierno [47]. Un intervalo entre 1.80 y 13.90 ppm fue medido en diferentes alojamientos de ganado porcino [2]. Todos estos valores fueron superiores a los obtenidos durante el último período analizado en este documento, donde los animales, con un peso aproximado de 20 kg, se acercaron más a las condiciones para los cerdos de engorde, con valores de 0.30 ± 0.48 ppm para una temperatura de consigna de 23ºC.

La evolución diaria de la concentración de NH_3 difirió considerablemente del patrón observado en las condiciones de laboratorio para cerdos en engorde, con ventilación mediante sistemas de presión negativa [41]. En ese trabajo las concentraciones de NH_3 eran más altas antes de las 07:00 h, luego disminuían por la eliminación diaria de estiércol por la mañana,

aumentaban nuevamente siguiendo el incremento de temperatura hasta que se alcanzaba el valor máximo entre las 13:00 h y las 14:00 h, y finalmente disminuían con la temperatura. Por lo tanto, y al contrario que nuestro trabajo, sus resultados muestran una evolución diaria de la concentración de amoníaco paralela a la temperatura, con la única excepción de la retirada del purín. Dichas diferencias pueden deberse principalmente a las diferencias en los sistemas de ventilación y limpieza. En la prueba experimental realizada, el sistema de ventilación forzada eliminó efectivamente el NH_3 al mediodía, evitando así una tendencia de concentración de NH_3 paralela a la tendencia de la temperatura del aire. Además, la eliminación diaria de estiércol afectó bruscamente la evolución diaria de la concentración de NH_3 [41], que no fue el caso de nuestro estudio.

Los resultados de nuestra prueba experimental sugieren una respuesta sinusoidal para la evolución diaria de la concentración de NH_3, que está de acuerdo con los resultados obtenidos para conejos [9]. De manera similar, encontramos una respuesta sinusoidal para la concentración diaria de NH_3, la cual estaba directamente relacionada con la emisión de olores y otros contaminantes de los edificios de cerdos de engorde [36]. Además, la actividad diaria de los animales se incorporó como una ecuación sinusoidal para predecir la emisión de NH_3 de los edificios para ganado vacuno de leche con ventilación natural [33], quienes encontraron que, la inclusión del seno y el coseno de las variables circulares, como las horas del día, los días del año y la dirección del viento, mejoró la naturaleza dinámica de los modelos utilizados para predecir la emisión de NH_3. Además, se encontraron patrones senoidales claros para la emisión diaria de NH_3 para pollos de engorde por [10].

La evolución diaria de la concentración de NH_3 en los edificios de destete mostró un patrón similar a la evolución encontrada en las granjas de conejos [9], con valores máximos por la noche cuando las tasas de ventilación eran mínimas y valores mínimos durante el día cuando las tasas de ventilación máximas. Por lo tanto, la respuesta sinusoidal estuvo fuertemente condicionada por las tasas de ventilación dentro del edificio, que fueron controladas por la temperatura interior. Este patrón afectó a la emisión de NH_3, que siguió la tendencia opuesta a la concentración de NH_3 y aumentó al incrementarse las tasas de ventilación. Como resultado, la emisión de NH_3 fue mayor durante el día [10, 33].

En general, una disminución en la temperatura de consigna causó una disminución en la amplitud de la función sinusoidal modelada y un retraso en la onda. Sin embargo, casi no hubo diferencia de amplitud en el ajuste para las temperaturas de 26 y 25ºC, en torno a 2.70 ppm. Sin embargo, la amplitud disminuyó bruscamente a temperaturas de consigna más bajas (0.33 ppm a 23ºC). Esto está en consonancia con el hecho de que las altas temperaturas, junto con elevados pH en la cama, conducen a considerables emisiones de NH_3 [1].

En base a esto, y teniendo en cuenta la inercia térmica de la instalación de calefacción y que las temperaturas en la zona animal son superiores a las establecidas como consigna, deben de establecerse temperaturas para el control ambiental inferiores a las temperaturas deseadas en la zona animal. Esta actuación va a tener dos efectos favorables, por una parte la mejora de la eficiencia térmica de la instalación de calefacción y, por otra, una menor concentración de NH_3 como consecuencia de las temperaturas ambientales más bajas.

La SDE fue el componente principal del error, porque el sesgo tuvo un resultado nulo debido a que la media de los datos experimentales coincide con la media de la curva senoidal obtenida en un período (1440 min). Entonces, el RMSE igualó el valor de la SDE. La onda sinusoidal para la concentración de NH_3 en granjas porcinas proporciona un patrón fiable que podría implementarse para su estimación en tiempo real e incluirse como un parámetro en las estrategias de control. Esto es particularmente relevante porque la concentración de NH_3 está directamente relacionada con la temperatura de consigna, que es el elemento más importante del control del clima.

5. Conclusiones

Las siguientes conclusiones pueden ser extraídas del análisis de los resultados de la prueba experimental realizada en un edificio de destete con control de los sistemas de calefacción y ventilación basado en la temperatura:

1.- La concentración de NH_3 en la zona animal varió con la temperatura de consigna establecida para el sistema de climatización entre 5.24 y 0.30 ppm. En período nocturno, con las temperaturas exteriores más bajas, la tasa de ventilación es más reducida, lo que da lugar a incrementos en la concentración de NH_3. El aumento de la temperatura exterior durante el día aumenta la tasa de ventilación y por tanto la extracción del gas.

2.- La onda sinusoidal diaria para la concentración de NH_3 proporciona un patrón fiable para cada temperatura de consigna, con valores de R^2 entre 0.93 y 0.71. La amplitud de la onda disminuye y, en general, la onda sinusoidal se retrasa con la disminución de la temperatura de consigna.

3.- El uso de ecuaciones sinusoidales para estimar la concentración de NH_3 puede ser de interés para los ganaderos, en la medida en que proporcionan información de los niveles del gas. Debido a que la simplicidad de la ecuación permite su implementación en muchos controladores convencionales, las ecuaciones sinusoidales en función de la temperatura de consigna podrían ser de gran utilidad para el control ambiental en tiempo real, lo que mejoraría considerablemente el bienestar animal.

4.- Dado que las concentraciones de NH3 se reducen con temperaturas más bajas, y teniendo en cuenta la inercia térmica de la instalación de calefacción, podrían establecerse temperaturas de consigna inferiores a las temperaturas deseadas en la zona animal, con la consecuente reducción de la concentración de NH_3 y mejora de la eficiencia energética de la granja.

6. Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado por la Xunta de Galicia y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), a través del proyecto de investigación ***Estrategias de control y automatización para la eficiencia energética y productiva en explotaciones porcinas de destete***, perteneciente a los programas sectoriales de investigación aplicada, PEME I+D Suma del Plan Gallego de Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica, en el marco del programa operativo FEDER Galicia 2007-2013.

Referencias

1. Andersson M. Performance of bedding materials in affecting ammonia emissions from pig manure. Journal of Agricultural Engineering Research. 1996, 65(3), (213 - 222).
2. Banhazi T.M. Seasonal, diurnal and spatial variations of environmental variables in Australian livestock buildings. Australian Journal of Multi-disciplinary Engineering. 2013, 10(1), (60 - 69).
3. Banhazi T., Seedorf J., Rutley D., Pitchford W. Identification of risk factors for suboptimal house conditions in Australian Piggeries: Part 3. Environmental Parameters Journal of Agricultural Safety and Health. 2008, 14(1), (41 - 52).
4. Backes A., Aulinger A., Bieser J., Matthias V., Quante M. Ammonia emissions in Europe, part I: Development of a dynamical ammonia emission inventory. Atmospheric Environment. 2016a, 131, (55 - 66).
5. Backes A.M., Aulinger A., Bieser J., Matthias V., Quante M. Ammonia emissions in Europe, part II: How ammonia emission abatement strategies affect secondary aerosols. Atmospheric Environment. 2016b, 126, (153 - 161).

6. Bjerg B., Norton T., Banhazi T., Zhang G., Bartzanas T., Liberati P., Cascone G., Lee B., Marucci A. Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings. Part 1: Ammonia release modelling. Biosystems Engineering. 2013, 116(3), (232 - 245).
7. Blanes-Vidal V., Hansen M.N., Pedersen S., Rom, H.B. Emissions of ammonia, methane and nitrous oxide from pig houses and slurry: Effects of rooting material, animal activity and ventilation flow. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2008, 124(3-4), (237 - 244).
8. Blanes-Vidal V., Nadimi E.S., Ellermann T., Andersen H.V., Løfstrøm P. Perceived annoyance from environmental odors and association with atmospheric ammonia levels in non-urban residential communities: a cross-sectional study. Environmental Health. 2012, 11(1), (11 - 27).
9. Calvet S., Cambra–López M., Estellés F., Torres A.G. Characterization of the indoor environment and gas emissions in rabbit farms. World Rabbit Science. 2011a, 19 (1), (49 - 61).
10. Calvet S., Cambra–López M., Estellés F., Torres, A.G. Characterization of gas emissions from a Mediterranean broiler farm. Poultry Science. 2011b, 90(3), (534 - 542).
11. Cheng Z., O'Connor E.A., Jia Q., Demmers T.G.M., Wathes C.M., Wathes D.C. Chronic ammonia exposure does not influence hepatic gene expression in growing pigs. Animal. 2014, 8(2), (331-337).
12. Clark C.M., Tilman D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands. Nature. 2008, 451, (712 - 715).
13. Done S.H., Chennells D.J., Gresham A.C.J., Williamson S., Hunt B., Taylor L.L., Bland V., Jones P., Armstrong D., White R.P., Demmers T.G.M., Teer N., Wathes, C.M. Clinical and pathological responses of weaned pigs to atmospheric ammonia and dust. Veterinary Record. 2005, 157(3), (71-80).
14. Drummond J.G., Curtis S.E., Simon J., Norton, H.W. Effects of aerial ammonia on growth and health of young pigs. Journal Animal Science. 1980, 50(6), (1085 - 1091).
15. Geels C., Andersen H.V., Ambelas Skjøth C., Christensen J.H., Ellermann T., Løfstrøm P., Gyldenkærne S., Brandt J., Hansen J.B., Frohn L.M., Hertel, O. Improved modelling of atmospheric ammonia over Denmark using the coupled modelling system DAMOS. Biogeosciences. 2012, 9(7), (2625 - 2647).
16. Hamilton T.D.C., Roe J.M., Hayes C.M., Webster A.J.F. Effects of ammonia inhalation and acetic acid pretreatment on colonization kinetics of toxigenic Pasteurella multocida within upper respiratory tracts of swine. Journal of Clinical Microbiology. 1998, 36(5), (1260 - 1265).
17. Hamon L., Andrès Y., Dumont E. Aerial pollutants in swine buildings: A review of their characterization and methods to reduce them. Environmental Science & Technology. 2012, 46(22), (12287 - 12301).
18. Heber A.J., Tao P.C., Ni J.Q., Lim T.T., Schmidt A.M. Air emissions from two swine finishing building with flushing: ammonia characteristics. In Livestock Environment VII. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Michigan, USA. 2005, (436 - 443).
19. Hendriks C., Kranenburg R., Kuenen J., van Gijlswijk R., Kruit R.W., Segers A., van der Gon H.D., Schaap M. The origin of ambient particulate matter concentrations in the Netherlands. Atmospheric Environment. 2013, 69, (289 - 303).
20. Koerkamp P.G., Metz J.H.M., Uenk G.H., Phillips V.R., Holden M.R., Sneath R.W., Short J.L., White R.P., Hartung J., Seedorf J., Schröder M., Linkert K.H., Pedersen S., Takai H, Johnsen J.O., Wathes C.M. Concentrations and emissions of ammonia in livestock buildings in Northern Europe. Journal of Agricultural Engineering Research. 1998, 70(1), (79 - 95).
21. Krupa S.V. Effects of atmospheric ammonia (NH3) on terrestrial vegetation: a review. Environmental Pollution. 2003, 124(2), (179 - 221).
22. Kryza M., Dore A.J., Błaś M., Sobik M. Modelling deposition and air concentration of reduced nitrogen in Poland and sensitivity to variability in annual meteorology. Journal of Environmental Management. 2011, 92(4), (1225 - 1236).
23. Le Dividich J., Herpin P. Effects of climatic conditions on the performance, metabolism and health–status of weaned piglets: a review. Livestock Production Science. 1994, 38(2), (79 - 90).
24. Liu X., Zhang Y., Han W., Tang A., Shen J., Cui Z., Vitousek P., Erisman J.W., Goulding K., Christie P., Fangmeier A., Zhang F. Enhanced nitrogen deposition over China. Nature. 2013, 494, (459 - 462).

25. Müirhead M.R., Alexander T.J.L. Managing health and disease. In Managing pig health and de treatment of disease: a reference for the farm. 5M Enterprises, Sheffield, UK. 1997, (55 - 104).
26. Ni J.Q., Heber A.J., Lim T.T. Ammonia and hydrogen sulfide in swine production. In Air Quality and Livestock Farming. CRC Press, Florida, USA. 2018, (69 - 88).
27. O'Connor E.A., Parker M.O., McLeman M.A., Demmers T.G., Lowe J.C., Cui L., Davey E.L., Owen R.C., Wathes C.M., Abeyesinghe S.M. The impact of chronic environmental stressors on growing pigs, Sus scrofa (Part 1): stress physiology, production and play behaviour. Animal. 2010, 4(11), (1899 - 1909).
28. Park J.H., Peters T.M., Altmaier R., Sawvel R.A., Renée Anthony T. Simulation of air quality and cost to ventilate swine farrowing facilities in winter. Computers and Electronics in Agriculture. 2013, 98, (136 - 145).
29. Parker M.O., O'Connor E.A., McLeman M.A., Demmers T.G.M., Lowe J.C., Owen R.C., Davey E.L., Wathes C.M., Abeyesinghe, S.M. The impact of chronic environmental stressors on growing pigs, Sus scrofa (Part 2): social behaviour. Animal. 2010, 4(11), (1910 - 1921).
30. Philippe F.X., Cabaraux J.F., Nicks B. Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2011, 141, (245 - 260).
31. Raynor P.C., Engelman S., Murphy D., Ramachandran G., Bender J.B., Alexander B.H. Effects of gestation pens versus stalls and wet versus dry feed on air contaminants in swine production. Journal of Agromedicine. 2018, 23(1), (40 - 51).
32. Rinaldo D., Le Dividich J. Assessment of optimal temperature for performance and chemical body composition of growing pigs. Livestock Production Science. 1991, 29(1), (61 - 75).
33. Saha C.K., Ammon C., Berg W., Fiedler M., Loebsin C., Sanftleben P., Brunsch R., Amon T. Seasonal and diel variations of ammonia and methane emissions from a naturally ventilated dairy building and the associated factors influencing emissions. Science of the Total Environment. 2014, 468, (53 - 62).
34. Saha C.K., Zhang G., Kai P., Bjerg B. Effects of a partial pit ventilation system on indoor air quality and ammonia emission from a fattening pig room. Biosystems Engineering. 2010, 105(3), (279 - 287).
35. Schauberger G., Piringer M., Mikovits C., Zollitsch W., Hörtenhuber S.J., Baumgartner J., Niebuhr K., Anders I, Andre K, Hennig-Pauka I, Schönhart M. Impact of global warming on the odour and ammonia emissions of livestock buildings used for fattening pigs. Biosystems Engineering. 2018, 175, (106 - 114).
36. Schauberger G., Piringer M., Petz E. Diurnal and annual variation of odour emission from animal houses: a model calculation for fattening pigs. Journal of Agricultural Engineering Research. 1999, 74(3), (251 - 259).
37. Takai H., Nimmermark S., Banhazi T., Norton T., Jacobson L.D., Calvet S., Hassouna M., Bjerg B., Zhang G.Q., Pedersen S., Kai P., Wang K., Berckmans D. Airborne pollutant emissions from naturally ventilated buildings: Proposed research directions. Biosystems Engineering. 2013, 116, (214 – 220).
38. Van Ransbeeck N., Van Langenhove H., Van Weyenberg S., Maes D., Demeyer P. Typical indoor concentrations and emission rates of particulate matter at building level: a case study to setup a measuring strategy for pig fattening facilities. Biosystems Engineering. 2012, 111(3), (280 - 289).
39. Van Wagenberg A.V., Metz J.H.M., den Hartog L.A. Methods for evaluation of the thermal environment in the animal–occupied zone for weaned piglets. Transactions of the ASABE. 2005, 48(6), (2323 - 2332).
40. Von Borell E., Özpinar A., Eslinger K.M., Schnitz A.L., Zhao Y., Mitloehner F.M. Acute and prolonged effects of ammonia on hematological variables, stress responses, performance, and behavior of nursery pigs. Journal of Swine Health and Production. 2007, 15(3), (137 - 145).
41. Wang K., Wei B., Zhu S., Ye Z. Ammonia and odor emitted from deep litter and fully slatted floor systems for growing–finishing pigs. Biosystems Engineering. 2011, 109(3), (203 - 210).
42. Wathes C.M., Demmers T.G.M., Teer N., White R.P., Taylor L.L., Bland V., Jones P., Armstrong D., Greshan A.C.J., Hartung J., Chennells D.J., Done S.H. Production responses of weaned pigs after chronic exposure to airborne dust and ammonia. Animal Science. 2004, 78(1), (87 - 97).

43. Webb J., Menzi H., Pain B.F., Misselbrook T.H., Dämmgen U., Hendriks H., Döhler H. Managing ammonia emissions from livestock production in Europe. Environmental Pollution. 2005, 135(3), (399 - 406).
44. Xu W., Zheng K., Liu X., Meng L., Huaitalla R.M., Shen J., Hartung E., Gallmann E., Roelcke M., Zhang F. Atmospheric NH3 dynamics at a typical pig farm in China and their implications. Atmospheric Pollution Research. 2014, 5(3), (455 - 463).
45. Ye Z., Zhang G., Li B., Strøm J.S., Dahl P.J. Ammonia emissions affected by airflow in a model pig house: effects of ventilation rate, floor slat opening, and headspace height in a manure storage pit. Transactions of the ASABE. 2008, 51(6), (2113 - 2122).
46. Zhang G., Strøm J.S., Li B., Rom H.B., Morsing S., Dahl P., Wang C. Emission of ammonia and other contaminant gases from naturally ventilated dairy cattle buildings. Biosystems Engineering. 2005, 92(3), (355 - 364).
47. Zong C., Li H., Zhang G. Ammonia and greenhouse gas emissions from fattening pig house with two types of partial pit ventilation systems. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2015, 208, (94 - 105).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Mejoras zootécnicas orientadas a la rentabilización de la utilización de corderos de razas lecheras en el mercado cárnico

Jesús P. Val-Aguasca[1*], Pablo Martín-Ramos[1], Esperanza Horcas[2], Jesús Yániz Pérez de Albéniz[3], F. Javier García-Ramos[1]

[1] Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca; 648857@unizar.es.
[2] Oviaragon S.c.l., Camino Cogullada (Mercazaragoza, Edif. Pastores) s/n, 50014 Zaragoza.
[3] Departamento de Producción Animal y Ciencia de los Alimentos, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca.

Resumen: Dada la difícil situación que está atravesando el sector ovino de carne, se hace necesaria la búsqueda de estrategias para mejorarla. Una posible solución sería introducir en el mercado cárnico corderos procedentes de ovejas lecheras, pero esta opción se ve afectada por una alta mortalidad durante la etapa de lactancia artificial. En el presente trabajo se estudia un nuevo sistema de explotación de corderos de razas lecheras que reduce dicha mortalidad y facilita su crecimiento hasta pesos elevados, sin engrasar. El trabajo se ha desarrollado en un cebadero de corderos, situado en Ejea de los Caballeros (Zaragoza), trabajando con 763 corderos, divididos en seis periodos, desde septiembre de 2016 a abril de 2017. Se han empleado tres sistemas de manejo diferentes (*slat* + placa calefactora, *slat* + lámpara infrarroja, y paja + lámpara infrarroja) y se ha evaluado el efecto de los parámetros ambientales del alojamiento ganadero sobre el desarrollo de los corderos en el periodo de lactancia artificial. Este proceso ha requerido una monitorización en continuo de los parámetros ambientales (temperatura, humedad relativa, CO_2 y NH_3) y un seguimiento de los parámetros productivos (peso de entrada de cada cordero, peso al cabo de 15 días y al cabo de un mes, ganancia media diaria, y bajas para cada tipo de manejo en cada periodo). También se han ensayado tres tipos de lacto-reemplazantes con diferentes composiciones al objeto de evaluar su efecto. Los resultados obtenidos sugieren que el sistema de manejo basado en suelo de paja con calefacción con lámpara infrarroja es la opción más deseable, tanto desde un punto de vista ambiental como por su influencia positiva en los factores productivos. Del estudio de la relación del peso de entrada con las bajas, se ha obtenido una curva de predicción de las mismas, de utilidad para la determinación del precio máximo a pagar por cordero en función de su peso de entrada que garantice la rentabilidad del proceso.

Palabras clave: Assaf; calefacción; cebadero; control ambiental; ovino; *slat*

1. Introducción

El sector productor de ovino de carne español atraviesa una profunda crisis, que se ha visto agravada por descensos del precio y del consumo de la carne de cordero: según el MAPA, se ha pasado de un consumo per cápita de 2,67 kg en 2006 a 1,62 kg en 2015. Esta situación ha provocado una disminución tanto del censo (se ha pasado de 12.708.383 cabezas en 2006 a 8.243.484 en 2015, según EUROSTAT) como de las explotaciones de ovino (se ha pasado de 122.694 explotaciones en 2007 a 116.296 explotaciones en 2016, según el Registro del Sistema Integral de Trazabilidad Animal (SITRAN).

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3386

Una posible solución para mejorar esta situación sería introducir en el mercado cárnico corderos procedentes de ovejas lecheras. En el sector de ovino de leche, se realiza un destete temprano (0-2 días) [1] a base de lacto-reemplazantes o alimentos sólidos [2]. Este destete artificial lleva aparejado un porcentaje elevado de mortalidad, porque afecta negativamente a la función inmune [3,4] y al crecimiento de los corderos [5].

Los índices productivos, al igual que el bienestar animal, están directamente relacionados con las condiciones ambientales de los alojamientos ganaderos. Los principales parámetros a tener en cuenta en un alojamiento de ganado ovino son la concentración de gases nocivos (NH_3 y CO_2), la temperatura (Tª), la humedad ambiental y la densidad ganadera [6].

El NH_3, producido por emisiones de excretas sobre el estiércol, tiene un efecto negativo sobre la ingesta de alimento y conlleva disminuciones en la ganancia de peso corporal [7], por lo que no deben superarse las 10-15 ppm [8]. Concentraciones altas de CO_2, producido por la respiración de los animales y la descomposición del estiércol, provocan una disminución en el rendimiento de los animales, siendo recomendables valores <3500 ppm [8].

En relación con la temperatura, la zona de neutralidad térmica en corderos está establecida en 15-20 °C en la primera fase y 10-18 °C en la segunda fase [9]. Las temperaturas altas afectan negativamente al crecimiento de los corderos, haciendo que los animales dediquen menos tiempo a la alimentación y pasen más tiempo de inactividad [10], mientras que las bajas temperaturas afectan al crecimiento del cordero en cuanto dan lugar a un descenso de la temperatura corporal y a un aumento del estrés térmico [11]. Por otra parte, la temperatura está correlacionada con la emisión de NH_3: en pisos de hormigón, las emisiones de NH_3 aumentan significativamente para ganado lechero cuando la temperatura aumenta de 5 a 35 °C [12].

Con respecto a la humedad relativa (HR), en ocasiones se valora junto con la temperatura en un único parámetro, el denominado índice de temperatura-humedad (ITH), que mide el confort térmico y evalúa el riesgo de estrés por calor sobre la producción y la mortalidad. Se recomiendan valores de humedad relativa del 65-75% [8] y de ITH<72 [13]. En un ensayo de Bello, *et al.* [14], en que se analizó la relación entre parámetros ambientales y la mortalidad de corderos en un cebadero comercial, se observó que en invierno, la humedad fue el parámetro ambiental más correlacionado con la mortalidad, mientras que en verano la mortalidad estuvo relacionada con la temperatura, el punto de rocío y ITH.

En cuanto a la densidad ganadera, Bello, *et al.* [14] analizaron el efecto de la densidad (<0,4 m^2/cordero y >0,4 m^2/cordero) sobre la muerte de corderos durante el invierno, observando un 85% más de bajas en los días en que la densidad de animales fue mayor. Para corderos de 15-25 kg se recomienda 0,6 m^2/cabeza, siendo 1 m^2/cabeza la opción preferible para corderos de 25-40 kg [15].

Los parámetros anteriores se pueden controlar a través de la ventilación [16], siendo los caudales de ventilación necesarios variables en función de la época del año, la limpieza de la explotación y el número de animales [8].

Otro aspecto a tener en cuenta es que, a diferencia de otros animales, los corderos no tienen una zona específica para efectuar las deyecciones, por lo que, en un alojamiento ovino, los corderos descansan en la misma zona en que defecan y orinan. Esto favorece la utilización de materiales absorbentes como la paja en solera [17]. Teixeira, *et al.* [18] utilizaron otros materiales como serrín o cáscara de arroz en el suelo, sin obtener diferencias en el rendimiento de los corderos. Muñoz-Osorio, *et al.* [19] compararon un sistema de *slat* de plástico o metal con un suelo de hormigón para engorde de corderos machos en intensivo, registrando mayores rendimientos productivos cuando se empleó el *slat*, si bien con una fuerte dependencia de otros factores (alimentación, condiciones climáticas, etc.).

En el presente estudio también se han comparado distintos sistemas de explotación de corderos, con la particularidad de que se ha trabajado con corderos de razas lecheras separados de las madres en el nacimiento. A través del uso de distintos tipos de suelo y calefacción, y del ensayo de distintos tipos de lacto-reemplazantes, se ha analizado qué sistema es más favorable en términos de reducción de la mortalidad de los corderos durante la lactancia artificial y para su crecimiento hasta pesos elevados, sin engrasar.

2. Material y métodos

2.1. Localización

El estudio se llevó a cabo en un cebadero de corderos localizado en el T.M. de Ejea de los Caballeros (Zaragoza). La nave quedó distribuida en 5 corrales o cuadras, que se diferenciaban en el tipo de suelo (*slat* de plástico o cama de paja) y en los sistemas de calefacción instalados (lámparas infrarrojas o placas calefactoras).

2.2. Material animal

Para el estudio se emplearon 763 corderos machos de la raza lechera Assaf, procedentes de una explotación situada en Artajona (Navarra), distribuidos en 6 periodos: 07/09/2016-05/10/2016, 05/10/2016-08/11/2016, 11/11/2016-30/11/2016, 09/12/2016-03/01/2017, 01/03/2017-29/03/2017, y 29/03/2017-26/04/2017. En la explotación de origen, los corderos se seleccionaron sin aplicar ningún tipo de filtrado respecto al peso o edad del animal. Tras su transporte a la nave en que se realizaron los ensayos, se suministraron vitaminas por vía intramuscular y se determinaron los pesos de entrada. Los corderos se distribuyeron aleatoriamente en los corrales, formando lotes.

2.3. Sistemas de alojamiento

En relación con el tipo de suelo, en dos de los corrales se instaló *slat* de plástico, es decir, planchas de polipropileno de gran resistencia, durabilidad y flexibilidad (Figura 1). Las placas instaladas fueron del tipo "*wean-to-finish*", con rendijas de 1 cm de anchura para la evacuación de las deyecciones. En los otros tres corrales se empleó cama de paja, añadiéndose paja y bentonita con periodicidad diaria, y realizándose la limpieza del corral cada 2 semanas.

En cuanto a los sistemas de calefacción, se ensayaron lámparas infrarrojas (IR) de 175 W y placas calefactoras de 150 W, equipadas con un regulador de potencia HF20C/230V e interruptor de 16 A.



Figura 1. Corrales con *slat* de plástico (*izquierda*) y con cama de paja (*derecha*).

2.4. Evaluación de los parámetros ambientales

Se monitorizaron de forma continua (cada 10 min) la temperatura, la humedad relativa (HR), el CO_2 y el NH_3. Para la medición de la temperatura y humedad relativa se emplearon sondas *datalogger* HOBO pro v2 Ext Temp/RH, instalando 4 sondas en el interior de la nave y 2 sondas en el exterior. La medición de los niveles de CO_2 se realizó mediante un detector de gases puntual infrarrojo antideflagrante, modelo Dräger PIR 7200, y, en el caso del NH_3, se utilizó un sensor electroquímico Dräger Sensor NH_3 LC - 68 09 680 y el módulo Dräger Polytron 7000. Se instaló una sonda de CO_2 y una sonda de NH_3 en cada tipo de suelo, conectándolas a una unidad de control Dräger QuadGard.

2.5. Alimentación

Se ensayaron tres tipos de lacto-reemplazantes (LR) de forma secuencial (LR1 en los periodos 1 y 2, LR2 en los periodos 3 y 4, y LR3 en los periodos 5 y 6), empleando nodrizas amamantadoras automáticas para su distribución. LR1 correspondió a un lacto-reemplazante básico (control), con la siguiente composición química: 47,9 g proteína bruta/kg, 45,1 g grasa/kg, 2,3 g fibra neutro detergente/kg y 12,9 g cenizas/kg. LR2 y LR3 presentaron una composición química semejante a la de LR1, con 63% de componentes lácteos, con y sin prebióticos, respectivamente. Adicionalmente, se suministró harina de iniciación, con aditivos contra la diarrea (D3) y la boquera (B1), y –en los primeros días tras su llegada– se añadió rehidratante en el agua.

2.6. Recogida de datos zootécnicos

Se estudió la evolución del peso de los corderos con tres pesajes durante el mes de lactación: a la llegada, donde se anotaba su número de identificación (crotal); a los 15 días; y tras un mes de lactación, antes de realizar el destete (dependiendo del peso de los animales). Asimismo, se registró la mortalidad de los animales a través del número de identificación, el corral al que pertenecían y el día de la muerte.

2.7. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el *software* SPSS v. 22 (IBM Inc., Chicago, IL, EE.UU.). Se analizó: (*i*) el efecto de los tres tipos de manejo sobre las condiciones ambientales; (*ii*) el efecto de la época del año sobre las condiciones ambientales; (*iii*) el efecto del manejo, condiciones ambientales y lacto-reemplazantes sobre las variables productivas; y (*iv*) el efecto de la relación peso de entrada del cordero *vs.* supervivencia. En los tres primeros se utilizó análisis de varianza (ANOVA), y en el cuarto se emplearon tablas de contingencia.

3. Resultados y discusión

3.1. Efecto del manejo sobre las condiciones ambientales

Se apreciaron diferencias estadísticamente significativas para todos los parámetros ambientales en función del tipo de manejo (Tabla 1).

La concentración de CO_2 fue significativamente menor para el sistema con *slat* que cuando se empleó suelo de paja mientras que el NH_3 resultó significativamente mayor en *slat* que para cama de paja. El resultado relativo a CO_2 coincide con observaciones obtenidas por otros autores, pero no así los valores obtenidos para el NH_3: por ejemplo, Philippe, *et al.* [20], al comparar un sistema de *slat* total frente a cama de paja en porcino, obtuvieron unas emisiones medias diarias por cerdo de engorde alojado bajo *slat* o bajo cama de paja de 548 y 406 g de CO_2 equivalente; 1,61 y 1,77 kg de CO_2, y de 4,98 y 13,31 g NH_3; respectivamente. Esta desviación respecto a los resultados referidos en la bibliografía puede atribuirse a singularidades de la instalación en la que se realizaron las pruebas: al tratarse de una nave antigua, el emparrillado no se construyó realmente sobre una fosa colectora con la pendiente adecuada para la evacuación de las deyecciones. Para evitar este efecto, se empleó paja sobre la solera del suelo, debajo del emparrillado. Esto supuso que la cama sucia no se limpió durante el periodo de cría de cada lote, con una acumulación de las deyecciones que habría dado lugar al aumento de la concentración de NH_3.

Respecto a la temperatura interior, el sistema *slat* + lámpara IR fue el que permitió alcanzar las temperaturas más altas, seguido por el sistema con cama de paja + lámpara IR y, finalmente, por el sistema *slat* + placa calefactora. Es preciso indicar que las diferencias entre los dos sistemas con lámpara fueron pequeñas. A la vista de las temperaturas alcanzadas con cada sistema de calefacción, el uso de lámparas IR parece ser más efectivo.

Respecto a la humedad relativa, el sistema paja + lámpara IR fue el que llevó asociados valores de HR más bajos. Por otra parte, en los sistemas con *slat*, se apreciaron diferencias en función del tipo de calefacción: la HR fue menor cuando se empleó lámpara IR que cuando se empleó la placa calefactora. Estos resultados de nuevo difieren de la bibliografía: por ejemplo, Seedorf, *et al.* [21] obtuvieron peores resultados con sistemas con cama de paja (*litter*) que con sistema emparrillado. De nuevo, esto puede atribuirse al hecho de no haber empleado un sistema *slat* habitual.

Respecto al ITH (calculado empleando la fórmula de Thom [22]), que indica el estrés térmico del animal causado por los efectos combinados de la temperatura y la humedad del aire, también se observaron diferencias significativas entre sistemas de manejo. No obstante, conforme a los rangos propuestos por Santolaria, *et al.* [13] para ovejas de raza aragonesa, los valores obtenidos (en el rango 61,6-63,2) fueron inferiores a 72 en todos los casos, excluyendo así la existencia de estrés térmico para los corderos.

Tabla 1. ANOVA de los parámetros ambientales en función del sistema de manejo. Para cada variable ambiental, los valores etiquetados con distintas letras minúsculas son estadísticamente diferentes según el test de Tukey ($p<0,05$).

Variable	Tipo de manejo			ANOVA	
	Paja + lámpara IR	***Slat* + placa**	***Slat* + lámpara IR**	**F**	**p**
Tª (°C)	17,85±4,98 b	17,07±5,33 c	18,03±5,04 a	169,9	0,000
HR (%)	72,17±11,94 c	79,96±13,34 a	77,32±11,09 b	1863,6	0,000
CO_2 (ppm)	1015,96±152,59	737,97±155,82	-	294,1	0,000
NH_3 (ppm)	0,05±0,02	0,07±0,03	-	99,8	0,000
ITH	62,79±7,18 b	61,63±8,04 c	63,21±7,50 a	200,4	0,000

Tª: temperatura; HR: humedad relativa; ITH: índice de temperatura-humedad

3.2. Efecto de la época del año sobre las condiciones ambientales

A través de un análisis factorial (no mostrado), se pudo apreciar cómo las variables ambientales dependieron fuertemente del periodo estacional, mientras que las concentraciones de CO_2 y NH_3 dependieron (más débilmente) del tipo de suelo. En relación con las primeras, se apreciaron diferencias estacionales muy significativas, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Influencia de la época del año sobre las variables ambientales en el alojamiento de los corderos. Para cada variable ambiental, los valores etiquetados con distintas letras minúsculas son estadísticamente diferentes según el test de Tukey ($p < 0,05$).

Variable	Periodo						ANOVA	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**F**	**p**
Tª (ºC)	22,49±3,50 a	18,02±3,13 c	13,46±2,20 e	12,14±2,02 f	16,27±2,99 d	18,70±3,32 b	21104,0	0,000
HR (%)	66,87±8,65 f	76,30±10,22 d	82,34±7,58 b	89,76±10,57 a	77,58±7,82 c	68,44±9,87 e	10941,9	0,000
ITH	69,61±4,51 a	63,47±4,81 c	56,31±3,64 e	54,07±3,45 f	60,75±4,57 d	64,10±6,82 b	22350,7	0,000

Tª: temperatura; HR: humedad relativa; ITH: índice de temperatura-humedad

En la Figura 2 se recoge la evolución de las temperaturas, humedades interiores e ITH para cada tipo de suelo en función del tiempo, evidenciando la magnitud de los cambios de un periodo a otro. Se puede inferir que los sistemas de calefacción ensayados tendrían fuertes limitaciones de cara al control ambiental del alojamiento ganadero a nivel global del habitáculo, y que su impacto se vería limitado a una zona localizada cercana a los emisores de calefacción. No obstante, toda vez que no hubo estrés térmico, cumplirían una función útil.

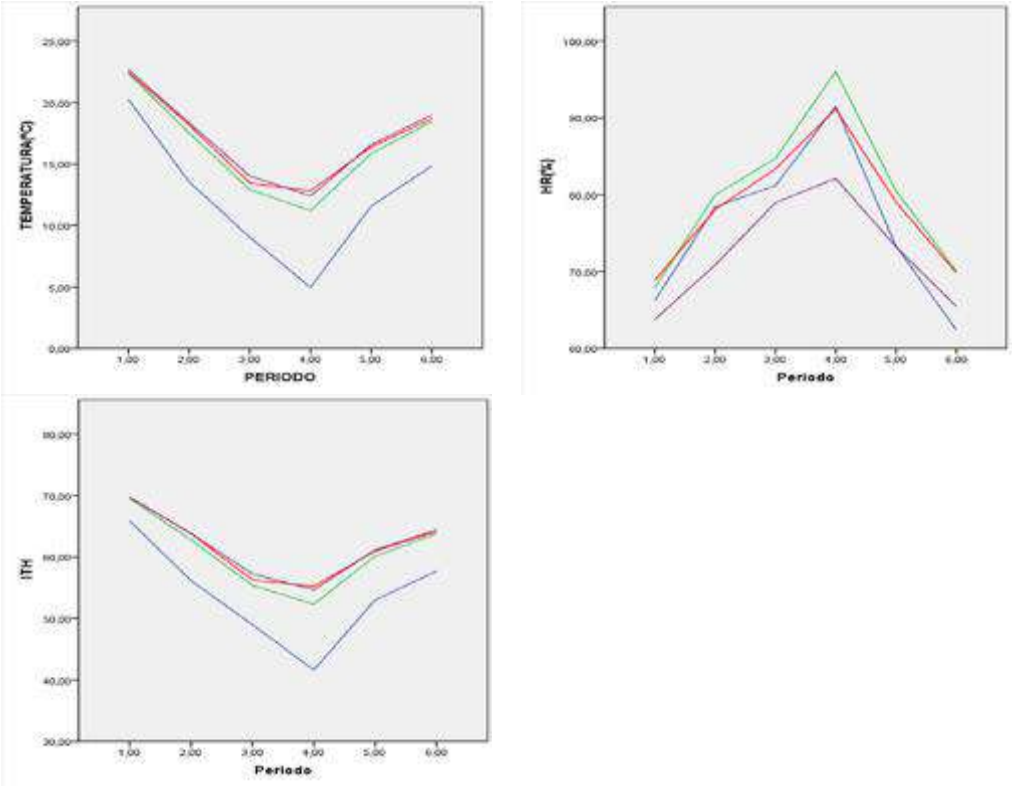


Figura 2. Evolución temporal de las condiciones ambientales exteriores (en azul) y de las condiciones ambientales interiores para los tres sistemas de manejo (*slat* + placa en verde, *slat* + lámpara IR en rojo y paja + lámpara IR en morado). HR: humedad relativa; ITH: índice de temperatura-humedad.

3.3. Efecto conjunto del manejo, condiciones ambientales y lacto-reemplazantes sobre las variables productivas

3.3.1. Efecto del periodo estacional sobre el peso de entrada, GMD y porcentaje de bajas

Los pesos iniciales fueron muy similares en los distintos periodos (con valores medios en el rango 4,70-4,77 kg, Tabla 3), excepto para el periodo 1, en el que los pesos de entrada fueron ligeramente más bajos (con valor medio de 4,4 kg). Los pesos de entrada más altos correspondieron al periodo 2. Con respecto a la ganancia media diaria (GMD), los valores fueron similares para todos los periodos, si bien la mayor GMD correspondió al periodo 3. En lo que respecta al porcentaje de bajas, no se observaron diferencias significativas desde un punto de vista estadístico, con valores generalmente dentro del intervalo 10-30%, a excepción de en el periodo 1, en el que el porcentaje de bajas fue notablemente más alto. Cabe destacar que, en el periodo 1, en que se registraron los pesos de entrada más bajos, también se obtuvo el porcentaje más alto de bajas.

Tabla 3. Influencia del periodo estacional sobre el peso de entrada, ganancia media diaria (GMD) y porcentaje de bajas.

Variable	Periodo						ANOVA	
	1	2	3	4	5	6	F	p
Peso inicial (kg)	4,41±0,95	4,77±1,12	4,73±1,02	4,73±1,09	4,70±0,80	4,74±1,00	2,9	0,012
GMD (kg/día)	0,21±0,08	0,21±0,08	0,23±0,09	0,22±0,08	0,20±0,08	0,20±0,08	2,4	0,033
Bajas (%)	33,33	17,30	20,77	15,00	14,96	13,15		

3.3.2. Análisis del efecto de los lacto-reemplazantes sobre la GMD

En base a los resultados presentados en la Tabla 3, y habida cuenta de que el lacto-reemplazante 1 se empleó en los periodos 1 y 2, que el lacto-reemplazante 2 se empleó en los periodos 3 y 4, y que el lacto-reemplazante 3 se empleó en los periodos 5 y 6, se podría inferir que el lacto-reemplazante 2 (con prebióticos) sería la opción más deseable, al conducir a GMDs ligeramente más altas. No obstante, es preciso tener en cuenta que los periodos 3 y 4 fueron también los que tuvieron menores valores del ITH (es decir, menor estrés), por lo que la influencia del lacto-reemplazante no fue concluyente.

3.3.3. Efecto del sistema de manejo sobre el peso de entrada, GMD y porcentaje de bajas

Se observó una diferencia significativa en el peso inicial (Tabla 4), con pesos más bajos para el sistema de *slat* + placa calefactora que para los otros dos sistemas de manejo, pero esta diferencia debería ser atribuida al bajo peso para los corderos criados en este sistema durante el periodo 1. En el resto de los periodos los valores fueron similares.

Con respecto a la GMD, no fue consistente a lo largo de los seis periodos de estudio, pero globalmente el sistema de manejo con paja + lámpara IR (con una ganancia de 0,22 kg PV/día) resulta el más ventajoso. No obstante, el valor obtenido fue más bajo que en un estudio similar realizado en un cebadero intensivo de corderos, en el que se obtuvieron valores de GMD de 0,27 kg PV/día [8]. El valor de la GMD puede verse afectado por el peso inicial del cordero, pero en nuestro estudio -como se ha comentado anteriormente- no existían diferencias significativas entre el suelo de paja + lámpara IR y el suelo de *slat* + lámpara IR. Por lo tanto, no hay tal efecto confundente del peso de partida, y se puede afirmar que la paja + lámpara IR es el sistema más ventajoso. En un estudio realizado por Muñoz-Osorio, *et al.* [19], se obtuvo una GMD mayor en suelo de *slat* (comparado con suelo de hormigón), atribuyendo estos resultados al menor contacto de los animales con posibles patógenos y bacterias en este tipo de suelo. Nuestro resultado no es directamente extrapolable, puesto que en estos estudios no se incluía el suelo de paja y el *slat* tiene unas limitaciones, ya explicadas anteriormente.

Con respecto al porcentaje de bajas, ha resultado ser notablemente menor para el sistema de manejo basado en paja + lámpara IR, si bien las diferencias no han sido estrictamente significativas desde el punto de vista estadístico. Podría plantearse que fuera consecuencia del peso de entrada, pero -como se ha analizado anteriormente- fue muy similar para los sistemas de paja + lámpara IR y *slat* + lámpara IR (y algo más bajo para el sistema de *slat* + placa). Por tanto, para un peso de entrada medio muy similar, el porcentaje de bajas fue menor para un suelo de paja que para uno de *slat* (con el mismo sistema de calefacción).

Tabla 4. Efecto del sistema de manejo sobre el peso de entrada, ganancia media diaria (GMD) y porcentaje de bajas. Para cada variable zootécnica, los valores etiquetados con distintas letras minúsculas son estadísticamente diferentes según el test de Tukey ($p < 0,05$).

Variable	Tipo de manejo			ANOVA	
	Paja + lámpara IR	***Slat* + placa**	***Slat* + lámpara IR**	**F**	**p**
Peso inicial (kg)	4,73±1,00 a	4,33±1,01 b	4,70±0,98 a	8,24	0,000
GMD (kg/día)	0,22±0,09	0,19±0,08	0,21±0,08	2,2	0,122
Bajas (%)	12,60	28,75	20,80		

3.4. Análisis de la relación del peso de entrada con la mortalidad

Como era de esperar, el peso de entrada influyó significativamente en la mortalidad de los corderos (Tabla 5), con un $\chi^2<0,001$. Para un peso de entrada >5 kg, el porcentaje de mortalidad fue de un 8%, frente a un 22% para 4-5 kg, un 28% para 3,5-4 kg, y un 38% para <3,5 kg.

Si se agrupan las bajas producidas durante los 6 periodos de estudio (154 bajas) en dos categorías: 1 (bajas producidas en los primeros 15 días) y 2 (bajas producidas en los días 15-30), se puede apreciar que un 73% (113 bajas) se produjeron en los primeros días tras la llegada. Dichas bajas en los primeros días no serían atribuibles al manejo de la explotación, y estarían asociadas a una serie de factores como el estrés del transporte, bajas defensas del animal por un deficiente encalostrado… En un estudio de Minka, *et al.* [23], los autores concluyeron que el estrés de transporte en animales es un problema clave para el ciclo de vida productivo del animal, si bien la total eliminación de los factores de estrés del transporte en la producción ganadera sería imposible.

Tabla 5. Influencia del peso de entrada en la mortalidad durante todo el periodo (un mes).

Variable	Baja	
	1 (muerte)	**2 (vivo)**
Peso de entrada (kg)	4,15±0,81	4,79±1,02

Por otra parte, si se analiza en más detalle la influencia del peso de entrada con el momento del periodo en que se producen las bajas (Tabla 6), se observa que el peso medio de entrada de los corderos muertos en los primeros 15 días fue de 4,05 kg, mientras que los del segundo periodo presentaron pesos medios mayores (4,42 kg). En la tabla de contingencia (no mostrada), se observa una reducción del 20% de las bajas en el primer periodo (de un 80% a un 60%) para pesos superiores a 4,4 kg, con un $\chi^2=0,04$.

Tabla 6. Periodo de baja de los corderos en función de su peso de entrada.

Variable	Periodo de baja	
	1 (1-15 días)	**2 (15-30 días)**
Peso de entrada (kg)	4,05±0,77	4,42±0,86

Lo anterior sugiere que sería interesante estimar el peso mínimo de entrada que garantizaría la supervivencia de los animales y, por lo tanto, la viabilidad del proceso de engorde. A partir de la curva ROC (Figura 3, *izquierda*), se estimó un peso de 4,4 kg como umbral para la supervivencia del animal, con un área bajo la curva (AUC) de 0,604. Por otra parte, recurriendo a una regresión logística binaria, se obtuvo la probabilidad de supervivencia en función del peso de entrada (Figura 3, *derecha*). Con el modelo propuesto, se clasificarían correctamente un 79,7% del total de casos, y sólo un 1,3% de los muertos se clasificaron como vivos.

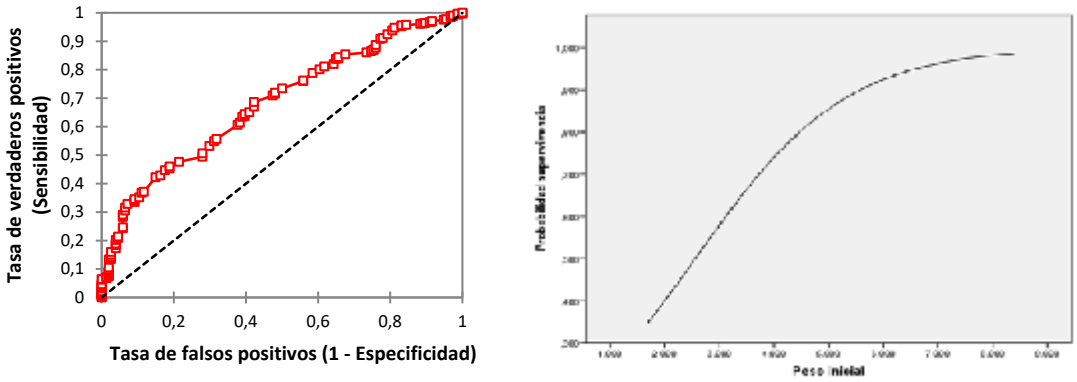


Figura 3. Curva ROC (*izquierda*), función de probabilidad de supervivencia del cordero en función del peso de entrada (*derecha*).

4. Conclusiones

En relación con la influencia del sistema de manejo sobre las condiciones del alojamiento, los dos sistemas de calefacción ensayados (lámpara IR y placa calefactora) lograron un adecuado confort en la zona localizada del cordero. La humedad relativa fue menor en el sistema de manejo basado en suelo de paja que con el suelo en emparrillado. Las concentraciones de gases nocivos fueron muy bajas en todos los casos. Respecto a los parámetros productivos, la GMD dependió fundamentalmente del sistema de manejo, siendo superior en el sistema paja + lámpara IR. El porcentaje de bajas más bajo se consiguió también para el sistema de manejo con suelo paja con calefacción por lámpara IR. Se puede, pues, establecer que el sistema de manejo con suelo de paja y lámpara IR sería la opción más deseable para su implantación en otros cebaderos con características similares al estudiado. A lo anterior hay que sumarle la ventaja adicional del menor coste de instalación frente al sistema de suelo emparrillado.

Por otra parte, se detectó una fuerte influencia del peso de entrada sobre el porcentaje de bajas, de forma que los corderos que entraron con pesos bajos (peso medio <4,1 kg) murieron prematuramente. La mayoría de las bajas (un 73% del total) se produjeron en los primeros días tras la llegada. Al depender la viabilidad y rentabilidad del proceso fundamentalmente de dicho peso de entrada de los corderos, una contribución clave del estudio ha sido la obtención de una curva de predicción que permite pronosticar el porcentaje de bajas en función del peso de entrada con una tasa de acierto del 80%.

Referencias

1. Napolitano, F.; De Rosa, G.; Sevi, A. Welfare implications of artificial rearing and early weaning in sheep. *Appl. Anim. Behav. Sci.* **2008**, *110*, 58-72.
2. Weary, D.M.; Jasper, J.; Hötzel, M.J. Understanding weaning distress. *Appl. Anim. Behav. Sci.* **2008**, *110*, 24-41.
3. Lynch, E.M.; Earley, B.; McGee, M.; Doyle, S. Characterisation of physiological and immunological responses in beef cows to abrupt weaning and subsequent housing. *BMC Veterinary Research* **2010**, *6*, 37.
4. Ungerfeld, R.; Hotzel, M.J.; Scarsi, A.; Quintans, G. Behavioral and physiological changes in early-weaned multiparous and primiparous beef cows. *Animal* **2011**, *5*, 1270-1275.
5. Langlands, J.P.; Donald, G.E. The intakes and growth rates of grazing border Leicester × Merino lambs weaned at 21, 49 and 77 days. *Animal Science* **1975**, *21*, 175-181.
6. Caroprese, M. Sheep housing and welfare. *Small Ruminant Research* **2008**, *76*, 21-25.
7. Phillips, C.J.; Pines, M.K.; Latter, M.; Muller, T.; Petherick, J.C.; Norman, S.T.; Gaughan, J.B. Physiological and behavioral responses of sheep to gaseous ammonia. *J. Anim. Sci.* **2012**, *90*, 1562-1569.
8. García-Ramos, F.J.; Lahera, L.M.; Horcas, E. Condiciones ambientales en cebaderos de corderos. *Mundo Ganadero* **2007**, (201), 238-243.

9. Buxadé Carbó, C. *Ovino de carne: aspectos claves* Ediciones Mundi-Prensa: Spain, 1998; p 550.
10. De, K.; Kumar, D.; Saxena, V.K.; Naqvi, S.M. Study of circadian rhythmicity of physiological response and skin temperature of sheep during summer and winter in semi-arid tropical environment. *Physiol. Behav.* **2017**, *169*, 16-21.
11. Johns, M. Rearing orphan lambs. Farmnote 78/99. *Animal Research and Developement Services* **2006**.
12. Pereira, J.; Misselbrook, T.H.; Chadwick, D.R.; Coutinho, J.; Trindade, H. Effects of temperature and dairy cattle excreta characteristics on potential ammonia and greenhouse gas emissions from housing: A laboratory study. *Biosys. Eng.* **2012**, *112*, 138-150.
13. Santolaria, P.; Yaniz, J.; Fantova, E.; Vicente-Fiel, S.; Palacin, I. Climate factors affecting fertility after cervical insemination during the first months of the breeding season in Rasa Aragonesa ewes. *Int J Biometeorol* **2014**, *58*, 1651-1655.
14. Bello, J.; Marco, L.; Ruiz, S.; Hernández, V.; Carranza, R.; Mantecón, A.; Lavín, P. In *Efecto de las condiciones ambientales sobre la mortalidad de corderos en un cebadero comercial*, XLI Jornadas Científicas y XVII Jornadas Internacionales de Ovinotecnia y Caprinotecnia, Talavera de la Reina, Toledo, Spain, 2016; Sociedad Española de Ovinotecnia y Caprinotecnia, Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario: Talavera de la Reina, Toledo, Spain, pp 367-371.
15. Sevi, A.; Casamassima, D.; Pulina, G.; Pazzona, A. Factors of welfare reduction in dairy sheep and goats. *Italian Journal of Animal Science* **2009**, *8*, 81-101.
16. Sevi, A. In *Influence of sunlight, temperature and environment on the fatty acid composition and coagulatine properties of sheep milk*, The Future of the Sheep and Goat Dairy Sector, Zaragoza, Spain, 2005; Sevi, A., Ed. International Dairy Federation: Zaragoza, Spain, pp 305-311.
17. Faerevik, G.; Andersen, I.; Boe, K. Preferences of sheep for different types of pen flooring. *Applied Animal Behaviour Science* **2005**, 90(93), 265-276.
18. Teixeira, D.L.; Miranda-de la Lama, G.; Villarroel, M.; Olleta, J.L.; García-Belenguer, S.; Escós, J.; María, G.A. Effects of alternative bedding substrates on lamb welfare, productive performance, and meat quality during the finishing phase of fattening. *Journal of Veterinary Behavior* **2015**, *10*, 171-178.
19. Muñoz-Osorio, G.A.; Aguilar-Caballero, A.J.; Sarmiento-Franco, L.A.; Wurzinger, M.; Gutiérrez-Reynoso, G.A. The effect of two housing systems on productive performance of hair-type crossbreed lambs in sub-humid tropics of Mexico. *Journal of Applied Animal Research* **2017**, *45*, 384-388.
20. Philippe, F.X.; Laitat, M.; Canart, B.; Vandenheede, M.; Nicks, B. Gaseous emissions during the fattening of pigs kept either on fully slatted floors or on straw flow. *animal* **2007**, *1*, 1515-1523.
21. Seedorf, J.; Hartung, J.; Schröder, M.; Linkert, K.H.; Pedersen, S.; Takai, H.; Johnsen, J.O.; Metz, J.H.M.; Groot Koerkamp, P.W.G.; Uenk, G.H., *et al.* Temperature and Moisture Conditions in Livestock Buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research* **1998**, *70*, 49-57.
22. Thom, E.C. The Discomfort Index. *Weatherwise* **1959**, *12*, 57-61.
23. Minka, N.S.; Ayo, J.O. Physiological responses of food animals to road transportation stress. *African Journal of Biotechnology Vol. 8 (25)* **2009**, 7415-7427.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Supervisión en continuo de porcino en cebo mediante sistema multi-sensor: patrones de comportamiento

M. Garrido[1], E.C. Correa[1], J.M. Requejo[2], B. Diezma[1]

[1] Laboratorio de Propiedades Físicas-Tecnologías Avanzadas en Agroalimentación (LPF-TAGRALIA), ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Puerta de Hierro, 2 - 4, 28040 Madrid, España; miguel.garrido.izard@upm.es

[2] Hypor, a Hendrix-Genetics Company. Hypor B.V.Villa 'de Körver', Spoorstraat 69, 5831 CK Boxmeer, Netherlands.

Resumen: En este trabajo se ha supervisado un periodo completo de cebo (81 días) de un total de 30 cerdos Landrace repartidos en dos boxes de un núcleo en Villatobas (Castilla-La Mancha). La supervisión individual de cada individuo ha consistido en el registro cada 3 minutos de la temperatura superficial mediante un registrador *iButton* con sensor de temperatura colocado en el crotal, y en el registro de la ingesta y el peso del animal en cada visita a una estación automatizada con báscula de pesaje. Las condiciones ambientales se han monitorizado mediante 6 *iButton* dotados además con sensor de humedad relativa distribuidos en los boxes.En la serie temporal completa de las temperaturas superficiales de los animales se ha observado una relación negativa entre la media y la desviación típica (r = -0,83): los animales con valores altos de temperatura muestran menor variabilidad térmica. El análisis no supervisado de estas series temporales ha identificado 5 grupos basados en esta relación. Se han identificado también diferentes patrones entre animales en las pautas de alimentación evaluando número de visitas, ingesta por visita, duración de la visita y ciclos día-noche que se relacionan con los patrones térmicos. El grupo de animales con menor variabilidad térmica presenta un comportamiento de alimentación *ad libitum* más individualizado.

Palabras clave: registrador de temperatura, estación electrónica de alimentación, patrón térmico, patrón de ingesta, eficiencia.

1. Introducción

En la actualidad el manejo de las explotaciones ganaderas ha de integrar criterios de rentabilidad y aspectos relativos al bienestar y a la salud animal, estando obligados a llegar a soluciones de compromiso cada vez más complejas. En esta situación el sector busca tecnologías y procedimientos para recabar y manejar datos e información sobre sus instalaciones y animales que puedan ser la base de la llamada ganadería de precisión. Surge así el concepto de fenotipado masivo de animales, en el que se busca el registro de parámetros significativos (temperatura, movimientos, sonidos, etc.) relacionados con aspectos de bienestar, salud o productividad.

Se ha prestado especial atención a la medida de la temperatura superficial en diferentes especies de mamíferos como indicador del nivel de estrés o de la existencia de enfermedades [1]. Más recientemente se ha demostrado que la monitorización de la temperatura superficial en ganado porcino puede dar indicaciones sobre su esfuerzo termo-regulatorio [2] en condiciones normales, sin afecciones ni estrés. Por otra parte, otros trabajos [3] han demostrado que la

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3458

producción de calor en cerdos en cebo está asociada a la actividad física, al efecto térmico de la ingesta y al metabolismo basal, lo que junto con el hecho de que animales con mayor temperatura corporal invierten más energía en la producción de calor metabólico a expensas de la productividad, permite establecer que animales con actividad física y producción de calor bajas muestran mejor productividad [4].

Los patrones de comportamiento se definen como los posibles modos de actuación ante una determinada situación o condición, incluyendo el nivel de actividad, los patrones de ingesta y las interacciones entre animales. En numerosos trabajos de investigación los patrones de comportamiento se estudian mediante el registro de imagen, con procedimientos de análisis complejos y costosos [5, 6] o mediante la incorporación de acelerómetros [7] o registradores de sonido [8]. En cualquier caso, todos estos sistemas suponen la instalación de dispositivos no habituales en las instalaciones comerciales. Las estaciones electrónicas de alimentación, sistemas instalados en numerosas explotaciones, permiten caracterizar los patrones de ingesta de cada individuo mediante el reconocimiento de identificadores por radiofrecuencia (*Radio Frequency Identification,* RFID) e incluyendo en el registro de variables la hora del evento, la frecuencia de visitas, la duración de la visita, la ingesta por visita y el peso del animal. En las explotaciones comerciales esta información se emplea para la determinación de la eficiencia global de cada animal, especialmente en aquellas dedicadas a la mejora genética.

En este trabajo se propone la implementación de registradores de temperatura superficial y estaciones electrónicas de alimentación como herramientas de seguimiento de cada individuo durante un periodo de cebo completo. El objetivo es la identificación de distintas tipologías de animales basadas en la integración de sus patrones térmicos y de ingesta.

2. Materiales y métodos

2.1. Animales

Entre el 17/04/2018 y el 06/07/2018, 30 cerdos Landrace (todos machos) fueron monitorizados, cubriéndose así todo su periodo de cebo. Los animales fueron distribuidos equitativamente en dos boxes (15 m²/box) en una granja de cría en Villatobas, Castilla-La Mancha, España (39 ° 54'02.7 "N 3 ° 17'31.4 "W) perteneciente a la empresa Hypor, importante proveedor de genética porcina y parte de la corporación Hendrix Genetics.

La temperatura ambiental se controló automáticamente mediante un sistema de enfriamiento por aire (RN 12, Exafan, España). Los extractores eliminaban el exceso de aire caliente de los boxes cuando se superaba la temperatura de consigna (20ºC + 4.0ºC); el aire caliente del exterior era introducido a través de las unidades de enfriamiento (superficie húmeda de celulosa) para reducir la temperatura y aumentar la humedad en los corrales. Para verificar el sistema de enfriamiento se ubicó un sensor de temperatura específico a 2 m de altura en el punto central de la nave (un total de seis corrales). El horario de iluminación, según el estado de las luces de la habitación, fue de 14 horas de luz y 10 horas de oscuridad, considerándose horario diurno de 7:00 h a 21:00 h y nocturno de 21:00 h a 07:00 h.

Todos los animales tenían acceso a dos pezones para beber y a alimento seco *ad-libitum* a través de una estación de alimentación electrónica (Compident MLP, Schauer Agrotronic GmbH, Austria), que pesaba el alimento en el comedero antes y después de la visita, proporcionando el valor de ingesta (Figura 1). El acceso al sistema de alimentación está controlado mediante la identificación unívoca de cada animal a través del marcador RFID ubicado en el crotal. De este modo, en cada visita se registra y almacena en una base de datos única el código del animal, la fecha, la hora y la cantidad de alimento consumido. Lo que permite calcular el consumo total de alimento y los tiempos de ocupación por cerdo. Ha de tenerse en cuenta que en el momento de inicio del ensayo, la ingesta de los animales no es monitorizada, comiendo estos *ad libitum*. Una

vez que los animales se han adaptado a las máquinas (periodo de aprendizaje), las estaciones de alimentaciones comenzaron a funcionar correctamente (monitorizando la ingesta).

A esta información proporcionada por la estación de alimentación se le añadía el peso de cada uno de los animales en cada visita, que al igual que la estación eran recopilados a través de la identificación del animal y mediante el empleo de una báscula de pesaje automatizada (Figura 1).



Figura 1. Báscula de pesaje y estación de alimentación empleada durante el ensayo.

Durante el transcurso del ensayo un total de 7 animales fueron descartados. Las causas de estas bajas fueron mordidas de la cola del animal por otros individuos, pérdida del sensor y crotal empleados para llevar a cabo la monitorización; o daños en el sensor.

La Tabla1 resume la información más relevante del ensayo para los 23 animales finalmente considerados, retirando aquellos que fueron dados de baja durante el ensayo.

Tabla 1. Nº de identificador del animal, peso al inicio y al final del ensayo de los animales monitorizados.

Nº cerdo	Nº crotal instalado en el cerdo	Peso al inicio del ensayo (kg)	Peso al final del ensayo (kg)
1	6200	41,4	135,7
2	6202	41,8	129,7
3	6204	41,3	129,9
4	6205	43,8	145,0
5	6208	43	129,9
6	6209	49,5	161,1
7	6211	43	129,7
8	6212	40	117,7
9	6213	47,3	131,7
10	6214	47,7	141,7
11	6215	40,6	108,4
12	6216	43,6	133,1
13	6219	35,6	114,7
14	6220	44	131,6
15	6221	37,2	110,2
16	6222	37,7	127,9
17	6223	37	119,2
18	6224	39,7	118,7
19	6225	37,7	118,0
20	6226	45	142,3

Nº cerdo	Nº crotal instalado en el cerdo	Peso al inicio del ensayo (kg)	Peso al final del ensayo (kg)
21	6227	34,6	118,0
22	6228	44,5	128,1
23	6229	39	109,7

2.2. Mediciones de temperatura

Para el registro de la temperatura de cada animal durante todo el periodo de cebo fueron empleados los sensores *iButton* DS1922E (Dallas Semiconductor, EE. UU.), dispositivos de adquisición de datos con sensor integrado de temperatura del tamaño de una pila de reloj (Figura 2a). Tanto la transferencia de datos como la configuración de los treinta sensores utilizados (Tabla 1) se realizó vía alámbrica mediante el empleo del lector "DS1402D-DR8" (Figura 2b) y el software "OneWireViewer versión 3.17.44" proporcionado por el distribuidor.

Cada *iButton* se acopló, con un sistema de sujeción resistente, al crotal de identificación del animal a supervisar (Figura 2c y2d).

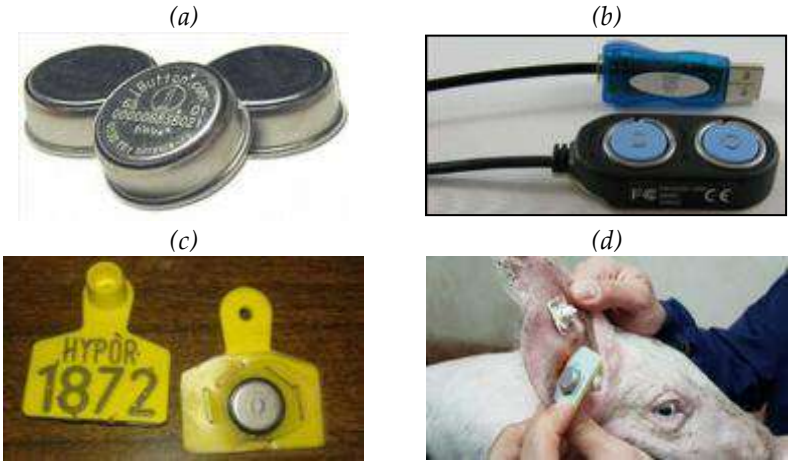


Figura 2. (a) Sensores iButton DS1992 E; (b) lector de escritorio para iButton DS1402D-DR8; (c) detalle del acoplamiento del sensor *iButton* al crotal; e (d) instalación del crotal con el sensor acoplado en el animal a monitorizar.

Para el registro de las condiciones de temperatura y humedad del ambiente donde se encontraban los animales durante todo el periodo de cebo fueron empleados 6 sensores *iButton* DS1923 (Dallas Semiconductor, EE. UU.), similares a los empleados para la monitorización animal, pero con sensor de humedad relativa añadido. Del mismo modo que para los sensores acoplados al crotal, tanto la transferencia de datos como la configuración (Tabla 1) se realizó vía alámbrica mediante el empleo del lector "DS1402D-DR8" y el software "*OneWireViewer* versión 3.17.44" proporcionado por el distribuidor.

Cada uno de los 6 *iButtons* empleados se integró en una estructura de protección, distribuyéndose estas de manera uniforme a lo largo de los dos boxes en estudio (Figura 3).

Tabla 2. Configuración empleada en los iButton DS1922E.

	Animal	Ambiental
Nº de iButton	30	6
Capacidad (datos/iButton)	8192 (8bit)	8192 (8bit)
Resolución (°C / %HR)	0.5°C / -	0.5°C / 0.6%

	Animal	Ambiental
Rango de Temperatura y Humedad	+15°C a +140°C-	-20°C to +85°C / 0 a 100 %HR
Intervalo de muestreo (s/dato)	360	720
Nº de remplazos de iButton		3

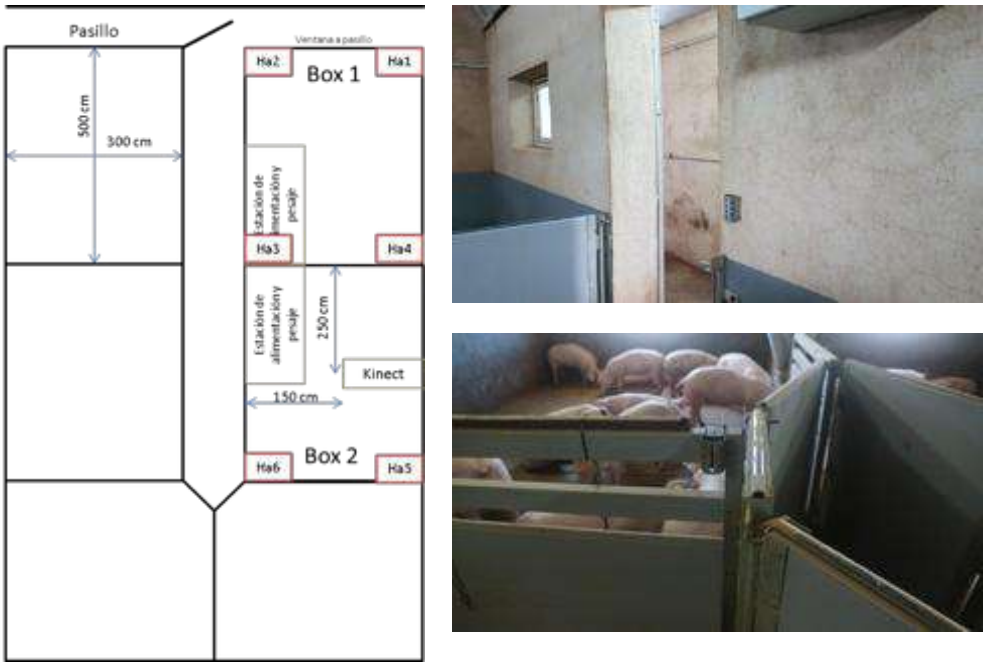


Figura 3. Plano de distribución de los sensores ambientales y detalle de la instalación de dos sensores (Ha2 y Ha6 en el mapa).

2.3. Analisis de los datos

El análisis de los datos registrados por los sensores empleados se ha realizado con el software MatLab R2018b (MathWorks, Massachusetts, EE. UU.).

El análisis se ha centrado en el estudio de las series temporales de temperatura de los animales. Se ha aplicado un análisis de clúster a las series temporales de temperatura para evaluar si se pueden establecer grupos de sensores con patrones de respuesta similares en su temperatura. El análisis de clúster calcula las distancias euclideas para cada par de observaciones y utilizando en este caso el algoritmo de la "media" basado en el uso de la distancia media no ponderada (o promedio de grupo) crea un árbol de clúster jerárquico.

3. Resultados y discusión

3.1. Temperatura animal vs temperatura ambiente & Ciclos día - noche

En la Figura 4 se incluye las series históricas de las temperaturas medias del ambiente y de los animales. Las temperaturas registradas en los *iButtons* ubicados en los crotales se mantienen sistemáticamente por encima de la temperatura ambiental. En la Figura 5 se muestra el detalle de esta serie histórica para un periodo de una semana; se observa la independencia de las fluctuaciones de ambas series, lo que indica que los sensores de los crotales están básicamente afectados por la temperatura corporal del animal. La media de las medianas de temperatura de los animales durante la noche fue 34,82 ± 0,79 ºC y durante el día 32,83 ± 1,0 ºC (Figura 6); mientras que el comportamiento

en la temperatura ambiental es el inverso: la media de las medianas durante el día fue de 23,22 ± 0,71 ºC y durante la noche 22,25 ± 0,82 ºC

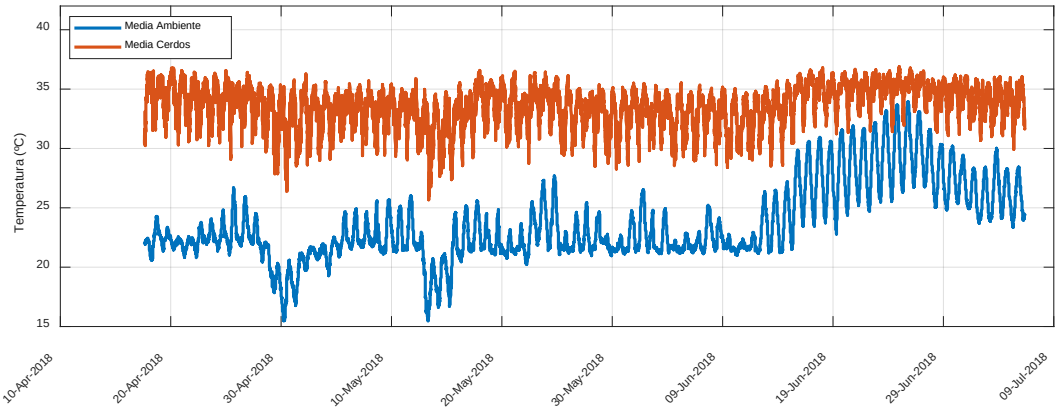


Figura 4. Series temporales de las temperaturas medias del ambiente y de los animales registradas durante el ensayo.

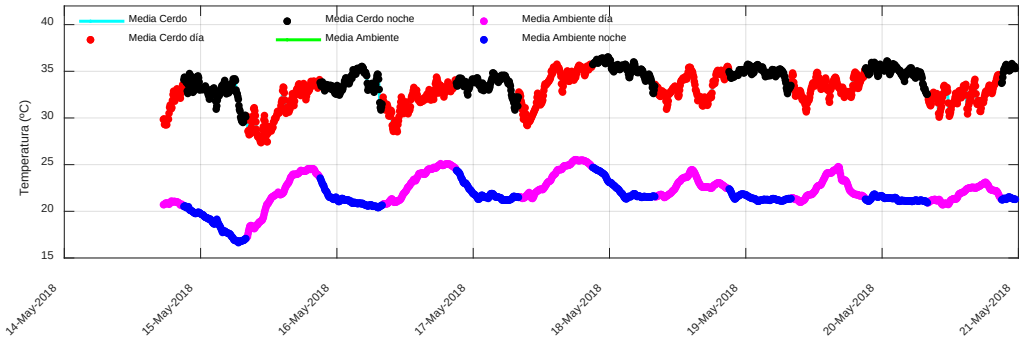


Figura 5. Detalle de una semana de las series temporales de las temperaturas medias del ambiente y de los animales; se señalan mediante diferentes colores los tramos horarios correspondientes a día y noche.

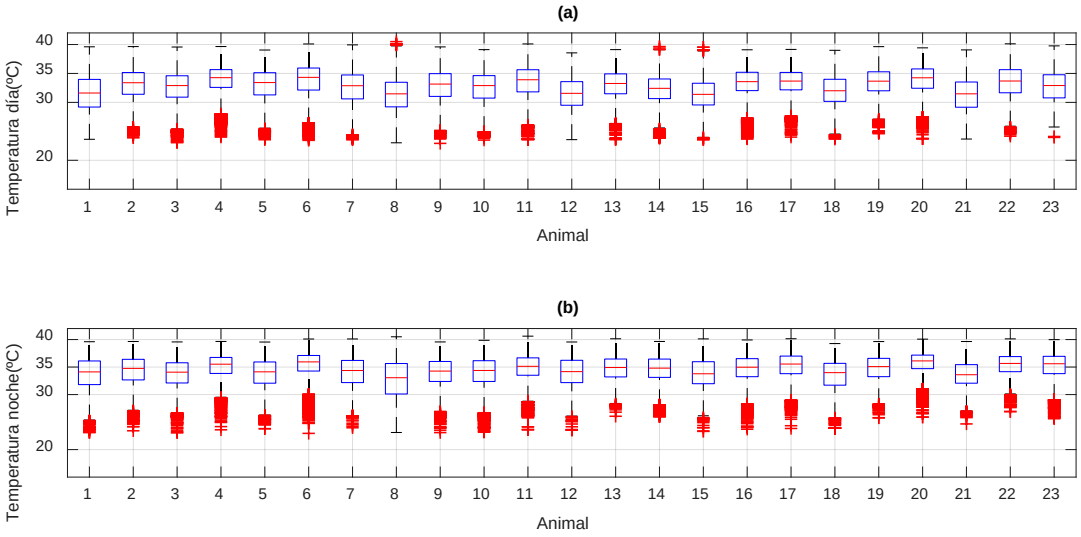


Figura 6. Gráficos de cajas y bigotes para los valores de la temperatura diurna y nocturna de cada uno de los animales monitorizados. La marca central roja corresponde a la mediana, los extremos de las cajas al primer y tercer cuartil y las cruces rojas a los *outliers*.

3.2. Temperatura animal

En la Figura 7 se incluye el dendrograma resultante del análisis de clúster aplicado a las series temporales de temperaturas de cada animal. Se identifican 5 grupos considerando la distancia marcada mediante la línea roja. En la Tabla 3 se muestran las medias y desviaciones de temperaturas de cada uno de los 5 grupos identificados. Se observa que las temperaturas disminuyen del grupo 1 al 5, mientras que las desviaciones aumentan. La Figura 8 representa la temperatura media y la desviación típica de cada uno de los animales clasificados según el grupo del clúster al que han sido asignados. Existe una relación lineal significativa con un coeficiente de determinación de 0,69 entre la media y la desviación típica de la serie temporal de temperaturas de cada animal. De forma que los animales de mayor temperatura media muestran menores variaciones de las temperaturas registradas; lo que ha sido previamente observado en trabajos anteriores con periodos de supervisión más cortos. Esto corrobora que las series temporales de temperaturas son una herramienta que permite la diferenciación entre animales según sus patrones térmicos [9].

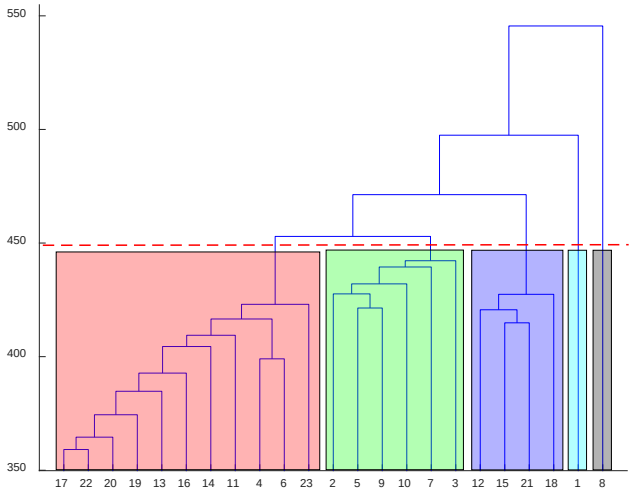


Figura 7. Dendrograma de la serie temporal de las temperaturas de los animales.

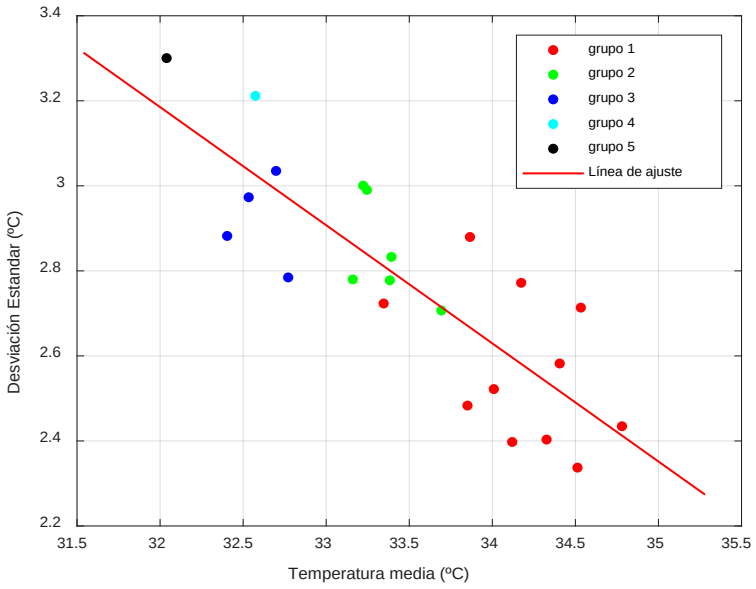


Figura 8. Relación la media y la desviación típica de las temperaturas registradas durante el ensayo por animal (r^2= 0,69; y = -0,28x+12) con identificación de los grupos asignados por el dendrograma.

Tabla 3. Dispersión de las temperaturas de los animales en el rango de temperatura ambiente más habitual.

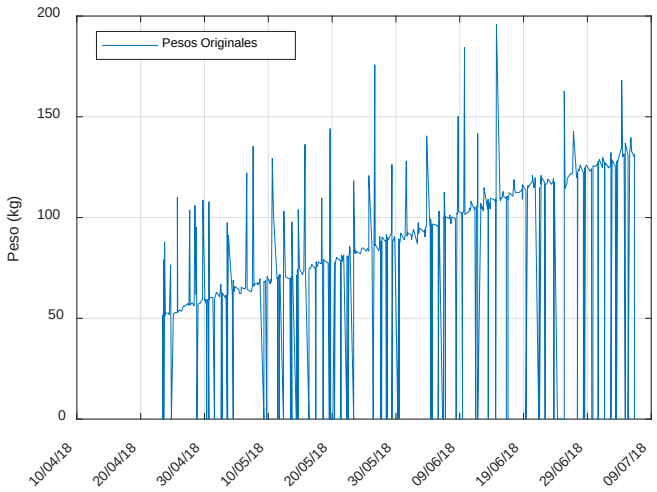
Temperatura media (°C)	Desviación estándar de la temperatura (°C)	Grupo en dendrograma
34,17	2,60	1
33,35	2,86	2
32,60	2,92	3
32,57	3,21	4
32,04	3,30	5

3.3. Estaciones de alimentación

A modo de ejemplo se muestra el registro del peso de un animal en cada visita a la estación de alimentación (Figura 10 a) a lo largo de todo el ensayo. Se observa que existen registros erróneos (por defecto y por exceso) que han de ser depurados antes de posteriores análisis. La Figura 10 b muestra el ajuste a los datos de peso en función de la fecha de registro habiendo eliminado los datos de pesos iguales a cero y aquellos anómalos por exceso y definidos como *outliers* (puntos que superan más de tres veces la mediana local, en una ventana de 5 puntos). Una vez eliminados estos puntos se realiza el ajuste y se asigna el valor de la función de ajuste a todos los puntos registrados, tanto los que han sido eliminados como *outliers* como los que no (línea roja en la Figura 10 b). El error medio de los ajustes realizados en los registros de peso de todos los animales es de un 2%.

En la Tabla 4 se incluyen los valores medios por animal de las variables obtenidas en la estación de alimentación. Son las variables número de visitas, tiempo medio de las visitas e ingesta media por visita, las que presentan mayor variabilidad entre animales (coeficientes de variación del 57%, 40% y 45% respectivamente). Mientras que las variables ingesta total y peso ganado presentan coeficientes de variación menores (11%). El coeficiente de determinación entre la ingesta total y el peso ganado es de 0,8; lo que está en consonancia con la pequeña variabilidad que se constata en los valores de eficiencias (un coeficiente de variación del 5% y un rango de entre 0,39 y 0,47). Estos valores de eficiencia se encuentran dentro de los rangos habituales en las fases de cebo, aunque existen trabajos en los que se han constatado eficiencias tan bajas como 0,082 en condiciones similares al presente estudio y para animales de unos 65 kg [9].

(a)



(b)

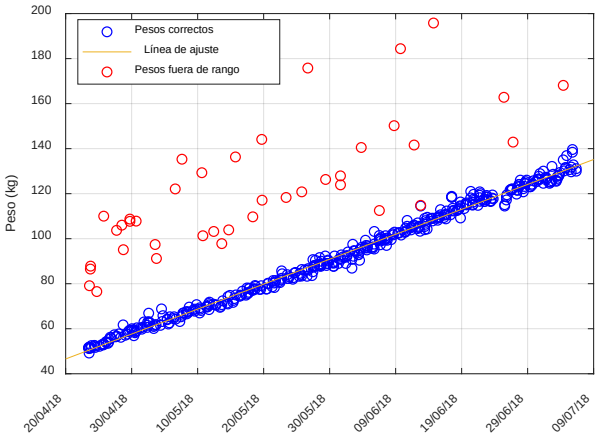


Figura 10. Registros de la báscula durante el ensayo para el animal con crotal 6220: (a) datos originales de peso; (b) filtrado de los pesos y obtención de la curva de ajuste

Tabla 4. Recopilación de los valores registrados por la estación de alimentación y báscula de pesaje durante el ensayo.

nº Crotal	nº visitas	Tiempo total de visita (s)	Tiempo medio visita (s)	Ingesta Total (kg)	Ingesta media por visita (kg)	Velocidad de ingesta total (g/s)	Peso ganado (kg)	Eficiencia (kg ganado / kg ingesta)	nº clúster
6229	505	233517	462,41	152,21	0,3	0,65	65,5	0,43	1
6220	542	213614	394,12	201,87	0,37	0,95	79,06	0,39	1
6223	564	224793	398,57	191,23	0,34	0,85	75,25	0,39	1
6209	656	231867	353,46	240,14	0,37	1,04	101,63	0,42	1
6228	785	172919	220,28	173,16	0,22	1	74	0,43	1
6215	970	202542	208,81	144,98	0,15	0,72	62,94	0,43	1
6225	1133	289776	255,76	164,72	0,15	0,57	72,84	0,44	1
6205	1278	290922	227,64	203,8	0,16	0,7	92,47	0,45	1
6219	1536	169266	110,2	171,81	0,11	1,02	69,88	0,41	1
6226	2065	215876	104,54	215,45	0,1	1	87,38	0,41	1
6222	2448	298379	121,89	190,98	0,08	0,64	85,23	0,45	1
6208	463	183903	397,2	179,87	0,39	0,98	81,63	0,45	2
6202	641	171559	267,64	178,27	0,28	1,04	77,13	0,43	2
6211	745	171683	230,45	166,3	0,22	0,97	77,44	0,47	2
6214	913	264242	289,42	191,23	0,21	0,72	87,77	0,46	2
6204	1123	228200	203,21	183,79	0,16	0,81	80,88	0,44	2
6213	2620	291074	111,1	187,28	0,07	0,64	73,25	0,39	2
6224	576	199051	345,57	163,11	0,28	0,82	72,34	0,44	3
6227	663	206810	311,93	181,76	0,27	0,88	72,4	0,4	3
6221	683	148972	218,11	159,74	0,23	1,07	66,88	0,42	3
6216	777	180289	232,03	190,51	0,25	1,06	84,41	0,44	3
6200	1642	247409	150,68	196,59	0,12	0,79	87,19	0,44	4
6212	1127	255801	226,98	163,73	0,15	0,64	72,69	0,44	5

3.4. Patrones de comportamiento

En este apartado se analizan algunas de las variables generadas por la estación de alimentación categorizadas en función del grupo al que está asignado cada animal en el análisis de clústeres. Se considerarán solo los grupos del 1 al 3, cada uno de ellos con un número de individuos superior al 15% de la población, eliminando los grupos 4 y 5 por estar compuestos por un único animal. La generación de grupos con un único individuo alejado del resto de la población puede ser indicio de ciertas anomalías en el registro de las temperaturas de esos individuos.

El número de visitas a la estación es un indicador que puede relacionarse con pautas de comportamiento de alimentación, de nivel de actividad y de jerarquía en los animales. En la Figura 11 se muestra la mediana y los rangos inter-cuartiles para esta variable categorizadas por grupo de patrón térmico. Se observa que del grupo 1 al grupo 3 tanto la mediana (970, 829 y 673 visitas respectivamente) como la variabilidad intra-grupo decrecen. Mientras que los animales del grupo 1 tienen un comportamiento respecto a actividad muy heterogéneo, los animales del grupo 3 muestran un nivel de actividad muy similar entre ellos.

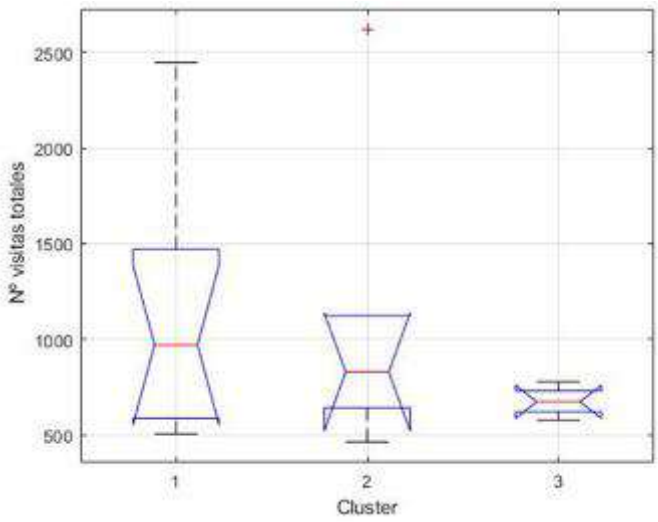


Figura 11. Gráfico de caja y bigotes para el nº de visitas agrupadas por los grupos resultantes del dendrograma. La marca central roja corresponde a la mediana, los extremos de las cajas al primer y tercer cuartil y las cruces rojas a los *outliers*.

Al grupo 1 pertenecen los animales con los registros de temperaturas medias más elevados y con menor variabilidad, podrían considerarse más próximos al confort térmico. Por otro lado, la heterogeneidad en nivel de actividad de este grupo podría indicar que cada animal busca también su óptimo en cuanto a pautas de alimentación. Los animales del grupo 3 caracterizados por menor temperatura y mayor variabilidad térmica realizan un número significativamente menor de visitas, pudiendo indicar que estos individuos conforman un subgrupo de comportamiento condicionado por el de otros animales.

A pesar de la disparidad en el número de visitas entre animales, se constata que la ganancia de peso, la ingesta total y por tanto la eficiencia son muy similares entre ellos al final del periodo supervisado, indicando que el sistema de alimentación *ad libitum* mediante las estaciones automatizadas amortigua el efecto que las pautas de alimentación pueden tener sobre la eficiencia de estos animales.

La eficiencia en la alimentación no muestra diferencias significativas entre los grupos, lo que puede ser debido al pequeño rango de variación encontrado (0,39 a 0,47y a la propagación de errores de medida tanto en el peso de los animales como de la ingesta por visita. Asumiendo

errores de medida del 5% en estas dos variables, la eficiencia acumularía un error de hasta el 10%, lo que duplica al coeficiente de variación del 5%, y anula por tanto las posibles diferencias entre animales. Todo ello explica que en este experimento no se hayan corroborado los resultados de trabajos previos en los que para rangos de eficiencia mayores (0,082 – 0,43) se verificaron correlaciones de 0,77 entre los perfiles térmicos y la eficiencia.

4. Conclusiones

Mediante el registro de alta frecuencia de la temperatura de animales en un cebo completo es posible identificar individuos con diferentes patrones térmicos: animales caracterizados por una mayor temperatura y menor variabilidad térmica, frente a animales que registran menores temperaturas medias y mayor variabilidad térmica.

La integración de las variables depuradas de las estaciones automatizadas permite perfilar patrones diferenciales de comportamiento en la alimentación (número de visitas) que se relacionan con los patrones térmicos. De forma que el grupo de animales con menor variabilidad térmica presentan un comportamiento de alimentación *ad libitum* particularizado.

El pequeño rango de eficiencia verificado en este experimento no permite establecer relaciones entre los perfiles térmicos y la propia eficiencia, tal y como ha sido constatado en estudios previos con rangos de eficiencia más amplios. En estos casos es el patrón térmico el que permite caracterizar individualmente a los animales.

5. Agradecimientos

Trabajo financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades "Desarrollo de una PRoducción porcina más sostenible a través de la mejora del ÍNdice de ConvErsión (PRINCE)" RTC-2017-5977-2 y Fondos Estructurales de la Unión Europea.

Referencias

1. Loughmiller, J. A., Spire, M. F., Dritz, S. S., Fenwick, B. W., Hosni, M. H., & Hogge, S. B. (2001). Relationship between mean body surface temperature measured by use of infrared thermography and ambient temperature in clinically normal pigs and pigs inoculated with Actinobacillus pleuropneumoniae. American journal of veterinary research, 62(5), 676-681.
2. Andersen, H. M. L., Jørgensen, E., Dybkjær, L., & Jørgensen, B. (2008). The ear skin temperature as an indicator of the thermal comfort of pigs. Applied Animal Behaviour Science, 113(1), 43-56.
3. Labussière, E., Dubois, S., van Milgen, J., & Noblet, J. (2013). Partitioning of heat production in growing pigs as a tool to improve the determination of efficiency of energy utilization. Frontiers in physiology, 4.
4. Meunier-Salaün, M. C., Guerin, C., Billon, Y., Sellier, P., Noblet, J., & Gilbert, H. (2014). Divergent selection for residual feed intake in group-housed growing pigs: characteristics of physical and behavioural activity according to line and sex. animal, 8(11), 1898-1906.
5. Lao, F., T. Brown-Brandl, et al. (2016). Automatic recognition of lactating sow behaviors through depth image processing. Computers and Electronics in Agriculture 125: 56-62.
6. Nasirahmadi, A., S. A. Edwards, et al. (2017). Implementation of machine vision for detecting behaviour of cattle and pigs. Livestock Science 202: 25-38.
7. Cornou, C. and S. Lundbye-Christensen (2010). Classification of sows' activity types from acceleration patterns using univariate and multivariate models. Computers and Electronics in Agriculture 72(2): 53-60.
8. Leliveld, L. M., S. Düpjan, et al. (2016). Behavioural and physiological measures indicate subtle variations in the emotional valence of young pigs. Physiology & Behavior 157: 116-124.
9. Requejo, J. M.;Garrido-Izard, M.;Correa, E. C.;Villarroel, M.; & Diezma, B. (2018). Pig ear skin temperature and feed efficiency: Using the phase space to estimate thermoregulatory effort. Biosystems Engineering, 174, 80-88.

Área temática:

Tecnología poscosecha



X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Actividad antifúngica contra *Fusarium culmorum* de los extractos de hojas de *Stevia rebaudiana* y sus combinaciones con extractos de semillas de *Silybum marianum* y *Lycium barbarum*

Petruta Mihaela Matei[1], Eduardo Pérez-Lebeña[2], Laura Buzón-Durán[2], Jesús Martín-Gil[2], Beatrice Michaela Iacomi[1], M. Carmen Ramos-Sánchez[3], Pablo Martín-Ramos[4,*]

[1] Department of Bioengineering of Horticultural and Viticultural Systems, University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine of Bucharest, Bulevardul Mărăști 59, București 011464, Rumania; petruta.matei@horticultura-bucuresti.ro (P.M.M.); b.iacomi@yahoo.fr (B.M.I.)
[2] Departamento de Ingeniería Agroforestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, Avenida de Madrid 44, 34004 Palencia, España; eplebena@gmail.com (E.P.-L); laura.buzon.duran@gmail.com (L.B.-D.); mgil@iaf.uva.es (J.M.-G.)
[3] Servicio de Microbiología y Parasitología, Hospital Universitario Rio Hortega, SACYL, Calle Dulzaina, 2, 47012 Valladolid, España; mramoss@saludcastillayleon.es
[4] Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca, España; pmr@unizar.es

Resumen: *Fusarium culmorum* es un hongo que produce la fusariosis (*scab* o FHB), una enfermedad que plantea un importante reto en la producción de cereales y conlleva notables implicaciones de seguridad alimentaria por la contaminación con micotoxinas (tricotecenos). Ocasionalmente, se desarrolla en almacén cuando las condiciones le son favorables (a bajas temperaturas y alta humedad) o si el grano ha sido secado insuficientemente y de forma rápida. En este estudio se ha evaluado *in vitro* el efecto antifúngico de los extractos de hojas de estevia, solos o en combinación con polifenoles (procedentes de semillas de cardo asnal, de semillas de goji o ácido gálico puro), contra este fitopatógeno. Se han ensayado distintas concentraciones, desde 31.25 μg·mL^{-1} a 1 mg·mL^{-1} y se han obtenido, para el tratamiento basado sólo en las hojas de estevia, concentraciones inhibitorias CE_{50} y CE_{90} de 112 y 283 μg·mL^{-1}, respectivamente; y para los tratamientos basados en hojas de estevia y polifenoles, valores de CE_{50} y CE_{90} de 160 y 500 μg·mL^{-1}, respectivamente. Estos resultados llevan a concluir que, aunque el comportamiento para las mezclas es no-sinérgico para este patógeno (la respuesta a la presencia de polifenoles es impredecible), la actividad antifúngica de las hojas de estevia (referida, principalmente a esteviósido como principio activo) es incuestionable. En consecuencia, se propone la aplicación de extractos de hojas de estevia para la protección contra la fusariosis de cosechas y del grano en almacenes.

Palabras clave: antifúngico, cardo asnal, estevia, fusariosis, goji.

1. Introducción

Los hongos patógenos presentes en el ambiente suponen una amenaza para las cosechas: a escala mundial, las enfermedades producidas por hongos fitopatógenos contribuyen de forma notable a las pérdidas totales en términos de rendimiento de cultivo. En el abordaje de este reto, el uso de pesticidas tradicionales conlleva desventajas relacionadas con la gestión de peligros,

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3456

costes, residuos y amenazas para la salud humana y el medio ambiente. En consecuencia, existe un creciente interés en la valorización de los productos naturales como agentes antimicrobianos, ya que pueden representar una alternativa más respetuosa con el medio ambiente.

Stevia rebaudiana (Bert.) Bertoni (comúnmente conocida como estevia) es una planta herbácea perenne de la familia Asteraceae. Se ha sugerido que sus extractos pueden ejercer efectos beneficiosos sobre la salud humana [1] y varios estudios han investigado su actividad antimicrobiana [2,3]. No obstante, la búsqueda bibliográfica ha revelado que su actividad antifúngica / fungistática ha sido poco estudiada [4-6]. En cuanto a los hongos fitopatógenos, Shukla, *et al.* [7] presentaron resultados prometedores, encontrando que los extractos alcohólicos y acuosos de las hojas de *Stevia rebaudiana* mostraban porcentajes de inhibición del crecimiento radial de 65,3% y 73,6%, respectivamente, contra *Fusarium oxysporum*.

Contra otras especies de *Fusarium* también han sido referidas actividades inhibitorias fuertes y específicas producidas por compuestos fenólicos y polifenólicos de origen natural [8], y en el caso de *F. culmorum*, se han logrado actividades antifúngicas *in vitro* mejoradas por utilización de complejos de inclusión de polifenoles y nanopartículas de plata (AgNPs) [9].

El objetivo del presente estudio ha sido explorar el presumible efecto sinérgico contra *F. culmorum* que podría resultar de la combinación de las hojas de *Stevia rebaudiana* con extractos de cardo mariano (*Silybum marianum* (L.) Gaertn) y goji (semillas de *Lycium barbarum* (L.), caracterizados por contenidos fenólicos totales de 29 mg de GAE/gDW [10] y 9 mgGAE/gDW [11], respectivamente.

El interés de la investigación radica en la posibilidad de combatir la fusariosis (*Fusarium head blight*, FHB), que plantea problemas en agricultura y para la industria alimentaria: no solo conduce a pérdidas de rendimiento hasta el 50%, sino también contaminación por tricotecenos.

2. Material y métodos

2.1. Reactivos

Las hojas de *Stevia rebaudiana* (nº de producto S5381), el ácido gálico (CAS 149-91-7) y el etanol (CAS 64-17-5) fueron suministrados por Sigma-Aldrich/Merck KGaA (Darmstadt, Alemania). Las semillas de *Silybum marianum* y *Lycium barbarum*, procedentes de cultivos orgánicos, se adquirieron de Starwest Botanicals (Sacramento, CA, EE.UU.).

2.2. Preparación de las soluciones bioactivas

Se ensayaron un tratamiento basado solo en hojas de *Stevia rebaudiana* y tres tratamientos diferentes en combinación con polifenoles. Para el primero, se utilizó una solución hidroalcohólica (1:1, v/v) de hojas de *Stevia rebaudiana* (1257 mg en 50 mL de agua destilada y 50 mL de etanol). El contenido de esteviósido en las hojas de estevia fue cercano al 10%, por lo tanto, 1260 mg de hojas de estevia contendrían aproximadamente 126 mg de esteviósido.

Los otros tres tratamientos se basaron en las soluciones hidroalcohólicas que resultaron de mezclar una solución acuosa de hojas de *Stevia rebaudiana* (1257 mg en 50 mL de agua destilada) con una solución etanólica de 50 mL de: (*i*) ácido gálico (26 mg); (*ii*) semillas de *S. marianum* (252 mg); o (*iii*) semillas de goji (252 mg). El contenido de polifenoles en esas soluciones iniciales fue de 0,26 mg GAE·mL^{-1}, 0,073 mg GAE·mL^{-1} y 0,023 mg GAE·mL^{-1}, respectivamente.

Las soluciones se sonicaron con un ultrasonicador UIP1000hdT de tipo sonda (Hielscher, Teltow, Alemania; 1000 W, 20 kHz) durante 20 min, manteniendo la temperatura por debajo de 60 °C.

2.3. Aislado fúngico y condiciones de crecimiento

Las pruebas *in vitro* se realizaron utilizando *Fusarium culmorum* CS7071, aislado de semillas de trigo infectadas, y siguiendo el procedimiento descrito anteriormente en [9]. La identificación se realizó sobre la base de la morfología de los conidios y los conidióforos y de las propiedades del cultivo. Se realizó una identificación molecular utilizando cebadores específicos de *Fusarium* dirigidos al factor de elongación 1 (EF1) [12,13]: se verificó una secuencia de FASTA en el NCBI Blast, confirmando la correspondencia con el gen del factor de elongación 1 (EF1a), cds parcial, identificador de secuencia MG857546.1 del cultivo de *F. culmorum* ICMP:15476.

La purificación del aislado se llevó a cabo mediante aislamiento de monoesporas. El aislado se mantuvo en muestras de agar de malta, a 4 °C, y se prepararon subcultivos frescos para las pruebas de sensibilidad, transfiriendo tapones de hifas a placas de Petri que contenían agar con dextrosa de patata (PDA; suministrado por Scharlau, Barcelona, España).

2.4. Ensayos in vitro de inhibición del crecimiento micelial

La actividad biológica de los tratamientos se determinó mediante el método de dilución en agar, incorporando alícuotas de soluciones madre a un medio de PDA para alcanzar concentraciones finales de 31,25, 62,5, 125, 250, 500 y 1000 μg·mL^{-1}. Los discos miceliales de patógeno (de 8 mm de diámetro), tomados de los bordes de un cultivo de 7 días, se transfirieron a placas llenas con los medios referidos anteriormente (tres por tratamiento y concentración), utilizando como control placas que contenían solo PDA.

El crecimiento radial del micelio se determinó mediante el cálculo del promedio de dos diámetros de colonias perpendiculares para cada réplica. La inhibición del crecimiento micelial para cada tratamiento y concentración después de 7 días de incubación, a 22 °C en la oscuridad, se calculó de acuerdo con la fórmula: $((d_c - d_t)/d_c) \times 100$, donde d_c es el diámetro promedio de la colonia fúngica en el control y d_t es el diámetro promedio de la colonia de hongos tratada con el compuesto objeto de ensayo.

Los resultados también se expresaron como concentraciones efectivas CE_{50} y CE_{90}, estimadas mediante la regresión de los valores de inhibición del crecimiento radial (%) frente a los valores en logaritmo en base 10 de las concentraciones de tratamiento.

2.5. Análisis estadísticos

Los datos se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) en el software IBM SPSS Statistics v.25. Para la comparación *post hoc* de las medias se utilizó el test HSD de Tukey con un nivel de probabilidad de 0,05 ($p < 0,05$).

3. Resultados

La inhibición del crecimiento radial *in vitro* lograda por cada uno de los tratamientos después de 7 días se muestra en la Figura 1 (solo para una repetición por cada tratamiento), y los valores medios de las tres repeticiones se resumen en la Figura 2.

El aumento en la concentración de los complejos de inclusión de 31,25 μg·mL^{-1} a 1000 μg·mL^{-1} conllevó una reducción en el crecimiento radial del micelio en todos los casos, con diferencias estadísticamente significativas entre las diversas concentraciones (Figura 2).

La inhibición completa se logró con las dos dosis más altas (500 y 1000 μg·mL^{-1}) para todos los tratamientos. Aunque no fuesen estadísticamente significativas, se pudieron observar diferencias para las dosis de 250 μg·mL^{-1}: mientras que el tratamiento basado solo en las hojas de estevia alcanzó una inhibición del 100%, los tratamientos basados en las hojas de estevia+ácido gálico, hojas de estevia +semillas de cardo mariano y de hojas de estevia+semillas de goji condujeron a porcentajes de inhibición del 90,4%, 90,1% y 87,2%, respectivamente.

A una dosis de 125 μg·mL^{-1} se detectaron diferencias estadísticamente significativas (Tabla 1) entre tratamientos, con porcentajes de inhibición del 73,4%, 22,9%, 35,1% y 41% para los tratamientos basados en hojas de estevia solas, hojas de estevia+ácido gálico, hojas de estevia+semillas de cardo mariano y hojas de estevia+semillas de goji, respectivamente.



Figura 1. (**a**) Ensayos de inhibición de crecimiento frente a *F. culmorum* para hojas de *S. rebaudiana* a tres concentraciones representativas. *De arriba a abajo*: 500 μg·mL^{-1}, 250 μg·mL^{-1}, 125 μg·mL^{-1} y el control (el color azul se debe al paper azul situado bajo las placas de Petri). (**b**) Ensayos de inhibición del crecimiento para los tres tratamientos con polifenoles a diferentes concentraciones. *De arriba a abajo*: hojas de *S. rebaudiana* con ácido gálico, hojas de *S. rebaudiana* con extracto de semillas de *S. marianum*, hojas de *S. rebaudiana* con extracto de semillas de *L. barbarum*, y control (no tratado). *De izquierda a derecha*: concentraciones a 1000 μg·mL^{-1}, 500 μg·mL^{-1}, 250 μg·mL^{-1}, 125 μg·mL^{-1}, 62,5 μg·mL^{-1} y 31,25 μg·mL^{-1}.

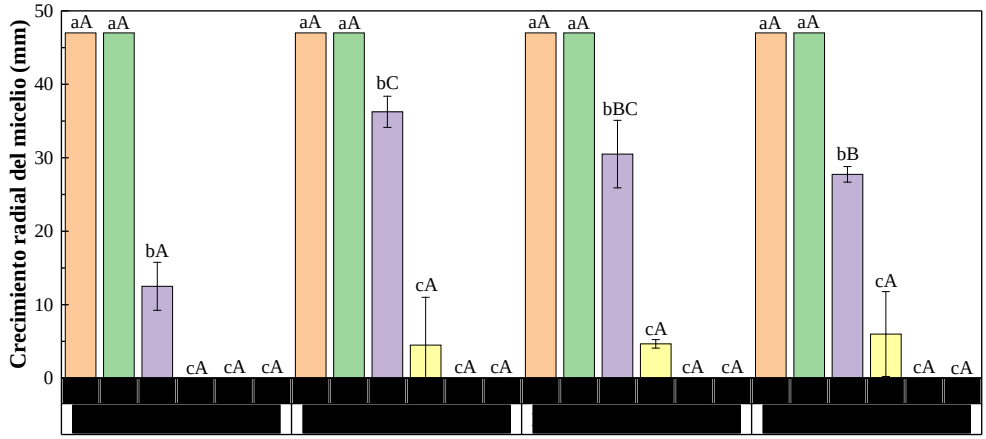


Figura 2. Valores de crecimiento radial del micelio de *F. culmorum* en presencia de hojas de *S. rebaudiana* (HS) y de HS con diferentes fuentes de polifenoles a distintas concentraciones (en μg·mL^{-1}). Para el control (no mostrado) se obtuvo un crecimiento radial de 47 mm en todos los casos. Las concentraciones etiquetadas con las mismas letras minúsculas no son significativamente diferentes para $p < 0,05$ según el test de Tukey. Los tratamientos etiquetados con las mismas letras mayúsculas no son significativamente diferentes para $p < 0,05$ a la dosis indicada. Todos los valores presentados son medias de tres repeticiones. Las barras de error indican desviaciones estándar.

Tabla 1. Análisis de las diferencias en valores de crecimiento radial para los distintos tratamientos a una concentración de 125 μg·mL^{-1}, con un intervalo de confianza del 95%, según el test de Tukey.

Comparaciones	Diferencia	Diferencia estandarizada	Pr > Dif	Significativo
HS *vs* HS+ácido gálico	-23,750	-9,516	< 0,0001	Sí
HS *vs* HS+semillas *S. marianum*	-18,000	-7,212	0,000	Sí
HS *vs* HS+semillas *L. barbarum*	-15,250	-6,110	0,001	Sí
HS+semillas *L. barbarum vs* HS+ácido gálico	-8,500	-3,406	0,038	Sí
HS+semillas *L. barbarum vs* HS+semillas *S. marianum*	-2,750	-1,102	0,698	No
HS+ semillas *S. marianum vs* HS+ácido gálico	-5,750	-2,304	0,176	No

Valor crítico para la prueba de Tukey: 4,529

Los resultados de las pruebas de sensibilidad también pueden expresarse en términos de concentraciones efectivas CE_{50} y CE_{90}, es decir, en forma de aquellas concentraciones que reducen el crecimiento del micelio en un 50% y 90%, respectivamente (Tabla 2). La sensibilidad del aislado fue muy similar para los tres tratamientos con polifenoles, que mostraron una inhibición notablemente menor que el tratamiento con solo hojas de estevia. De acuerdo con el método de Wadley [14] para la cuantificación del nivel de interacción, se obtuvo un factor de sinergia FS=0,6 (<1,0) en los tres casos, lo que sugiere una interacción antagónica entre los fungicidas.

Tabla 2. Concentraciones efectivas que inhibieron el crecimiento micelial en un 50% y un 90% (CE_{50} y CE_{90}, respectivamente).

Concentración (μg·mL^{-1})	HS	HS+ácido gálico	HS+semillas de cardo mariano	HS+semillas de goji
CE_{50}	112,1	166,1	156,9	154,5
CE_{90}	282,7	508,6	488,3	486,4

HS: hojas de estevia

4. Discusión

Como se ha señalado anteriormente, los resultados de actividad observados para las tres mezclas con polifenoles fueron muy similares, a pesar de sus diferentes contenidos de ácido gálico (o equivalentes de ácido gálico). Este hallazgo sugiere que la acción antifúngica de esas mezclas debe referirse a los principios activos de las hojas de estevia (en lugar de a los fenoles de los extractos de cardo de leche o de semillas de goji). Además, los tratamientos con solo hojas de estevia mostraron la mayor inhibición de entre los cuatro tratamientos objeto de estudio en todas las dosis probadas.

Este hallazgo apoya la actividad antifúngica de las hojas de estevia defendida por Shukla, *et al.* [7], y que debe atribuirse principalmente al esteviósido y, en menor medida, al rebaudosido y al ácido docosahexaenoico [15].

Aunque Salehi, *et al.* [16] informaron de que los extractos fenólicos de *S. marianum* tenían actividad antifúngica en hongos dermatofíticos y saprófitos, y Skenderidis, *et al.* [17] encontraron actividad contra *F. oxysporum* para el goji, en el estudio presentado aquí su actividad contra este aislado fúngico no ha resultado relevante.

Esta baja actividad puede referirse tentativamente a sus bajas concentraciones relativas en ácido gálico (o equivalentes de ácido gálico), ya que Song, *et al.* [18], en ensayos con vinos de goji, utilizaron concentraciones entre 5 y 50 veces mayores. Con respecto a la eficacia del ácido gálico

contra *Fusarium* spp., Nguyen, *et al.* [19] ensayaron la actividad antifúngica del ácido gálico obtenido de *Terminalia nigrovenulosa* contra *F. solani*, observando una supresión de la enfermedad del 81% para 1000 μg·mL^{-1}. Pani, *et al.* [8] no informaron los valores de CE_{50} para los diferentes polifenoles ensayados contra *F. culmorum* (en cambio cuantificaron el crecimiento fúngico en términos de biomasa fúngica seca), pero encontraron que el crecimiento fúngico solo se inhibió ligeramente cuando se añadió al cultivo líquido ácido gálico 1,5 mM (255 mg·mL^{-1}). La inhibición alcanzada en [9] para dosis de ácido gálico del mismo orden de magnitud a las reportadas en este documento sería atribuible a la formación de compuestos de inclusión y a su combinación con oligómeros de quitosano y nanopartículas de plata.

4.1. Mecanismo de acción

La actividad antifúngica del esteviósido (el principal constituyente del extracto de *Stevia rebaudiana*) ha sido referida a los derivados beta-OH del isosteviol (7β-, 11β-, 12β- y 17β-hidroxi-isosteviol) [20] que resultan de la interacción esteviósido-hongos. En un primer paso, la hidrólisis del esteviósido mediada por hongos conduce al aglicón esteviol o a su derivado reordenado isosteviol (ácido *ent*-16-cetobeyerano-19-oico). Posteriormente, los hongos metabolizan el isosteviol a derivados de beta-OH a través de una introducción estereoselectiva de grupos OH en las posiciones C-7, C-11, C-12 y C-17, así como C-1, C-6, C-15, y con una mayor cetonización en las posiciones C-1 y C-7 [21]. La evidencia sugiere que el mecanismo de acción de estas moléculas estaría relacionado con el desacoplamiento de la fosforilación oxidativa mitocondrial o con la permeabilización de la membrana celular, como ocurre con el ácido 7*β*-hidroxi-kaurenoico [22] (kaurenos y beyeranos están muy relacionados).

En el caso de *Fusarium verticilioide*s (la única especie del género *Fusarium* estudiada), la biotransformación de isosteviol conduce a los ácidos *ent*-7,6-hidroxi-16-cetobeyerano-19-oico y *ent*-12-hidroxi-16-cetobeyerano-19-oico como principales metabolitos (Figura 3) [23,24]. La hidroxilación selectiva del núcleo cetobeyerano de estos metabolitos es similar a la que ha llevado a la actividad potenciada de los metabolitos identificados por Lin, *et al.* [25], con hidroxilación en posiciones 7/12, 7/16 y 14/16. Existe la presunción de que algunos de estos metabolitos sean los que están involucrados en la transformación de isosteviol con *F. culmorum* y a que a ellos sea referida la eficacia antifúngica observada.

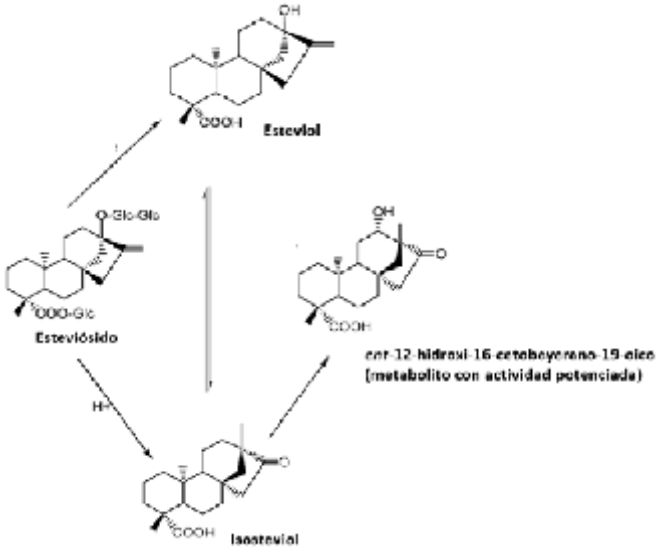


Figura 3. Estructuras de esteviósido, esteviol, isosteviol y uno de los metabolitos presumiblemente implicados en la interacción esteviósido-*F. culmorum*

5. Conclusiones

El potencial efecto sinérgico en términos de actividad antifúngica resultante de la combinación de soluciones acuosas de hojas de estevia y soluciones alcohólicas de cardo mariano y extractos de semillas de goji, preconizado como hipótesis de trabajo, no ha sido evidenciado contra *F. culmorum*. Se ha observado que, a las concentraciones utilizadas en nuestros ensayos y para este patógeno específico, los contenidos fenólicos de estas dos últimas plantas no han contribuido a aumentar la eficacia antifúngica de los extractos de estevia sola, los cuales –sin embargo- se han mostrado suficientemente bioactivos. De hecho, han dado lugar a valores de CE_{50} y de CE_{90} de 112,1 y 282,7 $\mu g \cdot mL^{-1}$, respectivamente. La falta de sinergismo observada orienta a la conclusión de que la simple concurrencia de varios tipos de polifenoles no es determinante de la actividad antifúngica y esta debe ser referida a la presencia preferente de intermediarios con hidroxilación selectiva sobre el núcleo cetobeyerano. Estos resultados sugieren que los extractos de las hojas de *S. rebaudiana* pueden ser prometedores antifúngicos para el tratamiento de la fusariosis, incluso como tratamiento único.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada a través del proyecto VA258P18 de la Junta de Castilla y León y el proyecto UZ2019-TEC-07 de la Universidad de Zaragoza.

Referencias

1. Ruiz-Ruiz, J.C.; Moguel-Ordoñez, Y.B.; Segura-Campos, M.R. Biological activity of *Stevia rebaudiana* Bertoni and their relationship to health. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2015**, *57*, 2680-2690.
2. Pina-Pérez, M.C.; Rivas, A.; Martínez, A.; Rodrigo, D. Effect of thermal treatment, microwave, and pulsed electric field processing on the antimicrobial potential of açaí (*Euterpe oleracea*), stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni), and ginseng (*Panax quinquefolius* L.) extracts. *Food Control* **2018**, *90*, 98-104.
3. Kumari, M.; Chandra, S. Stevioside glycosides from *in vitro* cultures of *Stevia rebaudiana* and antimicrobial assay. *Brazilian Journal of Botany* **2015**, *38*, 761-770.
4. Garcia, D.; Ramos, A.J.; Sanchis, V.; Marín, S. Effect of *Equisetum arvense* and *Stevia rebaudiana* extracts on growth and mycotoxin production by *Aspergillus flavus* and *Fusarium verticillioides* in maize seeds as affected by water activity. *Int. J. Food Microbiol.* **2012**, *153*, 21-27.
5. Muanda, F.N.; Soulimani, R.; Diop, B.; Dicko, A. Study on chemical composition and biological activities of essential oil and extracts from *Stevia rebaudiana* Bertoni leaves. *LWT - Food Sci. Technol.* **2011**, *44*, 1865-1872.
6. Garcia, D.; Garcia-Cela, E.; Ramos, A.J.; Sanchis, V.; Marín, S. Mould growth and mycotoxin production as affected by *Equisetum arvense* and *Stevia rebaudiana* extracts. *Food Control* **2011**, *22*, 1378-1384.
7. Shukla, S.; Mehta, A.; Bajpai, V.K. Phytochemical screening and anthelmintic and antifungal activities of leaf extracts of *Stevia rebaudiana*. *J. Biol. Act. Prod. Nat.* **2013**, *3*, 56-63.
8. Pani, G.; Scherm, B.; Azara, E.; Balmas, V.; Jahanshiri, Z.; Carta, P.; Fabbri, D.; Dettori, M.A.; Fadda, A.; Dessì, A., *et al.* Natural and natural-like phenolic inhibitors of type B trichothecene *in vitro* production by the wheat (*Triticum* sp.) pathogen *Fusarium culmorum*. *J. Agric. Food. Chem.* **2014**, *62*, 4969-4978.
9. Matei, P.; Iacomi, B.; Martín-Gil, J.; Pérez-Lebeña, E.; Ramos-Sánchez, M.; Barrio-Arredondo, M.; Martín-Ramos, P. *In vitro* antifungal activity of composites of AgNPs and polyphenol inclusion compounds against *Fusarium culmorum* in different dispersion media. *Agronomy* **2018**, *8*.
10. Mhamdi, B.; Abbassi, F.; Smaoui, A.; Abdelly, C.; Marzouk, B. Fatty acids, essential oil and phenolics composition of *Silybum marianum* seeds and their antioxidant activities. *Pak J Pharm Sci* **2016**, *29*, 953-959.
11. Islam, T.; Yu, X.; Badwal, T.S.; Xu, B. Comparative studies on phenolic profiles, antioxidant capacities and carotenoid contents of red goji berry (*Lycium barbarum*) and black goji berry (*Lycium ruthenicum*). *Chem. Cent. J.* **2017**, *11*.

12. O'Donnell, K.; Kistler, H.C.; Cigelnik, E.; Ploetz, R.C. Multiple evolutionary origins of the fungus causing Panama disease of banana: Concordant evidence from nuclear and mitochondrial gene genealogies. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **1998**, *95*, 2044-2049.
13. Karlsson, I.; Edel-Hermann, V.; Gautheron, N.; Durling, M.B.; Kolseth, A.-K.; Steinberg, C.; Persson, P.; Friberg, H.; Cullen, D. Genus-specific primers for study of *Fusarium* communities in field samples. *Appl. Environ. Microbiol.* **2016**, *82*, 491-501.
14. Wadley, F.M. *The evidence required to show synergistic action of insecticides and a short cut in analysis*; U.S. Government Printing Office: Washington DC, USA, 1945.
15. Bajpai, V.K.; Kim, H.R.; Hou, C.T.; Kang, S.C. Microbial conversion and *in vitro* and *in vivo* antifungal assessment of bioconverted docosahexaenoic acid (bDHA) used against agricultural plant pathogenic fungi. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* **2009**, *36*, 695-704.
16. Salehi, M.; Hasanloo, T.; Mehrabian, S.; Farahmand, S. Effects of *Silybum marianum* (L.) Gaertn seeds extract on dermatophytes and saprophytes fungi *in vitro* compare to clotrimazol. *Pharmaceutical Sciences* **2010**, *16*, 203-210.
17. Skenderidis, P.; Mitsagga, C.; Giavasis, I.; Hadjichristodoulou, C.; Leontopoulos, S.; Petrotos, K.; Tsakalof, A. In *Assessment of antimicrobial properties of aqueous UAE extracts of goji berry fruit and pomegranate fruit peels in vitro*, International Conference on Food and Biosystems Engineering, Rhodes, Greece, 2017; Rhodes, Greece, pp 542-549.
18. Song, Y.; Xu, B. Diffusion profiles of health beneficial components from goji berry (*Lyceum barbarum*) marinated in alcohol and their antioxidant capacities as affected by alcohol concentration and steeping time. *Foods* **2013**, *2*, 32-42.
19. Nguyen, D.-M.-C.; Seo, D.-J.; Lee, H.-B.; Kim, I.-S.; Kim, K.-Y.; Park, R.-D.; Jung, W.-J. Antifungal activity of gallic acid purified from *Terminalia nigrovenulosa* bark against *Fusarium solani*. *Microb. Pathog.* **2013**, *56*, 8-15.
20. de Oliveira, B. Biotransformation of the diperpenoid, isosteviol, by *Aspergillus niger*, *Penicillium chrysogenum* and *Rhizopus arrhizus*. *Phytochemistry* **1999**, *51*, 737-741.
21. Chang, S.-F.; Yang, L.-M.; Lo, C.-H.; Liaw, J.-H.; Wang, L.-H.; Lin, S.-J. Microbial transformation of isosteviol and bioactivities against the glucocorticoid/androgen response elements. *J. Nat. Prod.* **2008**, *71*, 87-92.
22. Cotoras, M.; Folch, C.; Mendoza, L. Characterization of the antifungal activity on *Botrytis cinerea* of the natural diterpenoids kaurenoic acid and 3β-hydroxy-kaurenoic acid. *J. Agric. Food. Chem.* **2004**, *52*, 2821-2826.
23. de Oliveira, B.H.; Strapasson, R.A. Biotransformation of isosteviol by *Fusarium verticilloides*. *Phytochemistry* **1996**, *43*, 393-395.
24. Parkinson, A.; Ogilvie, B.W.; Buckley, D.B.; Kazmi, F.; Czerwinski, M.; Parkinson, O. Chapter 6: Biotransformation of Xenobiotics. In *Casarett & Doull's Essentials of Toxicology*, Third edition. ed.; Klaassen, C.D.; Watkins, J.B., Eds. McGraw-Hill: New York, 2015; pp 78-108.
25. Lin, C.-L.; Lin, S.-J.; Huang, W.-J.; Ku, Y.-L.; Tsai, T.-H.; Hsu, F.-L. Novel ent-beyeran-19-oic acids from biotransformations of isosteviol metabolites by *Mortierella isabellina*. *Planta Med.* **2007**, *73*, 1581-1587.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Biodeterioro microbiológico en shiitake (*Lentinula edodes*)

E. Tejedor-Calvo[1,2], S. García-Barreda[1], S. Sánchez[1], D. Morales[2]; P. Marco[1]

[1] Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), Departamento de Recursos Forestales, Av. de Montañana, 930, Zaragoza, 50059, España
[2] Instituto de Investigación en Ciencias de la Alimentación (CIAL UAM-CSIC), Departamento Producción y Caracterización de Nuevos Alimentos, Nicolás Cabrera, 9, Madrid, 28049, España

Resumen: *Lentinula edodes* (shiitake) es uno de los hongos más apreciados tanto por sus características organolépticas como por sus compuestos bioactivos. Sin embargo, su vida útil escasamente alcanza una semana. En este estudio se determinó la vida útil de setas shiitake bajo tres condiciones: sin envasar (temperatura ambiente), sin envasar (4 ºC), y envasadas en atmósfera modificada (4 ºC). Semanalmente se monitorizaron parámetros físico-químicos, microbiológicos y organolépticos, siendo estos últimos los que establecieron el fin de vida útil de los diferentes lotes. Se aislaron e identificaron bacterias previamente diferenciadas y seleccionadas por su morfología colonial, que posteriormente se inocularon en carpóforos y láminas de shiitake. Además, se realizó un antibiograma de estas cepas bacterianas frente a micelio de shiitake. Los carpóforos analizados presentaron una carga microbiana total de 5 log ufc/g, constituida principalmente por el Gº *Pseudomonas* (4,7 log ufc/g), seguido de la Fª *Enterobacteriaceae* y la micobiota. Se identificaron 49 cepas bacterianas, de las cuales 24 pertenecieron a la Fª *Enterobacteriaceae* y 20 al Gº *Pseudomonas*. Los bioensayos efectuados demostraron que las cepas aisladas de *Burkholderia* sp., *Ewingella americana* y *Rahnella* sp. se comportaron como micopatógenas, siendo la última especie capaz de inhibir, de manera considerable, el crecimiento de micelio vegetativo de shiitake.

Palabras clave: vida útil, atmósfera modificada, antibiograma, micopatógeno

1. Introducción

En la actualidad, el cultivo y el uso de hongos comestibles está suscitando un creciente interés en el sector gastronómico y en la industria farmacéutica, siendo Lentinula edodes (shiitake) uno de los más demandados debido a sus características organolépticas y su contenido en compuestos bioactivos. Este hongo, después del champiñón, ocupa el segundo lugar en la producción mundial con más de 1,5 millones de toneladas anuales [1]. En España, en el año 2017 se consumieron aproximadamente 56 toneladas de champiñones y setas, con un valor estimado total de 210.000 euros [2].

Las setas son alimentos altamente perecederos, cuya vida útil oscila entre uno y tres días a temperatura ambiente, alcanzando hasta 2 semanas cuando se aplican tecnologías de conservación como refrigeración o envasado. Los factores determinantes del biodeterioro son principalmente de origen fisiológico y de origen microbiológico. La elevada tasa métabólica de las setas deriva en una rápida senescencia, debida al agotamiento de sus nutrientes y la pérdida de humedad por la propia respiración. Por otro lado, la elevada carga microbiana (105 - 108 microorganismos/g), casi exclusivamente superficial, unida a un pH próximo a la neutralidad (6 - 7), una elevada humedad relativa (HR > 90 %), una alta actividad de agua (aw ≥ 0,98), y una gama variada de nutrientes como azúcares de fácil asimilación, péptidos, aminoácidos,

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3385

vitaminas y minerales, hacen de las setas un excelente entorno para la proliferación de microorganismos. Todos estos factores, desencadenan procesos enzimáticos que conllevan pérdidas de textura, decoloración y modificaciones de aroma.

El género Pseudomonas es un grupo microbiano muy competitivo en la rizosfera, participando activamente en el proceso de fructificación del hongo [3]. Sin embargo, algunas especies de este género bacteriano también parecen responsabilizarse del deterioro post-cosecha, siendo Pseudomonas tolaasii la de mayor potencial alterante en champiñón [4]. La proliferación de dicha bacteria sobre la superficie del carpóforo genera cambios de color, conocidos como "mancha bacteriana", y se deben a reacciones de pardeamiento superficial producidas por la acción de la exotoxina "tolasina" [5]. Pseudomonas agarici, especie del mismo género, es capaz de generar colores pardos sobre el carpóforo [6]. Otra bacteria micopatógena, Ewingella americana, perteneciente a la familia Enterobacteriaceae, produce necrosis interna en el pie del champiñón, aunque puede encontrarse presente en otros hongos [7].

Para prolongar la conservación en fresco, garantizando su aptitud sanitaria y sensorial, se han desarrollado y combinado diferentes tecnologías de barrera que, aun siendo asequibles y disponibles para la industria alimentaria, actualmente no están plenamente implantadas. Un ejemplo de ello es el envasado en atmósfera modificada pasiva (AM), que consiste en proteger las setas frescas con una película plástica especial. La particular permeabilidad a los gases de ésta, junto con la propia respiración de los carpóforos, determina la composición gaseosa en el interior del envase produciendo una reducción de la concentración de oxígeno y un aumento de la de dióxido de carbono. Bajo estas condiciones, se ralentiza la madurez y la llegada de la senescencia en las setas debido a la reducción de su tasa respiratoria. Además, el CO2 genera un efecto negativo sobre la proliferación del grupo microbiano principal (Gº Pseudomonas) inhibiendo su metabolismo [8], y causa un efecto fungicida sobre la micobiota epífita (mohos y levaduras).

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio de vida útil de L. edodes aplicando tecnologías postcosecha, identificar qué microorganismos son responsables del biodeterioro, y determinar el efecto micopatógeno de las cepas identificadas sobre carpóforos y micelio de L. edodes.

2. Materiales y métodos

2.1. Muestras

Las muestras de shiitake suministradas por el proveedor se mantuvieron en condiciones de refrigeración hasta su llegada al laboratorio, donde fueron almacenadas a 4 ºC y 95 % de humedad relativa (HR) durante 24 h hasta su análisis y manipulación para el estudio de vida útil. Se diseñaron tres métodos de conservación: a temperatura ambiente sin envasar o control ambiente (1), sin envasar y refrigeración (4 ºC) (2) y envasado en AM y refrigeración (4 ºC) (3).

Las setas frescas en AM se envasaron en barquetas de polipropileno semirrígidas (Borden, S.A., Alicante, España) each), de 250 mL de capacidad, en las que se introdujeron alrededor de 100 gramos de setas. El cierre de los envases se realizó mediante una termoselladora manual BOV 160 (ORA Constructeur, Francia) con película plástica microperforada por láser (PPLUS, Amcor Flexible); esta película de 96 cm2 está compuesta por una doble capa de polietileno (40 μm) y poliéster (12 μm). El plástico se dispuso para que quedasen dos microperforaciones (50 x 90 μm) por envase, como indican Rivera et al. [9].

2.2. Determinación de vida útil

2.2.1. Análisis de composición gaseosa

La concentración gaseosa (O2 y CO2) en el interior de los envases se monitorizó con un Respirómetro Checkmate II (PBI Danasensor, Barcelona, España) al envasar, a las 24 horas y 48 horas, y a intervalos regulares de 7 días durante el periodo conservación en todos los envases.

2.2.2. Determinación de la pérdida de peso

La pérdida de peso se calculó por diferencia de pesada en una balanza Sartorius 3716 (Werke, Göttingen, Alemania) semanalmente. La pérdida se expresó como porcentaje de peso respecto al peso inicial.

2.2.3. Análisis microbiológico

La toma de muestras y los grupos microbianos se analizaron siguiendo la normativa ISO correspondiente a análisis microbiológico de alimentos (Tabla 1).

Tabla 1. Normativa ISO y procedimiento empleado para la cuantificación de los distintos grupos microbianos investigados.

Grupo microbiano	Metodología	Descripción
Preparación de muestras	ISO 6887-1:1999	Preparación de muestras, suspensiones iniciales y diluciones decimales para análisis microbiológico – Parte 1: Normas generales para la preparación de suspensiones iniciales y diluciones decimales.
Microognanismos aerobios mesófilos totales	ISO 4833-2:2013	Método de enumeración de microorganismos – Parte 2: Colonias a 30 ºC mediante técnica de extensión en superficie
Pseudomonas spp.	ISO 13720:2011	Enumeración de presuntas *Pseudomonas* spp.
Fª Enterobacteriaceae	ISO 21528-2:2004	Método de enumeración de Enterobacteriaceae – Parte 2: Método de conteo de colonias
Bacterias ácido lácticas	ISO 15214:1998	Método para enumerar bacterias mesófilas ácido lácticas. Técnica de recuento de colonias a 30 ºC
Mohos y levaduras	ISO 21527-1:2008	Método para enumerar levaduras y mohos – Parte 1: técnica de recuento de colonias en productos con una actividad de agua mayor a 0,95

PCA: agar de recuento en placa; CFC: cetrimida, fucidina, cefaloridina; VRBG: cristal violeta, rojo neutro, bilis y glucosa; MRS: de Man, Rogosa and Sharpe (Autores); DRBC: dicloran, rosa de bengala, coranfenicol.

Para el muestreo, se tomaron 25 g como analito que se colocaron en una bolsa tipo Stomacher estéril provista de filtro de celulosa. Se utilizó agua de peptona (Merck, Darmstadt, Alemania) al 0,1% como diluyente, y se homogeneizaron en un Stomacher Lab-Blender Circulator 400 (Seward Laboratory, London, England) durante 2 minutos a 260 rpm. Los medios de cultivo se prepararon siguiendo las indicaciones del etiquetado de los medios y de la normativa ISO 11133-1:2009 [10].

2.2.4. Análisis sensorial

Se realizó un análisis descriptivo de perfil clásico, en el que se evaluó apariencia externa, aspecto del himenio, aroma, textura, sabor y aceptabilidad general como parámetros sensoriales. Para estandarizar el procedimiento, se entrenó un panel sensorial compuesto por ocho catadores. Realizaron un entrenamiento de tres sesiones de 45 minutos que consistió en una caracterización de las setas, la determinación de los parámetros de calidad más importantes, y la evaluación de cada uno de ellos. Todo este proceso se llevó a cabo siguiendo la Norma ISO 11035:1994 [11]. El análisis sensorial, se realizó a la llegada de los carpóforos al laboratorio y semanalmente durante el ensayo de conservación en una sala de catas normalizada (ISO 8589:2007) [12]. Cada miembro del panel entrenado rellenó una ficha de cata para cada muestra analizada.

2.3. Determinación de cepas responsables del biodeterioro

2.3.1. Aislamiento e identificación de colonias

Tras el recuento microbiano en los diferentes medios de cultivo utilizados para el análisis, se seleccionaron diferentes cepas en función de la morfología colonial con ayuda de una lupa binocular Leica EZ4 (Wetzlar, Alemania). Se sembraron en agar PCA (agar de recuento en placa) mediante siembra por agotamiento, se incubaron a 25 ºC, y posteriormente se conservaron en refrigeración (4 ºC). En total, se obtuvieron 49 microorganismos diferentes en base a su morfología. Las colonias procedían de los siguientes medios de cultivo: 15 colonias de agar PCA, 20 de agar CFC (cetrimida, fucidina y cefaloridina), 11 de agar VRBG (cristal violeta, rojo neutro, bilis y glucosa) y 3 de agar MRS (Man, Rogosa y Sharpe).

La identificación de los microorganismos aislados se realizó molecularmente mediante la secuenciación de la región 16S del ADN siguiendo el protocolo de Barghouthi [13]. Para ello, se introdujo en un vial una cantidad significativa de microorganismo directamente desde cultivo puro. Posteriormente se añadieron 100 µl de PrepMan® Ultra Sample Preparation Reagent (Applied Biosystems, Foster City, CA) en cada vial, y se llevaron a 100 ºC durante 10 minutos en un termobloque (Eppendorf ThermoMixer C, Hamburgo, Alemania). Finalmente, se centrifugaron a 13.000 rpm durante 5 minutos en una microcentrífuga (Gyrozen, Daejeon, Corea del Sur). A continuación, en el sobrenadante se determinó la concentración de ADN con un NanoDrop 2000 Spectrophotometer (ThermoFisher Scientific, Waltham, EE.UU.). Las condiciones de PCR fueron: 94 ºC – 2´; [94 ºC – 30´´; 51 ºC – 1´; 72 ºC -1´] x 33 ciclos; 72 ºC -7´; 4 ºC - ∞. Los primers utilizados fueron: 8F – 1492R. Finalmente, se purificó el producto de reacción con el kit QlAquick PCR Purification kit (Qiagen, Inc., Valencia, CA, USA).

Se realizó una electroforesis con un gel de agarosa al 1,5 % con tampón buffer TAE (Buffer Tris, Ácido acético, EDTA) y 0,8 µl de Midori Green (NIPPON Genetics GmbH, Düren, Germany). Se utilizó 1 µl de tampón carga y 4 µl de la muestra. La corriente empleada fue de 60 mV, a partir de una fuente de electroforesis BioRad PowerPac HV (BioRad, California, USA). La revelación de bandas se llevó a cabo en un transiluminador (Chemidoc XRS+ BioRad, EEUU) con la ayuda del software GeneSys (Syngene, Cambridge, United Kingdom). Tras verificar la calidad de las bandas de ADN, se añadieron 3 µl de Primer R y 10 µl del producto de la PCR en viales para secuenciar las muestras, y se almacenaron a 10 ºC. La secuenciación se externalizó a la empresa STAB VIDA (Caparica, Portugal). Tras 48 horas, se recibieron las secuencias que se visualizaron y refinaron mediante el software 4Peaks (Nuclebytes, Ámsterdam, Holanda).

2.3.2. Ensayo de patogenicidad sobre caropóforos de shiitake

Los 49 microorganismos aislados, se revivificaron en caldo TSB (Caldo Soja Triptona). Tras 24 horas de incubación a 30 ºC, los microorganismos se inocularon sobre la cutícula de carpóforos enteros y sobre láminas de *L. edodes* con una concentración ajustada a 10^8 ufc/ml por la escala de McFarland. Las láminas se colocaron en placas de Petri y los carpóforos en bandejas de plástico cubiertas con film para evitar su deshidratación. Ambos envases, se incubaron a 10 ºC hasta percibir visualmente daños considerables en la zona de inoculación.

2.3.3. Ensayo de patogenicidad sobre micelio puro de shiitake

Para la obtención de micelio se seleccionaron carpóforos y se desinfectó la cutícula con etanol al 70%. Con un bisturí estéril se realizó un corte superficial en el sombrero y se fraccionó en 2 mitades evitando la contaminación cruzada. Se obtuvieron porciones rectangulares de tejido fúngico que se depositaron sobre placas con PDA (Merck, Darmstadt, Alemania). El hongo se incubó a 25 ºC hasta que el micelio había cubierto toda la superficie y se conservaron a 4 ºC. Se extrajeron círculos de micelio puro con un sacabocados estéril, y se inocularon en el centro de

placas de Petri con agar PCA. En cada placa se inocularon 4 microorganismos por punción aislados en puntos equidistantes. Las placas se incubaron durante dos semanas a 25 ºC.

2.4. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos se compararon estadísticamente mediante un análisis de varianza de un factor (ANOVA de una vía) combinado con el test de Tukey de rango múltiple con un nivel de significación del 0,05. En el análisis de datos se utilizó el programa estadístico SPSS versión 22.0.0.

3. Resultados y discusión

3.1. Evolución de la atmósfera interna

La evolución de las concentraciones de CO_2 y O_2 en el interior del envase durante 28 días se muestras en la Figura 1.

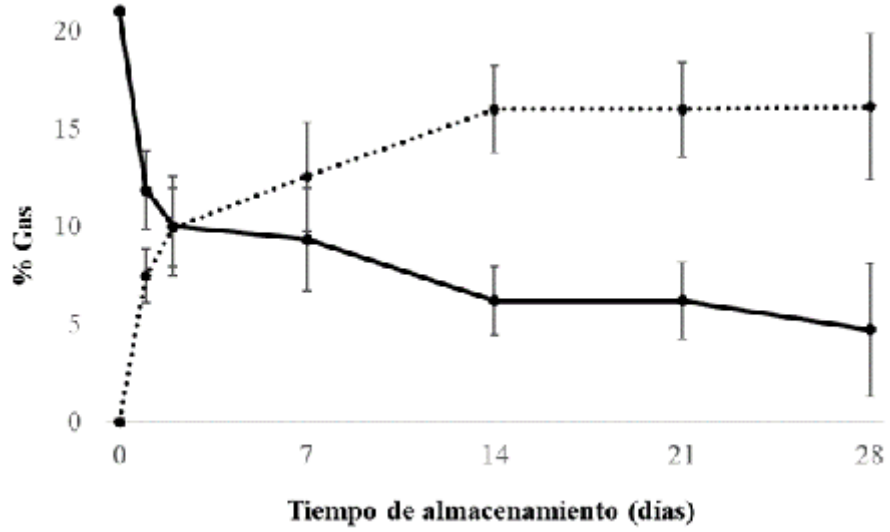


Figura 1. Evolución del CO_2 (—●— línea continua) y O_2 (···●··· línea discontinua) de setas shiitake envasadas en atmósfera modificada y almacenadas a temperatura de refrigeración (4 ºC). Los datos están expresados como media de tres medidas ± desviación estándar.

El incremento de CO_2 fue muy elevado durante las primeras 48 h alcanzando un 10 % en la atmósfera interna. Este efecto se redujo paulatinamente hasta alcanzar una concentración de 16 % a las cuatro semanas. En la concentración de O_2 ocurre el efecto contrario, decrece rápidamente durante los dos primeros días alcanzando un 10 %, disminuyendo progresivamente llegando a alcanzar condiciones próximas a anoxia (5 % de O_2) al final del periodo de conservación. Una acumulación excesiva de CO_2 puede causar lesiones fisiológicas a los hongos, produciendo un pardeamiento severo, o favorecer la proliferación de microorganismos anaerobios facultativos como *Clostridium botulinum* [14]. La falta de oxígeno conduce a una situación de anoxia acompañada de olores extraños debido a la producción de sustancias volátiles, como etanol y acetaldehído [15].

El hongo shiitake tiene una alta tasa respiratoria y una mayor susceptibilidad a elevadas concentraciones de CO_2 que otras especies [16]. Estos investigadores compararon dos tipos de envases, polietileno (PE) de baja densidad y polipropileno (PP). La concentración de O_2 disminuyó rápidamente en ambos casos durante los primeros cinco días de almacenamiento,

manteniéndose constante posteriormente (1,3 %), concentraciones inferiores a las de este estudio. Sin embargo, la concentración de CO_2 aumentó durante los primeros cinco días y se mantuvo constante hasta 13,6 y 9 % en los envases de PP y PE respectivamente, valores inferiores a los obtenidos en el presente estudio (16 %). Dichas diferencias pueden deberse a dos factores: el tipo de plástico utilizado (tamaño y número de perforaciones) o a las diferencias intraespecie de las cepas de *L. edodes* utilizadas en ambos ensayos. Rivera et al. [9, 17] realizaron un ensayo con las mismas condiciones de envasado y película plástica en hongos hipogeos. Tras tres semanas de almacenamiento, obtuvieron resultados similares a los de este trabajo en *Tuber melanosporum* (7,5 % O_2 y 15 % CO_2) y en *Tuber aestivum* (8 % O_2 y 14 % CO_2).

3.2. Evolución del peso

La evolución del peso de shiitake bajo diferentes condiciones de conservación se muestra en la Figura 2.

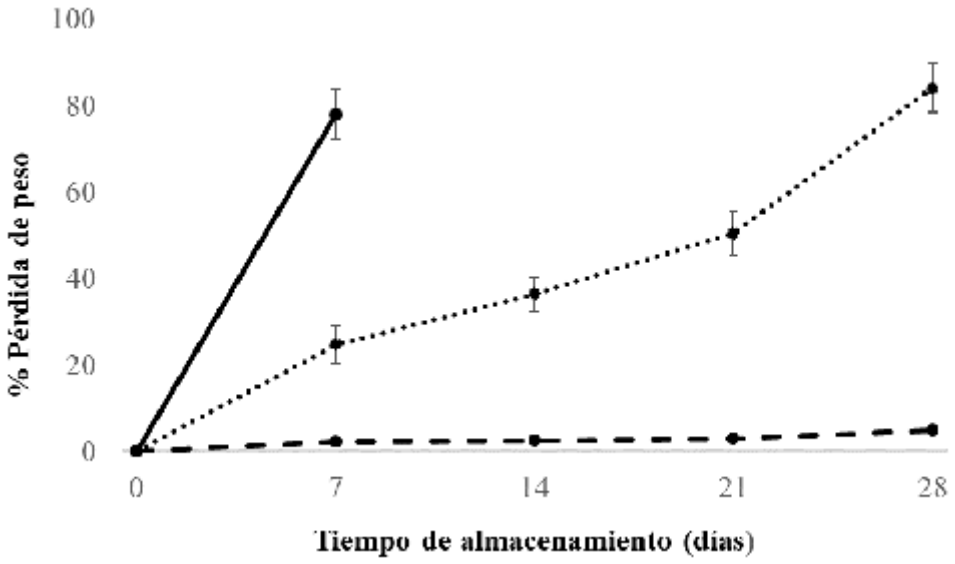


Figura 2. Evolución de la pérdida de peso (%) en *L. edodes* bajo diferentes condiciones de almacenamiento: sin envasar a 25 ºC, sin envasar 4 ºC, y envasado en atmósfera modificada 4 ºC. Los datos están expresados como media de tres medidas ± desviación estándar.

Los lotes sin envasar a temperatura ambiente sufrieron una pérdida de casi 80 % en peso durante los siete primeros días. Aplicando tan sólo refrigeración la pérdida se reduce al 25 % en el mismo periodo de tiempo; y si además se incorpora un envasado en AM la pérdida es de tan sólo un 2 %. Al final del periodo de conservación, el lote sin envasar (4 ºC) tuvo pérdidas de peso superiores al 80 %, sin embargo, el lote envasado con atmósfera modificada no superó el 5 %. Algunos autores han demostrado que el uso de AM reduce significativamente la pérdida de peso en los hongos durante la conservación [9, 17]. De la misma manera en shiitake, Ares et al. [16] obtuvieron pérdidas en torno a 5 % utilizando plásticos microperforados y superiores al 47 % en contenedores macroperforados durante 16 días de almacenamiento bajo refrigeración. Otros estudios en shiitake establecen una pérdida de peso en torno al 72 % tras seis días de almacenamiento a temperatura ambiente [18], evolución similar a este estudio.

3.3 Evolución de la microbiota

La Tabla 2 muestra los recuentos iniciales de los grupos microbianos analizados en este estudio, y los obtenidos por otros autores.

Tabla 2. Comparación de recuentos microbianos (log UFC/g) de microorganismos aerobios mesófilos totales (AMT), Género *Pseudomonas* (PSE), Familia *Enterobacteriaceae* (ENT), bacterias ácido lácticas (BAL), mohos y levaduras (ML) en carpóforos de *L. edodes* frescos.

Autores	AMT	PSE	ENT	BAL	ML
Reyes et al. (2004) [7]	4,87 ± 1,06	4,51 ± 1,08	3,60 ± 0,98	-	-
Parentelli et al. (2007) [19]	5,41	-	-	3,60	3,95
Santana et al. (2008) [20+	4,00	-	-	-	-
Jiang et al. (2010) [21]	4,30 ± 0,03	6,20 ± 0,22	-	-	4,10 ± 0,04
Venturini et al. (2011) [22]	4,90 ± 1,20	4,40 ± 1,20	3,70 ± 1,10	1,70 ± 0,90	3,90 ± 0,70
Jiang et al. (2012) [23]	4,12 ± 0,06	5,37 ± 0,16	-	-	3,81 ± 0,10
Jiang et al. (2013) [24]	3,97 ± 0,22	4,89 ± 0,24	-	-	3,32 ± 0,70
Presente trabajo	4,97 ± 0,32	4,68 ± 0,22	3,53 ± 1,20	2,53 ± 0,73	4,06 ± 0,17

- grupos microbianos no estudiados.

Inicialmente, los recuentos microbianos obtenidos son similares a los de otros autores (Tabla 2) y prácticamente iguales a los descritos por Venturini et al. [22]. El grupo más importante es el Gº *Pseudomonas*, seguido de la micobiota y de la Fª *Enterobacteriaceae*. Las bacterias lácticas quedan en un segundo plano; y, en nuestro caso, no se detectan mohos debido, probablemente, a la elevada carga de levaduras. A diferencia del resto de autores, Jiang et al. [21, 23, 24] indican un recuento de microorganismos aerobios mesófilos totales inferior al de *Pseudomonas*. Comparando con otras especies como *Agaricus bisporus*, cuya carga inicial es 7,5 y 7,2 log ufc/g de microorganismos aerobios mesófilos totales y *Pseudomonas*, respectivamente, la carga microbiana inicial de *L. edodes* es notablemente inferior [25], posiblemente debido a los compuestos antimicrobianos propios de esta especie.

Los grupos microbianos evolucionaron de forma dispar según el método de conservación. En el lote a temperatura ambiente aumentó ligeramente la carga microbiana en todos los grupos analizados tras 7 días de conservación. En el lote sin envasar bajo refrigeración, la carga microbiana aumenta ligeramente las 3 primeras semanas disminuyendo posteriormente, debido probablemente a la pérdida de humedad, inhibiendo a su vez la proliferación microbiana y llegando incluso a inactivarla. En el tercer lote, atmósfera modificada y refrigeración, se produce un incremento de poblaciones microbianas a lo largo del periodo de conservación, llegando a alcanzar unos recuentos de 8,4 u.log de aerobios mesófilos totales.

El recuento total de microorganismos aerobios totales (Figura 3-A) durante la primera semana fue similar en todos los lotes. A medida que aumenta el tiempo de conservación las diferencias son más notables, siendo estadísticamente significativas después de la tercera semana. En el lote envasado en AM la carga microbiana aumenta hasta la última semana; sin embargo, en el lote sin envasar los recuentos aumentan durante las tres primeras semanas, descendiendo casi una unidad logarítmica la última semana por la gran pérdida de humedad. Sucede lo mismo en las *Pseudomonas* y en las enterobacterias. La presencia de CO_2 (16 %) no dificulta el crecimiento de las primeras (Figura 3-B) pese a ser aerobias estrictas, y las segundas (Figura 3-C), aero-anaerobias facultativas, llegan a tener recuentos ligeramente superiores a *Pseudomonas* en el lote envasado en AM a medida que aumenta el tiempo de almacenamiento. No hubo diferencias significativas de los recuentos de bacterias ácido lácticas (Figura 3-D) entre lotes hasta la última semana de

almacenamiento. La alta concentración de CO_2 facilita el crecimiento de este grupo bacteriano. Los recuentos de mohos y levaduras (Figura 3-E) se mantienen constantes a lo largo de la conservación, incluso descendieron en el caso del envasado en AM.

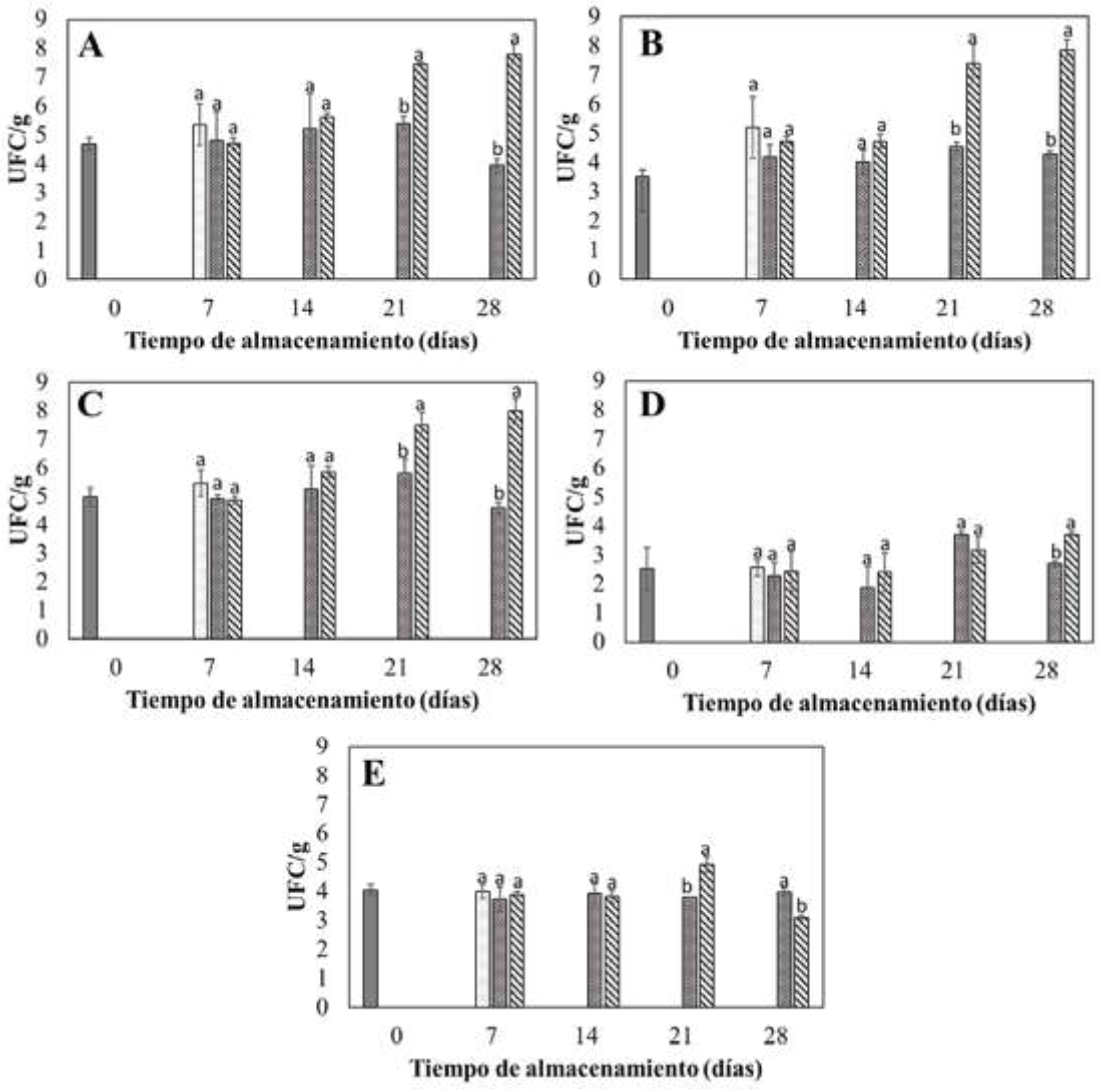


Figura 3. Evolución de los microorganismos aeróbicos mesófilos (A), Gº *Pseudomonas* (B), Fª *Enterobacteriaceae* (C), bacterias ácido lácticas (D) y mohos y levaduras (E) de *L. edodes* almacenados en diferentes condiciones. Inicial; sin envasar a 25 ºC, sin envasar 4 ºC, y envasado en AM 4 ºC. Los datos están expresados como media ± desviación estándar por triplicado. [a,b] Diferentes letras infican diferencias significativas entre diferentes métodos de conservación en el mismo día ($p < 0.05$)

Otros estudios realizados con shiitake han obtenido recuentos similares de aerobios mesófilos totales (7.3 ufc/g), y superiores en *Pseudomonas* (8.7 ufc/g), mohos y levaduras (6.8 ufc/g) tras 20 días de almacenamiento en AM [21]. En champiñón, la carga microbiana de aerobios mesófilos totales y *Pseudomonas* aumentó de forma similar a nuestros resultados en las mismas condiciones de conservación [25]. Y en hongos hipogeos, *T. melanosporum* y *T. aestivum*, se han reportado aumentos de 2 u.log de aerobios mesófilos totales tras 4 semanas de almacenamiento en AM [9, 22], inferiores a los de este estudio. Esta diferencia de incremento con

el Gº *Tuber* puede ser debida a que el recuento inicial en shiitake es inferior al del Gº *Tuber* (7 u.log), por tanto, las poblaciones microbianas tienen mayor rango para su proliferación.

3.4 Evaluación del análisis sensorial

La vida útil se estableció en base al Real Decreto 30/2009 [26] y a las características organolépticas de los carpóforos. Visualmente, este biodeterioro se caracterizó por la aparición de manchas blancas superficiales, la pérdida de humedad y el oscurecimiento de los carpóforos. En el diagrama de araña (Figura 4) se comparan los datos del análisis descriptivo durante 28 días en los diferentes métodos de conservación. Cabe señalar que aquellos cuerpos fructíferos con una puntuación inferior a 6.0 en cualquiera de los parámetros mencionados anteriormente no fueron aceptados como comercializables.

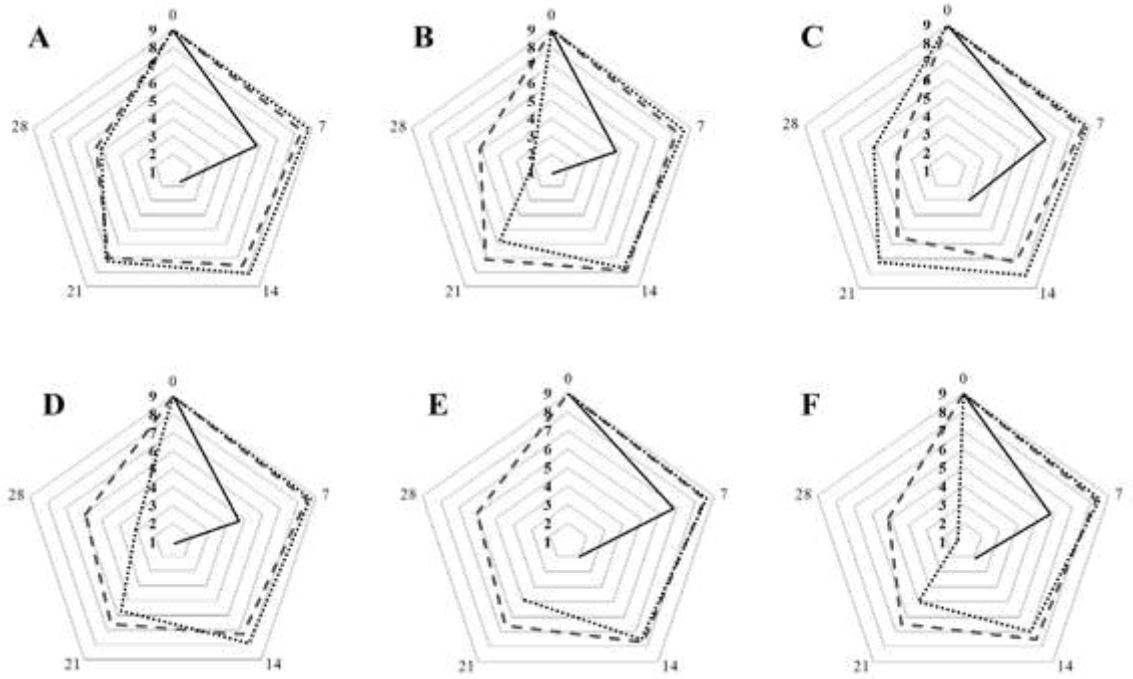


Figura 4. Evaluación de atributos sensoriales: apariencia externa (A), apariencia del himenio (B), textura (C), aroma (D), sabor (E) y aceptabilidad general (F) de *L. edodes* durante 28 días. Atributos valorados en una escala de 1-9 (9 = definitivamente aceptable, 7 = aceptable, 5 = puede ser aceptable, 3 = inaceptable, 1 = definitivamente inaceptable). — Sin envasar (25 ºC), — — sin envasar (4 ºC), y ▪▪▪▪ envasado en AM (4 ºC)

Se establecieron menos de siete días de vida útil para shiitake conservado a temperatura ambiente sin envasar, debido a la gran pérdida de humedad y como consecuencia la pérdida de textura y de aroma característica del shiitake fresco. En lotes conservados bajo refrigeración fueron dos semanas debido principalmente a la pérdida de textura, de sabor y de aroma. En el caso del lote envasado también se alcanzó la vida útil de dos semanas debido a la modificación de las características sensoriales y el aumento de la carga microbiana. Se observó un mayor oscurecimiento en comparación con el resto de los lotes.

La AM, al impedir pérdidas de humedad, facilita la proliferación microbiana y por ello los atributos valorados a los 21 días tienen puntuaciones más bajas. En cambio, los lotes sin envasar en AM, al tener una gran pérdida de humedad, impiden que los microorganismos se desarrollen, afectando éstos a las propiedades sensoriales. De los resultados obtenidos se observa que solo la refrigeración aumenta de manera muy significativa la vida útil del shiitake. Sin embargo, el

envasado en AM no parece contribuir a este aumento en la vida útil, aunque reduce significativamente la deshidratación, preservando la textura.

3.5. Identificación de las cepas responsables del biodeterioro

Se identificaron 49 cepas aisladas del ensayo de vida útil de shiitake (Figura 5). Casi la totalidad de cepas aisladas, y por tanto presentes a lo largo de la vida útil de shiitake son Gram -, en concreto, gamma proteobacterias del género *Pseudomonas* y de la Familia *Enterobacteriaceae.* Dentro de este grupo de bacterias anaerobias facultativas, predominó el Gº *Ewingella* con 19 cepas. Además, se encontraron 8 especies diferentes de *Pseudomonas*: *P. tolaasii, P. fluorescens, P. brenneri, P. palleroniana, P. yamanorum, P. jesseni, P. reinekei, P. psycrhopilia.*

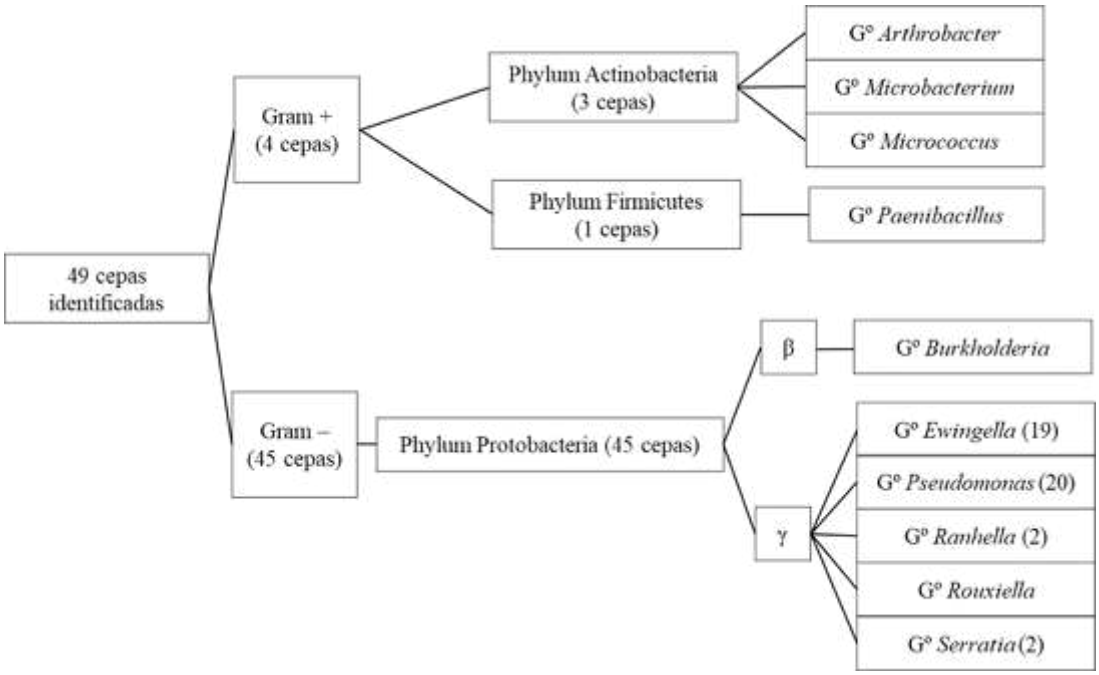


Figura 5. Clasificación de las cepas bacterianas aisladas de shiitake a lo largo de la conservación.

La mayoría de las Actinobacterias se encuentran en el suelo y juegan un importante rol en la descomposición de compuestos orgánicos, como la celulosa y quitina, al igual que el Gº *Burkholderia* y las *Pseudomonas*. Las enterobacterias actúan como fermentadores de carbohidratos en condiciones anaeróbicas con o sin la producción de gas, teniendo capacidad oxidante de una amplia gama de substratos en condiciones aeróbicas.

Algunos autores han asociado algunas de estas bacterias como responsables de la degradación de muchas especies de hongos [3] debido a las toxinas producidas [4] o a el carácter patógeno de la propia bacteria [7].

3.6 Confirmación de cepas responsables de biodeterioro

Tras inocular las cepas en carpóforos y láminas de shiitake, se determinó visualmente que el mayor daño en el himenio fue causado por bacterias pertenecientes a la Fª *Enterobacteriaceae*: *Ewingella americana* y *Rahnella* sp; sin embargo, en la cutícula superficial, el mayor daño fue causado por *Burkholderia* sp. Visualmente *Rahnella* sp. (Figura 6-C) tuvo mayor capacidad de biodeterioro, aunque el daño producido por *Ewingella americana* (Figura 6-B) fue similar. Sin

embargo, *Pseudomonas tolaassi* (Figura 6-D), responsable de la macha parda en champiñón, apenas produjo daños siendo similar al control (Figura 6-A).

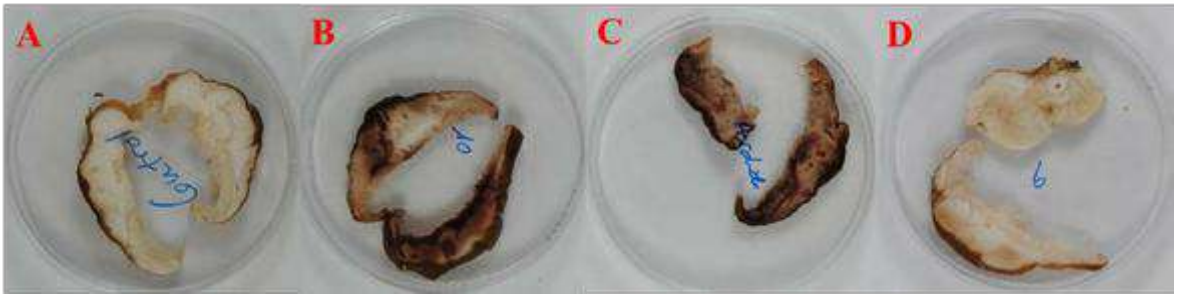


Figura 6. Láminas de shiitake inoculadas con las cepas aisladas y almacenadas durante una semana a 10 ºC: Control sin inoculación (A); inoculo con *Ewingella Americana* (B); *Rahnella* sp (C); y *Pseudomonas tolaassi* (D).

Ewingella americana demostró tener la mayor capacidad de biodeterioro en el himenio. Sin embargo, *Burkholderia* sp., de carácter aerobio estricto, fue la que más afectó a la cutícula superficial, degradando completamente el resto del carpóforo. *Rahnella* sp., aunque desde un punto visual. Produjo menos daño, aunque la textura se vio seriamente afectada en el área inoculada.

El reservorio de *E. americana* es desconocido, pero ha sido aislado como un patógeno oportunista en humanos [27]. También se ha aislado de zanahorias [28] y carne envasada al vacío [29]. Reyes et al. [7] establecieron que *E. americana* tiene un efecto micopatogénico, causando una lesión marrón y necrosis en el pie del carpóforo. Por otro lado, Chowdhury y Heinemann [30] señalan que *Burkholderia gladioli* es un patógeno importante, que causa el ablandamiento y el deterioro de numerosos hongos comerciales, como *L. edodes*, *A. bisporus* y *Pleurotus ostreatus*. Sin embargo, es la primera vez que *Rahnella* sp. se aísla en hongos. Sólo esta especie tuvo un claro efecto sobre el micelio de *L. edodes*, inhibiendo su crecimiento (Figura 7). En la primera semana de incubación tuvo un ligero efecto inhibitorio (Figura 7-A) que no ocurrió en el resto de las especies enfrentadas. En la segunda semana se observó el pardeamiento del micelio (Figura 7-B). El resto de las colonias inoculadas no afectaron el crecimiento del micelio, aunque algunas cepas de *E. americana* mostraron una ligera inhibición alrededor de la colonia, que impidió el crecimiento por encima de ella.

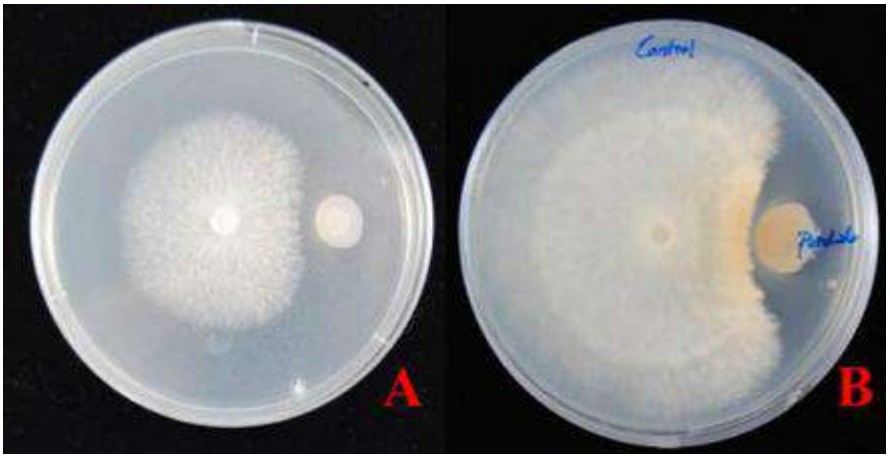


Figura 7. Inhibición del crecimiento de micelio por la cepa aislada *Rahnella* sp.: incubación a 10 ºC durante 1 (A) y dos semanas (B)

Rao et al. [31] testaron la inhibición de extractos acuosos de shiitake frente a *Rahnella* y *Serratia*, entre otras, obteniendo la mínima inhibición con estas cepas. Es posible que estas bacterias inhiban o afecten, de alguna manera, el metabolismo de compuestos liposolubles y no los hidrosolubles. Se ha descrito que *P. tolaasii* produce compuestos volátiles como metanotiol, disulfuro de dimetilo y 1-undeceno que inducen la inhibición del crecimiento de micelios in vitro de varios hongos provocando pardeamiento del micelio [32]. Sin embargo, en este estudio, no afectó al crecimiento de micelio de shiitake. Es posible que *Rahnella* produzca otros compuestos volátiles que puedan ser responsables del pardeamiento.

4. Conclusiones

La carga microbiana del shiitake (5 log ufc/g) está mayoritariamente constituida por especies bacterianas del Gº *Pseudomonas* (4,7 log ufc/g), la micobiota (4,1 log ufc/g), la Fª *Enterobacteriaceae* (3,5 log ufc/g), y las bacterias lácticas (2,5 log ufc/g). El fin de vida útil vino determinado por criterios organolépticos que, a su vez, estuvieron directamente relacionados con la pérdida de peso y el incremento de la microbiota. La conservación de shiitake a temperatura ambiente causó una merma del producto (80 % en siete días) debido a la pérdida de humedad. La aplicación de refrigeración (4 ºC) disminuyó la pérdida de humedad, aunque permitió la proliferación de los microorganismos. El almacenamiento de shiitake fresco en atmósfera modificada (4 ºC) redujo significativamente las pérdidas de humedad (5 % en veintiocho días). Sin embargo, la alta humedad es responsable del aumento de mesófilos totales, pseudomonas y enterobacterias al final de la vida útil. A pesar de que la atmósfera modificada no prolonga la vida útil respecto a la refrigeración, es extremadamente recomendable debido a la prevención de pérdidas del producto.

El biodeterioro fue causado principalmente por bacterias Gram -. *Ewingella americana*, *Burkholderia* sp y *Rahnella* sp se comportaron como micopatógenas, pero tan sólo la última especie mostró, de manera clara, la inhibición del crecimiento del micelio vegetativo de shiitake. El desarrollo de métodos rápidos de detección de microorganismos micopatógenos permitirá establecer medidas preventivas y correctivas, que reducirían las pérdidas económicas en la industria del cultivo de hongos, desde la producción de sustrato y micelio a la producción de carpóforos y comercialización.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el INIA mediante el Proyecto RTA2015-00053-00-00.

Referencias

1. Hinestroza-Cordoba, L.I., López-Malo, A. (2008) Aspectos relacionados con la producción de *L. edodes* (shiitake): una seta con alto potencial alimenticio y medicinal. Departamento de Ingeniería Química y Alimentos. Universidad de las Américas-Puebla, México. Temas de Ingeniería de Alimentos (2) 16-21.
2. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (https://www.mapa.gob.es/es/)
3. Giménez, A. P., de Juan Valero, J. A., & González, J. P. Factores que influyen en la iniciación de la fructificación del champiñón cultivado. Factores microbiológicos. 2002
4. Soler-Rivas, C., Arpin, N., Olivier, J. M., & Wichers, H. J. The effects of tolaasin, the toxin produced by *Pseudomonas tolaasii* on tyrosinase activities and the induction of browning in *Agaricus bisporus* fruiting bodies. Physiological and molecular plant pathology. 1999, 55(1), 21-28.
5. Mamoun, M., Moquet, F., Laffitte, J., & Olivier, J. M. *Pseudomonas tolaasii*: extra-genomic factor mediates toxin production and efficiency. FEMS microbiology letters. 1997, 153(1), 215-219.
6. Geels, F. P., Hesen, L. P. W., & Griensven, L. J. L. D. (2008). Brown discolouration of mushrooms caused by *Pseudomonas agarici*. Journal of Phytopathology, 140(3), 249-259.

7. Reyes, J. E., Venturini, M. E., Oria, R., & Blanco, D. Prevalence of Ewingella americana in retail fresh cultivated mushrooms (*Agaricus bisporus*, *Lentinula edodes* and *Pleurotus ostreatus*) in Zaragoza (Spain). FEMS microbiology ecology. 2004, 47(3), 291-296.
8. King Jr, A. D., & Nagel, C. W. Growth inhibition of a Pseudomonas by carbon dioxide. Journal of Food Science. 1967, 32(5), 575-579.
9. Rivera, C. S., Venturini, M. E., Marco, P., Oria, R., & Blanco, D. Effects of electron-beam and gamma irradiation treatments on the microbial populations, respiratory activity and sensory characteristics of *Tuber melanosporum* truffles packaged under modified atmospheres. Food microbiology. 2011, 28(7), 1252-1260.
10. ISO 11133-1:2009 Microbiology of food and animal feeding stuffs - Guidelines on preparation and production of culture media - Part 1: General guidelines on quality assurance for the preparation of culture media in the laboratory
11. ISO 11035:1994 Sensory analysis -- Identification and selection of descriptors for establishing a sensory profile by a multidimensional approach
12. ISO 8589:2007 Sensory analysis -- General guidance for the design of test rooms
13. Barghouthi, S. A. (2011). A universal method for the identification of bacteria based on general PCR primers. Indian journal of microbiology, 51(4), 430-444.
14. Farber, J. N., Harris, L. J., Parish, M. E., Beuchat, L. R., Suslow, T. V., Gorney, J. R., Garret, E.H., & Busta, F. F. Microbiological safety of controlled and modified atmosphere packaging of fresh and fresh-cut produce. Comprehensive reviews in food science and food safety. 2003, 2, 142-160.
15. Burton, A. J., Zogg, G. P., Pregitzer, K. S., & Zak, D. R. Effect of measurement CO_2 concentration on sugar maple root respiration. Tree Physiology. 1997, 17(7), 421-427.
16. Ares, G., Lareo, C., & Lema, P. Modified atmosphere packaging for postharvest storage of mushrooms. A review. Fresh Produce. 2007, 1(1), 32-40.
17. Rivera, C. S., Blanco, D., Marco, P., Oria, R., & Venturini, M. E. Effects of electron-beam irradiation on the shelf life, microbial populations and sensory characteristics of summer truffles (*Tuber aestivum*) packaged under modified atmospheres. Food microbiology. 2011, 28(1), 141-148.
18. Antmann, G., Ares, G., Lema, P., & Lareo, C. Influence of modified atmosphere packaging on sensory quality of shiitake mushrooms. Postharvest biology and technology. 2008, 49(1), 164-170.
19. Parentelli, C., Ares, G., Corona, M., Lareo, C., Gámbaro, A., Soubes, M., & Lema, P. Sensory and microbiological quality of shiitake mushrooms in modified-atmosphere packages. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2007, 87(9), 1645-1652
20. Santana, C. C., Vanetti, M. C. D., & Kasuya, M. C. M. Microbial growth and colour of minimally processed shiitake mushroom stored at different temperatures. International journal of food science & technology. 2008, 43(7), 1281-1285.
21. Jiang, T., Luo, S., Chen, Q., Shen, L., & Ying, T. Effect of integrated application of gamma irradiation and modified atmosphere packaging on physicochemical and microbiological properties of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*). Food Chemistry. 2010, 122(3), 761-767.
22. Venturini, M. E., Reyes, J. E., Rivera, C. S., Oria, R., & Blanco, D. Microbiological quality and safety of fresh cultivated and wild mushrooms commercialized in Spain. Food microbiology. 2011, 28(8), 1492-1498.
23. Jiang, T., Feng, L., & Li, J. Changes in microbial and postharvest quality of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) treated with chitosan–glucose complex coating under cold storage. Food Chemistry. 2012, 131(3), 780-786.
24. Jiang, T., Feng, L., & Wang, Y. Effect of alginate/nano-Ag coating on microbial and physicochemical characteristics of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) during cold storage. Food chemistry. 2013, 141(2), 954-960.
25. González-Fandos, E., Giménez, M., Olarte, C., Sanz, S., & Simón, A. Effect of packaging conditions on the growth of micro-organisms and the quality characteristics of fresh mushrooms (*Agaricus bisporus*) stored at inadequate temperatures. Journal of Applied Microbiology. 2000, 89(4), 624-632.

26. Real Decreto 30/2009, de 16 de enero, por el que se establecen las condiciones sanitarias para la comercialización de setas para uso alimentario. Boletín Oficial del Estado, nº20, de 23 de enero de 2009, 7861-7871.
27. Tsokos, M. Fatal Waterhouse-Friderichsen syndrome due to *Ewingella americana* infection. The American journal of forensic medicine and pathology. 2003, 24(1), 41-44.
28. Hamilton-Miller, J. M. T., & Shah, S. Identity and antibiotic susceptibility of enterobacterial flora of salad vegetables. International journal of antimicrobial agents. 2001, 18(1), 81-83.
29. Helps, C. R., Harbour, D. A., & Corry, J. E. PCR-based 16S ribosomal DNA detection technique for *Clostridium estertheticum* causing spoilage in vacuum-packed chill-stored beef. International journal of food microbiology. 1999, 52(1), 57-65.
30. Chowdhury, P. R., & Heinemann, J. A. The general secretory pathway of Burkholderia gladioli pv. agaricicola BG164R is necessary for cavity disease in white button mushrooms. Applied and environmental microbiology. 2006, 72(5), 3558-3565.
31. Rao, J. R., Millar, B. C., & Moore, J. E. Antimicrobial properties of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*). International journal of antimicrobial agents. 2009, 33(6), 591-592.
32. Lo Cantore, P., Giorgio, A., & Iacobellis, N. S. Bioactivity of volatile organic compounds produced by *Pseudomonas tolaasii*. Frontiers in microbiology. 2015, 6, 1082.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Desarrollo de procedimientos de evaluación rápida de calidad de aceites basados en técnicas espectroscópicas

Paola Baltazar[1], Natalia Hernández Sánchez[1], Belén Diezma Iglesias[1], Lourdes Lleó García[1]

[1] Laboratorio de Propiedades Físicas-Tecnologías Avanzadas en Agroalimentación (LPF-TAGRALIA), ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Puerta de Hierro, 2 - 4, 28040 Madrid, España, paola.balatazar.delcastillo@alumnos.upm.es

Resumen: El objetivo de este trabajo fue desarrollar un procedimiento basado en espectroscopia de fluorescencia ultravioleta/visible de análisis rápido, de bajo coste y respetuoso con el medio ambiente, para la evaluación de la calidad del aceite de oliva, que pueda ser integrado en cualquier eslabón de su cadena de valor. Se utilizaron 8 muestras iniciales de AOVE. De cada muestra se obtuvieron 6 réplicas contenidas en frascos de vidrio transparente. Dos réplicas fueron sometidas a 4 semanas de luz indirecta natural; otras dos réplicas a 2 días; y la tercera pareja se utilizó como control, manteniéndola en oscuridad. De cada pareja un frasco se utilizó para las medidas espectroscópicas y el otro se envió a un laboratorio externo acreditado por ENAC para la obtención de las medidas físico-químicas. Para la adquisición de espectros de fluorescencia se dispusieron de 4 ml de cada muestra en cubetas de cuarzo de sección cuadrada, de 10 mm de lado. Los parámetros físico-químicos considerados fueron: grado de acidez, índice de peróxidos, espectrofotometría K270, espectrofotometría K232, tocoferoles totales, polifenoles totales. Todos se vieron afectados por la exposición a la luz. Los parámetros que presentaron mayor coeficiente de variación fueron el índice de peróxidos (53%), al α-tocoferol (19%), β-tocoferol (20,8%) y γ-tocoferol (24,3%). Finalmente se muestra la posibilidad del desarrollo de modelos de estimación puesto que con un número muy limitado de muestras se obtuvieron R2 de casi 0,9 en los PLSR de cada una las características físico-químicas estudiadas.

Palabras clave: aove, fluorescencia, UV/VIS, productos de oxidación, espectros.

1. Introducción

La elección del aceite de oliva se debe a que es uno de los productos bandera del Gran Consumo. Su producción y consumo se han incrementado y extendido desde la zona mediterránea hacia otras regiones del mundo. El creciente interés por este producto, en especial por el aceite de oliva virgen extra (AOVE), se fundamenta en sus cualidades beneficiosas para la salud y en sus atributos sensoriales, ya que es rico en ácidos grasos monoinsaturados y en compuestos antioxidantes; y presenta una amplia gama de matices aromáticos y gustativos.

Aproximadamente el 78% del consumo mundial de aceite corresponde a los países productores, siendo Italia el primer país consumidor (38,5%) seguido de España (28,4%). Sin embargo el mayor incremento del consumo de aceite de oliva se está produciendo en los países no productores [2] y, en consecuencia, los países productores europeos se han convertido también en exportadores de aceite de oliva.

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3426

En este contexto, la comercialización del AOVE se ha vuelto cada vez más exigente en la evaluación de la calidad. El sector oleícola está sometido al cumplimiento de reglamentos y normativas que afectan a la comercialización de los aceites de oliva tanto en el marco europeo [1] como en el internacional (COI/T.15/NC nº3), apareciendo incluso, normas de control específicas en ciertos países. Esta reglamentación establece la categorización del aceite de acuerdo a numerosas características físico-químicas analizadas en laboratorios acreditados, así como a una valoración organoléptica llevada a cabo por un panel de cata específico y acreditado. Estos análisis son por lo general laboriosos, lentos y costosos.

El aceite de oliva contiene compuestos que son fluorescentes y están directamente relacionados con efectos beneficiosos sobre la salud, así como con la resistencia a la oxidación y el nivel de frescura. Los compuestos fluorescentes son: polifenoles y tocoferoles, productos de oxidación primaria, productos de oxidación secundaria y clorofilas.

El sector oleícola demanda herramientas fáciles de implementar, rápidas y de menor coste económico y medioambiental. El presente trabajo avanza en este sentido, ya que, a diferencia de los procedimientos tradicionales, la aplicación de la espectroscopia de fluorescencia supone la ausencia de disolventes y reactivos; rapidez y sencillez en las medidas; y disminución de la necesidad de personal cualificado. De todo ello se deriva un menor coste y la posibilidad de implementar este procedimiento en cualquier eslabón de la cadena de valor.

2. Materiales y métodos

2.1. Datos de la muestra

Se utilizaron 8 muestras iniciales (mostradas en Tabla 1) de aceites de oliva virgen extra procedentes de diferentes depósitos de la almazara Finca La Pontezuela S.L., con Denominación de Origen Montes de Toledo; y Cornicabra como variedad emblemática.

Tabla 1. Muestras iniciales del experimento

Nº muestra inicial	Variedad	Abreviatura	Depósito
1	Cornicabra	C	D5
2	Picual	P	D7
3	Cornicabra	C	D8
4	Hojiblanca	H	D10
5	Redondilla	R	D11
6	Cornicabra	C	D16
7	Cornicabra	C	D17
8	Cornicabra	C	D19

2.2. Tratamiento de la muestra

Estas muestras se sometieron a 3 tratamientos diferentes con la finalidad de incrementar la variabilidad en el estado de oxidación de las mismas.

Se dispuso de un litro de cada una de las 8 muestras de aceite. Se generaron 6 réplicas de cada muestra contenidas en frascos de vidrio transparente de 100 ml. De los frascos se expusieron dos a luz ambiente indirecta durante 4 semanas y dos durante 2 días. Como control se utilizaron dos réplicas mantenidas en oscuridad. Las réplicas fueron en parejas de forma que el aceite de un frasco se utilizó para las medidas espectroscópicas y el otro frasco, sin abrir, se envió a un laboratorio externo acreditado por ENAC para la obtención de las características físico-químicas, como se ilustra en la Figura 1. Este procedimiento proporcionó un total de 24 muestras (8 muestras x 3 tratamientos de almacenamiento = 24 muestras analizadas). Para la

adquisición de espectros de fluorescencia se dispusieron de 4 ml por a muestra en cubetas de cuarzo numeradas. El cuarzo se eligió como material de las cubetas por ser transparente en los rangos espectrales UV y VIS.



Figura 1. Obtención de las 24 muestras analizadas.

2.3. Determinaciones físico-químicas

Se acordó con el laboratorio externo que los análisis físico-químicos de las muestras se desarrollaran de forma casi simultánea a los análisis espectroscópicos en nuestro laboratorio (LPF-TAGRALIA). De esta forma había una correspondencia total entre características físico-químicas y espectrales. Los análisis llevados a cabo por el laboratorio externo se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de parámetros y protocolos empleados por el laboratorio acreditado.

Ensayo	Unidades	Norma
Grado de acidez	% (ac. Oleico)	PNT 1.08
Índice de peróxidos	meq O2/k	PNT 1.09
Espectrofotometría K270	-	PNT 1.10
Espectrofotometría K232	-	PNT 1.10
Espectrofotometría ΔKc	-	PNT 1.10
Tocoferoles totales	mg/kg	PNT 1.18b
α-Tocoferol	mg/kg	PNT 1.18b
β-Tocoferol	mg/kg	PNT 1.18b
γ-Tocoferol	mg/kg	PNT 1.18b
δ-Tocoferol	mg/kg	PNT 1.18b
Polifenoles totales	Ac.Cafeico/kg	PNT 1.56 (Folin-Ciocalteu)

2.4. Procedimiento de análsis espectroscópico

Los resultados de las determinaciones físico-químicas se analizaron mediante:

- Determinación de parámetros estadísticos básicos como media, rango, desviación estándar y coeficiente de variación.

- Análisis de la variabilidad mediante diagramas radiales para los aceites sometidos a diferente duración de exposición a la luz.

Las medidas de fluorescencia se sometieron a los siguientes procesos:

- Selección del rango de longitudes de onda de interés.
- Eliminación de ruido de los espectros mediante pretratamiento consistente en el suavizado mediante el algoritmo Savitsky-Golay, ajustado a un polinomio de grado 2, con ventana de 5 datos, sin aplicación de diferenciación.
- Representación gráfica de los espectros y análisis de los picos característicos de los espectros.
- Comparación de espectros de los aceites sometidos a diferente duración de exposición a la luz.

Ambos resultados, los físico-químicos y los espectrales se analizaron de forma conjunta mediante aplicación de técnicas multivariantes para la obtención de modelos de regresión por mínimos cuadrados parciales (Partial Least Square Regression PLSR, por sus siglas en inglés) para la estimación de las características físico-químicas a partir de los datos espectrales.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de los parámetros obtenidos en laboratorio

Tabla 3. Resumen de los resultados de los análisis químicos de las 24 muestras.

	Acidez	Índice Perók.	K_{232}	K_{270}	Tocoferoles totales	α Tocoferol	β Tocoferol	γ Tocoferol	Polifenoles totales
Medias	0,13	9,08	0,14	1,83	244,99	233,91	2,43	8,65	563,88
Máx.	0,15	24,00	0,16	2,16	348,20	332,10	3,30	13,50	683,00
Mín.	0,10	3,80	0,12	1,68	165,70	157,50	1,70	6,40	410,00
Rango	0,05	20,20	0,04	0,48	182,50	174,60	1,60	7,10	273,00
Desv. St.	0,01	4,83	0,01	0,14	46,72	44,56	0,50	2,11	78,25
CV (%)	9,25	53,22	6,96	7,49	19,07	19,05	20,79	24,34	13,88

La Tabla 3 muestra los coeficientes de variación con la variabilidad de los datos y oscilan entre un 7% y un 53%, dependiendo del parámetro considerado. Los parámetros con mayor coeficiente son el índice de peróxidos (53%), al α-tocoferol (19%), β-tocoferol (20,8%) y γ-tocoferol (24,3%). Por lo tanto, el índice de peróxidos aparece como el parámetro que presenta más variabilidad; los diferentes tocoferoles también están afectados pero en menor medida. Los parámetros acidez, las K232 y K270 son los que tiene el coeficiente de variación más bajo.

Para observar la evolución de cada muestra de aceite durante la exposición a la luz (oscuridad, 2 días y 1 mes), se calcularon los diagramas radiales de forma que cada radio del polígono corresponde a una muestra. Se calcularon para cada parámetro químico: acidez, índice de peróxidos, K232, K270, tocoferoles totales, α-tocoferol, β-tocoferol, γ-tocoferol y polifenoles totales.

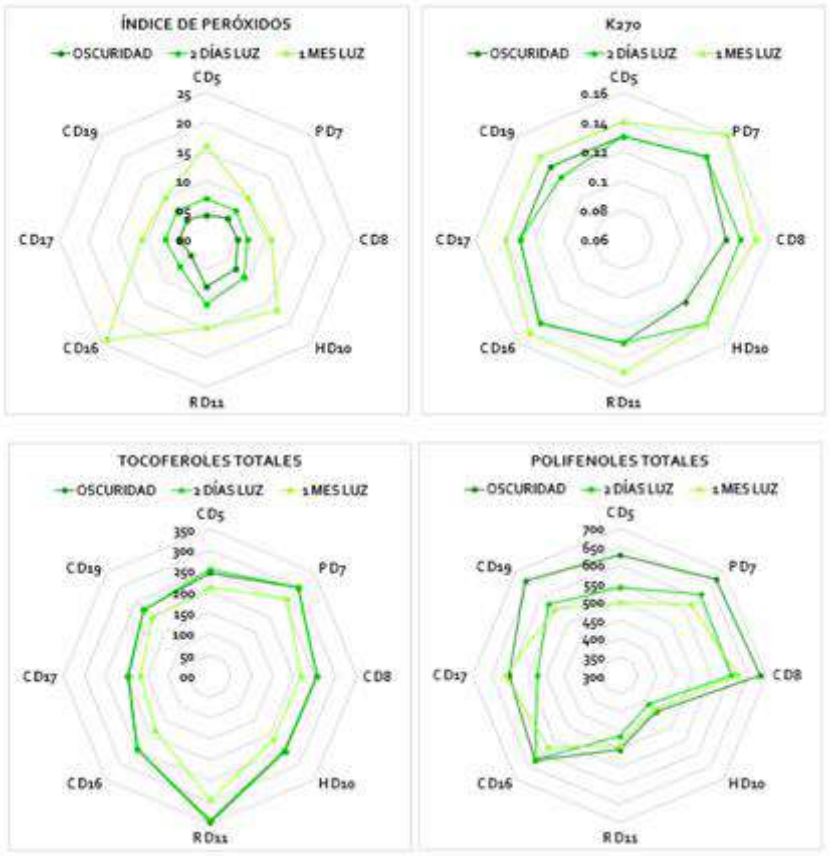


Figura 2. Diagrama radial para los tres tratamientos del índice de peróxidos, K_{270}, tocoferoles totales y polifenoles totales.

La Figura 2 presenta los diagramas de índice de peróxidos, K_{270}, tocoferoles totales y polifenoles totales. Se puede observar que los valores del índice de peróxidos y la K_{270} crecen con la exposición a la luz, por tanto, con el estado de oxidación. Ambos parámetros reflejan el nivel de oxidación de los aceites siendo más relevante la evolución en el índice de peróxidos. Cada muestra presenta un patrón de evolución diferente, destacando CD16 en el caso de índice de peróxidos. Por otra parte, como cabría esperar, los compuestos antioxidantes tocoferoles y polifenoles totales disminuyen con el tiempo.

3.2. Análisis de los espectros de fluorescencia

Los espectros obtenidos mostraron picos de emisión en diferentes rangos de longitudes de onda. La Figura 3 corresponde a una de las configuraciones de adquisición de espectros empleadas. En a) se aprecia un pico dominante alrededor de 670 nm, correspondiente a la emisión de las clorofilas. Con menor intensidad aparecen una serie de picos en el rango desde 300 nm hasta 600 nm aproximadamente (zona ampliada en b)). Estas áreas de emisión corresponden a productos de oxidación y tocoferoles, relacionados con el estado de oxidación de los aceites. Por ello, se selecciona el rango desde 350 nm hasta 550 nm para los posteriores desarrollos de modelos de estimación de las características físico-químicas. El pico a 670 nm no se consideró por no ser la clorofila un parámetro recogido en la normativa de calidad de los aceites.

La emisión en el rango desde 350 a 550 nm mostró un incremento paulatino de la intensidad con el tiempo de exposición a la luz en todas las muestras de aceite (Figura 3 a y b). La Figura 3 c) muestra la evolución de la señal de fluorescencia de la muestra Cornicabra C D5.

Este resultado es congruente con el hecho de que los procesos de oxidación primaria y secundaria que experimenta el aceite suponen la aparición de productos de oxidación que son fluorescentes. Igualmente, la detección del incremento de las señales pone de manifiesto la sensibilidad de la técnica empleada.

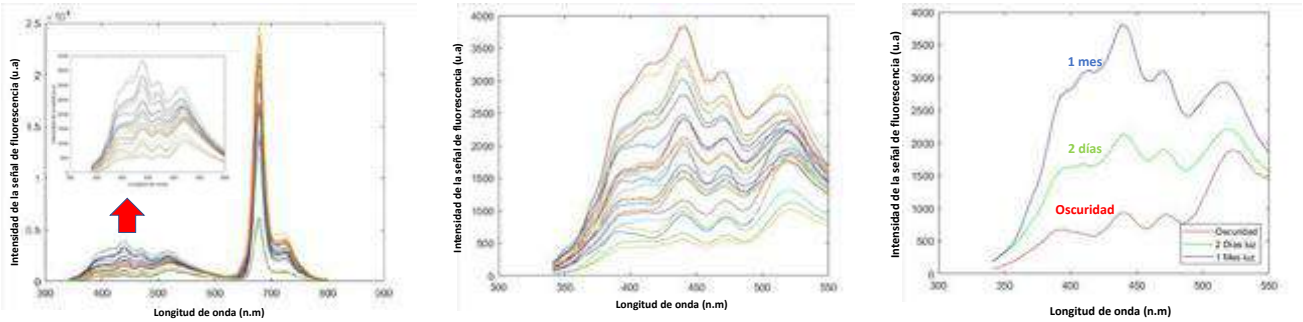


Figura 3. a) Representación de todos los espectros (N=24) obtenidos con una de las configuraciones del equipo; b) Selección del rango espectral de estudios; c) Evolución de la señal de fluorescencia de una muestra de Cornicabra CD5.

3.3. Modelos de estimación de los parámetros físico-químicos

Con anterioridad al desarrollo de los modelos multivariantes de estimación, se estudiaron las características espectrales de aceites con estados de oxidación diferentes. La Figura 4 ilustra las diferencias encontradas entre un espectro de una muestra de mayor acidez con respecto al de una muestra de menor acidez. Claramente, el de mayor acidez presenta una mayor intensidad de señal en todo el rango. Además, los picos aparecen de forma más acusada.

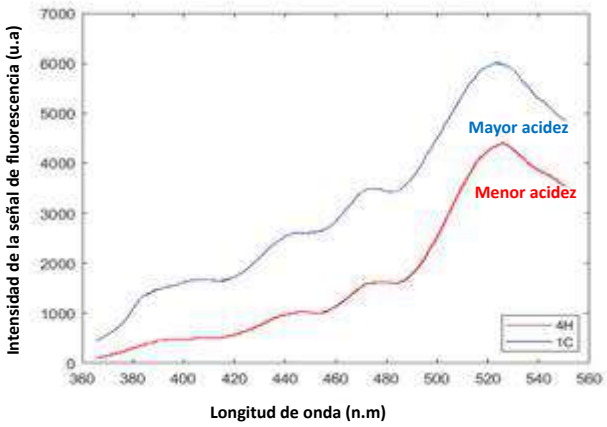


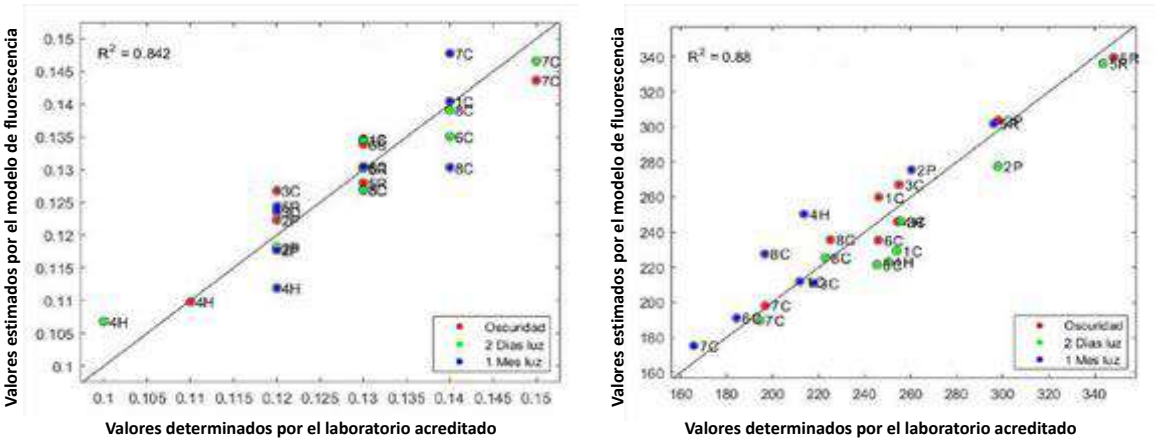
Figura 4. Ejemplo del espectro de una muestra de alta acidez y espectro de una muestra de baja acidez.

Una vez detectado que los espectros de fluorescencia reflejan las diferencias en los valores de las características físico-químicas, se procedió al desarrollo de los modelos de estimación. Los resultados obtenidos de los modelos PLSR para cada parámetro están resumidos en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultado para los modelos PLSR para cada parámetro físico-químico.

Parámetro químico	R2
Acidez	0,842
Índice de Peróxidos	0,672
K232	0,875
K270	0,299
Tocoferoles totales	0.880
α-Tocoferol	0,876
β-Tocoferol	0,818
γ-Tocoferol	0,858
Polifenoles totales	0,644

La capacidad predictiva de los modelos se evalúa a través del coeficiente de determinación R^2, de forma que cuanto más se aproxime a la unidad, menor es la diferencia entre los valores reales obtenidos por el laboratorio acreditado y los valores estimados mediante fluorescencia. La Figura 5 y la Tabla 4 muestran valores de R^2 muy elevados, alcanzando casi el 0.9 en casi todos los parámetros.



a. **b.**

Figura 5. a) Valores determinados por el laboratorio acreditado en el eje x frente a los valores que se estiman con los modelos de fluorescencia en el eje y para acidez; b) Valores determinados por el laboratorio acreditado en el eje x frente a los valores que se estiman con los modelos de fluorescencia en el eje y para tocoferoles totales. Cada círculo representa una muestra.

4. Conclusiones

Este trabajo demuestra la viabilidad del procedimiento desarrollado basado en la espectroscopia de fluorescencia para la evaluación del estado de oxidación del AOVE. Los cambios internos producidos en la composición del aceite de oliva a consecuencia de la exposición a la luz se manifiestan en cambios en la forma de los espectros de emisión de fluorescencia en el rango desde 350 a 550 nm. Esto implica que los espectros de emisión de fluorescencia tienen la capacidad de ser empleados en el seguimiento de la evolución de los aceites de oliva.

La intensidad de la señal en el rango estudiado se incrementa con el tiempo, aportando información valiosa sobre el estado de oxidación de los aceites, pudiendo ser utilizada para la

estimación de características físico-químicas claves en cualquier punto de la cadena de valor del producto.

5. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la empresa La Pontezuela S.L.U. y, en especial, a su Director de Operaciones y Estrategia Corporativa David Pérez Pardo-Pimentel; a la empresa española Multiscan Technologies S.L.; al LPF-TAGRALIA de la ETSIABB de la Universidad Politécnica de Madrid, por su apoyo y colaboración en el proyecto.

Referencias

1. CE (2013). Reglamento nº1348/2013 de la Comisión que modifica el Reglamento (CEE) nº2568/91, relativo a las características de los aceites de oliva y de los aceites de orujo de oliva y sobre sus métodos de análisis. Diario Oficial de la Unión Europea, L 338, 31-67.
2. COI (2016). Consejo Oleícola Internacional. Datos producción, consumo, exportación e importación europea y mundial de aceite de oliva. http://www.internationaloliveoil.org/
3. Hernández-Sánchez N, Lleó L, Ammari F, Cuadrado TR, Roger JM. Fast Fluorescence Spectroscopy Methodology to Monitor the Evolution of Extra Virgin Olive Oils under Illumination. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(5), 949-961.
4. Hernández-Sánchez N., L. Lleó, B. Diezma, F. Ammari, T.R. Cuadrado, P. Barreiro, J.M. Roger and M. RuizAltisent. Front-face and right-angle fluorescence spectroscopy for monitoring EVOO evolution. VIII International Olive Symposium, Croatia, 2016, 10-14.
5. Hernández-Sánchez Natalia, Lourdes Lleó García, Teresa Cuadrado, María Dolores Molero Vílchez, Margarita Ruiz-Altisent. HR Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy for authentication of olive oil quality. Proceedings International Conference of Agricultural Engineering – AgEng, 2014.
6. Lleó L, Natalia Hernández-Sánchez, Faten Ammari, Jean-Michel Roger. 3D front-face fluorescence spectroscopy for characterization of extra virgin olive oil and olive oil according to the spectral pattern. 2016, Vol 18, No 4.
7. Mishra, P., Lleó, L., Cuadrado, T., Ruiz-Altisent, M., Hernández-Sánchez, N. Monitoring oxidation changes in commercial extra virgin olive oils with fluorescence spectroscopy-based prototype. Eur Food Res Technol, 2018, 244-565.
8. Sikorska, E.; Khmelinskii, I.; Sikorski, M. Analysis of olive oils by fluorescence spectroscopy: Methods and applications. In Boskou Dimitrios (Ed.), Olive oil – constituents, quality, health properties and bioconversions, 2012.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Desarrollo de un sistema para la administración de cosechas de café

O. J. Ardila-Peña[1], O. L. García-Navarrete[2], R. Osorio-Hernandez[3]

[1] Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Estudiante Maestría en Ingeniería – Ingeniería Agrícola, Carrera 30 No 45-03, Edificio 214, Oficina 201 CP: 111321, Bogotá, Colombia; oardilap@unal.edu.co
[2] Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Docente Ingenieria Agrícola, Carrera 30 No 45-03, Edificio 214, Oficina 203 CP: 111321, Bogotá, Colombia; olgarcian@unal.edu.co
[3] Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Docente Ingenieria Agrícola, Carrera 30 No 45-03, Edificio 214, Oficina 201 CP: 111321, Bogotá, Colombia; rosorioh@unal.edu.co

Resumen: Las zonas cafeteras colombianas, presentan problemas a la hora de evaluar la eficiencia de recolección y liquidar los pagos, ya que el registro de las cantidades recolectadas se realiza de forma manual, esto lleva al mal manejo de información que causa malos entendidos con los recolectores. Este registro de la cosecha se logró sistematizar adecuando tecnología existente y de bajo coste, por lo cual, este proyecto desarrolló un sistema para la administración de cosechas de café formado por un prototipo de comunicación electrónico para una báscula de marca TEK y una aplicación móvil (AMSCoffeApp) para diferentes plataformas (Android, iOS). Este dispositivo toma la señal de medida del peso del café cosechado por cada recolector usando tecnología RIFD, y transmite la información través de bluetooth a la aplicación AMSCoffeApp, esta almacena y procesa la información por recolector y por parcela, además de proveer estadísticas de rendimiento y generación de informes. Para evaluar el sistema se realizaron pruebas en campo comparando el método manual y el sistema propuesto. El resultado fue que el sistema propuesto mejora los tiempos en un 60%, ya que optimizó el registro del pesaje, generación de planillas de pago, y evaluación del desempeño, permitiendo una trazabilidad confiable.

Palabras clave: trazabilidad, calidad de café, software, RFID.

1. Introducción

En la agricultura, la vinculación del proceso productivo con mejoras tecnológicas ha perfeccionado y simplificado las labores aumentando así la productividad y eficiencia de los procesos de producción y tratamiento de cultivos. Las mejoras en la trazabilidad garantizan la inocuidad del café [1] y mejoran los procesos para su beneficio. Prescindir de las nuevas formas de tecnología ralentiza el proceso y hace notar que los métodos rudimentarios no son los más eficaces y efectivos a la hora de mejorar los procedimientos en la agricultura [2]. Actualmente se ha determinador que no sólo la optimización de maquinaria y métodos de beneficio del café [3] mejoran el proceso, sino que evaluar la información que estas pueden llegar a proveer para la identificación de falencias durante toda la cadena productiva, también en las labores automatizadas como en las que se involucra mano de obra, cuantificando su eficacia, es decir, se debe en la medida de lo posible crear tecnología que permita agilizar el trabajo y evaluar la

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3380

información durante todas la actividades. No mejorar los métodos de producción puede llegar a generar enormes pérdidas de dinero, tiempo y producción [4], ya que en medio puede generarse pérdida de información debido al factor de error humano. Ante esto [5] plantea que existe la necesidad de identificar la implementación de tecnologías de trazabilidad en las diferentes cadenas de comercialización de frutas y durante su proceso de producción.

La trazabilidad de la recolección diaria del café, hoy en día se lleva a cabo a partir de bolígrafo y agenda [6]. Si se analiza minuciosamente este método puede conllevar a varios errores y malos entendidos, producto del mal manejo de la información, porque no se registró correctamente la medida o porque estos apuntes pueden llegar a desaparecer o corromperse de forma inesperada. En este trabajo se presenta un sistema que mejora y digitaliza el registro de la cosecha por recolector. Este prototipo identifica al recolector por medio de un chip instalado en un brazalete que se pasará sobre un lector de identificación, el recolector procede a ubicar su producto recolectado en la báscula digital que tendrá conectado un sistema de control y comunicación que envía la señal a un dispositivo móvil que procesa y pone a disposición la información en tiempo real. Esto se logró construyendo un módulo electrónico que se acopla a una báscula digital y que permite la comunicación entre la báscula y una aplicación móvil en la que se lleva el registro diario de cada recolector y su rendimiento con respecto a cada lote. Este trabajo tiene por objetivo presentar el diseño y los resultados de la implementación del sistema que permite realizar un seguimiento de la recolección de café llevando el registro por recolector y lote.

2. Materiales y métodos

2.1. Dispositivos electronicos

Para construir la interfaz de comunicación se usa un arduino UNO, lector de tarjetas RFID Mifare MFRC522, módulo bluetooth de baja energía HM-10, amplificador de instrumentación de baja potencia INA125p, módulo zumbador, batería de 1300 mAh y un condensador de un microfaradio. El código cargado al arduino se puede encontrar en el repositorio de Github: https://github.com/ojardila/bascula.

2.2. Software

La aplicación fue elaborada principalmente a partir de React Native un framework para el desarrollo de aplicaciones móviles, para conocer todos los paquetes empleados se puede consultar el archivo package.json en el repositorio.

2.3. Validacion del sistema

Finalmente, para corroborar la efectividad del sistema, se validó en la finca San José ubicada en el departamento de Santander en Colombia con un grupo de 51 recolectores procedentes de diferentes regiones del país. Las pruebas consistieron en comparar los métodos rudimentarios con el nuevo sistema, y se establece la comparación en tiempo en que se realizan tareas específicas con ambos métodos.

Las tareas que se evaluaron fueron el tiempo de pesaje por recolector, valoración del rendimiento por semana de cada recolector y capacidad de identificación de los factores que afectan el rendimiento del recolector. El proceso básico que se sigue para determinar la cantidad recolectada por cada trabajador a diario consiste en pesar el café durante la jornada diaria. Los recolectores suben sus sacos a una báscula y luego la persona a cargo de llevar el registro anota en una libreta los kilos durante cada jornada (Figura 2-C), al final de una semana de trabajo se a recopilado la información a mano y en una tabla dibujada en la libreta de la cantidad total que se ha cosechado cada recolector a diario. Este mismo itinerario en cada jornada se ejecuta al

mismo tiempo el sistema propuesto registrando el tiempo empleado durante el pesaje de la recolección por cada recolector para evaluar la efectividad del nuevo sistema en campo.

3. Resultados y discusión

3.1. Prototipo

El prototipo implementado permite el almacenamiento y disposición en tiempo real de la información sobre la recolección, es decir, la persona que lo recolecta, el peso que recolecta y el lote que es cosechado. El almacenamiento es posible a partir de un sistema de recepción, conversión y emisión de la señal generada por la celda de carga de la báscula, Figura 1, y que es visible y almacenada gracias a un software en un dispositivo móvil.

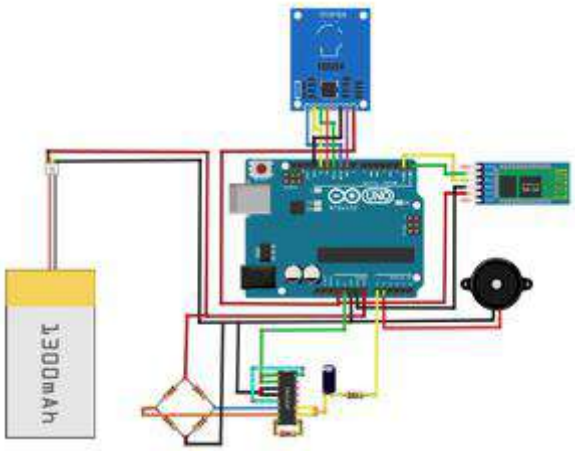


Figura 1. Diagrama del circuito de la interfaz que suministra la información a la aplicación a través de Bluetooth. (Las resistencias con forma de rombo representan la celda de carga de la báscula digital) [Este diagrama fue elaborado a partir de la herramienta Fritzing]

Se realizaron tres prototipos de captura de la señal de la báscula, de los cuales se seleccionó la mejor opción:

- Prototipo 1: Se capturó la señal del display de 7 segmentos de la báscula, pero presento ruido en la señal emitida y al rango del voltaje.
- Prototipo 2: Se capturó la señal desde el conversor A/D pero debido a la resolución de la medida de 0.1 Kg y un rango de 0Kg a 300 Kg implicaba tener que decodificar 3000 datos digitales, por su alto volumen de datos se descartó.
- Prototipo 3: Se capturó la señal desde la celda de carga y a partir de un amplificador de instrumentación INA125p se implementó y se realizó la calibración el sistema.

3.2. Aplicación movil

La aplicación móvil cuenta con interfaces que administran el proceso de cosecha que contemplan: tableros de gráficos de eficiencia en el proceso por lote y por recolector, lista de recolectores, lista de lotes, creación de recolectores, creación de lotes y configuración (Figuras 2, 3 y 4) en estas imágenes se muestran capturas de pantalla del registro de los recolectores en la finca San José, en estas figuras se puede apreciar el tamaño del lote, la variedad de las plantas y las dimensiones de este, en la interfaz de persona cada una es identificada con un número y es visible su rostro y número de identificación, en la interfaz de cosecha se recopila toda la información de la cantidad recolectada hasta ese día por cada recolector a partir de la información se generan gráficos de rendimiento de cada recolector por lote.



Figura 2. Vista de Lotes registrados en AMSCoffeApp



Figura 3. Lista de Recolectores registrados en AMSCoffeApp



Figura 4. Registro manual de la cosecha

Para el diseño de la aplicación se usó el patrón de arquitectura Flux para así transmitir de forma sencilla la información de los eventos relacionados con las actualizaciones de peso y la identificación de los trabajadores en la báscula.

3.3. Comunicación Bascula - Aplicacion

Para la comunicación de la báscula con la aplicación se realizaron dos prototipos con módulos diferentes de comunicación bluetooth:

Prototipo 1: Se implementó el módulo HC-05, no se seleccionó debido a la incompatibilidad con el sistema operativo sobre el que se ejecutaba la aplicación (iOS).

Prototipo 2: Se implementó el módulo HC-10, este permitió la correcta transmisión de la información con las plataformas programadas. Este prototipo usó la librería react-native-ble-manager ya que implementa eficientemente comunicaciones con bluetooth Low Energy

Finalmente para validar la efectividad de la aplicación con los datos recopilados a diario durante dos semanas se analizan los tiempos individuales de registro manual con el sistema de cada trabajador como el que se presenta en la Figura 8. A partir del análisis de los dos tiempos diarios por trabajador y de un promedio temporal con los datos, se llega a la conclusión de, que por recolector el tiempo empleado para el pesaje de lo cosechado a diario se reduce a la mitad, es decir, el nuevo sistema optimiza el proceso disminuyendo el tiempo empleado en la tarea.

El aporte en tiempo de la AMSCoffeApp, se ve en la identificación del usuario, cada recolector se identifica automáticamente accediendo a su historial y registro Figuras 5 y 6, mientras que de la manera manual es necesario buscarlo en la planilla Figura 4, muchas veces es posible confundir al recolector con otro, lo que lleva a confusiones y malos entendidos. Ademas que se tiene un base de datos con los rendimientos por lote y recolector Figura 7.



Figura 5. Cantidad cosechada por recolector registrada en AMSCoffeApp



Figura 6. Registro de usuuarios – recolectores en AMSCoffeApp



Figura 7. Rendimiento pos lote y recolector, informe de AMSCoffeApp

La diferencia principal es en el tiempo empleado en la totalización de los datos, la generación de las estadísticas y de las cantidades totales recolectadas y los precios a pagar son automáticos en la AMSCoffeApp, mientras que la generar de las planillas de pago de forma manual lleva un tiempo adicional, además de la verificación por posibles errores de cálculo. La trazabilidad de la recolección con AMSCoffeApp hace que se tenga disponible toda la información en todo momento.

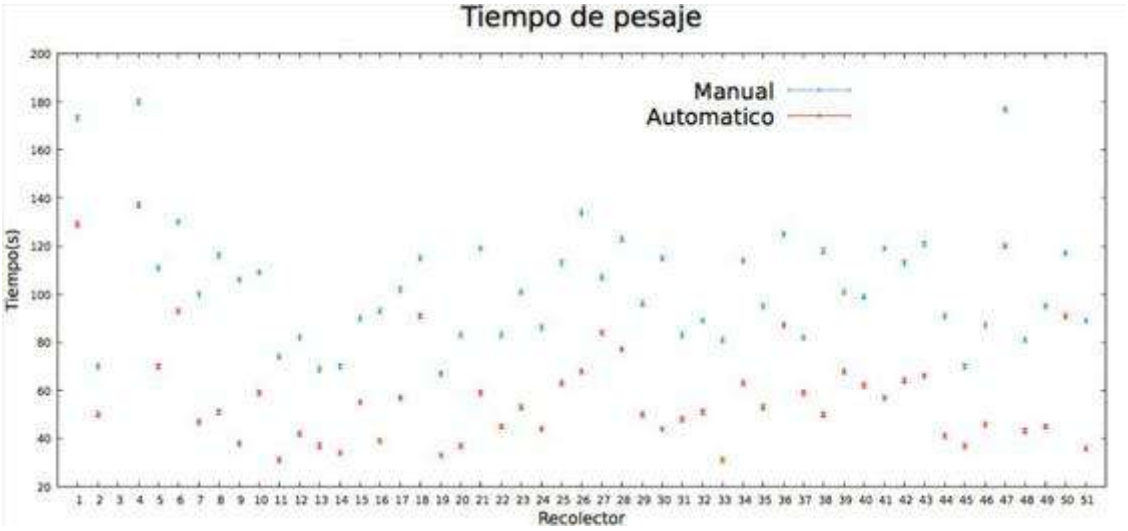


Figura 8. Gráfica del tiempo empleado en la pesada de forma manual y llevando el registro con el nuevo sistema en un día de trabajo (Las etiquetas del 1 al 51 representan cada uno de los recolectores).

El sistema por ser de bajo coste y de muy fácil adaptación a los diferentes sistemas de producción cafeteros de Colombia hace que se una forma de crear trazabilidad en pequeños productores, ya que el desarrollo de sistemas detallados de trazabilidad no es fácil para los pequeños productores de alimentos y empresas de procesamiento, puesto que carecen de la capacidad financiera, la información de trazabilidad adecuada y conocimientos suficientes para ponerla en práctica [7-8]. Además, no solo la trazabilidad de la recolección sino también un registro adecuado y completo del proceso de beneficio ayuda a obtener un café de un valor comercial alto, garantizando toda la información de las condiciones adecuadas de producción [9-11].

4. Conclusiones

El prototipo logra de manera eficiente la recolección y registro de datos de la productividad de un cultivo, facilitando la administración y trazabilidad de la información por recolector y lote, lo cual es de gran importancia en las fincas.

No solo es notable la mejora en la trazabilidad de la recolección, sino que también se mejora el manejo de la información para generar las planillas de pago semanales, ya que es clara la cantidad registrada a diario y además no se presentan corrupciones, deterioro o ambigüedades de la información como cuando esta se recopila de forma manual.

El sistema diseñado está construido de forma tal que cualquier tipo de cultivo que tenga un esquema de recolección similar al del cultivo del café, pueda ser trazado, es decir, para cualquier cultivo en el que la cuantificación de la cosecha sea similar.

La digitalización de la información conlleva a un mejoramiento en la eficiencia de todo el ecosistema de beneficio del café y sobre todo en los procesos en los que se involucra personal permitiendo también un manejo, tratamiento y análisis de la información más sencillo.

Referencias

1. Puerta Q., G.I. Registro de la trazabilidad del café en la finca. Avances Técnicos CENICAFÉ - Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2007, No. 355. Paginas (1-8). ISSN-0120-0178
2. Rojas G., C.P. Factores físicos y Socioeconómicos que explican la no adopción de tecnología moderna por el caficultor en Antioquia y Cundinamarca. Ensayos sobre economía cafeteria – Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 1998. Paginas (73-100).

3. Puerta Q., G.I. Buenas Prácticas Agrícolas Para El Café. Avances Técnicos CENICAFÉ - Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2006, No. 349. Paginas (1-12). ISSN-0120-0178
4. Perdomo J.A., Darrel H., Mendieta J.C. Factores que afectan la eficiencia técnica en el Sector Cafetero Colombiano: una aplicación con análisis envolvente de datos. Ensayos sobre economía cafetera – Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2006. Paginas (121-140).
5. Herrera, M. y Orjuela, J. Perspectiva de trazabilidad en la cadena de suministros de frutas: un enfoque desde la dinamica de sistemas. En: Ingenierıa, 2014. Vol. 19, No. 2, pp. 63–84 ISSN-02121-750X
6. Oliveros T., C. E., Sanz U., J. R. Ingeniería y café en Colombia. Revista de ingeniería. Universidad de los Andes 2011. Volumen 33. Paginas (99-113)
7. Bosona T., Gebresenbet G, Food traceability as an integral part of logistics management in food and agricultural supply chain, Food control, 2013 pp. 32-48.
8. Rincon B, D., Conceptualización de la trazabilidad en la cadena de abastecimiento. Trabajo fin de Especializacion Ingenieria de producción y Logística. Universidad Francisco Jose de Caldas Bogotá 2016
9. Puerta Q., G.I. (2013) Calidad del café En CENICAFE. Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura. Chinchiná:FNC:CENICAFÉ. 3 vol (81 - 110).
10. Puerta Q., G.I. Beneficie correctamente su café y conserve la calidad de la bebida. Avances Técnicos CENICAFÉ - Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2000, No. 276. Paginas (1-8). ISSN-0120-0178
11. Sanz U., J.R.; Oliveros T., C.E.; Ramírez G., C.A.; Peñuela M., A.E.; Ramos G., P.J. Proceso de beneficio. Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura, CENICAFÉ - Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2013. Volumen 3. Paginas (9 - 47).

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Determinación de precursores de acrilamida en patata por NIRS

S. Arazuri[1], A. López-Maestresalas[1], C. Pérez[1], F.J. Morales[2], M. Mesías[2], C. Jarén[1]

[1] Dpto. Ingeniería. Ed. Los Olivos. Campus Arrosadía. Universidad Pública de Navarra. 31001 Pamplona. Navarra.
[2] Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos y Nutrición, ICTAN-CSIC. José Antonio Novais 10, 28040, Madrid.

Resumen: Según la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), la presencia de acrilamida en los alimentos incrementa el riesgo de desarrollar determinados tipos de cáncer. Las patatas fritas son una de las principales fuentes de exposición a este contaminante, formado debido a los altos niveles de precursores (azúcares reductores y asparagina) en la patata y a las elevadas temperaturas aplicadas durante la fritura. El objetivo del trabajo es utilizar la tecnología NIRS como método rápido de muestreo y control de los niveles de azúcares reductores en las patatas destinadas para fritura. Se han analizado 494 muestras liofilizadas de patatas obtenidas tanto de diferentes variedades de patatas frescas, como de patatas prefritas congeladas. Se ha empleado como método analítico de referencia el descrito por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) que emplea ácido dinitrosalicílico (DNS) pero utilizando un espectrofotómetro de placas (Synergy HT, BioTek Instruments, Inc., USA). Las medidas en el infrarrojo se han realizado con un espectrofotómetro NIR, Luminar 5030 de Brimrose. El análisis estadístico consiste en la realización de modelos de regresión por mínimos cuadrados parciales (PLSR). Se observó que los errores obtenidos en los modelos de predicción estaban alrededor de 15 mg/g y 22 mg/g, para azúcares reductores y totales (Glucosa, Fructosa y Sacarosa). La técnica se presenta como una herramienta útil para realizar el análisis rápido de muestras de patata liofilizada.

Palabras clave: acrilamida, infrarrojos, PLS-R, azúcares reductores.

1. Introducción

La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) indica que la presencia de acrilamida en los alimentos incrementa el riesgo de desarrollar determinados tipos de cáncer. Las patatas fritas son una de las principales fuentes de exposición a este contaminante, formado debido a los altos niveles de precursores (azúcares reductores y asparagina) en la patata fresca y a las elevadas temperaturas aplicadas durante la fritura.

El contenido en azúcares reductores (glucosa + fructosa) en el tubérculo es el factor crítico en la formación de acrilamida, ya que el contenido en asparagina libre es muy elevado y presenta poca variación. Es por ello que una de las estrategias para mitigar la formación de este contaminante es controlar los niveles de azúcares reductores en la patata fresca, que dependerá, entre otros factores, de la variedad, de factores agronómicos o de las condiciones de almacenamiento.

Los métodos de análisis químico son costosos tanto por los materiales utilizados como por el tiempo empleado en realizarlos. Los métodos de análisis de azúcares reductores en alimentos y en patata en particular son muy variados, desde técnicas de análisis directo mediante

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3462

cromatografía de líquidos acoplado a detectores amperométricos, de índice de refracción o light-scattering, pero también mediante cromatografía de gases de los azúcares derivatizados. También existen técnicas rápidas basadas en kits enzimáticos y colorimétricos. La mayoría de ellas tienen limitaciones para ser realizadas on-line o incluso at-line, y requieren de varias horas o días para obtener el resultado, o como ocurre con los métodos cromatográficos, se requiere de equipamiento costoso y personal técnico cualificado. Todo ello, limita el uso rutinario del control de azúcares reductores para el pequeño productor.

El objetivo de este trabajo ha sido utilizar la tecnología NIRS como método de control, para muestrear de forma rápida los niveles de azúcares reductores en patata liofilizada.

2. Materiales y métodos

2.1. Material vegetal

Las patatas utilizadas en el ensayo correspondieron a patatas frescas y patatas prefritas congeladas proporcionadas por voluntarios de más de 300 hogares, comedores escolares y establecimientos de restauración colectiva. Todas las patatas procedentes de los hogares (n = 320) fueron patatas frescas (de temporada o de conservación) de distintas variedades comerciales obtenidas en diferentes localizaciones de 30 provincias españolas. Las patatas proporcionadas por los comedores escolares (n = 51) fueron frescas (n = 22) y prefritas congeladas (n = 29), mientras que aquéllas procedentes de la restauración colectiva (n = 123) fueron en su totalidad prefritas congeladas. Todas las muestras se liofilizaron y se conservaron hasta su análisis en cámara frigorífica a 4ºC. En total se analizaron 494 muestras.

2.2. Análisis de azúcares reductores

Los azúcares reductores y totales se analizaron según el método del ácido dinitrosalicílico (DNS)[1] utilizando un espectrofotómetro de placas (Synergy HT, BioTek Instruments, Inc., USA). La determinación incluyó extracción con agua a 50ºC e hidrólisis de la sacarosa con HCl 2N para los azúcares totales. En presencia de azúcares reductores, el 3-5-dinitrosalicílico es reducido a 3,5-diaminosalicílico, compuesto coloreado que presenta un máximo de absorción a 530 nm. La absorbancia de las muestras será proporcional a la concentración de azúcares reductores (glucosa + fructosa) presentes en el medio. Los resultados son expresados como glucosa equivalentes. El método ha sido validado con la determinación de azúcares por cromatografía de líquidos mediante intercambio iónico y detección amperométrica.

2.3. Análisis de espectroscopía en el Infrarrojo Cercano

Las muestras de patata liofilizada se analizaron con el espectrofotómetro Luminar 5030 de Brimrose (Baltimore, MD, USA), este equipo cuenta con tecnología AOTF-NIR (Acousto Optic Tunable Tunable Filter-Near Infrared), es portátil y permite tomar medidas con y sin contacto con la muestra. El rango espectral es de 1100 a 2300 nm, con una velocidad de escaneo de 16000 longitudes de onda/s. Se adquirieron 4 espectros por muestra liofilizada.

2.4 Análisis quimiométrico

Una vez adquirida toda la información espectral y química de cada muestra se elaboró la tabla de datos, de forma que cada muestra quedara caracterizada por su espectro y por la cantidad de azúcares reductores (AR) obtenida. La regresión por mínimos cuadrados parciales PLS-R, es la técnica aplicada para la realización de los modelos de predicción de los azúcares a partir de los datos espectrales. El siguiente paso, consiste en dividir los datos en dos grupos: uno para realizar la calibración del modelo de predicción de azúcares reductores que contenga

el 70% de las muestras, y el otro grupo, el de validación o predicción, que va a permitir evaluar el modelo obtenido y que contiene el 30% restante de las muestras.

Se realizaron distintos pretratamientos a los espectros para corregir el ruido espectral y la dispersión. Estos pretratamientos fueron: normalización (NORM), corrección de la dispersión multiplicativa (MSC), y primera y segunda derivadas según el método de Savitzky-Golay.

La capacidad de aplicación de los modelos desarrollados se evaluó según los siguientes parámetros: el coeficiente de determinación (R^2), el error de predicción del modelo de calibración (RMSEC), de la validación cruzada (RMSECV) y de la predicción o validación (RMSEP) [2].

El software utilizado para la realización de los análisis quimiométricos es The Unscrambler X (versión 10.3, CAMO software AS, Oslo, Norway).

3. Resultados y discusión

La variabilidad de las muestras debe ser tal, que permita que el modelo sea escalable. En la tabla 1 se presentan los valores de número de muestras, rango, media y desviación típica para los grupos de calibración y de validación, para las variables Azúcares Reductores (AR) y Azúcares Totales (AT), medidas en miligramos por gramo de patata liofilizada.

Tabla 1. Datos de caracterización de los grupos de calibración y predicción

	Grupo de calibración				**Grupo de predicción**			
	n	**Rango**	**Media**	**SD**	**n**	**Rango**	**Media**	**SD**
AR (mg/g)	303	0,81-202,97	29,43	39,99	151	0,78-153,66	26,29	34,07
AT(mg/g)	303	1,01-261,79	52,71	47,65	151	4,46-221,35	51,42	44,68

Podemos observar que ambos grupos presentan medias y desviaciones típicas muy similares, esto nos permitirá poder evaluar de forma correcta la capacidad de predicción de los modelos desarrollados para ambas variables de estudio.

Una vez que la distribución de los datos es la adecuada para el análisis, pasamos a evaluar los resultados obtenidos. En la tabla 2, se muestran para los distintos pretratamientos aplicados a los datos espectrales, los parámetros de evaluación de los modelos de predicción de azúcares (error y coeficiente de determinación). Además se incluye el número de variables latentes (LV) utilizadas en cada caso.

Tabla 2. Parámetros de evaluación de los modelos para los distintos pretratamientos y variables analizadas

Variable	**Pretratamiento**	**LV**	**R^2CV**	**RMSECV**	**R^2V**	**RMSEP**
AR(mg/g)	Sin pretratar	13	0,85	14,72	0,70	19,63
	Normalización	12	0,67	19,58	0,76	16,69
	MSC	12	0,84	15,09	0,70	19,86
	1ª derivada	9	0,84	15,15	0,69	19,95
	2ª derivada	8	0,78	17,82	0,63	21,83
AT(mg/g)	Sin pretratar	13	0,80	20,53	0,83	18,28
	Normalización	13	0,81	19,55	0,88	15,19
	MSC	12	0,83	18,85	0,84	18,03
	1ª derivada	9	0,80	20,61	0,85	17,10
	2ª derivada	8	0,79	21,15	0,81	19,64

Se puede observar (tabla 2) cómo el valor del coeficiente de determinación tanto en la validación cruzada como en la predicción alcanza en todos los casos un valor superior a 0,6 que es el límite de aplicación de los modelos. Cuando R^2 se sitúa entre 0,8 y 0,9, donde está la mayoría de los modelos, éstos se pueden utilizar para la mayoría de las aplicaciones [3]. Esto indica que los modelos desarrollados pueden utilizarse según este parámetro, para la predicción del contenido de azúcares reductores y totales. En relación a los errores de validación cruzada y predicción, si comparamos estos con el valor de la desviación típica de la variable, vemos que son inferiores, haciendo que podamos aceptar cualquiera de ellos, cumpliendo así con el objetivo marcado en este trabajo.

En el caso de AR, podemos indicar que la mejor opción podría ser la de no realizar ningún pretratamiento de los datos, asumiendo que el error en la predicción va a aumentar, ya que son muestras que no han participado en el desarrollo del modelo. El número de variables latentes utilizadas (LV), se ha seleccionado minimizando el error pero sin sobreajustar el modelo.

La predicción de AT, sin embargo, parece que es mejor en el caso de normalizar los datos, ya que tenemos un buen comportamiento en la predicción, con coeficientes de determinación más altos y errores más bajos.

Aunque el rango de azúcares reductores es mayor que el presentado por López-Maestresalas [4], la relación entre los errores y el valor medio de la variable, es muy similar en ambos trabajos.

Finalmente, en las figuras 1 y 2, podemos observar las longitudes de onda que más influyen en la capacidad predictora de los modelos para AR y AT, respectivamente.

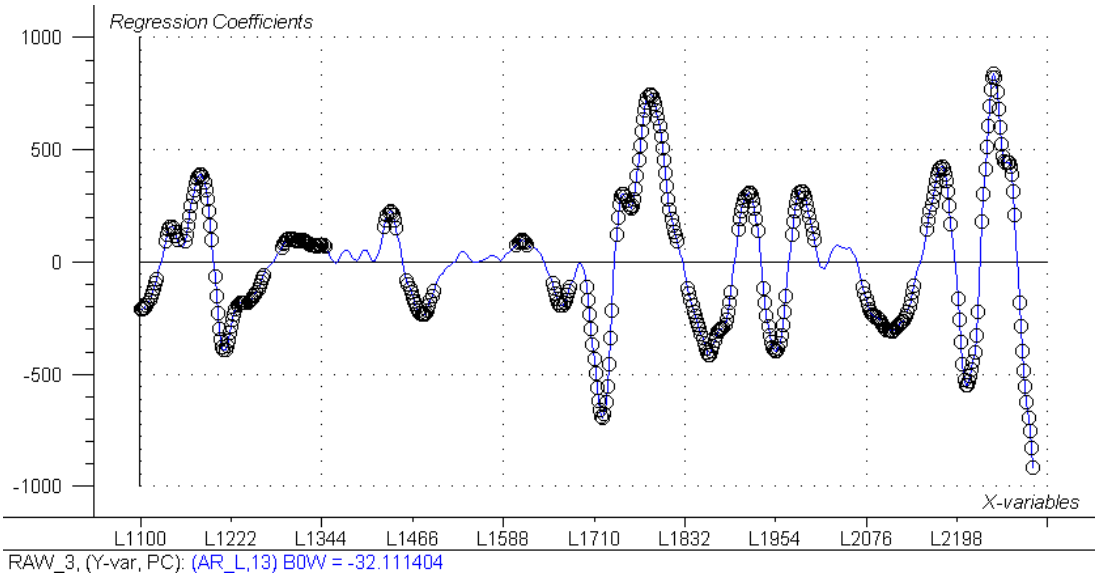


Figura 1. Longitudes de onda con mayor influencia en el modelo de predicción del contenido de azúcares reductores.

En la Figura 1 prácticamente todo el espectro tiene la misma importancia en el desarrollo del modelo, sin embargo, en la Figura 2, para la predicción de los azúcares totales, parece que son los rangos del 1700 a 1900 nm y de 2100 a 2300 nm donde radica la capacidad de predicción del modelo. Estas zonas están relacionadas con las bandas de absorción de los enlaces C=H, presentes en los azúcares.

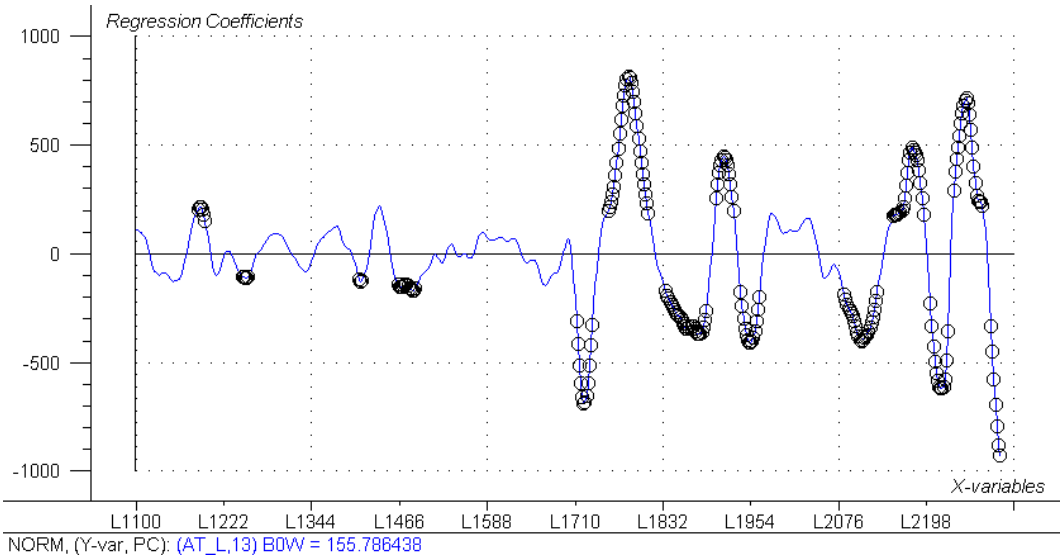


Figura 2. Longitudes de onda con mayor influencia en el modelo de predicción del contenido de azúcares totales.

4. Conclusiones

En este estudio se ha investigado la capacidad de la tecnología NIRS para predecir el contenido en azúcares reductores y azúcares totales en muestras de patata de distinta procedencia. Una vez analizados los datos obtenidos, podemos concluir que la tecnología NIRS puede ser una buena alternativa a las medidas de laboratorio para la estimación de azúcares en muestras de patata liofilizadas. Se han obtenido unos coeficientes de determinación entre 0,63-0,88 para el grupo de validación. Los mejores resultados se han alcanzado para la predicción de azúcares totales aplicando una normalización a los datos (R^2:0,88, RMSEP:15,19), mientras que la mejor estimación de los azúcares reductores se ha realizado sin pretratar los datos espectrales (R^2:0,70, RMSEP:19,63).

De acuerdo a los resultados obtenidos, el uso de la tecnología NIR combinada con el análisis PLS-R tiene potencial para detectar la concentración de azúcares en patata. Sin embargo, en futuros estudios será necesario seguir aumentando el número de muestras para poder reducir el error de predicción.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha estado financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (España) bajo los proyectos SAFEFRYING (AGL2015-46234-R) y RTA2013-00006-C03-03.

Referencias

1. Miller, G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. Analytical Chemistry. 1959, 31, 426-428.
2. Naes T., Isaksson T., Fearn T., Davies T. A user friendly guide to multivariate calibration an classification. NIR Publications. 2002.
3. Williams P. Near-infrared technology—Getting the best out of light. PDK Grain, Nanaimo, Canada. 2003.
4. López-Maestresalas A., Pérez C., Tierno R., Arazuri S., Ruiz de Galarreta J.I., Jarén C. Prediction of main potato compounds by NIRS. Chemical Engineering Transactions. 2017, 50, 385-390.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Diferentes aplicaciones de la imagen hiperespectral para garantizar la calidad de nectarina

S. Munera[1], N. Aleixos[2], J.M. Amigo[3], S. Cubero[1], P. Talens[4], J. Blasco[1]*

[1] Centro de Agroingeniería, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Carretera CV-315, Km 10.7, 46113 Moncada, España; blasco_josiva@gva.es
[2] Departamento de Ingeniería Gráfica, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España.
[3] Department of Food Sciences, Faculty of Science, University of Copenhagen. Rolighedsvej 30, Frederikberg C DK-1958, Dinamarca.
[4] Departamento de Tecnología de Alimentos, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España.

Resumen: En este trabajo se ha estudiado la aplicación de la imagen hiperespectral en reflectancia y transmitancia para garantizar la calidad de manera no destructiva de tres variedades de nectarina: "Big Top, 'Diamond Ray' y 'Magique'. En primer lugar se evaluó la calidad de nectarinas 'Big Top' y 'Magique' durante su madurez poscosecha usando reflectancia y transmitancia. El índice de calidad interna (IQI) se utilizó para relacionar las propiedades fisicoquímicas como firmeza, color de la pulpa y sólidos solubles totales. Para ambos modos se obtuvieron resultados óptimos: en reflectancia se obtuvieron valores de R^2 de 0,90 y 0,88 para la predicción de IQI de 'Big Top' y 'Magique' utilizando 8 y 7 longitudes de onda, y en transmitancia se obtuvieron valores de R^2 de 0,88 y 0,86 utilizando 13 y 9 longitudes de onda. Debido a la susceptibilidad de 'Big Top' de presentar huesos abiertos, se estudió la aplicación de imágenes en transmitancia para su detección. Como resultado, el 100 % de las frutas que presentaban hueso abierto y el 91% con hueso normal fueron clasificadas correctamente. Por último, se aplicó esta técnica en reflectancia para discriminar las variedades estudiadas. Como resultado se clasificaron correctamente el 98 % y 95 % de las frutas de cada variedad usando 14 longitudes de onda, mientras que un panel visual compuesto por expertos solamente pudo distinguirlas con una tasa de éxito cercana al 50 %. Todos estos resultados confirman el gran potencial de la imagen hiperespectral para la evaluación de la calidad de nectarinas en líneas de manipulación haciendo posible la oferta de productos más adecuados para el consumidor.

Palabras clave: madurez, hueso abierto, no destructivo, reflectancia, transmitancia

1. Introducción

La nectarina es una de las frutas que mayor esfuerzo le ha sido dedicado para mejorar su rendimiento agronómico y mejorar la apariencia y calidad [1], lo que ha resultado en un aumento significativo en la cantidad de nuevas variedades disponibles para los productores de fruta. Sin embargo, este esfuerzo no se ha traducido en un aumento en el consumo. Esto es debido a que la fruta se cosecha muy temprano, resultando a menudo carente de sabor y con una firmeza excesiva, y a una falta de identificación del producto [2]. Por otro lado, existe el problema del hueso abierto que puede afectar a un 45 % de las frutas. Este fenómeno consiste en la división del hueso a lo largo del endocarpio, lo que hace que las dos mitades se separen entre sí dentro del mesocarpio. Cuando esto ocurre, pueden desarrollarse problemas de

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3421

podredumbres mucho más rápido y existe un mayor riesgo de que la enfermedad se propague más rápidamente a otras frutas durante las operaciones de almacenamiento o comercialización posteriores a la cosecha [3]. Por lo tanto, sería necesaria una evaluación previa de la calidad para ofrecer a los consumidores las frutas que mejor se adapten a sus preferencias.

La evaluación interna de la calidad de las frutas de hueso se ha llevado a cabo tradicionalmente mediante métodos destructivos, que son caros, contaminantes, requieren mucho tiempo y solo se pueden controlar unas pocas muestras aleatorias por lote. Existe, por lo tanto, una necesidad de desarrollar metodologías no destructivas e instantáneas que permitan determinar de una manera objetiva la calidad de la fruta.

La imagen hiperespectral es una técnica de visión artificial que combina imágenes digitales convencionales con espectroscopia que permite detectar características de la fruta en regiones del espectro electromagnético donde el ojo humano no es capaz de detectarlas, como las regiones ultravioleta o infrarroja [4]. Esta técnica se está empezando a explorar como una herramienta científica para garantizar la calidad de una amplia gama de alimentos. Dentro de las frutas de hueso, el melocotón ha sido el más estudiado, por ejemplo, para estimar su madurez [5], firmeza [6] o daños [7]. En cuanto a la nectarina, esta técnica fue usada para detectar daños [8].

El objetivo de este trabajo ha sido proponer diferentes aplicaciones de la imagen hiperespectral junto con métodos de análisis multivariante para evaluar la calidad de la nectarina, desarrollando modelos estadísticos predictivos que permitan monitorear su madurez, detectar el fenómeno de hueso abierto y discriminar variedades similares.

2. Materiales y métodos

2.1. Muestras

Para el estudio de la madurez y detección de huesos abiertos se usaron un total de 168 nectarinas ‘Big Top’ y 168 nectarinas ‘Magique’. La fruta se cosechó en un huerto comercial en Lérida (España) en su período de madurez comercial y se agrupó en 6 lotes de 28 frutas, donde 5 lotes se almacenaron en condiciones controladas (15 °C, 90 % HR) hasta la senescencia. La adquisición de las imágenes y los análisis de la variedad 'Big Top' se realizaron antes de su almacenamiento y después del 1º, 2º, 3º, 5º y 8º día de almacenamiento. Para las nectarinas ‘Magique’ se realizaron antes del almacenamiento y después del 2 º, 4 º, 7 º, 10 º y 14 º día.

Inicialmente, ninguna fruta presentó signos externos de hueso abierto. El experimento para detectar este fenómeno se llevó a cabo después de la adquisición de las imágenes. Un total de 137 frutas ‘Big Top’ de 168 (81,5 %) presentaron hueso normal y 31 (18,5 %) abierto. En el caso de las frutas de la variedad ‘Magique’, ninguna presentó este fenómeno.

Para la discriminación de variedades se utilizaron frutas de las variedades ‘Diamond Ray’ y ‘Big Top’ porque son consideradas como referencia de variedades ácidas y dulces [9], y presentan una apariencia muy similar. Se seleccionaron un total de 125 frutas de cada variedad sin defectos o moratones y se almacenaron en condiciones controladas (1 °C; 90 % HR) para evitar una mayor maduración durante el experimento.

2.2. Adquisición y procesado de las imágenes hiperespectrales

Las imágenes hiperespectrales de las frutas intactas se obtuvieron por medio de una cámara industrial (CoolSNAP ES, Photometrics, AZ, USA) acoplada a dos filtros sintonizables de cristal líquido (Varispec VIS-07 and NIR-07, Cambridge Research & Instrumentation, Inc., MA, USA), capaces de adquirir imágenes en reflectancia entre 450 nm y 1040 nm y en transmitancia entre 630 nm y 900 nm. El sistema se configuró para capturar imágenes de 1392 x 1040 pixels con una resolución espacial de 0,14 mm/pixel cada 10 nm. De esta forma, se obtuvo el espectro de la nectarina en ese rango espectral en cada uno de los píxeles de la imagen. En

reflectancia, la iluminación consistió en 12 halógenos que iluminaron la escena indirectamente por medio de la reflexión difusa, en una cúpula de aluminio donde las nectarinas se introducían manualmente. En el caso de la transmitancia la fruta se colocó entre la cámara y el sistema de iluminación.

Una vez capturadas las imágenes, se obtuvo el espectro promedio de todos los píxeles de la nectarina utilizando el programa HYPER-Tools [10] para MATLAB (The MathWorks, Inc. MA, EE. UU.).

2.3. Análisis de referencia

La caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las frutas se realizó tras la toma de imágenes. La firmeza se registró en los dos lados opuestos de la fruta usando un texturómetro (XT2 Stable. MicroSystems Haslemere, Reino Unido). Después, se tomó una muestra de zumo para la medición de los sólidos solubles usando un refractómetro digital (RFM330-VWR, Internacional Eurolab S.L., Barcelona) y se midió la acidez usando un pH-metro (pH-Burette 24, Crison, Barcelona). Los resultaron se expresaron como porcentaje de sólidos solubles y porcentaje de ácido málico, respectivamente.

Las coordenadas de color en los espacios CIELAB y CIELCH L^*, a^*, b^*, h^*, C^*, de la piel y la pulpa de cada fruta se obtuvieron mediante el uso de un colorímetro (Minoltacm-700d, Minolta Co. Tokio, Japón).

El índice de calidad interna (IQI) se calculó utilizando la Ecuación (3) [11]. Este índice relaciona las propiedades fisicoquímicas internas con una percepción sensorial de su madurez.

$$IQI = \ln \frac{100 \times F \times L^* \times h^*}{TSS \times C^*} \quad (3)$$

Para la discriminación de variedades se realizó además un análisis visual llevado a cabo por un panel semientrenado compuesto por cinco panelistas (tres hombres y dos mujeres de entre 29 y 50 años). Cada panelista fue entrenado previamente con 20 imágenes en color (10 de cada variedad). Después se les presentó un total de 40 imágenes de nectarina (20 de cada variedad) aleatoriamente para que las clasificaran como pertenecientes a la variedad 'Diamond Ray' o 'Big Top'.

Finalmente se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y un test de Tukey para determinar la existencia de diferencias estadísticas entre los diferentes días de análisis en el estudio de la madurez y entre las variedades de acuerdo a sus propiedades fisicoquímicas.

2.4. Análisis multivariante

Para predecir las propiedades de las frutas se utilizó la regresión basada en mínimos cuadrados parciales (PLS-R). En el caso de la detección de frutas con hueso abierto y normal y la discriminación de variedades, se realizó con un análisis discriminante basado en mínimos cuadrados parciales (PLS-DA). Para la construcción de los modelos se usaron dos tercios de las muestras y el tercio restante se utilizó para validarlos. Los resultados de los modelos PLS-R fueron expresados en base al coeficiente de determinación (R^2), al error cuadrático medio (RMSE) y a la desviación predictiva residual (RPD), definida como la relación entre la desviación estándar de los datos de referencia y RMSE de la validación externa, y que indica el poder de predicción del modelo [11]. En cuanto a los obtenidos por los modelos PLS-DA, fueron basados en el porcentaje de frutas correctamente clasificadas.

3. Resultados y discusión

3.1. Monitorización de la madurez de nectarinas 'Big Top' y 'Magique'

La Tabla 1 muestra los resultados de la predicción del índice de calidad IQI para las variedades 'Big Top' y 'Magique' usando reflectancia y trasnmitancia. En general, se obtuvieron predicciones óptimas para las dos variedades usando los dos modos. Usando reflectancia para la variedad 'Big Top', los valores de R^2 y RMSE fueron 0,89 y 0,33 y para 'Magique', estos valores fueron 0,89 y 0,44, respectivamente. En el caso de la transmitancia, esos valores fueron similares. Cuando se seleccionó un conjunto óptimo de longitudes de onda para cada variedad y modo, 8 longitudes de onda para 'Big Top' en reflectancia y 9 en trasnmitancia, 7 longitudes de onda para 'Magique' en reflectancia y 7 en trasnmitancia, los valores de R^2 se mantuvieron similares a los obtenidos usando todas las longitudes de onda para las dos variedades y modos.

Según [12] y los valores de RPD obtenidos, todos los modelos obtuvieron una precisión excelente en la predicción de IQI. Por lo tanto, el uso de ambos modos tuvo un gran potencial para estimar la calidad de las nectarinas.

Tabla 1. Resultados de la predicción del índice de calidad interna del set de validación externo de nectarinas 'Big Top' y 'Magique' usando reflectancia y transmitancia.

Modo	Índice de calidad (IQI)					
	'Big Top'			'Magique'		
	R^2	RMSE	RPD	R^2	RMSE	RPD
Reflectancia (60 λ)	0,89	0,33	3,0	0,89	0,44	2,7
Reflectancia (8 y 7 λ)	0,90	0,32	3,1	0,88	0,44	2,7
Trasnmitancia (28 λ)	0,89	0,34	2,7	0,88	0,43	2,8
Transmitancia (9 y 7 λ)	0,88	0,35	2,7	0,89	0,40	3,0

RMSE = error cuadrático medio; RPD = desviación predictiva residual.

3.2. Detección de huesos abiertos en nectarinas 'Big Top'

EL modelo PLS-DA para la detección de huesos abiertos obtuvo una precisión total del 93,0 %, clasificándose correctamente el 91,3 % de las frutas con hueso normal y el 100 % de las frutas que presentaban hueso abierto (Tabla 2). Se seleccionaron un total de 7 longitudes de onda (630, 670, 680, 700, 740, 800 y 870 nm) y se desarrolló un nuevo modelo PLS-DA. Los resultados (Tabla 2) fueron mejores que los obtenidos utilizando el espectro completo, aumentando la precisión total del 93,0 % al 94,7 %.

Tabla 2. Resultados de la detección de hueso abierto en el set de validación externo de nectarinas 'Big Top' usando transmitancia.

λ	Clase	Normal	Abierto	% frutas clasificadas correctamente	% total de clasificación correcta
28	Normal	42	4	91,3	93,0
	Abierto	0	11	100	
7	Normal	43	3	93,5	94,7
	Abierto	0	11	100	

Para detectar este fenómeno, se utilizaron imágenes de rayos X [13] en melocotón y se obtuvo una precisión de clasificación total del 95,5 % utilizando 94 frutas normales, 5 con hueso agrietado y 99 con hueso abierto y de diferentes variedades. También se estudió el uso de un método de vibración acústica [14] que obtuvo una precisión de clasificación total del 97,8 % utilizando 256 frutas normales y 57 frutas con hueso abierto y de la misma variedad y etapa de madurez. Comparando estos resultados con los obtenidos en este trabajo, se puede afirmar que la imagen hiperespectral es una alternativa viable para la detección de huesos abiertos, especialmente teniendo en cuenta la alta precisión en la identificación de frutas que sufren este fenómeno independientemente de la etapa de madurez de las frutas.

3.3. Discriminación de las variedades 'Big Top' y "Diamond Ray'

La discriminación de las nectarinas 'Big Top' y 'Diamond Ray' se realizó usando la imagen hiperespectral, la medida de color y un panel semientrenado. Como muestra la Tabla 3, prácticamente la mitad de las frutas clasificadas visualmente por el panel fueron erróneas, lo que demuestra la dificultad del ojo humano para distinguir entre estas dos variedades de nectarinas. La clasificación obtenida por el modelo PLS-DA usando color tuvo una precisión similar a la del panel (56,9 %), lo que indica que únicamente el color no es adecuado para este tipo de inspección de calidad. Estos resultados de clasificación fueron bajos en comparación con los resultados obtenidos por la imagen hiperespectral. Cuando se usó la información espectral de las 60 longitudes de onda, las dos variedades se clasificaron con un éxito superior al 94 %.

Tabla 3. Resultados de la discriminación del set de validación externa de nectarinas 'Big Top' y 'Diamond Ray' usando un panel entrenado, color e imagen hiperespectral.

Método	**% frutas de cada variedad clasificadas correctamente**		**% total de clasificación correcta**
	'Diamond Ray'	'Big Top'	
Análisis visual (panel)	54,0	55,0	54,5
Color (L*, a*, b*)	64,8	49,0	56,9
Imagen hiperespectral (60 λ)	94,4	94,4	94,4
Imagen hiperespectral (14 λ)	94,8	97,8	96,3

Para agilizar el proceso de clasificación, se seleccionaron un total de 14 longitudes de onda. El nuevo modelo PLS-DA obtuvo un porcentaje mayor de clasificación total (96,3 %) resultando mejor clasificada la variedad 'Big Top' (Tabla 3).

Estos resultados concuerdan con un trabajo previo [15] en el que se utilizaron imágenes hiperespectrales e imágenes de color para discriminar entre cuatro variedades de uva roja. Solo el 52 % de las muestras se clasificaron correctamente utilizando imágenes de color. Sin embargo, el éxito aumentó al 86 % cuando se usaron imágenes hiperespectrales. Por otro lado, previamente se desarrolló un sistema en línea [16] para la verificación de variedades de nectarina usando características de color con un éxito del 100 % al comparar tres variedades con otra variedad de referencia. En el mismo experimento, la clasificación visual con un panel logró el 86 % de clasificación correcta. El elevado éxito de clasificación obtenido tanto por el sistema automático como por el panel visual se debió, probablemente, a las grandes diferencias existentes entre las variedades estudiadas.

4. Conclusiones

Este trabajo muestra diferentes aplicaciones de la imagen hiperespectral para garantizar la calidad de nectarinas.

La monitorización de la madurez de las variedades 'Big Top' y 'Magique' se llevó a cabo usando imágenes en reflectancia y transmitancia y el índice de calidad interna IQI obtenido a partir de la medición destructiva de las propiedades fisicoquímicas de las frutas. Los modelos PLS-R obtuvieron una predicción óptima para ambas variedades usando reflectancia y trasnmitancia, con valores de R2 alrededor de 0,90 usando todas las longitudes de onda y las seleccionadas como óptimas.

La detección de frutas con hueso abierto en la variedad 'Big Top' fue exitosa, logrando una clasificación por medio de PLS-DA del 100 % para frutas con hueso abierto y 91,3 % para frutas de hueso normal utilizando todas las longitudes de onda capturadas. Cuando se seleccionaron 7 longitudes de onda óptimas, estos resultados fueron del 100 % y 93,5 % respectivamente.

Por último, los resultados de la discriminación entre las variedades 'Big Top' y 'Diamond Ray' mediante el uso de color o por un panel capacitado fueron muy pobres, con una precisión de solo 56,9 % y 54,5 %, respectivamente. Sin embargo, el uso de la imagen hiperespectral permitió la clasificación con una mayor precisión que los sistemas tradicionales manuales, proporcionando una precisión de clasificación del 94,4 % y 96,3 % usando todas las longitudes y las 14 seleccionadas, respectivamente.

Estos resultados confirman el gran potencial de esta técnica para evaluar la calidad de nectarinas de diferentes variedades. Sin embargo, los resultados obtenidos deben confirmarse en un número mayor de frutas cultivadas en diferentes áreas y cosechadas en diferentes etapas de madurez antes de que pueda implementarse en un sistema en línea.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por fondos del INIA y FEDER a través del proyecto RTA2015-00078-00-00. Sandra Munera agradece al INIA el contrato FPI-INIA núm. 43 (CPR2014-0082), parcialmente financiado por fondos de la Unión Europea FSE.

Referencias

1. Reig G., Alegre S., Gatius F., Iglesias I. Agronomical performance under Mediterranean climatic conditions among peach [Prunus persica (L,) Batsch] cultivars originated from different breeding programs, Scientia Horticulturae. 2013, 150, 267–277.
2. Iglesias I., Echeverría G. Differential effect of cultivar and harvest date on nectarine colour, quality and consumer acceptance, Scientia Horticulturae. 2009, 120, 41–50.
3. Tani E., Polidoros A.N., Tsaftaris A.S. Characterization and expression analysis of FRUITFULL-and SHATTER-PROOF-like genes from peach (Prunus persica) and their role in split-pit formation. Tree physiology. 2007, 27, 649-659.
4. Lorente D., Aleixos N., Gómez-Sanchis J., Cubero S., García-Navarrete O.L., Blasco J. Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment, Food Bioprocess Technology. 2012, 5, 1121–1142.
5. Herrero-Langreo A., Lunadei L., Lleó L., Diezma B., Ruiz-Altisent M. Multispectral Vision for Monitoring Peach Ripeness, Journal of Food Science. 2011, 2, 178-187.
6. Zhu N., Lin M., Nie Y., Wu D., Chen K. Study on the quantitative measurement of firmness distribution maps at the pixel level inside peach pulp, Computers and Electronics in Agriculture. 2016, 130, 48–56.
7. Sun Y., Gu S., Sun K., Hu H., Xu M., Wang Z., Tu K., Pan L. Hyperspectral reflectance imaging combined with chemometrics and successive projections algorithm for chilling injury classification in peaches, LWT - Food Science and Technology. 2017, 75, 557-564.

8. Huang F., Zhang S., Yang Y., Man Z., Zhang X., Wu Y. Application of hyperspectral imaging for detection of defective features in nectarine fruit, Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2015, 11, 252-259.
9. Reig G., Iglesias I., Echeverría G. Agronomical performance, fruit quality and sensory attributes of several flat peach and flat nectarine cultivars. VII International Peach Symposium. 2009, 962. pp. 563-569.
10. Mobaraki N., Amigo J.M. HYPER-Tools. A graphical user-friendly interface for hyperspectral image analysis. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2018, 172, 174-187.
11. Cortés V., Ortiz C., Aleixos N., Blasco J., Cubero S., Talens P. A new internal quality index for mango and its prediction by external visible and near-infrared reflection spectroscopy. Postharvest Biololgy and Technology. 2016, 118, 148-158.
12. Williams P.C. Variables affecting near-infrared reflectance spectroscopic analysis. In: Williams P., Norris K. (Eds.), Near-infrared Technology in the Agricultural and Food Industries. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, 1987, pp. 143-166.
13. Han Y.J., Bowers S.V., Dodd R.B. Nondestructive detection of Split-pit peaches. Transactions of the ASAE. 1992, 35, 2063-2067.
14. Nakano R., Akimoto H., Fukuda F., Kawai T., Ushijima K., Fukamatsu Y., Kubo Y., Fujii, Y., Hirano K., Morinaga K. Sakurai, N. Nondestructive detection of split pit in peaches using an acoustic vibration method. The Horticulture Journal. 2018, 87, 281–287.
15. Nogales-Bueno J., Rodríguez-Pulido F.J., Heredia F.J., Hernández-Hierro J.M. Comparative study on the use of anthocyanin profile, color image analysis and near-infrared hyperspectral imaging as tools to discriminate between four autochthonous red grape cultivars from LaRioja (Spain), Talanta. 2015, 131, 412–416.
16. Font D., Tresanchez M., Pallejà T., Teixidó M., Martinez D., Moreno J., Palacín, J. An image processing method for in-line nectarine variety verification based on the comparison of skin feature histogram vectors, Computers and Electronics in Agriculture. 2014, 102, 112–119.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Efectos del recubrimiento con sulfato de zinc sobre tasas de germinación y niveles de isoenzimas en semillas de algodón

José de Souza Abreu Júnior[1], Leopoldo Mario Baudet[2], Cassyo de Araújo Rufino[1], Jucilayne Fernandes Veira[3], Jesús Martín-Gil[4], Pablo Martín-Ramos[5*]

[1] Faculdade de Guanambi, membro de pesquisa do Observatório FG do Semi-Árido Nordestino. Av. Senador Nilo Coelho, S/N, CEP 46430-000, Bairro São Sebastião, Guanambi, Bahia.
[2] Departamento de Fitotecnia da Universidade de Pelotas – UFPel, CEP 96001-970, Pelotas, RS, Brasil.
[3] Agência de Defesa Agropecuária da Bahia – ADAB. Avenida Adhemar de Barros, 967, Ondina, Salvador - Bahia, 40.170-110, Brasil.
[4] Departamento de Ingeniería Agroforestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, Avenida de Madrid 44, 34004 Palencia, España
[5] Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca, España.

Resumen: Se han estudiado los parámetros fisiológicos y enzimáticos de semillas y plántulas de algodón variedad BRS 286 tratadas con sulfato de zinc, antes y después de su almacenaje durante 4 meses. Las semillas de algodón se han recubierto con una película utilizando distintas dosis de $ZnSO_4$ (hasta 11,6 g/kg de semillas) en combinación con un fungicida y un insecticida en una matriz polimérica. La calidad fisiológica antes y después del almacenaje se ha analizado mediante pruebas de germinación y ensayos de primer recuento. En los tests de germinación, aunque las diferencias no han sido estadísticamente significativas, se ha observado que las dosis de 2,9 y 5,8 g de $ZnSO_4$/kg de semillas han mejorado las tasas de germinación, superando el 90%, mientras que dosis más altas (8,65 y 11,6 g de $ZnSO_4$/kg de semillas) han conducido a valores inferiores al control. Las dosis más altas también han producido una reducción del vigor tras 120 días de almacenaje. Respecto a las cuatro isoenzimas cuya actividad se ha medido para evaluar la calidad de las semillas (carboxilesterasa, fosfatasa ácida, glutamato-oxalacetato transaminasa y glutamato deshidrogenasa), se han registrado diferencias para dos enzimas tras 120 días de almacenaje. Los valores más bajos de carboxilesterasa (cuyo aumento va asociado al metabolismo de lípidos y a degeneración de la membrana) y los más altos de glutamato-oxalacetato transaminasa (clave en el metabolismo de las proteínas) se han obtenido para una dosis de $ZnSO_4$ de 5,8 g de $ZnSO_4$/kg de semillas). El estudio sugiere que la aplicación del sulfato de zinc a esta dosis, en forma de *composite*, mejora la viabilidad de las semillas de algodón durante su almacenaje.

Palabras clave: *coating*; *composite*; *Gossypium hirsutum* L.; micronutrientes; zinc

1. Introducción

Un requerimiento usual de la industria textil es que las materias primas para la producción de ropa sean, en gran medida, compatibles con la piel humana. Esta exigencia ha hecho aumentar mucho la demanda de algodón pluma, de la que Brasil es un exportador importante. El comienzo de la producción de algodón pluma se inicia por la elección de semillas de calidad, que garantice

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3452

su vigor y sostenibilidad. En este escenario es necesario el uso de técnicas de bajo costo sobre la base de que la aplicación de micronutrientes es esencial para alcanzar buenos índices de productividad y calidad.

La USDA estima que la producción de algodón 2018/19 de Brasil alcanzó un récord de 12,8 millones de fardos de 480 libras, con un aumento de 3,6 millones de fardos (39%) respecto al año anterior. El área cosechada se estima en 1,6 millones de hectáreas, un 36% más que el año pasado. El rendimiento se estima en un récord de 1,747 kg/ha, superando el récord anterior (2017/18) en un 2% [1].

Muchos factores son responsables de estas mejoras en el rendimiento, pero una mejor utilización del suelo ha sido considerada como un punto clave. La fertilización también es crucial y, a este respecto, debe tenerse en cuenta que el algodón es particularmente sensible a la deficiencia de zinc. Una deficiencia de este micronutriente tiene varios efectos perjudiciales en la planta: las puntas de las raíces se agrandan y los pelos radiculares se tuercen; se produce la caída de los brotes florales; las cápsulas son pequeñas y algunas veces tienen extremos romos; las flores se caen antes de que se formen las cápsulas, etc. Todas estas anomalías contribuyen a la pérdida de rendimiento.

El zinc también actúa como activador de varias enzimas y como componente estructural de otros. Se considera esencial para la síntesis de triptófano, que, a su vez, es el precursor del ácido indol-3-acético, que aumenta el volumen celular [2].

El suelo es la principal fuente de zinc para las plantas, pero muchos factores pueden afectar a su disponibilidad y es conveniente suministrarlo en las semillas, el suelo y mediante aplicación foliar. Existen experimentos que muestran diferentes respuestas a la aplicación de micro-nutrientes entre cultivares y entre especies [3-13].

Si el tratamiento con zinc va dirigido a la semilla, se debe prestar especial atención no solo a su calidad, sino también a una aplicación adecuada y una correcta distribución del producto [14]. Entre los métodos de tratamiento de semillas, el revestimiento con película (método utilizado en este estudio) ha ganado popularidad en los últimos años debido a las ventajas siguientes: asegura una uniformidad superior a la que se obtiene con la aplicación de lechadas (o pastas aguadas); minimiza la dispersión de los pesticidas en el medio ambiente; cuando los protectores de plantas se aplican a la semilla con encapsulación, trabajan en un área específica; la dosis completa originalmente aplicada a la semilla queda disponible para combatir las plagas en el entorno, etc. [15].

Respecto al potencial de almacenaje de las semillas, este puede verse influenciado por muchos factores, desde la fase de producción en el campo a los procedimientos de recolección y procesamiento. Por lo tanto, garantizar las condiciones de conservación que mantienen la calidad de la semilla también debe considerarse una prioridad [16].

Otro enfoque importante para evaluar la calidad de las semillas es a través del estudio de los procesos enzimáticos y en concreto de las isoenzimas, en cuanto productos de la expresión génica: los genes que controlan su expresión se manifiestan en ciertas etapas del desarrollo y en órganos y tejidos específicos, o bajo un estímulo particular [17]. Los isoenzimas vienen siendo utilizados como marcadores en estudios de viabilidad, ya que son efectivos para conocer mejor los cambios degenerativos y la muerte de las semillas [18].

Carboxilesterasa (CES, EC 3.1.1.1) y fosfatasa ácida (AP, EC 3.1.3.2) son hidrolasas que participan en las reacciones de hidrólisis de los ésteres y que han sido puestas en relación con el proceso degenerativo de la membrana involucrando la peroxidación lipídica [19],[20,21]. Según Vieira, *et al.* [22], ambas esterasas se pueden usar como marcadores del proceso de deterioro de la semilla. La glutamato deshidrogenasa (GLDH, EC 1.4.1.3) actúa en la oxidación de las proteínas de almacenaje para suministrar energía a las células (ciclo de Krebs) y/o en la reducción de cetoglutarato para la síntesis de aminoácidos [23], y probablemente desempeña un papel importante en la germinación de la semilla, aportando energía al proceso, o aminoácidos para el

desarrollo embrionario. La glutamato-oxalacetato transaminasa (GOT, EC 2.6.1.1) es responsable de la oxidación de los aminoácidos, proporciona energía al ciclo de Krebs y participa en la reducción del cetoglutarato para la síntesis de nuevos aminoácidos como fuente de energía para el embrión en desarrollo. Tiene un papel fundamental en el metabolismo de las proteínas, no solo durante la germinación, sino a lo largo del ciclo de vida de la planta [24].

Distintos trabajos han destacado el potencial de estos sistemas de isoenzimas para indicar el estado de deterioro de las semillas de especies como el algodón [25], el maíz [19], la alubia [21,26] o la soja y la cebada [27], ayudando así en la evaluación del potencial fisiológico de las semillas. La utilización del patrón de expresión de sistemas de isoenzimas específicas resulta, así, enteramente recomendable como herramienta complementaria para evaluar el potencial fisiológico de la semilla, más teniendo en cuenta el bajo coste de esta práctica.

En el presente trabajo se ha analizado el efecto del recubrimiento de semillas de algodón con diferentes dosis de $ZnSO_4$, en combinación con un fungicida, un insecticida y un polímero, sobre los atributos fisiológicos y enzimáticos de las semillas y las plántulas antes y después del almacenaje mediante pruebas de germinación y de primer recuento de plántulas, y mediante el estudio de cuatro patrones de isoenzimas representativos, respectivamente.

2. Material y métodos

La parte experimental del estudio se realizó en el Laboratório Didático de Análise de Sementes (LDAS) y en las instalaciones de invernadero de la Facultad de Agronomía "Elisha Maciel" (FAEM) en la Universidade Federal de Pelotas (RS, Brasil).

La Fundação Bahia - Luís Eduardo Magalhães/BA suministró las semillas del cultivar de algodón BRS 286 (ciclo de 140-160 días y tamaño bajo a mediano). En el momento del estudio, este cultivar presentaba una tasa de germinación del 88%.

Los tratamientos consistieron en la aplicación de $ZnSO_4$ a diferentes dosis, combinado con un fungicida (Maxin-XL®, 2 mL·kg^{-1} de semilla), un insecticida (Cruise 350 FS®, 4 mL·kg^{-1} de semilla) y un polímero (Colorseed HE®, 4 mL·kg^{-1} de semilla). Se utilizaron los siguientes códigos: "T0" corresponde al control de semilla no tratada; "T1" al control con recubrimiento de fungicida (F) + insecticida (I) + polímero (P); "T2" a 2,895 g de $ZnSO_4$·kg^{-1} semilla + F + I + P; "T3" a 5,795 g de $ZnSO_4$·kg^{-1} semilla + F + I + P; "T4" a 8,65 g de $ZnSO_4$·kg^{-1} semilla + F + I + P; y "T5" a 11,585 g de $ZnSO_4$·kg^{-1} semilla + F + I + P.

Las semillas se recubrieron de acuerdo con el método descrito por Nunes [28], un procedimiento manual que utiliza bolsas de polietileno. El insecticida, el fungicida, el $ZnSO_4$ y el polímero se colocaron directamente en el fondo de la bolsa de plástico hasta una altura de aproximadamente 15 cm. Posteriormente, se agregó 1 kg de semillas y la bolsa de plástico se agitó durante 3 min. Las semillas se dejaron secar a temperatura ambiente durante 24 h. Este procedimiento se repitió hasta obtener el número necesario de semillas para cada tratamiento.

Después del tratamiento, parte de las semillas se sometieron a una evaluación de su calidad inicial y el resto se dividió en muestras de 100 g, que se envolvieron en un papel con un espesor de 0,125 mm y se almacenaron en condiciones no controladas a una temperatura promedio de 22.3 °C y a humedad relativa del 78,4% para su estudio después de 120 días (de noviembre de a marzo). Contenido de humedad de la semilla al inicio y al final del período de almacenaje.

Para la evaluación de la calidad fisiológica de las semillas, la prueba de germinación (*germination test*, GT) se realizó con 200 semillas por tratamiento, divididas en cuatro réplicas de 50 semillas, que se sembraron en papel "Germitest" humedecido con una cantidad de agua destilada equivalente a tres veces el peso del papel seco, y posteriormente se mantuvieron en un germinador a 25 °C. Los recuentos se realizaron cuatro y doce días después de la siembra, según lo prescrito por Brasil Mapa/ACS [29]. El primer recuento de germinación (*first germination count*, FGC) se realizó conjuntamente con la prueba de germinación, contando las plántulas normales

cuatro días después del inicio de la prueba. Los resultados se expresaron como porcentaje de plántulas normales.

Para la diferenciación de isoenzimas, las elegidas fueron carboxilesterasa (EC 3.1.1.1), fosfatasa ácida (AP, EC 3.1.3.2), glutamato-oxalacetato transaminasa (EC 2.6.1.1) y glutamato deshidrogenasa (EC 1.4.1.3). Las semillas germinaron y las plántulas, después de cuatro días, se utilizaron para la extracción. También se realizaron análisis en las semillas secas (no germinadas) antes y después del almacenaje, con fines de comparación.

Para cada tratamiento y repetición, diez semillas y plántulas se recolectaron al azar y se molieron en un mortero de porcelana con hielo. Se colocaron alícuotas de 200 mg del extracto vegetal de cada una de las muestras en un tubo Eppendorf con una solución tampón de gel extractor (gel tampón + 0,15% de 2-mercaptoetanol) en una proporción 1:2 (p/v). La electroforesis se realizó en geles de poliacrilamida al 7%, colocando 20 μL de cada muestra en los pocillos. Los patrones enzimáticos se analizaron mediante el sistema tampón [30]. Los geles se depositaron en cubas electroforéticas verticales y se mantuvieron en una cámara fría a 4-6 °C. Las migraciones electroforéticas se realizaron con una diferencia de potencial de 1.0 $V \cdot mm^{-1}$, hasta que la línea frontal formada por azul de bromofenol alcanzó 90 mm desde el punto de aplicación. Los geles de electroforesis se fijaron en una solución de agua destilada:metanol:ácido acético a 5:5:1 (v/v). Teniendo en cuenta la presencia/ausencia e intensidad de cada banda electroforética, la interpretación de los resultados se basó en el análisis visual de los geles de electroforesis [31,32].

Con respecto al análisis estadístico, se utilizó un diseño completamente aleatorio con cuatro repeticiones. Los datos se analizaron para determinar la normalidad y la homocedasticidad y posteriormente se sometieron a análisis de varianza ($p < 0,05$). Con una probabilidad significativa de F, las medias se compararon mediante la prueba de Dunnett frente a T1.

3. Resultados y discusión

3.1. Calidad fisiológica

3.1.1. Ensayo de germinación

Los resultados de la prueba de germinación se resumen en la Tabla 1. No se encontraron diferencias significativas entre las muestras tratadas con $ZnSO_4$ y los controles, ni antes ni después del almacenaje. Estos resultados están de acuerdo con las observaciones recogidas en la bibliografía para otros cultivos: Arjmand, *et al.* [33], en un estudio sobre semillas de cebada tratadas con $ZnSO_4$, junto con fungicidas y polímeros, no observaron diferencias significativas en el potencial de germinación entre las muestras tratadas con diferentes dosis de zinc (ni en el período inicial, ni después de tres y seis meses de almacenaje). De manera similar, Ohse, *et al.* [5] y Vieira, *et al.* [22], en trabajos con semillas de arroz recubiertas con zinc, no encontraron diferencias significativas en la germinación. Tampoco Funguetto [34] para semillas de arroz recubiertas con boro, zinc, un fungicida y un polímero, o Trentini, *et al.* [35] para semillas de soja. Sin embargo, Yagi, *et al.* [36], en un estudio con sorgo, informaron de una reducción en el porcentaje de germinación, como también lo hicieron Pereira, *et al.* [37] para semillas de maíz, con una pequeña reducción (2%) en el potencial de germinación.

La leve mejoría en términos de germinación de T1 en comparación con el control de T0 estaría de acuerdo con los resultados de Kunkur, *et al.* [38], que evaluaron el impacto de un fungicida, insecticida y compuesto de polímero en semillas de algodón, observando una mayor germinación después de nueve meses de almacenaje.

Tabla 1. Prueba de germinación (GT), antes y después de su almacenaje, de las semillas de algodón recubiertas con una película con diferentes dosis de $ZnSO_4$ + fungicida + insecticida + polímero. Se presentan valores medios. Los coeficientes de variación se mantuvieron por debajo del 3,16% (antes del almacenaje) y del 3,35% (después del almacenaje).

Tratamiento	GT (%) antes de almacenaje	GT (%) después de almacenaje
T0	88.3	86
T1	91.0	90
T2	90.3	92
T3	90.0	89
T4	86.0	86
T5	86.0	90

3.1.2. Primer recuento de germinación

Esta prueba se basa en el principio de que las muestras que muestran el mayor porcentaje de plántulas normales en el primer recuento son las más vigorosas, evaluando de forma indirecta la tasa de germinación [29]. Por lo tanto, a medida que se reduce la respuesta de las semillas para iniciar el proceso de germinación, es menos probable que expresen su potencial fisiológico para producir plántulas normales y vigorosas y son menos capaces de sobrevivir en condiciones de campo severas.

Antes del almacenaje, los resultados de la primera prueba de recuento (Tabla 2) mostraron que hubo diferencias significativas entre las dosis de T4 y T5 (8,65 y 11,59 g de $ZnSO_4 \cdot kg^{-1}$ semilla, respectivamente) y T0 (semilla no tratada) y T1 (semilla tratada sólo con F + I + P), con una reducción notable del vigor de la semilla: T4 llevó a una reducción de 27,5% en comparación con T0 y a una reducción de 30,85% en comparación con T1, mientras que T5 dio como resultado un 53,5% de reducción frente a T0 y en una reducción del 55,7% frente a T1.

Tabla 2. Primer recuento de germinación (FGC), antes y después del almacenaje, de las semillas de algodón recubiertas con una película con diferentes dosis de $ZnSO_4$ + fungicida + insecticida + polímero. Los valores presentados son valores medios, y los coeficientes de variación se mantuvieron por debajo del 6,66% (antes de almacenaje) y del 3,94% (después de almacenaje).

Tratamiento	FGC (%) antes de almacenaje	FGC (%) después de almacenaje
T0	79.0	86
T1	82.8	90
T2	77.8	* 92
T3	76.8	89
T4	* 57.3 $^{\beta}$	* 32 $^{\beta}$
T5	* 36.7 $^{\beta}$	* 26 $^{\beta}$

Los valores medios precedidos por '*' y seguidos por 'β' difieren de los tratamientos T0 y T1, respectivamente, de acuerdo con la prueba de Dunnett ($p \leq 0,05$).

Después del almacenaje durante 120 días en condiciones no controladas, los resultados de la prueba de germinación del primer recuento fueron similares a los obtenidos antes del almacenaje, con diferencias significativas para los tratamientos con T4 y T5 en comparación con los controles (T0 y T1). En este caso, T4 redujo el FGC en un 62,8% y en un 64,4% en comparación con T0 y T1, respectivamente, mientras que T5 llevó a una reducción del 69,8% y a una reducción del 71,1% frente a T0 y T1, respectivamente. Es preciso señalar también que la dosis más baja (T2) condujo a un aumento significativo (7%) en comparación con T0, pero no frente a T1.

3.2. Patrones de isoenzimas

A partir de los resultados del análisis de los cuatro sistemas enzimáticos estudiados, fue posible inferir que hubo variaciones significativas en la intensidad de la expresión de isoenzimas, tanto en función de las dosis de zinc aplicadas a las semillas, como antes y después de su almacenaje durante 120 días en condiciones no controladas.

En general, se pudo observar que el patrón de isoenzimas expresado por la semilla seca (0 días) difería de las isoenzimas expresadas por las plántulas en desarrollo para todos los sistemas de proteínas analizados. Esto se puede atribuir al hecho de que los patrones durante el desarrollo de la semilla seca y en la germinación corresponden a diferentes procesos de diferenciación celular y perfiles de expresión génica. En la semilla seca, la actividad metabólica es extremadamente baja y sólo las reacciones biosintéticas necesarias para la respiración celular son sostenidas. Por otro lado, en las plántulas en desarrollo, durante el proceso de germinación, se desencadenan varias reacciones bioquímicas y biosintéticas, como la producción intensa de trifosfato de adenosina (ATP), la degradación de las reservas de proteínas y polisacáridos, la nueva síntesis de ARNm, la reestructuración y reparación de membranas dañadas y orgánulos, etc., que modifican significativamente la expresión de isoenzimas [24].

Antes del almacenaje, las semillas recubiertas con sulfato de zinc mostraron diferencias en la intensidad de las bandas de la enzima carboxilesterasa (ver Figura 1). Al evaluar las plántulas cuatro días después de la emergencia, el control T0 mostró una mayor intensidad de la enzima que el control T1. Para las dosis T3 y T4, se observó una intensidad más baja de la enzima en comparación con las otras muestras tratadas con el micronutriente. Estos resultados difieren de los reportados por Diniz, *et al.* [39], que encontraron un aumento en la intensidad de las bandas para las semillas de lechuga cubiertas con sales de zinc durante su almacenaje, y por de Tunes, *et al.* [40], que analizaron las variaciones en la expresión de esta enzima en semillas de cebada durante su almacenaje durante seis meses.

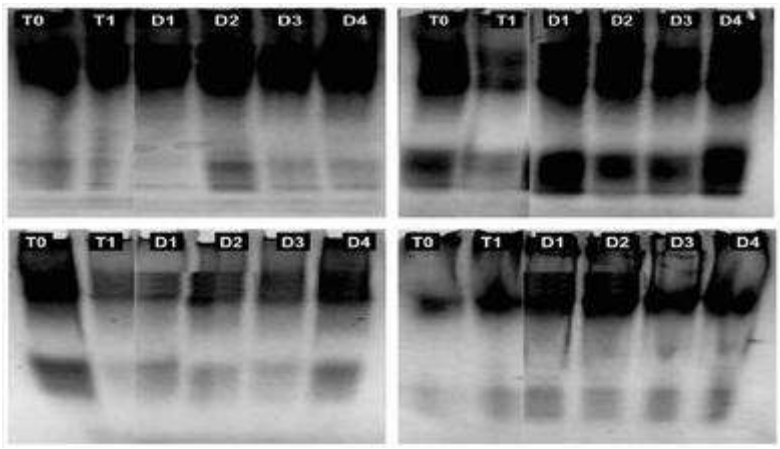


Figura 1. Patrones electroforéticos de la isoenzima carboxilesterasa obtenidos para semillas de algodón (*izquierda*) y plántulas (*derecha*) recubiertas con diferentes dosis de $ZnSO_4$ (junto con un fungicida, un insecticida y un polímero), antes (*arriba*) y después (*abajo*) de su almacenaje en condiciones no controladas durante 120 días. T0: sin recubrimiento; T1: *composite* sin $ZnSO_4$; D1: *composite* con 2,895 g $ZnSO_4$/kg semillas; D2: *composite* con 5,795 g $ZnSO_4$/kg semillas; D3: *composite* con 8,65 g $ZnSO_4$/kg semillas; D4: *composite* con 1,585 g $ZnSO_4$/kg semillas.

Cuando se analizaron los resultados de la electroforesis en gel después de 120 días de almacenaje de las semillas en condiciones ambientales no controladas, se evidenció que se produjo una menor expresión de CES para las semillas no tratadas (T0) en comparación con todos los otros tratamientos, con o sin la presencia de sulfato de zinc. En el análisis visual de las bandas

en plántulas, se observó una menor expresión de la enzima en los controles T0 y T1 que en las muestras tratadas con el micronutriente.

En semillas de alubia, un aumento en la actividad de CES puede implicar una reducción de la calidad, conforme a lo indicado por Santos, *et al.* [26], que propusieron que las esterasas pueden usarse como marcadores del proceso de deterioro de las semillas. Lo mismo fue verificado por Silva, *et al.* [41] en plántulas de maíz tratadas con sales de zinc.

En cuanto a los resultados de electroforesis en gel para la enzima AP (Figura 2), antes y después del almacenaje, no se encontraron diferencias en el número y/o la intensidad de las bandas para ninguno de los tratamientos, ni para las semillas ni para las plantas de semillero.

Como se señaló anteriormente, la fosfatasa ácida es una enzima relacionada con los procesos de deterioro en las semillas, como la interrupción del sistema de membrana celular, causada por la peroxidación de la membrana de fosfolípidos [19-21]. Santos, *et al.* [26] informaron que, para las semillas de alubia sometidas a envejecimiento artificial, los valores más altos de conductividad eléctrica estaban relacionados con una mayor actividad de la fosfatasa ácida.

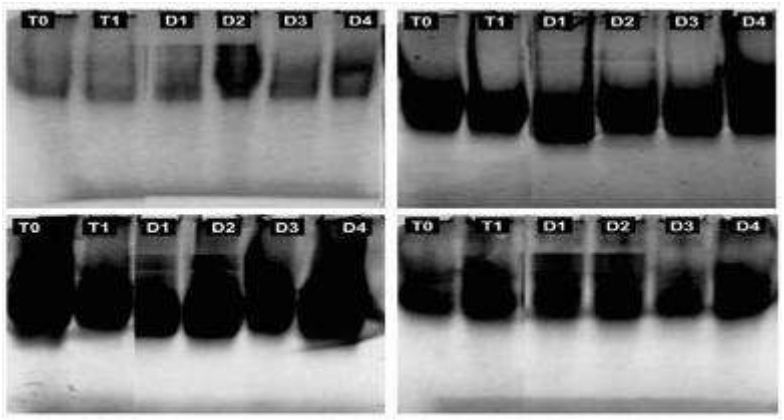


Figura 2. Patrones electroforéticos de fosfatasa ácida obtenidos para semillas de algodón (*izquierda*) y plántulas (*derecha*) recubiertas con diferentes dosis de $ZnSO_4$ (junto con un fungicida, un insecticida y un polímero), antes (*arriba*) y después (*abajo*) de almacenaje en condiciones no controladas. T0: sin recubrimiento; T1: *composite* sin $ZnSO_4$; D1: *composite* con 2,895 g $ZnSO_4$/kg semillas; D2: *composite* con 5,795 g $ZnSO_4$/kg semillas; D3: *composite* con 8,65 g $ZnSO_4$/kg semillas; D4: *composite* con 1,585 g $ZnSO_4$/kg semillas.

Para el sistema isoenzima de la glutamato-oxalacetato transaminasa (Figura 3), las semillas y las plántulas recubiertas antes del almacenaje no mostraron cambios en el número y la intensidad de las bandas, independientemente de la dosis de zinc utilizada en el tratamiento. Después de 120 días de almacenaje, tampoco se observaron diferencias para las plántulas (4 días después de la emergencia, DAE). No obstante, después de 120 días de almacenaje, se pudo observar una mayor expresión de la GOT para las semillas T1 en comparación con T0. Para T3 y T4, la intensidad de las bandas aumentó con el aumento de la dosis de zinc.

La actividad de la enzima GOT está directamente relacionada con la calidad de la semilla [42], pues participa en el proceso de degradación y síntesis de aminoácidos [42], mostrando un papel importante en la germinación de las semillas. Dado que esta enzima participa directamente en el metabolismo del N, pueden producirse variaciones a medida que la síntesis y la degradación de los aminoácidos tienen lugar durante el proceso de germinación.

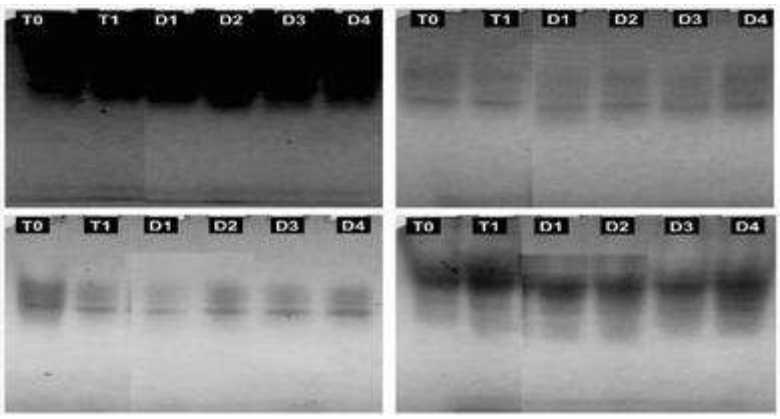


Figura 3. Patrones electroforéticos de glutamato-oxalacetato transaminasa obtenidos para semillas de algodón (*izquierda*) y plántulas (*derecha*) recubiertas con diferentes dosis de $ZnSO_4$ (junto con un fungicida, un insecticida y un polímero), antes (*arriba*) y después (*abajo*) de almacenaje en condiciones no controladas. T0: sin recubrimiento; T1: *composite* sin $ZnSO_4$; D1: *composite* con 2,895 g $ZnSO_4$/kg semillas; D2: *composite* con 5,795 g $ZnSO_4$/kg semillas; D3: *composite* con 8,65 g $ZnSO_4$/kg semillas; D4: *composite* con 1,585 g $ZnSO_4$/kg semillas.

La expresión de la enzima glutamato deshidrogenasa (Figura 4) no mostró variaciones en su intensidad de expresión antes del almacenaje de las semillas. Sin embargo, para las plántulas se encontró una expresión más intensa para el control T0 y los tratamientos T3 y T4. Después de 120 días de almacenaje, no se encontraron variaciones en la intensidad y expresión de los patrones de GLDH, ni para las semillas ni para las plántulas 4 DAE, independientemente de la dosis de zinc.

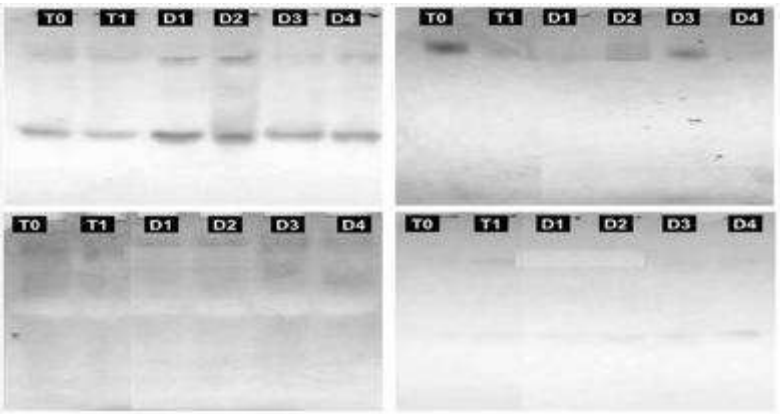


Figura 4. Patrones electroforéticos de glutamato deshidrogenasa obtenidos para semillas de algodón (*izquierda*) y plántulas (*derecha*) recubiertas con diferentes dosis de $ZnSO_4$ (junto con un fungicida, un insecticida y un polímero), antes (*arriba*) y después (*abajo*) de almacenaje en condiciones no controladas. T0: sin recubrimiento; T1: *composite* sin $ZnSO_4$; D1: *composite* con 2,895 g $ZnSO_4$/kg semillas; D2: *composite* con 5,795 g $ZnSO_4$/kg semillas; D3: *composite* con 8,65 g $ZnSO_4$/kg semillas; D4: *composite* con 1,585 g $ZnSO_4$/kg semillas.

Esta enzima está, al parecer, gobernada por la expresión de dos loci no vinculados ($GLDH_1$ y $GLDH_2$) [43-45]. Esta enzima actúa sobre la oxidación de aminoácidos (proteínas de almacenaje), proporciona energía para las células (ciclo de Krebs) y/o la reducción de α-cetoglutarato para la síntesis de aminoácidos, y probablemente desempeña un papel importante en la germinación de las semillas, proporcionando energía al proceso. o aminoácidos para el desarrollo embrionario. Según Brandão-Junior, *et al.* [23], esta enzima tiene una alta correlación entre la actividad disminuida y la calidad reducida de la semilla.

4. Conclusiones

El recubrimiento de las semillas de algodón con *composites* a dosis de 2,9 g $ZnSO_4$/kg de semillas y 5,8 g $ZnSO_4$/kg de semillas han dado lugar a las mejores tasas de germinación y al mayor vigor de las plántulas tras su almacenaje durante un cuatrimestre (aunque sin diferencias significativas desde un punto de vista estadístico). Otro es el caso cuando se aumenta la dosis de $ZnSO_4$ pues tras 120 días de almacenaje se observa una indeseada reducción del vigor. Respecto a las cuatro isoenzimas cuya actividad se ha medido para evaluar la calidad de las semillas (carboxilesterasa, fosfatasa ácida, glutamato-oxalacetato transaminasa y glutamato deshidrogenasa), se han registrado diferencias en dos enzimas tras los 4 meses de almacenaje. Los valores más bajos de carboxilesterasa (cuyo aumento va asociado al metabolismo de lípidos y a degeneración de la membrana) y los más altos de glutamato-oxalacetato transaminasa (clave en el metabolismo de las proteínas) se han obtenido para las semillas tratadas con $ZnSO_4$ a 5,8 g/kg de semillas, que se plantea como la dosis más deseable en los ensayos realizados con el cultivar BRS 286. La aplicación de sulfato de zinc con una adecuada dosificación, en forma de *composite*, se plantea pues como una vía de mejora de la viabilidad de las semillas de algodón durante su almacenaje.

Referencias

1. USDA. *Circular Series on World Agricultural Production 5-19*; United States Department of Agriculture - Foreign Agricultural Service: USA, 2019; p 31.
2. Vale, F. Avaliação e caracterização da disponibilidade do boro e zinco contidos em fertilizantes. Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brazil, 2001.
3. Volkweiss, S.J.; Tedesco, M.J.; Bohnen, H. *Levantamento dos teores de nutrientes das plantas em solos do Rio Grande do Sul*. UFRGS: Porto Alegre, Brazil, 1983; p 60.
4. Ohse, S.; dos Santos, O.S.; Morodim, V.; Manfron, P.A. Efeito do tratamento de sementes de arroz irrigado com zinco em relação a aplicação no substrato. *Revista da FZVA* **1998**, *5*.
5. Ohse, S.; Marodim, V.; Dos Santos, O.S.; Lopes, S.J.; Manfron, P.A. Germinação e vigor de sementes de arroz irrigado tratadas com zinco, boro e cobre. *Revista da FZVA* **2001**, *7/8*, 41-50.
6. Fageria, N.K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **2000**, *4*, 390-395.
7. Fageria, N.K. Screening method of lowland rice genotypes for zinc uptake efficiency. *Scientia Agricola* **2001**, *58*, 623-626.
8. Fageria, N.K. Influence of micronutrients on dry matter yield and interaction with other nutrients in annual crops. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **2002**, *37*, 1765-1772.
9. Marchezan, E.; Santos dos Santos, O.; Avila, L.A.d.; Posser da Silva, R. Adubação foliar com micronutrientes em arroz irrigado, em área sistematizada. *Ciência Rural* **2001**, *31*, 941-945.
10. de Oliveira, S.C.; Costa, M.C.G.; Chagas, R.d.C.S.; Fenilli, T.A.B.; Heinrichs, R.; Cabral, C.P.; Malavolta, E. Resposta de duas cultivares de arroz a doses de zinco aplicado como oxissulfato. *Pesq. agropec. bras., Brasília* **2003**, *38*, 387-396.
11. Bonnecarrère, R.A.; Londero, F.A.; Santos, O.; Schmidt, D.; Pilau, F.G.; Manfron, P.A.; Neto, D.D. Resposta de genótipos de arroz irrigado à aplicação de zinco. *Revista da FZVA* **2003**, *10*, 109-116.
12. Moraes, M.F.d.; Santos, M.G.d.; Bermúdez-Zambrano, O.D.; Malavolta, M.; Raposo, R.W.C.; Cabral, C.P.; Malavolta, E. Resposta do arroz em casa de vegetação a fontes de micronutrientes de diferentes granulometria e solubilidade. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **2004**, *39*, 611-614.
13. Fageria, N.K.; Baligar, V.C. Growth components and zinc recovery efficiency of upland rice genotypes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **2005**, *40*, 1211-1215.
14. Baudet, L.; Peske, F. Aumentando o desempenho das sementes. *Seed News* **2007**, *9*, 22-24.
15. Levien, A.; Peske, S.T.; Baudet, L. Film coating no recobrimento das sementes. *Seed News* **2008**, *12*, 1-5.
16. Baudet, L.; Villela, F.A. Armazenamento de sementes. In *Sementes: fundamentos científicos e Tecnológicos*, 2nd ed.; Peske, S.T.; Lucca Filho, O.A.; Barros, A.C.S.A., Eds. UFPel: Pelotas, Brazil, 2006; pp 427-472.

17. Ramírez, H.; Calderón, A.; Roca, W.M. Técnicas moleculares para evaluar y mejorar el germoplasma vegetal. In *Cultivo de Tejidos Vegetales en la Agricultura. Fundamentos y Aplicaciones*, Roca, W.M.; Mroginski, L.A., Eds. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT): Cali, Colombia, 1991; pp 825-855.
18. Tunes, L.M. Atributos de qualidade em sementes de trigo recobertas com zinco durante e após o armazenamento. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2011.
19. Spinola, M.C.M.; Cícero, S.M.; Melo, M. Alterações bioquímicas e fisiológicas em sementes de milho causadas pelo envelhecimento acelerado. *Scientia Agricola* **2000**, *57*, 263-270.
20. Carvalho, M.; Vieira, M.; Pinho, E. Técnicas moleculares em sementes. *Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento, Brasília* **2000**, *3*, 44-47.
21. Santos, C.M.R.; Menezes, N.d.; Villela, F.A. Modificações fisiológicas e bioquímicas em sementes de feijão no armazenamento. *Revista Brasileira de Sementes* **2005**, *27*, 104-114.
22. Vieira, E.H.N.; Moreira, G.A. Peletização de sementes de arroz. In *Comunicado Técnico*, Embrapa Arroz e Feijão: Santo Antônio de Goiás, Brazil, 2005; Vol. 111, p 2.
23. Brandão-Junior, D.d.S.; Carvalho, M.L.M.d.; Vieira, M.G.G.C. Variações eletroforéticas de proteínas e isoenzimas relativas à deterioração de sementes de milho envelhecidas artificialmente. *Revista Brasileira de Sementes* **1999**, *21*, 114-121.
24. Malone, G. Relações bioquímicas e moleculares da germinação e emergência em arroz. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brazil, 2007.
25. Vieira, M.d.G.G.C. Utilização de marcadores moleculares no monitoramento da qualidade sanitária e nível de deterioração de sementes de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.). Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil, 1996.
26. Santos, C.M.R.; Menezes, N.L.d.; Villela, F.A. Alterações fisiológicas e bioquímicas em sementes de feijão envelhecidas artificialmente. *Revista Brasileira de Sementes* **2004**, *26*, 110-119.
27. Chauhan, K.; Gopinathan, M.; Babu, C. Electrophoretic variations of proteins and enzymes in relation to seed quality. *Seed Science and Technology* **1985**, *13*, 629-641.
28. Nunes, J.C. Tratamento de semente-qualidade e fatores que podem afetar a sua performance em laboratório. *Londrina: Syngenta Proteção de Cultivos Ltda* **2005**.
29. Brasil Mapa/ACS. *Regras para análise de sementes*. Brasil - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária: Brasília, Brasil, 2009; p 399.
30. Scandalios, J.G. Genetic control of multiple molecular forms of enzymes in plants: a review. *Biochem. Genet.* **1969**, *3*, 37-79.
31. de Souza Lima, M.d.G.; Lopes, N.F.; Zimmer, P.D.; Meneghello, G.E.; Mendes, C.R.; do Amarante, L. Enzyme expression in indica and japonica rice cultivars under saline stress. *Acta Scientiarum. Biological Sciences* **2012**, *34*, 473-481.
32. Alfenas, A.C. *Eletroforese de isoenzimas e proteínas afins: fundamentos e applicações em plantas e microrganismos*. Universidade Federal de Viçosa: Viçosa, Brazil, 1998; p 574.
33. Arjmand, H.S.; Abarghooei, G.H.B.; Ghorbanpour, M.; Sharafi, S. Effect of zinc coated during storage on the seed quality of barley. *International Journal of Farming and Allied Science* **2014**, *3*, 845-850.
34. Funguetto, C.I. Recobrimento de sementes de arroz irrigado com zinco e polímero. *Norte Científico* **2011**, *2*, 80-92.
35. Trentini, P.; Vieira, M.d.G.G.C.; Carvalho, M.L.M.d.; Oliveira, J.A.d.; Machado, J.d.C. Peliculização: desempenho de sementes de soja no estabelecimento da cultura em campo na região de alto garças, MT. *Ciência e Agrotecnologia* **2005**, *29*.
36. Yagi, R.; Simili, F.F.; Araújo, J.C.d.; Prado, R.d.M.; Sanchez, S.V.; Ribeiro, C.E.R.; Barretto, V.C.d.M. Aplicação de zinco via sementes e seu efeito na germinação, nutrição e desenvolvimento inicial do sorgo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **2006**, *41*, 655-660.
37. Pereira, C.; Oliveira, J.A.; Evangelista, J.R.E. Qualidade fisiológica de sementes de milho tratadas associadas a polímeros durante o armazenamento. *Ciência e Agrotecnologia* **2005**, *29*, 1201-1208.
38. Kunkur, V.; Hunje, R.; BiradarPatil, N.; Vyakarnahal, B. Effect of seed coating with polymer, fungicide and insecticide on seed quality in cotton during storage. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences* **2010**, *20*.

39. Diniz, K.A.; Oliveira, J.A.; Silva, P.d.A.; Guimarães, R.M.; Carvalho, M.L.M.d. Qualidade de sementes de alface enriquecidas com micronutrientes e reguladores de crescimento durante o armazenamento. *Revista Brasileira de Sementes* **2009**, *31*.
40. de Tunes, L.M.; Badinelli, P.G.; Barros, A.C.S.A.; Meneghello, G.E.; do Amarante, L. Influência dos diferentes períodos de colheita na expressão de isoenzimas em sementes de cevada. *Revista Ceres* **2011**, *58*, 178-184.
41. Silva, T.T.d.A.; Von Pinho, É.V.d.R.; Cardoso, D.L.; Ferreira, C.A.; Alvim, P.d.O.; Costa, A.A.F.d. Qualidade fisiológica de sementes de milho na presença de bioestimulantes. *Ciênc. agrotec.,(Impr.)* **2008**, *32*, 840-844.
42. Costa, C.J.; Villela, F.A.; Bertoncello, M.R.; Tillmann, M.Â.A.; Menezes, N.L.d. Expressão de isoenzimas após a pré-hidratação de sementes de ervilha. *Revista Brasileira de Sementes* **2008**, *30*, 130-138.
43. Misharin, S.; Mozgova, E.; Monastyreva, L.; Sukhorzhevskaia, T.; Khavkin, E. Protein polymorphism in maize and its nearest relatives. *Maize Genetic Cooperation News Letter* **1979**, *53*, 44-46.
44. Sukhorzhevskaya, T.B. Organ-specific spectra of glutamate dehydrogenase in maize *Zea mays* L. *Soviet Journal of Developmental Biology (USA)* **1979**.
45. Sukhorzhevskaya, T.B. Investigation of genetic control over glutamate dehydrogenase in maize (Zea mays L.). Genetika 1980, 16, 914-917.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Efectos inmediatos y tras almacenaje del recubrimiento con boro de semillas de algodón

José de Souza Abreu Júnior[1], Cassyo de Araújo Rufino[2], Pablo Martín-Ramos[3], Ricardo Pereira Cunha[1], Jucilayne Fernandes Veira[4], Jesús Martín-Gil[5]

[1] Instituto Federal Baiano, Campus Bom Jesus da Lapa. BR349, km 14, Zona Rural. 47600-000, Brasil.
[2] Centro Universitário UniFG, Avenida Pedro Felipe Duarte, 4911 - São Sebastião, Guanambi - Bahia, 46430-000, Brasil.
[3] Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca, España
[4] Agência de Defesa Agropecuária da Bahia – ADAB. Avenida Adhemar de Barros, 967, Ondina, Salvador - Bahia, 40.170-110, Brasil.
[5] Departamento de Ingeniería Agroforestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, Avenida de Madrid 44, 34004 Palencia, España

Resumen: Se presentan los resultados de la evaluación de la calidad fisiológica de las semillas de algodón tras su recubrimiento con un material compuesto basado en boro. Para el tratamiento de las semillas se ha empleado el producto comercial Jel Fertil® como fuente de boro, junto con un insecticida y un fungicida en una matriz polimérica. Se han ensayado 4 dosis distintas (0,05, 0,10, 0,20 y 0,30 mL·kg^{-1} de semillas). La calidad de las semillas y el rendimiento de las plántulas se han evaluado antes y después del almacenaje mediante diferentes determinaciones y parámetros: prueba de germinación, primer recuento de germinación, prueba de envejecimiento acelerado, longitud de plántula, longitud de la parte aérea, longitud radicular, prueba de emergencia de campo, índice de velocidad de emergencia, contenido de agua, peso seco de la parte aérea, peso seco radicular y altura de planta. El recubrimiento con el material compuesto no ha afectado negativamente a la calidad fisiológica de las semillas, ni antes ni después del almacenamiento. De hecho, las semillas recubiertas tienden a comportarse mejor que las semillas desnudas. La inclusión de boro en el compuesto de recubrimiento no produce un efecto inmediato sobre la germinación, el vigor y la aparición de semillas, pero sí un efecto beneficioso en el peso seco de la parte aérea antes del almacenamiento, y en las longitudes de la parte aérea y radicular. Después de cuatro meses de almacenamiento, el recubrimiento de polímero ha mantenido su efectividad insecticida y fungicida. Las concentraciones de boro utilizadas en el experimento no han dado lugar a síntomas visuales de toxicidad.

Palabras clave: boro; *coating*; *composite*; *Gossypium hirsutum* L.; micronutrientes

1. Introducción

El algodón (*Gossypium hirsutum* L.) es una de las fibras textiles más importantes, ya que representa alrededor del 35% del uso mundial de fibra. Si bien unos 80 países producen algodón, Estados Unidos, China e India proporcionan dos tercios del algodón del mundo.

Brasil es el quinto mayor productor y el cuarto mayor consumidor de algodón [1]. A pesar del escenario adverso actual, con fuertes caídas en los precios de la fibra, la producción brasileña de algodón en la temporada 2018/19 superó las 6.436.000 toneladas, ocupando un área de cultivo de 1.569.000 hectáreas [2]. El reciente interés del mercado por el algodón en pluma de Brasil ha

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3455

dado lugar a la adopción por los productores de estrategias más eficaces, con aplicación de técnicas de bajo coste y buenos retornos de productividad. En este sentido, el recubrimiento de semillas reviste gran relevancia, pues con cantidades muy pequeñas de productos químicos se consigue promover el crecimiento inicial y, además, proteger el cultivo del ataque de plagas y enfermedades en la primera fase del desarrollo de la cutícula.

Un componente importante de la producción de algodón rentable (que afecta tanto al rendimiento como a la calidad del algodón) es la disponibilidad de una nutrición adecuada y equilibrada. La fertilización racional del algodón asegura una mejor economía de producción, la eficiencia en el uso de nutrientes y la protección del medio ambiente.

En cuanto a los micronutrientes, el boro es considerado el más importante para la producción de algodón. Es esencial en todas las etapas del crecimiento de la planta, y de manera crítica durante el desarrollo del fruto (especialmente, con variedades de alto rendimiento y rápida fructificación). Un suministro adecuado de boro ayuda al algodón a desarrollar y retener más botones florales, a aumentar la polinización de la floración y el conjunto de cápsulas, a la movilización de nutrientes y azúcares de las hojas a la fruta, a la producción de fibras fuertes y bien desarrolladas, y acelerara la madurez [3]. No obstante, la información sobre la movilidad de los nutrientes dentro de la planta, los niveles y dosis más apropiados y la forma de aplicación aún es limitada. Además, los cultivares de algodón tienen eficiencias distintas en el uso de boro, respondiendo de manera diferencial a su adición al suelo [4].

Por otro lado, todas las inversiones realizadas en la etapa de producción del cultivo pueden desperdiciarse si no se aplican prácticas adecuadas de almacenamiento. Se debe hacer hincapié en garantizar unas condiciones de conservación que mantengan la calidad de la semilla [5]. Por ejemplo, es importante reducir el contenido de humedad de las semillas porque minimizará la actividad respiratoria, reducirá el consumo de reservas y, por lo tanto, las conservará durante más tiempo, en particular si se mantienen en un ambiente en el que la temperatura y la humedad relativa están controladas [6]. Si bien se dispone de información abundante sobre el almacenamiento de semillas de algodón sin tratar, el efecto del tratamiento con boro en la longevidad de las semillas almacenadas sigue pendiente de estudio.

Por tanto, es importante la realización de trabajos científicos que analicen el potencial de almacenamiento de las semillas de algodón tratadas con productos químicos y sus efectos latentes, un tema clave para los productores, que buscan poder tratar las semillas, dejarlas almacenadas, y utilizarlas para la siembra en campo. De esta forma, el principal objetivo del almacenamiento sería el mantenimiento de la calidad fisiológica de las semillas, reduciendo al mínimo el deterioro de las mismas [7].

El objetivo del presente estudio fue evaluar la germinación y el vigor de semillas de algodón recubiertas con diferentes dosis de boro, investigando el efecto de estos recubrimientos sobre el crecimiento inicial de las plántulas de algodón antes y después del almacenamiento en condiciones no controladas (reproduciendo la situación más habitual entre los productores) durante 120 días.

2. Material y métodos

Este trabajo se realizó en el Laboratório Didático de Análise de Sementes (LDAS) y en las instalaciones de invernadero de la Facultad de Agronomía "Elisha Maciel" (FAEM) de la Universidade Federal de Pelotas (RS, Brasil).

La Fundação Bahia - Luís Eduardo Magalhães/BA suministró las semillas del cultivar de algodón BRS 286 (ciclo de 140-160 días y tamaño bajo a mediano). En el momento del estudio, este cultivar presentaba una tasa de germinación del 88%.

Los tratamientos consistieron en la aplicación de fertilizante foliar con boro Jel fértil® a diferentes dosis, en combinación con un fungicida (Maxin-XL®, 2 mL·kg^{-1} de semilla), un insecticida (Cruise 350 FS®, 4 mL·kg^{-1} de semilla) y un polímero (Colorseed HE®, 4 mL·kg^{-1} de

semilla). Los tratamientos se etiquetaron de la siguiente manera: semilla no tratada ("T0"); fungicida (F) + insecticida (I) + polímero (P) ("T1"); 0,05 mL de boro·kg^{-1} semilla + F + I + P ("T2"); 0,10 mL de boro·kg^{-1} semilla + F + I + P ("T3"); 0,20 mL de boro·kg^{-1} semilla + F + I + P ("T4"); y 0,30 mL de boro·kg^{-1} semilla + F + I + P ("T5").

El recubrimiento de las semillas se realizó conforme al método descrito por Nunes [8], es decir, mediante un procedimiento manual empleando bolsas de polietileno. El insecticida, el fungicida, la fitina y el polímero se colocaron directamente en el fondo de la bolsa de plástico hasta una altura de aproximadamente 15 cm. Posteriormente, se agregó 1 kg de semillas y la bolsa de plástico se agitó durante 3 min. Las semillas se dejaron secar a temperatura ambiente durante 24 h. Este procedimiento se repitió para obtener el número necesario de semillas para cada tratamiento.

Después del tratamiento, parte de las semillas se sometieron a una evaluación de su calidad inicial y el resto se dividió en lotes de 100 g, que se envolvieron en un papel con un espesor de 0,125 mm y se almacenaron en condiciones no controladas a una temperatura media de 22,3 °C y a una humedad relativa del 78,4% para su estudio después de 120 días (de diciembre a marzo). En dicho periodo, la temperatura más baja registrada fue de 15,1 °C (16 de marzo) y la más alta de 29 °C (25 de diciembre), mientras que la humedad relativa alcanzó su valor más bajo el 10 de diciembre (54%) y su valor más alto el 20 de febrero (94,8%). El contenido de humedad de la semilla se determinó al principio y al final del período de almacenamiento.

Para la evaluación de la calidad fisiológica de las semillas, se realizaron las siguientes pruebas de germinación, vigor y desarrollo de plántulas:

La prueba de germinación (*germination test*, GT) se realizó con 200 semillas por tratamiento, que se sembraron en papel 'Germitest' humedecido con una cantidad de agua destilada equivalente a tres veces el peso del papel seco, y posteriormente se mantuvieron en un germinador a 25 °C. Los conteos se realizaron a los cuatro y doce días después de la siembra, según lo prescrito por Brasil Mapa/ACS [9].

El primer recuento de germinación (*first germination count*, FGC) se realizó conjuntamente con la prueba de germinación, contando las plántulas normales cuatro días después del inicio de la prueba. Los resultados se expresaron como porcentaje de plántulas normales.

El test de envejecimiento acelerado (*accelerated aging*, AA) se llevó a cabo de acuerdo con la metodología propuesta por Baalbaki [10] y descrita por Marcos Filho [11]. La prueba se realizó en cajas de plástico con una pantalla de aluminio suspendida en el interior, en la que se distribuyeron 200 semillas para formar una capa uniforme. Se añadió agua (40 mL) a cada caja de plástico. Las cajas se cubrieron y se mantuvieron en una incubadora para DBO (demanda bioquímica de oxígeno) a 42 °C durante 72 h, después de lo cual se llevó a cabo una prueba de germinación. Las evaluaciones se realizaron cuatro días después de la siembra [9] y los resultados se expresaron como porcentaje medio de plántulas normales para cada lote.

Para las pruebas de longitud de la parte aérea y radicular (*shoot lenght*, SL, y *root length*, RL, respectivamente), se distribuyeron cuatro lotes de muestreo de 15 semillas de cada tratamiento en papel humedecido con agua destilada (2,5 veces la masa del papel seco) y se guardaron en el germinador a 25 °C durante cuatro días [12]. La longitud total de las plántulas, la longitud de la parte aérea y la longitud de las raíces primarias se determinaron al final del cuarto día, con la ayuda de una regla milimétrica [9].

La prueba de emergencia de campo (*field emergence*, FE) se realizó con cuatro repeticiones con 50 semillas para cada tratamiento, que se sembraron en lechos llenos de suelo recogido del horizonte A1 de un planosol háplico eutrófico solódico perteneciente a la unidad de mapeo Pelotas [13]. La evaluación se realizó 12 días después de la siembra, contando las plántulas emergidas. Los resultados se expresaron como porcentaje medio de plántulas emergidas.

La prueba del índice de velocidad de emergencia (*emergence speed index*, ESI) se realizó junto con la prueba de emergencia, con recuentos diarios de plántulas emergidas, y la tasa de germinación se calculó utilizando la fórmula propuesta por Maguire [14].

Las determinaciones de peso seco de la parte aérea y radicular (*shoot dry weight*, SDW, y *root dry weight*, RDW, respectivamente) se realizaron junto con la prueba de longitud de plántulas. Después de la medición, se seccionaron las plántulas, separando la parte aérea del sistema radical. Las diferentes secciones se colocaron luego en cápsulas de aluminio y se mantuvieron en un horno con ventilación forzada a 65 °C durante 96 h Posteriormente, el peso seco se determinó utilizando una báscula de precisión (0,0001 g) y los resultados se expresaron en mg·plántula^{-1}, de acuerdo con las recomendaciones de Nakagawa, *et al.* [15].

El contenido de humedad (*moisture content*, MC), antes y después del almacenamiento, se determinó utilizando el método del horno a 105±3 °C durante 24 h (con circulación de aire forzado), utilizando cuatro réplicas de 5 g de semillas por tratamiento [9].

Con respecto al análisis estadístico, se utilizó un diseño completamente aleatorio con cuatro repeticiones. Los datos se analizaron para determinar la normalidad y la homocedasticidad, y posteriormente se sometieron a análisis de varianza ($p < 0,05$). Con una probabilidad significativa *F*, las medias se compararon frente a la dosis T1 mediante la prueba de Dunnett.

3. Resultados y discusión

3.1. Efectos inmediatos

No se encontraron diferencias significativas para las distintas dosis de boro en términos de la prueba de germinación, el primer recuento de germinación y el envejecimiento acelerado cuando se compararon sus valores medios con los controles T0 (semillas no tratadas) y T1 (tratamiento con fungicida + insecticida + polímero) (Tabla 1).

Del mismo modo, las distintas dosis de boro no dieron lugar a diferencias significativas para la prueba de emergencia de campo, que es una de las más confiables para evaluar la calidad fisiológica de las semillas (ya que el sustrato es el suelo, lo que permite la lixiviación de los productos con los que se recubrieron las semillas), ni para el parámetro ESI. No obstante, las semillas cubiertas con la dosis más alta de boro (T5) tuvieron un rendimiento ligeramente inferior en los parámetros mencionados anteriormente.

Los resultados resumidos en la Tabla 1 muestran que la adición de boro al compuesto de revestimiento no tuvo un efecto inmediato sobre la germinación, el vigor o la emergencia de semillas.

Se encontraron diferencias significativas para la longitud de la parte aérea de las plántulas (Tabla 1) entre el control de T1 (fungicida + insecticida + polímero) y el tratamiento con 0,3 mL de boro·kg^{-1} (T5), siendo aproximadamente un 20% menor para este último. Este comportamiento también se observó para la variable de longitud radicular, en la que la dosis más alta (T5) también tuvo un efecto perjudicial en comparación con T1, con una disminución del 14,2% (Tabla 1), lo que confirma la tendencia observada para las pruebas de FE y ESI. Por otro lado, la dosis más baja de boro (T2) mejoró los parámetros de SL y RL de manera significativa en comparación con el control T0 (en un 14% y un 6,3%, respectivamente).

Con respecto al peso seco de la parte aérea, se observó que todas las dosis de boro estudiadas fueron beneficiosas (Tabla 1): el mayor aumento frente al control T1 (en un 31,5%) correspondió a T3. Por otro lado, el tratamiento con boro parece que tuvo un efecto perjudicial sobre el peso seco de parte radicular, ya que se observó una reducción en todos los casos (aunque no fue significativa desde el punto de vista estadístico), más marcada para la dosis más alta (T5).

Tabla 1. Primer recuento de germinación (FGC), prueba de germinación (GT), envejecimiento acelerado (AA), emergencia de campo (FE), índice de velocidad de emergencia (ESI), longitud de la parte aérea (SL), longitud radicular (RL), peso seco de la parte aérea (SDW), peso seco radicular (RDW) y contenido de humedad (MC) de las semillas de algodón recubiertas con un material compuesto (que consta de diferentes dosis de boro, un fungicida, un insecticida y un polímero) antes del almacenamiento. Todos los valores son un promedio de cuatro repeticiones.

Tratamiento	FGC^{ns}	GT^{ns}	AA^{ns}	FE^{ns}	ESI^{ns}	SL	RL	SDW	RDW^{ns}	MC
			(%)			(cm)		(mg)		%
T0	79	88	77	89	18,2	5,0	11,1	380,1	81,7	9,5
T1	83	90	78	90	18,9	5,2	11,8	472,9	77,9	9,6
T2	81	90	78	91	18,0	*5,7	*11,8	*511,0 $^{\beta}$	78,3	10
T3	83	91	79	91	17,4	5,0	11,3	*621,0 $^{\beta}$	68,5	9,6
T4	83	91	78	89	17,8	4,8	10,7$^{\beta}$	*604,4 $^{\beta}$	70,1	9,8
T5	85	92	79	87	16,4	*4,1$^{\beta}$	*10,2$^{\beta}$	*607,7 $^{\beta}$	66,9	10,0
CV (%)	3,19	3,33	2,21	3,61	7,32	4,75	1,97	9,34	11,02	-

Los valores medios precedidos por '*' y seguidos por 'β' difieren de los tratamientos T0 y T1, respectivamente, de acuerdo con la prueba de Dunnett (p≤0,05). *ns* indica variables que no son significativas a la probabilidad *F* (p≤0,05).

3.2. Efectos tras almacenaje

Con respecto a los datos de germinación, resumidos en la Tabla 2, no se encontraron diferencias significativas entre las diversas dosis probadas en términos de la prueba de germinación, el primer recuento de germinación, el envejecimiento acelerado y las pruebas de emergencia en el campo. Se pudo observar una leve mejoría para todas las muestras tratadas, como en la sección anterior, pero sólo fue significativa desde un punto de vista estadístico para T4 frente a T0 (no frente a T1) en la prueba de emergencia de campo, con un aumento del 16,6%. Por otro lado, se observó una diferencia significativa entre T5 y T1 para la prueba de envejecimiento acelerado: para la dosis más alta de boro (0,3 mL de boro·kg^{-1} semilla), la germinación fue un 15% más baja que la del control T1. A efectos comparativos, dos Santos, *et al.* [16] no encontraron diferencias significativas en el envejecimiento acelerado de semillas de marandú (*Brachiaria brizantha* (A.Rich.) Stapf) con recubrimiento.

En relación con el índice de velocidad de emergencia, nuevamente no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos y los controles. No obstante, es preciso señalar que los tratamientos T2, T3 y T4 aumentaron la velocidad de emergencia en un 14%, un 16% y un 25%, respectivamente, en comparación con T0 (semilla desnuda). Por otro lado, los tratamientos T2, T3 y T5 redujeron el ESI en un 4,5%, 2,5% y 18%, respectivamente, en comparación con el control T1.

Cuando se analizó la longitud de la parte aérea (Tabla 2), se evidenciaron diferencias significativas entre el tratamiento con T3 y el control T0 (aumento del 17,2%) y entre los tratamientos con T3 y T4 en comparación con el control con T1 (la dosis de 0,1 mL de boro·kg^{-1} aumentó la longitud de la parte aérea de las plántulas en un 21,6% y la dosis de 0,20 mL de boro·kg^{-1} condujo a un aumento del 9,6%).

Con respecto a la longitud radicular, todas las dosis de boro tuvieron un impacto positivo, excepto la dosis más alta (0,3 mL de boro·kg^{-1} semillas): los tratamientos con T2 y T3 aumentaron el valor medio de la longitud radicular (en comparación con T0 y T1), mientras que la longitud radicular para T4 fue muy similar a la de T1 y superior a la del control T0. Por el contrario, el tratamiento T5 disminuyó la longitud radicular en un 10,6% en comparación con el control T1. A efectos comparativos, Ohse, *et al.* [17] encontraron una disminución del 1,2% en la longitud

radicular de las plántulas cuando se aplicó una dosis de 0,065 g de $H_3BO_3 \cdot kg^{-1}$ a semillas de arroz, acompañada por un aumento del 3,7% en la longitud de la parte aérea.

Con respecto a la variable de peso seco de la parte aérea, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes tratamientos con boro y el control T1, aunque todos los tratamientos (incluido el control T1) condujeron a valores más bajos que los del control T0. En relación con el peso seco radicular, todos los tratamientos con boro tuvieron un impacto negativo en comparación con los controles T0 y T1 (que sólo fue estadísticamente significativo frente a T1, excepto para T5, para el que también se encontró una diferencia significativa frente al control T0). La dosis de 0,3 mL de boro·kg^{-1} dio como resultado una disminución del peso seco radicular de un 23,1% en comparación con el control T1. Esto contrasta con los resultados de Ohse, *et al.* [17], que también informaron de una disminución en el peso seco de la parte aérea, pero encontró un aumento del 11,7% en el peso seco radicular (para la dosis única de boro probada en semillas de arroz).

Tabla 2. Primer recuento de germinación (FGC), prueba de germinación (GT), envejecimiento acelerado (AA), emergencia de campo (FE), índice de velocidad de emergencia (ESI), longitud de la parte aérea (SL), longitud radicular (RL), peso seco de la parte aérea (SDW) , peso seco radicular (RDW) y contenido de humedad (MC) de las semillas de algodón recubiertas con un material compuesto (que consta en diferentes dosis de boro, un fungicida, un insecticida y un polímero) después de 120 días de almacenamiento en condiciones no controladas. Todos los valores son un promedio de cuatro repeticiones.

Tratamiento	FCG^{ns}	GT^{ns}	AA^{ns}	FE^{ns}	ESI^{ns}	SL	RL	SDW	RDW	MC
	(%)					(cm)		(mg)		%
T0	87	87	64	78	8,2	2,9	8,7	443,6	60,3	9,6
T1	90	90	74	84	12	2,8	9,0	429,5	62,8	10,2
T2	90	90	69	83	10,7	2,9	9,2	415,2	53,0 $^{\beta}$	10,1
T3	91	91	67	88	11,1	*3,4 $^{\beta}$	9,5	433,1	53,0 $^{\beta}$	10,4
T4	90	90	70	*91	12,7	3,0 $^{\beta}$	8,9	408,2	52,7 $^{\beta}$	10,1
T5	90	90	63 $^{\beta}$	83	8,2	2,9	8,1 $^{\beta}$	428,2	*48,3 $^{\beta}$	10,4
CV (%)	4,15	4,15	6,23	5,9	14,43	3,52	6,12	4,33	7,44	

Los valores medios precedidos por '*' y seguidos por 'β' difieren de los tratamientos T0 y T1, respectivamente, de acuerdo con la prueba de Dunnett (p≤0,05). *ns* indica variables que no son significativas a la probabilidad *F* (p≤0,05).

A partir de los datos sobre el contenido de humedad de las semillas en el análisis inicial (Tabla 1) y después de su almacenamiento durante cuatro meses en un entorno no controlado (Tabla 2), se pudo inferir que el contenido de humedad de las semillas durante el período de almacenamiento no se vio afectado por el recubrimiento de las semillas y la aplicación de boro. Al inicio del almacenamiento, el contenido de humedad de las semillas oscilaba entre el 9,5 y el 10,0%. Después de su almacenaje durante cuatro meses, el contenido de humedad para los diferentes tratamientos aumentó en un 1% y en un 4% para los valores que presentaron el contenido de humedad más alto y más bajo antes del almacenamiento, respectivamente, mostrando la tendencia habitual de las semillas almacenadas en condiciones no controladas a buscar el equilibrio higroscópico con la humedad relativa del ambiente que los rodea a través de un proceso de intercambio dinámico de humedad [5]. La presencia del polímero en el recubrimiento de semillas puede considerarse como una protección que evitaría cambios bruscos en la absorción de agua de las semillas durante períodos de alta humedad del aire y baja temperatura.

Con respecto al impacto del almacenamiento en la evolución de los otros parámetros, fue similar para las semillas no tratadas y recubiertas para FGC (que aumentó aproximadamente un

7% en todos los casos), GT (que se mantuvo casi constante) y AA (que disminuyó en cerca del 10% en todos los casos). La disminución en la FE fue menos marcada para las muestras tratadas que para las semillas no tratadas (y para T4, por ejemplo, se produjo un aumento), y lo mismo es aplicable al ESI para los tratamientos T1-T4. Por otro lado, mientras que la disminución en los parámetros SL y RL fue similar para las semillas no tratadas y tratadas, sí se observaron diferencias para los parámetros SDW y RDW: la notable mejora en SDW para las semillas tratadas no se repitió después del almacenaje (los valores fueron similares en todos los casos y más altos que el valor inicial para T0 antes del almacenamiento), y la reducción en RDW fue más evidente después del almacenamiento.

De los datos presentados anteriormente, se puede inferir que el recubrimiento con el material compuesto que consta de boro + fungicida + insecticida + polímero no afectó negativamente a la calidad fisiológica de la semilla, ni antes ni después del almacenamiento. Por el contrario, los resultados para los parámetros analizados mostraron que, en términos generales, hubo una tendencia de las semillas recubiertas a comportarse mejor que las semillas no tratadas (excepto para T5, como se explicará más adelante).

Con respecto a la influencia del boro en calidad de micronutriente sobre la calidad fisiológica de las semillas, existe cierta controversia en la literatura, ya que se han informado efectos dispares para diferentes cultivos: Kappes, *et al.* [18] y Leite [19] concluyeron que la calidad foliar de las semillas de soja y de arroz, respectivamente, no se veía influenciada por la aplicación foliar de boro a las semillas. Asimismo, Wazilewski, *et al.* [20], trabajando con semillas de girasol, no encontró un aumento significativo en la producción de peso fresco y seco; y Bonacin, *et al.* [21] también indicaron que las características morfológicas y fisiológicas de las semillas de girasol no se vieron afectadas por las dosis de boro. Por otro lado, Farinelli, *et al.* [22] encontraron aumentos en el vigor de las semillas de alubia con fertilización con boro y calcio; Farooq, *et al.* [23] concluyeron que el recubrimiento de semillas de arroz con boro mejoró la energía de germinación, el índice de germinación y el porcentaje de germinación final de las semillas; y Rehman, *et al.* [24] informaron de que el boro mejoró las relaciones hídricas, la fertilidad de la panícula, el rendimiento del grano y la biofortificación del arroz aromático de grano fino. Por el contrario, de Oliveira, *et al.* [25] y Shabaz, *et al.* [26] observaron que el boro tuvo una influencia negativa en la germinación y el vigor en semillas de ricino y semillas de maíz, respectivamente.

También resulta llamativo que, trabajando con semillas de trigo, Ashagre, *et al.* [27] encontraron que el porcentaje y la tasa de germinación, la longitud de la parte aérea y radicular, los pesos frescos y secos de la parte aérea y radicular, el número de raíces, la proporción raíz-tallo y el índice de vigor de las plántulas disminuyeron para dosis de boro superiores a 0,25 mg/L, en línea con los hallazgos de este estudio, en el que la dosis más alta (0,3 mL de boro·kg^{-1} semillas) también fue perjudicial en algunos casos, reduciendo el vigor. En el artículo de revisión de Farooq, *et al.* [28], también se hace hincapié en la importancia crucial de la concentración de boro: los experimentos sobre el cebado de semillas en soluciones de ácido bórico tuvieron efectos estimulantes y supresores de la germinación en varios cultivos (incluyendo nabo, girasol, soja, remolacha azucarera, alfalfa, arroz, trigo y cebada). Las semillas cebadas en las soluciones de boro más concentradas no pudieron emerger, mientras que las cebadas en soluciones de boro más diluidas mejoraron el establecimiento del rodal.

En lo que respecta al efecto de *composites* análogos (micronutrientes + fungicidas + insecticidas + polímeros) sobre la calidad de las semillas en la literatura, no hay datos reales sobre *composites* con boro (hasta donde sabemos), pero se han encontrado efectos dispares para *composites* con zinc. Por ejemplo, Vieira, *et al.* [29], trabajando con semillas de arroz recubiertas con zinc, no encontraron diferencias significativas en la germinación de las semillas. Resultados similares han sido informados por Funguetto [30] para semillas de arroz recubiertas con zinc, un fungicida y un polímero, o por Lemes, *et al.* [31], para semillas de trigo recubiertas con zinc, un fungicida y un polímero. Por otro lado, de Tunes, *et al.* [32] y Araujo Rufino, *et al.* [33] observaron

un impacto positivo de tratamientos análogos en semillas de trigo, y también lo hicieron Arjmand, *et al.* [34] para semillas de cebada y Schwerz, *et al.* [35] para semillas de avena blanca. Por el contrario, Yagi, *et al.* [36] encontraron una reducción en el porcentaje de germinación para semillas de sorgo tratadas con zinc. Las diferencias entre los resultados descritos anteriormente podrían explicarse por las diferencias entre los cultivos en términos de eficiencia de uso de los nutrientes [31].

En relación con las posibles interferencias de la matriz polimérica sobre la eficiencia de los productos insecticidas y fungicidas, Pereira, *et al.* [37] encontraron que los polímeros comerciales ensayados como parte del recubrimiento de semillas de soja (AGL 205 y AGL 202, INCOTEC Group BV, Países Bajos) mejoraban la adherencia de los fungicidas, sin modificar su efecto. Además, los recubrimientos con polímeros no tuvieron efectos significativos sobre la germinación y el vigor de semillas de soja [37] y de algodón [38]. Estos resultados concuerdan también con los de da Conceição, *et al.* [39] y Silva, *et al.* [40], que observaron que distintas composiciones y espesores de recubrimientos a base de alcohol polivinílico en semillas de maíz y semillas de lechuga, respectivamente, no afectaron al primer recuento de germinación ni al índice de velocidad de emergencia de las semillas de manera significativa.

Finalmente, respecto al efecto del almacenamiento en semillas recubiertas, Pereira, *et al.* [41] también informaron que las semillas de maíz con una alta calidad fisiológica inicial, tratadas con un insecticida, un fungicida y un polímero, se almacenaron durante seis meses sin verse afectada su calidad. Por su parte, Kunkur, *et al.* [42] informaron de que el tratamiento de semillas de algodón con un fungicida, un insecticida y un polímero mejoró el porcentaje de germinación después de nueve meses de almacenamiento (lo que concuerda con nuestras observaciones).

Conclusiones

El recubrimiento de las semillas del cultivar de algodón BRS 286 con un *composite* con una fuente de boro, un fungicida, un insecticida y un polímero no produjo diferencias significativas en la calidad fisiológica de las semillas, ni antes ni después de su almacenamiento durante cuatro meses. Por el contrario, las semillas recubiertas tendieron a comportarse mejor que las semillas no tratadas. La adición de boro al *composite* de revestimiento (en concentraciones que oscilaron entre 0,05 y 0,3 mL de boro·kg^{-1} de semillas) no tuvieron un efecto inmediato en la germinación, el vigor y la aparición de semillas, pero sí tuvieron un impacto beneficioso en el peso seco de la parte aérea antes del almacenaje (con un incremento de hasta el 31,5%). Las dosis más bajas también condujeron a un aumento de las longitudes de las partes aérea y radicular, tanto antes como después del almacenaje. Se encontró que la dosis de boro más alta (0,30 mL·kg^{-1} de semillas) era perjudicial para el vigor de la semilla, aunque no se observaron síntomas visuales de toxicidad. El recubrimiento no afectó a la actividad del insecticida ni a la del fungicida, incluso después de cuatro meses de almacenamiento.

Referencias

1. USDA. Cotton & Wool. http://www.ers.usda.gov/topics/crops/cotton-wool/
2. CONAB. *Acompanhamento da safra brasileira: grãos (V.2 - Safra 2014/15, N.12 - Décimo segundo levantamento, Setembro/2015)*; Companhia Nacional de Abastimento: Brazil, 2015; p 139.
3. Gupta, U.C. *Boron and its role in crop production*. CRC Press: Boca Raton, Fla., 1993; p 237 p.
4. Fontes, R.L.; Medeiros, J.F.; Neves, J.C.; Carvalho, O.S.; Medeiros, J.C. Growth of Brazilian cotton cultivars in response to soil applied boron. *J. Plant Nutr.* **2008**, *31*, 902-918.
5. Baudet, L.; Villela, F.A. Armazenamento de sementes. In *Sementes: fundamentos científicos e Tecnológicos*, 2nd ed.; Peske, S.T.; Lucca Filho, O.A.; Barros, A.C.S.A., Eds. UFPel: Pelotas, Brazil, 2006; pp 427-472.
6. Menezes, N.L.; Villela, F.A. O Potencial de armazenamento de cada semente. *SEED News* **2009**, *13*, 22-25.

7. Funguetto, C.I.; Pinto, J.F.; Baudet, L.; Peske, S.T. Desempenho de sementes de arroz irrigado recobertas com zinco. *Revista Brasileira de Sementes* **2010**, *32*, 117-123.
8. Nunes, J.C. Tratamento de semente-qualidade e fatores que podem afetar a sua performance em laboratório. *Londrina: Syngenta Proteção de Cultivos Ltda* **2005**.
9. Brasil Mapa/ACS. *Regras para análise de sementes*. Brasil - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária: Brasília, Brasil, 2009; p 399.
10. Baalbaki, R. Seed vigor testing handbook. **2009**.
11. Marcos Filho, J. Teste de envelhecimento acelerado. In *Vigor de sementes: conceitos e testes*, Krzyzanowski, F.C.; Vieira, R.D.; França-Neto, J.B., Eds. ABRATES: Londrina, Brazil, 1999; pp 1-24.
12. Nakagawa, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. In *Vigor de sementes: conceitos e testes*, Krzyzanowski, F.; Vieira, R.; França Netro, J., Eds. ABRATES: Londrina, brazil, 1999; pp 1-24.
13. Streck, E.V.; Kämpf, N.; Dalmolin, R.S.D.; Klamt, E.; Nascimento, P.d.; Schneider, P.; Giasson, E.; Pinto, L. *Solos do Rio Grande do Sul*. UFRGS, Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia: Porto Alegre, Brazil, 2008; p 222.
14. Maguire, J.D. Speed of germination—aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Sci.* **1962**, *2*, 176-177.
15. Nakagawa, J.; Vieira, R.D.; de Carvalho, N.M. Testes de vigor baseados na avaliação das plântulas. *Testes de vigor em sementes. Jaboticabal: FUNEP* **1994**, 49-85.
16. dos Santos, L.D.C.; Benett, C.G.S.; Silva, K.S.; da Silva, L.V. Germinação de diferentes tipos de sementes de Brachiaria brizantha cv. BRS Piatã. *Bioscience Journal* **2011**, *27*.
17. Ohse, S.; Marodim, V.; Dos Santos, O.S.; Lopes, S.J.; Manfron, P.A. Germinação e vigor de sementes de arroz irrigado tratadas com zinco, boro e cobre. *Revista da FZVA* **2001**, *7/8*, 41-50.
18. Kappes, C.; Golo, A.L.; de Carvalho, M.A.C. Doses e épocas de aplicação foliar de boro nas características agronômicas e na qualidade de sementes de soja. *Scientia agraria* **2008**, *9*, 291-297.
19. Leite, R.F.C. Rendimento e qualidade de sementes de arroz irrigado em função da adubação com boro. *Revista Brasileira de Sementes* **2011**, *133*, 785-791.
20. Wazilewski, W.T.; Gomes, L.F.S. Boro aplicado via semente em girassol. *Cultivando o Saber* **2009**, *2*, 137-142.
21. Bonacin, G.A.; Rodrigues, T.d.J.; Cruz, M.; Banzatto, D.A. Características morfofisiológicas de sementes e produção de girassol em função de boro no solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **2008**, *13*, 111-116.
22. Farinelli, R.; Penariol, F.G.; de Souza, F.S.; Piedade, A.R.; Lemos, L.B. Características agronômicas e qualidade fisiológica de sementes de cultivares de feijão adubados via foliar com cálcio e boro. *Cientifica* **2008**, *34*, 59-65.
23. Farooq, M.; Nawaz, A.; Iqbal, S.; Rehman, A. Optimizing the Boron Seed Coating Treatments for Improving the Germination and Early Seedling Growth of Fine Grain Rice. *International Journal of Agriculture & Biology* **2012**, *14*.
24. Rehman, A.-u.; Farooq, M. Boron application through seed coating improves the water relations, panicle fertility, kernel yield, and biofortification of fine grain aromatic rice. *Acta physiologiae plantarum* **2013**, *35*, 411-418.
25. de Oliveira, J.P.M.; Bueno Scivittaro, W.; Vargas Castilhos, R.M.; Oliveira Filho, L.C.I. Adubação fosfatada para cultivares de mamoneira no Rio Grande do Sul. *Ciência Rural* **2010**, *40*, 1835-1839.
26. Shabaz, M.K.; Ali, H.; Sajjad, M. Effect of Seed Coating with Boron and Zinc of Zea mays for Various Yield Traits. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci* **2015**, *15*, 1304-1311.
27. Ashagre, H.; Hamza, I.A.; Fita, U.; Nedesa, W. Influence of boron on seed germination and seedling growth of wheat (Triticum aestivum L.). *African Journal of Plant Science* **2014**, *8*, 133-139.
28. Farooq, M.; Wahid, A.; Siddique, K.H.M. Micronutrient application through seed treatments: a review. *Journal of soil science and plant nutrition* **2012**, *12*, 125-142.
29. Vieira, E.H.N.; Moreira, G.A. Peletização de sementes de arroz. In *Comunicado Técnico*, Embrapa Arroz e Feijão: Santo Antônio de Goiás, Brazil, 2005; Vol. 111, p 2.
30. Funguetto, C.I. Recobrimento de sementes de arroz irrigado com zinco e polímero. *Norte Científico* **2011**, *2*, 80-92.

31. Lemes, E.S.; Tunes, L.M.d.; Almeida, A.d.S.; Meneghello, G.E.; Oliveira, S.d.; Muniz, M.F.B. Response of wheat seeds to zinc application during storage. *Ciencia e investigación agraria* **2015**, *42*, 21-22.
32. de Tunes, L.M.; Rodrigues, D.B.; Gadotti, G.I.; da Silva Almeida, A.; Gewehr, E.; Radke, A.K. Health and quality of zinc coated wheat seeds during storage. *Bioscience Journal* **2016**, *32*.
33. Araujo Rufino, C.; Tavares, L.C.; Brunes, A.P.; Lemes, E.S.; Villela, F.A. Treatment of wheat seed with zinc, fungicide, and polymer: seed quality and yield. *Journal of Seed Science* **2013**, *35*, 106-112.
34. Arjmand, H.S.; Abarghooei, G.H.B.; Ghorbanpour, M.; Sharafi, S. Effect of zinc coated during storage on the seed quality of barley. *International Journal of Farming and Allied Science* **2014**, *3*, 845-850.
35. Schwerz, F.; Caron, B.O.; Kulczynsnki, S.M.; Elli, E.F.; Oliveira, D.M.d.; Szareski, V. Physiological performance of white oat seeds coated with zinc. *Cientifica* **2015**, *43*, 341.
36. Yagi, R.; Simili, F.F.; Araújo, J.C.d.; Prado, R.d.M.; Sanchez, S.V.; Ribeiro, C.E.R.; Barretto, V.C.d.M. Aplicação de zinco via sementes e seu efeito na germinação, nutrição e desenvolvimento inicial do sorgo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **2006**, *41*, 655-660.
37. Pereira, C.E.; Oliveira, J.A.; Evangelista, J.R.E.; Botelho, F.J.E.; Oliveira, G.E.; Trentini, P. Desempenho de sementes de soja tratadas com fungicidas e peliculizadas durante o armazenamento. *Ciência e Agrotecnologia* **2007**, *31*, 656-665.
38. de Lima, L.B.; da Silva, P.A.; Guimarães, R.M.; Oliveira, J.A. Peliculização e tratamento químico de sementes de algodoeiro (Gossypium hirsutum L.). *Ciênc. agrotec.* **2006**, *30*.
39. da Conceição, P.M.; Duarte Vieira, H. Qualidade fisiológica e resistência do recobrimento de sementes de milho. *Revista Brasileira de Sementes* **2008**, *30*, 048-053.
40. Silva, J.B.C.; Santos, P.E.; Nascimento, W.M. Desempenho de sementes peletizadas de alface em função do material cimentante e da temperatura de secagem dos péletes. *Horticultura brasileira* **2002**, *20*, 67-70.
41. Pereira, C.; Oliveira, J.A.; Evangelista, J.R.E. Qualidade fisiológica de sementes de milho tratadas associadas a polímeros durante o armazenamento. *Ciência e Agrotecnologia* **2005**, *29*, 1201-1208.
42. Kunkur, V.; Hunje, R.; BiradarPatil, N.; Vyakarnahal, B. Effect of seed coating with polymer, fungicide and insecticide on seed quality in cotton during storage. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences* **2010**, *20*.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

El sistema APPCC como herramienta para reducir el riesgo de aparición de *Listeria monocytogenes* en vegetales congelados

I. García Panadero[1], M. Álvarez-Ortí[1], A. Rabadán[1], J.E. Pardo[1]

[1] E.T.S.I. Agrónomos y de Montes (UCLM), Campus Universitario s/n, 02071-Albacete (España); manuel.alvarez@uclm.es

Resumen: La bacteria *Listeria monocytogenes* es actualmente la principal causa de muertes debida a enfermedades transmitidas por alimentos. Puede afectar en gran medida a las industrias de vegetales congelados, puesto que los alimentos no están sometidos a tratamientos térmicos diseñados para eliminarla del producto final. Para evaluar la incidencia de *Listeria* en una industria de vegetales congelados, se ha realizado un control microbiológico de superficies, en contacto o no con los alimentos, previo y posterior a la aplicación de una serie de medidas preventivas que se incluyeron en su sistema APPCC. En el análisis microbiológico previo no se detectó la presencia de *L. monocytogenes*, pero si aparecieron otra serie de bacterias en la mayor parte de las superficies muestreadas. La disminución en la carga microbiana en la mayoría de estas superficies después de implantar las medidas preventivas, demuestran su eficacia en la lucha contra la contaminación microbiológica. Las medidas preventivas implantadas consistieron básicamente en la compra de materias primas a proveedores de bajo riesgo, la modificación del plan de limpieza y desinfección para evitar salpicaduras, incluyendo formación al personal, y cambios en los flujos de personal para evitar que pasen de una zona sucia a una limpia.

Palabras clave: medidas preventivas; plan de higiene; inocuidad de alimentos

1. Introducción

El consumo de vegetales está ampliamente recomendado para reducir la incidencia de muchas enfermedades cardiovasculares o ciertos tipos de cáncer [1,2]. Para poder disponer de vegetales durante cualquier época del año, se puede recurrir a la tecnología de la congelación, que además permite un mejor uso al incrementar la vida útil de éstos [3], contribuyendo a reducir el desperdicio estimado del 25 % del total de los alimentos suministrados a nivel de consumidor, que se produce debido al carácter perecedero de los mismos [4,5]. A pesar de que la congelación de vegetales es una tecnología que permite mantener la mayor parte de los nutrientes de los vegetales, puede presentar una serie de riesgos microbiológicos para el consumidor, puesto que en este proceso los alimentos no se someten a tratamientos térmicos de conservación diseñados para la eliminación de la carga microbiana. En este punto, cobra especial importancia la aparición de la bacteria *Listeria monocytogenes*, causante de la enfermedad conocida como listeriosis.

La listeriosis presenta síntomas similares a la gripe u otras enfermedades transmitidas por alimentos, como diarreas o fiebre que en muchos casos no suele ser diagnosticada, pero en ciertos grupos de riesgo como personas ancianas, inmunodeprimidas o mujeres embarazadas puede llegar a ser una enfermedad grave y producir septicemias o meningitis, presentando una ratio de

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3357

mortalidad del 30 % [6]. Aunque las medidas de control, que se empezaron a implantar en las industrias alimentarias a partir de la década de los 90, y las mejoras de las condiciones higiénicas actuales han reducido la prevalencia de *L. monocytogenes* en muchas categorías de alimentos, esta bacteria todavía sigue siendo una causa importante de enfermedad transmitida por alimentos [7]. En 2013, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) reportó la presencia de 1763 casos de listeriosis confirmada en humanos, en 27 estados miembros de la UE, lo que supone una incidencia de 0,44 casos por cada 100.000 habitantes [8]. Estos datos suponen que la listeriosis ocupa el quinto lugar en cuanto a enfermedades de transmisión alimentaria. La mayor parte de estos casos requirieron hospitalización (99,1 %), reportándose un total de 191 fallecimientos, lo que convierte a la listeriosis en la enfermedad de transmisión alimentaria que más muertes provoca en la UE. Recientemente ha surgido un brote de *Listeria* en Austria, Dinamarca, Finlandia, Suecia y Reino Unido, debido al consumo de vegetales congelados provenientes de una planta de congelados de vegetales de Hungría [9], con 47 personas afectadas, entre los cuales se produjeron 9 fallecimientos, y que ha provocado el cese de actividad de dicha planta.

L. monocytogenes se suele encontrar presente en una gran variedad de hábitats relacionados con las industrias alimentarias. Puede encontrarse ampliamente en el suelo, en los vegetales, o en muestras superficiales de agua, así como en instalaciones dedicadas a la actividad agrícola y ganadera [7,10]. Una vez que coloniza las instalaciones de la industria, lo que se produce por vía ambiental, en la suela de los zapatos de los trabajadores, o bien por medio de materias primas contaminadas, es una bacteria muy difícil de combatir. Presenta una elevada capacidad para la formación de biofilms mono o multiespecíficos, lo que le confiere resistencia a muchos tratamientos desinfectantes [11], y la consiguiente capacidad de colonizar distintas superficies dentro de la industria [12], donde puede persistir durante años. Por lo tanto, la necesidad de encontrar un método de control eficaz, que reduzca el riesgo de aparición de *Listeria* en los alimentos, es un reto al que se enfrentan la mayor parte de las industrias alimentarias en la actualidad. Esta necesidad es mayor en aquellas que ofrecen productos que no están sometidos a tratamientos térmicos, que se consumen frescos o con un mínimo procesado.

El sistema de Análisis de Peligros y Puntos de Control Crítico (APPCC) es una herramienta de gestión de la seguridad de los alimentos, de obligado cumplimiento para todas las industrias del sector agroalimentario [13]. Se trata de aplicar una serie de medidas con un enfoque preventivo, mediante las que se identifican, evalúan y controlan los posibles peligros que pueden aparecer en los alimentos. Es un sistema dinámico que permite hacer frente a la aparición de organismos patógenos emergentes y toxiinfecciones alimentarias derivados de los nuevos hábitos de consumo, basado en la aplicación de una serie de principios, mediante los que se consigue un control más detallado y metódico de las diferentes etapas del proceso de producción. De esta manera se garantiza la inocuidad de los alimentos producidos, y se da una respuesta más rápida a las posibles eventualidades surgidas, convirtiéndose en el método más ampliamente aceptado y considerado como la mejor manera de proteger a los consumidores de daños transmitidos por los alimentos [14].

El objetivo de este trabajo es proponer las medidas higiénico sanitarias necesarias para minimizar el riesgo de aparición de *L. monocytogenes* en el producto final de una industria dedicada a la elaboración de vegetales congelados, de tal forma que pueda adaptarse su sistema APPCC teniendo en cuenta el control específico de esta bacteria. Para ello es necesario realizar un estudio detallado del diagrama de flujo de la industria, mediante el que se detecten aquellas operaciones donde existe riesgo de contaminación con *Listeria*. El diagrama de flujo, junto con la observación directa en las instalaciones de la fábrica, aportará información sobre las superficies, en contacto con los alimentos o no, que son susceptibles de contaminación y que pueden originar una contaminación cruzada del producto final. En estas superficies se realizará un muestreo microbiológico para detectar la presencia de *Listeria*, y se estudiarán las medidas necesarias para evitar su entrada en la industria.

2. Materiales y métodos

2.1. Características de la industria

El presente trabajo se ha realizado en las instalaciones de la industria Ultracongelados Campo Verde S.L., situada en la calle Autovía, nº 72 del Polígono Industrial Campollano, al Norte de la ciudad de Albacete. Aunque la industria se encuentra en un entorno urbano, está cerca de otras industrias agroalimentarias. Es especialmente destacable reseñar que se encuentra lindando con una empresa de semillas, que atrae animales como roedores o pájaros, que pueden ser vectores de una posible contaminación microbiológica.

La industria se dedica al congelado de una amplia gama de vegetales, entre los que se incluyen: Aceituna, apio, alcachofa, berenjena, brócoli, calabacín, calabaza, cebolla, coliflor, guisante, hinojo, maíz, pepino, pimiento, puerro, romanesco, tomate.

La industria dispone de una zona de recepción de materias primas al aire libre, donde se pueden realizar las primeras operaciones de limpieza, aislada de la nave de acondicionamiento en la que se realizan las operaciones en las que se preparan las materias primas para el congelado. En esta se realiza también la operación de escaldado, con agua caliente. Los túneles de congelado separan esta nave de la zona de selección y envasado del producto congelado. La industria además cuenta con otra nave de reenvasado, así como de cámaras de almacenamiento del producto congelado.

2.2. Diseño experimental

Para la detección de *L. monocytogenes* en las instalaciones de la industria, se realizó un muestreo de superficies, teniendo en cuenta tanto aquellas superficies que pueden estar en contacto con los alimentos, como las que no, que pueden servir de reservorio a la *Listeria* y provocar la contaminación cruzada en cualquier momento. Por lo tanto, en primer lugar, se realizó un estudio *in situ* detallado del diagrama de flujo del proceso, con el objeto de localizar todas aquellas superficies más propensas de poder producir la contaminación de los alimentos con Listeria, que quedan reflejadas en la tabla 1.

Tabla 1. Superficies muestreadas para el análisis microbiológico

ZONA	Superficie muestreada
ZONA 1. DESPERDICIOS	Z.1.1. Cinta transportadora de destrío Z.1.2. Zona de paso con charco
ZONA 2. RECEPCIÓN	Z.2.1. Guantes de personal de selección Z.2.2. Cinta de selección Z.2.3. Alcantarilla de la zona de recepción
ZONA 3. ACONDICIONAMIENTO	Z.3.1. Cinta de desgranado Z.3.2. Cinta de selección de acondicionamiento Z.3.3. Alcantarilla de acondicionamiento Z.3.4. Lavadora
ZONA 4. ESCALDADO Y CONGELADO	Z.4.1. Escaldador Z.4.2. Cinta del escaldador Z.4.3. Alcantarilla del escaldador Z.4.4. Cinta del túnel de congelado Z.4.5. Suelo del túnel de congelado Z.4.6. Alcantarilla del túnel de congelado Z.4.7. Cinta de salida del túnel Z.4.8. Cinta del selector artificial

En estas superficies se realizó un muestreo previamente a la adopción de medidas preventivas del APPCC. Para ello, se empleó un hisopo Path-Check Higiene, mediante el que se muestreó un área de 10x10 cm. Posteriormente se transfirió al caldo de detección de patógenos y se observó si se producía el cambio de color tras una incubación a 25ºC durante 24-48 h (negro indica positivo, amarillo indica negativo). Para la confirmación de la presencia de *L. monocytogenes* se procedió a la siembra en placas con *Compass Listeria Agar*, donde las colonias de *L. monocytogenes* aparecen como colonias de color azul rodeadas de un halo blanco.

Una vez evaluado el resultado del análisis microbiológico, se diseñaron y aplicaron una serie de medidas preventivas para reducir la incidencia microbiológica en todas estas superficies, y se repitió el muestreo de la misma manera para evaluar la eficacia de estas medidas. Este segundo muestreo se realizó en dos momentos: antes de empezar la producción, lo cual permite evaluar la eficacia del plan de limpieza y desinfección, y después de la producción, para evaluar la posible contaminación de los alimentos durante el proceso.

De esta forma, se planificaron los muestreos microbiológicos de la siguiente manera:

- MUESTREO 1. Toma de muestras por la mañana antes de empezar la producción, sin ninguna medida preventiva.
- MUESTREO 2. Toma de muestras, por la mañana antes de empezar la producción tras la aplicación de medidas preventivas.
- MUESTREO 3. Toma de muestras, tras la toma de medidas preventivas, después de la fabricación de productos congelados.

2.3. Confirmación

A pesar de emplear medios de cultivo específicos para el crecimiento de *L. monocytogenes*, en ciertas ocasiones se puede apreciar el crecimiento de colonias que puede resultar dudosas, por lo que se procedió a identificar las bacterias presentes en las placas mediante la amplificación por PCR y posterior secuenciación del gen 16S rRNA [15]. Para ello, en primer lugar, se extrajo el ADN genómico de las colonias crecidas en las placas mediante el kit PureLink® Pro 96 Genomic DNA Purification Kit (Invitrogen, Carlsbad, CA). El ADN purificado se cuantificó mediante espectrofotometría y se evaluó su integridad mediante electroforesis en geles de agarosa al 1%.

Posteriormente se realizó la amplificación parcial del gen 16S rRNA mediante PCR, empleando los primers universales para bacterias 8F (AGAGTTTGATCCTGGCTCAG) y 1492R (GGTTACCTTGTTACGACTT). La PCR consistió en 30 ciclos con un primer paso de desnaturalización de 1 minuto a 95ºC, un paso de anillamiento de 1 minuto a 53ºC, y un paso final de extensión de 1 minuto a 72ºC. La PCR se completó con un paso inicial de desnaturalización de 10 minutos a 95ºC y un paso final de extensión a 72ºC de 7 minutos. El producto de PCR se visualizó en geles de agarosa al 2% y el fragmento resultante de la amplificación se purificó de los geles empleando el kit PureLinkTM Quick Gel Extraction and PCR Purification Combo Kit (Invitrogen, Carlsbad, CA). El fragmento de PCR purificado se envió para su secuenciación mediante el método Sanger (Macrogen Spain, Madrid).

3. Resultados y discusión

3.1. Diagrama de flujo

La elaboración del diagrama de flujo de la industria presenta la dificultad de la cantidad de materias primas que procesa, algunas de ellas pueden tener un procesado diferente, principalmente en las operaciones de acondicionamiento. En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo del proceso de congelación de todas estas materias primas. El estudio del diagrama de flujo, junto con el conocimiento del proceso y la observación en la propia industria, permite identificar aquellas superficies que son más susceptibles de ser colonizadas por *Listeria*, y que serán aquellas

que deben ser incluidas para la realización del control microbiológico mediante el que se monitorice la presencia de *L. monocytogenes* en la industria.

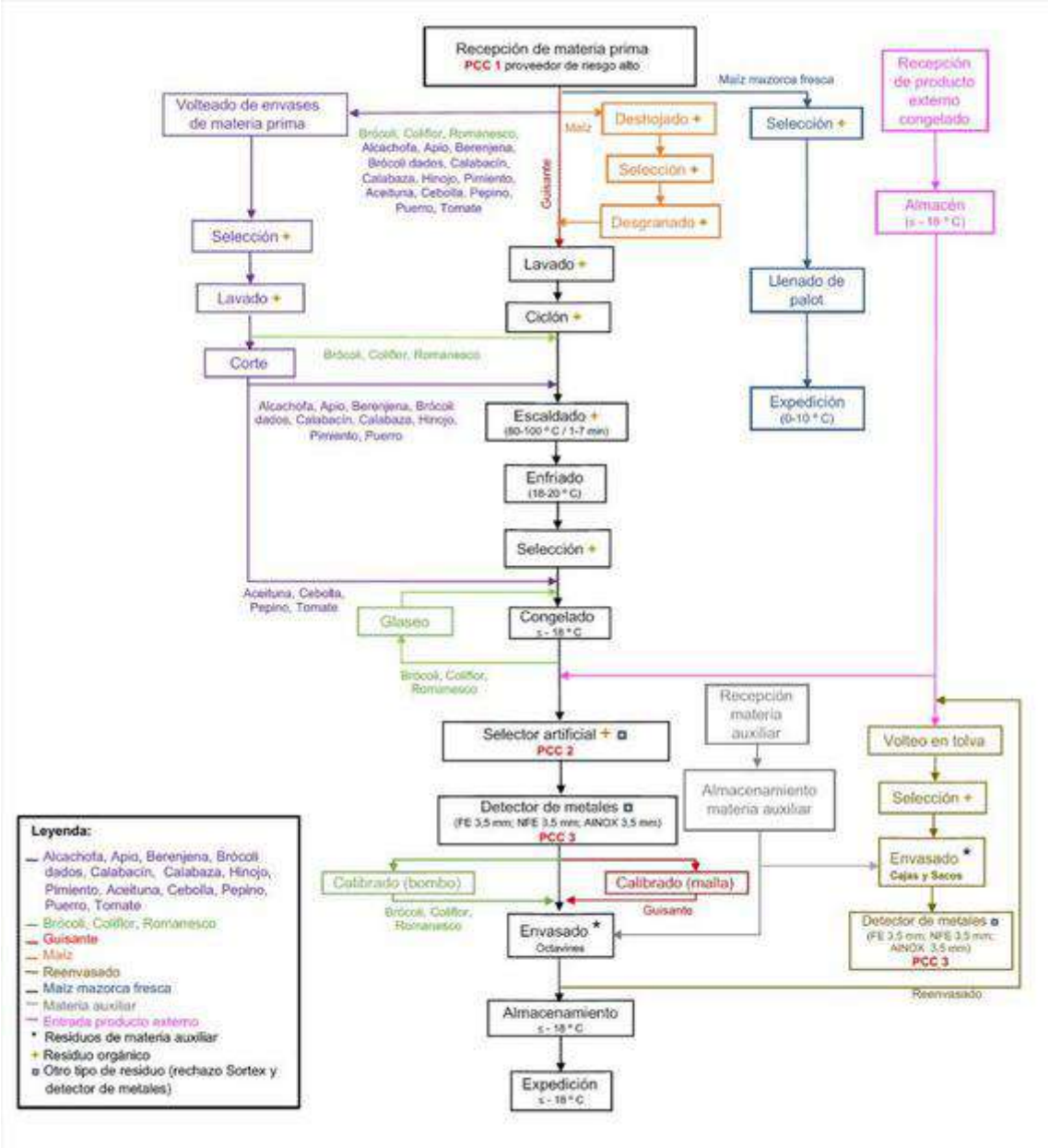


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de congelación de vegetales en la industria Ultracongelados Campo Verde S.L.

La recepción de las materias primas es una etapa fundamental para evitar la colonización de la fábrica por *Listeria*, puesto que la vía más probable de entrada es mediante materias primas que pueden estar contaminadas en el campo [16]. Esta etapa se considera punto de control crítico (PCC) cuando la materia prima llega de un proveedor considerado de alto riesgo, siendo éstos los que proporcionan materias primas sin ningún tipo de información, ni libro de campo, ni análisis de productos químicos, y que carecen de certificaciones tales como Global Gap. En este caso, la etapa de recepción debe ser monitorizada y controlada, teniendo en cuenta las acciones correctoras que deben considerarse en el caso de que se detecte alguna anomalía. Además, la recepción de muchos productos se produce al aire libre, con la posibilidad de la formación de

charcos, circunstancia que se agrava con la caída de material vegetal procedente de las tolvas de recepción. El agua se suele evacuar hacia alcantarillas, que también será necesario muestrear. Debe procurarse tomar las muestras de lugares poco accesibles o que presenten dificultades en su desinfección, de tal forma que se pueda asegurar que no están actuando como reservorio microbiológico.

El escaldado es otra operación importante, que permite inactivar microorganismos en su forma vegetativa, incluyendo los patógenos [17]. Sin embargo, el escaldado no es una operación diseñada para eliminar todos los peligros microbiológicos presentes en los alimentos. En el caso de *Listeria*, el tratamiento de escaldado correctamente aplicado puede ser suficiente de acuerdo con la resistencia térmica de *L. monocytogenes* [18], aunque es necesario considerar que no se debe someter a *Listeria* a temperaturas subletales, pues éstas pueden inducir resistencias al estrés térmico que pueden propiciar la proliferación y persistencia de *L. monocytogenes* en toda la zona del escaldador. Las temperaturas subletales pueden darse si el tratamiento no se hace correctamente, o cuando éste se realiza a temperaturas bajas. Por lo tanto, deberá controlarse que la temperatura y tiempo de tratamiento en el escaldador son adecuadas. En cualquier caso, será conveniente asegurarse que el producto sale del escaldador libre de *L. monocytogenes*, puesto que en el proceso de congelado no se va a realizar ninguna otra operación de esterilización o inactivación de microorganismos.

En las últimas etapas del proceso, el producto no se va a someter a ningún tipo de tratamiento térmico que pueda reducir su carga microbiana, así que es fundamental que en estas etapas no se produzca la contaminación microbiológica. La congelación se produce, en cualquier caso, a temperaturas inferiores a -30ºC, y a partir de esta etapa, el producto debe mantenerse a una temperatura de -18ºC por lo que, en general, el crecimiento microbiológico se ve ralentizado o detenido. Sin embargo, *L. monocytogenes* puede sobrevivir a estas temperaturas, e incluso proliferar, por lo que es fundamental asegurarse de que todas las instalaciones en esta última parte del proceso están libres de *L. monocytogenes*, de tal forma que no se produzca la contaminación cruzada de los vegetales congelados.

3.2. Muestreo microbiológico

Una vez estudiado el diagrama de flujo de la industria, se han identificado todas aquellas superficies susceptibles de contaminación microbiológica, para lo que se tuvieron en cuenta aquellos factores que pueden determinar una mayor proliferación de *Listeria* (lugares con mayor humedad, lugares de difícil acceso para la limpieza, lugares afectados por el paso del personal o materia de destrío, lugares de acumulación de producto, etc.). En este punto, debido a la persistencia y la capacidad de colonización de *L. monocytogenes*, se han tenido en cuenta, tanto las superficies en contacto directo con los alimentos, como las que no lo están, como alcantarillas y suelos de la fábrica donde se producen acumulaciones de humedad. Los resultados del análisis microbiológico de superficies previo a la implantación de medidas preventivas se muestran en la tabla 2.

No se detectó la presencia de *L. monocytogenes* en ninguna de las superficies muestreadas, que en las placas empleadas con *Compass Listeria Agar* deben aparecer formando colonias de color azul rodeadas de un halo blanco. Sin embargo, a pesar de que el sistema de detección empleado es específico para *L. monocytogenes*, en algunos casos puede apreciarse el crecimiento de otras colonias en las placas. Este crecimiento se produjo en la mayor parte de las superficies analizadas, indicando una alta presencia de microorganismos.

En concreto, se aprecia el crecimiento de 2 tipos de bacterias: uno da lugar a colonias blancas y la otra da lugar a colonias azules (figura 2). La presencia de otros microorganismos puede ser un problema, aunque éstos no sean patógenos, debido al incremento en la resistencia a distintos tratamientos desinfectantes cuando *Listeria* forma biofilms multiespecíficos [11]. Por lo tanto, se

identificaron estas bacterias para evaluar su potencial peligrosidad y descartar que pertenecieran a algún serotipo de *Listeria*.

Tabla 2. Resultados del análisis microbiológico de superficies previo a la implantación de medidas preventivas

Superficie muestreada	Presencia de L. monocytogenes	Presencia de otros microorganismos
Z.1.1. Cinta transportadora de destrío	-	+
Z.1.2. Zona de paso con charco	-	+
Z.2.1. Guantes de personal de selección	-	+
Z.2.2. Cinta de selección	-	-
Z.2.3. Alcantarilla de la zona de recepción	-	+
Z.3.1. Cinta de desgranado	-	+
Z.3.2. Cinta de selección de acondicionamiento	-	+
Z.3.3. Alcantarilla de acondicionamiento	-	+
Z.3.4. Lavadora	-	+
Z.4.1. Escaldador	-	+
Z.4.2. Cinta del escaldador	-	+
Z.4.3. Alcantarilla del escaldador	-	+
Z.4.4. Cinta del túnel de congelado	-	-
Z.4.5. Suelo del túnel de congelado	-	-
Z.4.6. Alcantarilla del túnel de congelado	-	+
Z.4.7. Cinta de salida del túnel	-	+
Z.4.8. Cinta del selector artificial	-	+

– indica ausencia del microorganismo

+ indica presencia de microorganismos

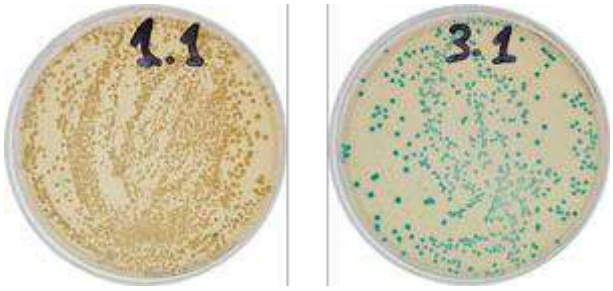


Figura 2. Aspecto de las colonias aparecidas en el muestreo microbiológico para la detección de *L. monocytogenes* en placas con *Compass Listeria Agar*

La secuenciación del gen 16S rRNA es una de las técnicas más usadas para la identificación de bacterias [19,20]. En este caso, se seleccionaron 5 colonias diferentes de cada tipo (blancas y azules). El ADN genómico extraído de estas colonias mostró una elevada integridad, y el fragmento amplificado mediante PCR se resolvió como una única banda del tamaño esperado. Las secuencias obtenidas se compararon con las bases de datos de secuencias bacterianas del gen 16S rRNA del NCBI (*National Center for Biotechnology Information*). Los resultados confirman la ausencia de *L. monocytogenes*, pues las secuencias de ADN obtenidas indicaron que los microorganismos que formaron las colonias no se corresponden con ninguna especie de *Listeria*. En concreto, las colonias de color blanco mostraron similitud con *Staphilococcus edaphicus*, mientras que las azules mostraron similitud con *Enterococcus gallinarum*. En ningún caso se han identificado

estas especies de bacterias como patógenos causantes de enfermedades de transmisión alimentaria en humanos.

3.3. Medidas preventivas

A pesar de que no se ha detectado la presencia de *L. monocytogenes* en ninguna de las muestras de superficies, esto no quiere decir que se pueda dejar de monitorizar y controlar estas superficies. Es necesario tomar medidas para reducir la presencia de otras bacterias, que no originan enfermedades alimentarias, pero que pueden contribuir a la formación de biofilms multiespecíficos en los que pueden asociarse a *L. monocytogenes*, y que pueden ser muy difíciles de erradicar por su resistencia a tratamientos desinfectantes. Por lo tanto, se planificaron una serie de medidas preventivas, modificando el sistema APPCC, para reducir en lo posible la presencia microbiológica en todas las superficies de la fábrica.

Uno de los principales riesgos para la colonización de *Listeria* y de otros microorganismos en las industrias agroalimentarias es la entrada de materias primas contaminadas. Por ello es necesario disponer de información de los proveedores, que permita garantizar la seguridad de la materia prima que entra en la fábrica. Se estableció un protocolo de evaluación de proveedores en alto, medio y bajo riesgo, facilitando así la información sobre el riesgo que presentan las materias primas que provienen de cada proveedor. Los proveedores de bajo riesgo facilitan a la empresa los certificados de calidad, el APPCC (flujo de proceso, cuadro de gestión y cuadro de PCC), analíticas multiresiduos, y libro de campo con los tratamientos realizados al cultivo. Los certificados de calidad reconocidos por la GFSI (*Global Food Safety Initiative* o Iniciativa Global de Seguridad Alimentaria) como: IFS, BRC, FSSC 2000 (ISO 22000 y 22003 y Global Gap) dan una idea del sistema de calidad y seguridad alimentaria que presentan los proveedores de las materias primas y asegura la implantación de las buenas prácticas, manual de calidad, procedimientos, instrucciones y registros.

Otra de las principales fuentes de contaminación microbiológica de los alimentos es el contacto directo con los manipuladores. A pesar de que la industria dispone de medidas higiénicas, de obligado cumplimiento, entre las que se encuentra el lavado minucioso de las manos de todos los manipuladores, se considera que el uso de guantes puede reducir el riesgo de contaminación microbiológica. Por lo tanto, como medida preventiva para evitar la contaminación microbiológica de las materias primas y productos terminados por parte del personal interno de la empresa, se establece el uso obligatorio de guantes desechables o la desinfección de guantes no desechables en todas las etapas del proceso. Además, se estableció la obligatoriedad de la limpieza de las suelas de las botas de todas las personas que accedan al interior de la fábrica. Esta limpieza se debe producir, tanto antes del acceso a fábrica como en el paso de la zona sucia a la limpia, para evitar que éstas sean un vehículo de entrada de *Listeria* al interior de las instalaciones.

Otra medida preventiva esencial que se considera necesario establecer, y a la que se debe prestar especial atención, es la mejora del plan de limpieza y desinfección. El plan debe modificarse de tal forma que la limpieza se produzca evitando salpicaduras de agua del suelo o de las rejillas del alcantarillado a la línea de procesado, debido a la presión excesiva del agua utilizada al realizar la limpieza. Estas salpicaduras pueden originar la dispersión de los microorganismos del suelo hacia superficies en contacto con los alimentos provocando su contaminación cruzada. Para que el plan sea efectivo, se dio formación teórica y práctica al equipo de limpieza interno, entregándoles una copia del plan establecido de limpieza y desinfección, con el programa por zonas y máquinas donde se reflejan los productos químicos de limpieza y desinfección a utilizar, las dosis a utilizar y los tiempos que deben dejarse actuar los desinfectantes.

Además, como medida preventiva para evitar la contaminación microbiológica del alimento por parte del personal, se estudió el flujo de paso del personal en las distintas etapas de producción, el flujo de paso de las visitas, el flujo de la limpieza y el flujo de la materia prima y

producto final. Se consideró necesario cambiar el flujo de personal y el flujo de visitas, así como recordar y exigir el cumplimiento del flujo de limpieza. El flujo de personal y de visitas permitía pasar al personal de selección, manipuladores, jefe de línea y a las personas que acceden a la fábrica en calidad de visitantes, de la zona de recepción de la materia prima, una zona considerada como menos aséptica, a la zona de procesado, considerada como una zona aséptica, lo que favorece la contaminación microbiológica. Este flujo se ha cambiado, haciendo pasar al personal de la zona de materias primas, al vestuario y baño, para cambiarse de ropa y calzado antes del acceso a la zona de fabricación, en el caso de tener que acceder. En todo momento se evita el acceso de una zona a otra si no es necesario, así como el cambio del personal de unas zonas a otras (figura 3). Para evitar el paso del personal de la zona menos aséptica a la zona de fabricación se instaló una puerta de personal cerrada con llave, controlada por el departamento de calidad. Además, se modificó el flujo de las visitas, de tal forma que se comience por el vestuario y baño, entrando en primer lugar a la zona de fábrica y saliendo por las zonas más contaminadas, evitando volver a pasar por las zonas de fabricación. De esta forma, las visitas siempre avanzan de las zonas limpias hacia las sucias, y no al revés, donde habría mayor riesgo de extender la contaminación.

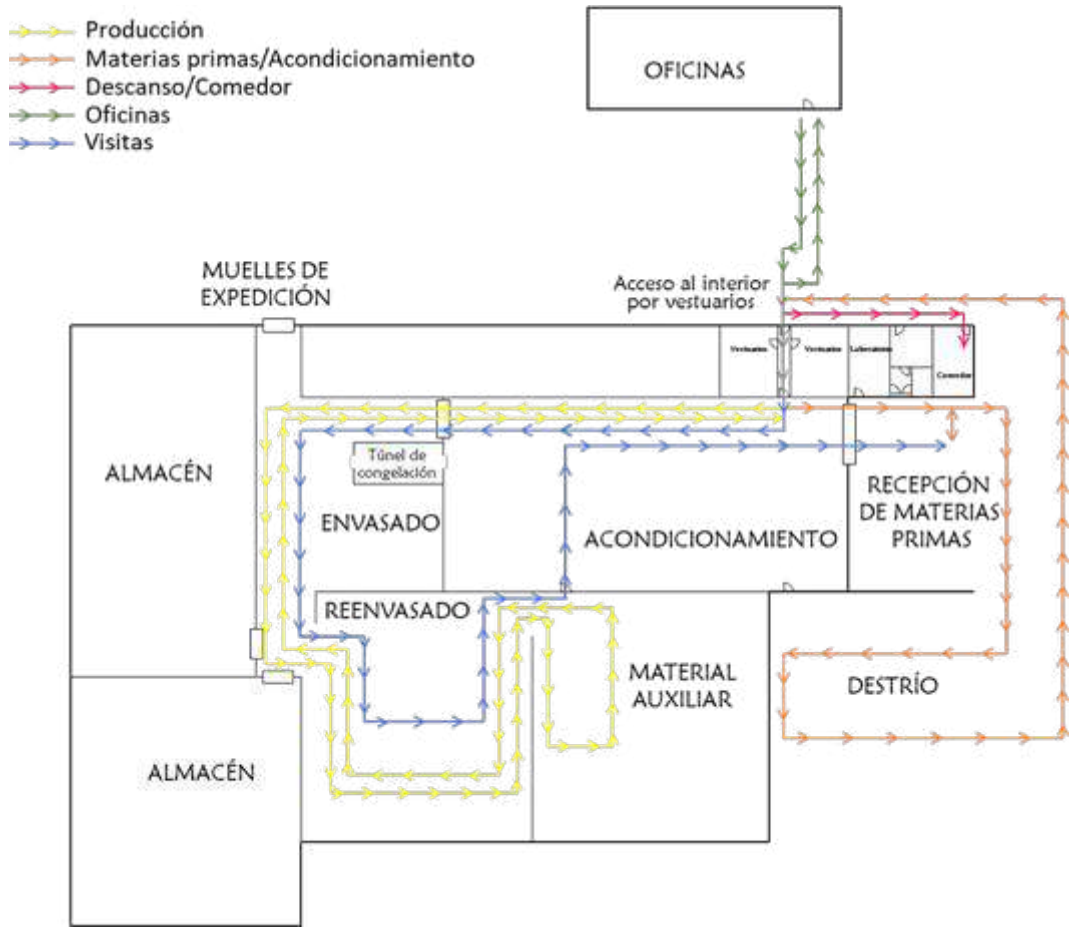


Figura 3. Esquema de los flujos de personal en el interior de la fábrica

Finalmente, como medida preventiva de control y monitorización de microorganismos, se estableció un plan de muestreos microbiológicos para comprobar la eficacia de la higiene del personal, la eficacia de la limpieza y desinfección de las superficies y otras medidas preventivas, así como la carga microbiana de las materias primas y producto finales. En el plan anual de

analíticas se estableció realizar análisis microbiológicos de superficies en contacto con el alimento (cintas, elevadores, tolvas) con una frecuencia de tres veces al mes. Asimismo, se estableció el análisis de superficies sin contacto con el alimento (suelo, pared, alcantarillas) con una frecuencia de cinco veces al mes, para comprobar su limpieza y desinfección. Se estableció realizar análisis microbiológicos de las manos de los manipuladores (con y sin guantes) para verificar la higiene del personal, con una frecuencia de 2 manipuladores aleatorios al mes de forma interna y un análisis por trimestre de forma externa. Además, se estableció la realización de un análisis microbiológico de las materias primas por producto y del producto final por lote.

3.4. Eficacia de las medidas preventivas

Después de la implantación de las medidas preventivas, se repitió el análisis microbiológico en las mismas superficies, para evaluar su eficacia. En este caso, los resultados dieron negativo, tanto en *L. monocytogenes* como en otros microorganismos en todas las superficies antes de iniciar la producción (tabla 3).

Tabla 3. Resultados del análisis microbiológico de superficies después de la implantación de medidas preventivas, antes del inicio de la producción y después

Superficie muestreada	Antes de la Producción		Después de la Producción	
	Presencia de *L. monocytogenes*	Presencia de otros microorganismos	Presencia de *L. monocytogenes*	Presencia de otros microorganismos
Z.1.1. Cinta transportadora de destrío	-	-	-	+
Z.1.2. Zona de paso con charco	-	-	-	-
Z.2.1. Guantes de personal de selección	-	-	-	-
Z.2.2. Cinta de selección	-	-	-	-
Z.2.3. Alcantarilla de la zona de recepción	-	-	-	-
Z.3.1. Cinta de desgranado	-	-	-	+
Z.3.2. Cinta de selección de acondicionamiento	-	-	-	-
Z.3.3. Alcantarilla de acondicionamiento	-	-	-	-
Z.3.4. Lavadora	-	-	-	-
Z.4.1. Escaldador	-	-	-	-
Z.4.2. Cinta del escaldador	-	-	-	-
Z.4.3. Alcantarilla del escaldador	-	-	-	+
Z.4.4. Cinta del túnel de congelado	-	-	-	-
Z.4.5. Suelo del túnel de congelado	-	-	-	-
Z.4.6. Alcantarilla del túnel de congelado	-	-	-	-
Z.4.7. Cinta de salida del túnel	-	-	-	-
Z.4.8. Cinta del selector artificial	-	-	-	-

– indica ausencia del microorganismo

+ indica presencia de microorganismos

En el análisis realizado después de la producción, se detectó presencia de microorganismos en la cinta de destrío y en la cinta de desgranado. Estas superficies están en contacto con residuos de la limpieza de las materias primas en el caso de la cinta de destrío, o directamente con materias primas antes de operaciones de lavado en el caso de la cinta de desgranado, lo que puede indicar que la contaminación viene directamente de estas materias primas. Aunque los proveedores sean de bajo riesgo, la entrada de las materias primas es una etapa fundamental, que debe ser controlada mediante análisis microbiológicos periódicos para garantizar la producción de alimentos seguros. Hay que destacar que la colonización más frecuente por *Listeria* en las industrias agroalimentarias se debe a la entrada de materias primas contaminadas.

Además, se apreció el crecimiento de colonias en las placas provenientes del muestreo de la alcantarilla del escaldador, mostrando que este debe ser un lugar de control importante. Este punto tiene la característica de evacuar agua caliente, procedente del proceso de escaldado, que una vez se enfría a temperaturas subletales, dan lugar a las condiciones ideales para el crecimiento

de microorganismos. Por lo tanto, este punto debería ser una zona donde el equipo de limpieza y desinfección interno preste especial atención.

El resultado obtenido no implica que la fábrica esté completamente libre de microorganismos, pues en el análisis solo se han considerado aquellos que formaron colonias en las placas empleadas, con *Compass Listeria Agar*. Sin embargo, los resultados sí que muestran una clara disminución de la carga microbiológica de estas superficies, indicando la efectividad de las medidas adoptadas. El mantenimiento de estas medidas, junto con la vigilancia y el control microbiológico periódico, deben permitir asegurar la producción de vegetales congelados libres de *L. monocytogenes*.

4. Conclusiones

Se ha realizado un estudio del diagrama de flujo de la industria Ultracongelados Campo Verde, evaluando aquellas zonas que presentan un mayor riesgo de contaminación microbiológica, atendiendo principalmente a la posible presencia de residuos de material orgánico y humedad. Del análisis microbiológico, efectuado en las diferentes superficies con riesgo de contaminación, se deduce la ausencia de *L. monocytogenes* en toda la fábrica. Sin embargo, en la mayor parte de las superficies muestreadas se apreció la presencia de otras especies de microrganismos, apareciendo en las placas empleadas en los análisis dos tipos de bacterias, que dieron lugar al crecimiento de colonias blancas y azules. Para descartar que éstos corresponden a serotipos de *Listeria* se han identificado mediante secuenciación del gen 16S rRNA, resultando ser bacterias de los géneros *Staphilococcus* y *Enterococcus*, no patógenos.

Para tratar de reducir la incidencia de contaminación microbiológica, se implantaron una serie de medidas preventivas: Compra a proveedores de bajo riesgo, que faciliten a la empresa los certificados de calidad, el APPCC, las analíticas multiresiduos, y el libro de campo con los tratamientos realizados al cultivo; uso de guantes desechables en todas las etapas del proceso y desinfección de los guates reutilizables de manera diaria, antes de empezar la producción; limpieza de las suelas de las botas al entrar a la fábrica, o al pasar de la zona sucia a la zona limpia; mejora de la etapa de limpieza y desinfección, haciendo hincapié en la formación al personal de limpieza interno para evitar salpicaduras al emplear agua a presión; estudio de flujos de personal, estableciendo nuevos flujos de las visitas, y evitando accesos innecesarios del personal de la zona sucia a la zona limpia; establecimiento de un plan de muestreos microbiológicos para descartar la presencia de *L. monocytogenes*, tanto en superficies en contacto directo con los alimentos como aquellas que no lo están, principalmente alcantarillas de desagüe. La implantación de estas medidas preventivas resultó positiva, pues consiguió eliminarse la presencia de microorganismos en todas las superficies en las que se detectó en el primer análisis microbiológico.

5. Agradecimientos

El presente trabajo se ha realizado gracias a la colaboración de la industria Ultracongelados Campo Verde S.L.

Referencias

1. Liu R.H. Health-promoting components of fruits and vegetables in the diet. Advances in Nutrition. 2013, 4, 384S-392S.
2. Slavin J.L., Lloyd B. Health benefits of fruits and vegetables. Advances in Nutrition. 2012, 3, 506-516.
3. Janssen A.M., Nijenhuis-de Vries M.A., Boer E.P.J., Kremer S. Fresh, frozen, or ambient food equivalents and their impact on food waste generation in Dutch households. Waste Management. 2017, 67, 298-307.
4. Secondi L., Principato L., Laureti T. Household food waste behavior in EU-27 countries: A multilevel analysis. Food Policy. 2015, 56, 25-40.

5. Stancu V., Haugaard P., Lähteenmäki L. Determinants of consumer food waste behavior: Two routes to food waste. Appetite. 2016, 96, 7-17.
6. Lomonaco S., Nucera D., Filipello V. The evolution and epidemiology of *Listeria monocytogenes* in Europe and the United States. Infection, Genetics and Evolution. 2015, 35, 172-183.
7. Buchanan R.L., Gorris L.G.M., Hayman M.M., Jackson T.C., Whiting R.C. A review of *Listeria monocytogenes*: An update on outbreaks, virulence, dose-response, ecology, and risk assessments. Food Control. 2017, 75, 1-13.
8. EFSA, ECDC. The European Union summary report on trends and sources of zoonoses, zoonotic agents and food-borne outbreaks in 2013. EFSA Journal. 2015, 13(1), 3991.
9. EFSA, ECDC. Multi-country outbreak of *Listeria monocytogenes* serogroup IVb, multi-locus sequence type 6, infections linked to frozen corn and possibly to other frozen vegetables – first update. EFSA Supporting Publication. 2018, EN-1448.
10. Heredia N., García S. Animals as sources of food-borne pathogens: A review. Animal Nutrition. 2018, 4, 250-255.
11. Van der Veen S., Abee T. Mixed species biofilms of *Listeria monocytogenes* and *Lactobacillus plantarum* show enhanced resistance to benzalkonium chloride and peracetic acid. International Journal of Food Microbiology. 2011, 144, 421-431.
12. Muhterem-Uyar M., Dalmasso M., Sorin Bolocan A., Hernandez M., Kapetanakou A.E., Kuchta T., Manios S.G., Melero B., Minarovičová J., Ioana Nicolau A., Rovira J., Skandamis P.N., Jordan K., Rodríguez-Lázaro D., Stessl B., Wagner M. Environmental sampling for *Listeria monocytogenes* control in food processing facilities reveals three contamination scenarios. Food Control. 2015, 51, 94-107.
13. CE. Reglamento (CE) nº 852/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, relativo a la higiene de los productos alimenticios. Diario Oficial de la Unión Europea. 2004, L139.
14. Early R. Good agricultural practice and HACCP in fruit and vegetable cultivation. Improving the safety of fresh fruit and vegetables. Woodhead Publishing limited, Cambridge (Reino Unido). 2005.
15. Rodríguez-López P., Bernárdez M., Rodríguez-Herrera J.J., Comesaña A.S., Cabo M.L. Identification and metagenetic characterization of *Listeria monocytogenes*-harbouring communities present in food-related industrial environments. Food Control. 2019, 95, 6-17.
16. Kljujev I., Raicevic V., Jovicic-Petrovic J., Vujovic B., Mirkovic M., Rothballer M. *Listeria monocytogenes* – Danger for health safety vegetable production. Microbial Pathogenesis. 2018, 120, 23:31.
17. Van Boekel M., Fogliano V., Pellegrini N., Stanton C., Scholz G., Lalljie S., Somoza V., Knorr D., Jasti P.R., Eisenbrand G. A review on the beneficial aspects of food processing. Molecular Nutrition & Food Research. 2010, 54, 1215–1247.
18. Bucur F.I., Grigore-Gurgu L., Crauwels P., Riedel C.U., Nicolau A.I. Resistance of *Listeria monocytogenes* to Stress Conditions Encountered in Food and Food Processing Environments. Frontiers in Microbiology. 2018, 9, 2700.
19. Lane D. J. 16S/23S rRNA sequencing. In E. Stackebrandt, & M. Goodfellow (Eds.). Nucleic acid techniques in bacterial systematics (pp. 115–175). Wiley, Chichester (Reino Unido). 1991.
20. Barbosa J., Albano H., Silva C.P., Teixeira P. Microbiological contamination of reusable plastic bags for food transportation. Food Control. 2019, 99, 158-163.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Evaluación de las pérdidas en patata durante su almacenamiento por punción y tecnología NIRS

C. Jarén[1], C. Pérez-Roncal[1], A. López-Maestresalas[1], R. Pérez-García[1], S. Arazuri[1] y J. I Ruiz de Galarreta[2]

[1] Dpto. Ingeniería, Universidad Pública de Navarra. Campus Arrosadia, 31006 Pamplona, España; cjaren@unavarra.es
[2] NEIKER-Tecnalia, Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario. Campus Agroalimentario de Arkaute. Apto 46, E-01080, Vitoria, España

Resumen: La industria alimentaria se enfrenta al reto de ofrecer productos de mayor calidad, siendo los parámetros texturales los comúnmente empleados para el control de la misma. Factores como la variedad y el almacenamiento condicionan el destino de los tubérculos y tienen un impacto directo sobre su calidad. El objetivo de este estudio consistió en estudiar la viabilidad de la tecnología NIRS y de ensayos texturales para discriminar patatas en función de la calidad y el tiempo de almacenamiento. Se utilizaron 250 patatas de 25 variedades, que se conservaron refrigeradas en los 3 meses de ensayos. Cada 2 semanas se determinó el peso y la textura mediante ensayos de punción con texturómetro de 50 patatas (2 por variedad), además se adquirieron los espectros de reflectancia con un espectrofotómetro AOTF-NIR (1100-2300 nm). Por un lado, se analizaron los datos de peso y textura mediante un análisis de la varianza (ANOVA). Por otro, se realizó un análisis discriminante (DA) con las variables texturales y un análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) con los datos espectrales, para conseguir diferenciar los tubérculos según el tiempo de almacenamiento. Se observó una disminución del peso medio y de la textura de las patatas a lo largo del almacenamiento, debido a la pérdida de humedad y, por tanto, de firmeza. El porcentaje de bien clasificados fue de un 40% para el DA desarrollado con las variables texturales, y de un 76,39% con el PLS-DA combinado con un pretratamiento de los datos espectrales con SNV y *detrend*.

Palabras clave: análisis discriminante, calidad, textura, reflectancia NIR, *Solanum tuberosum* L

1. Introducción

La patata (*Solanum tuberosum* L.) es uno de los cultivos alimentarios que mayor producción y consumo presenta a nivel mundial [1], experimentando en los últimos años un crecimiento de la producción debido a su alto rendimiento y valor nutritivo.

En la actualidad, la industria alimentaria se enfrenta al reto de ofrecer a los consumidores productos de mayor calidad, cumpliendo los requisitos impuestos por los organismos reguladores en temas de seguridad alimentaria y trazabilidad [2]. En el caso de la patata, los principales atributos de calidad que condicionan su aceptabilidad en el mercado son el tamaño, el aspecto general, el color y la textura [3], siendo los parámetros texturales los que se utilizan generalmente para controlar la calidad de los tubérculos a lo largo de toda la cadena de valor. Además, factores como el tiempo óptimo de cosecha, la variedad y el almacenamiento condicionan el destino de los tubérculos y tienen un impacto directo sobre su calidad.

Tradicionalmente la textura se ha evaluado mediante análisis sensoriales o técnicas instrumentales, que son métodos destructivos y que requieren tiempo para su realización [4]. En

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3438

los últimos años, se han incorporado tecnologías rápidas y no destructivas, como la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS), que ha demostrado ser una alternativa factible a los métodos analíticos comúnmente empleados en la evaluación de calidad [5].

El objetivo de este trabajo se centra en evaluar la viabilidad de la tecnología NIRS y de ensayos texturales de punción para discriminar patatas en función de la calidad y el tiempo de almacenamiento.

2. Materiales y métodos

2.1. Material vegetal

En la realización de este estudio se utilizaron un total de 250 patatas de 25 variedades diferentes (10 tubérculos por variedad) pertenecientes al Banco de Germoplasma del Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario (NEIKER-Tecnalia). Los tubérculos, cosechados en la campaña de 2017, se recogieron en el centro que NEIKER-Tecnalia posee en Arkaute (Álava) y se trasladaron a la Universidad Pública de Navarra donde se conservaron refrigerados (8 °C; 90% HR) durante los 3 meses de ensayos (diciembre 2017 - marzo 2018). Aproximadamente cada 18 días se seleccionaron al azar 2 tubérculos por variedad (50 en total) y, tras identificarlos, se analizó la calidad de los mismos midiendo el peso, los espectros NIR y la textura. Después de realizar los ensayos, los tubérculos (50 cada día) eran desechados.

2.2. Propiedades físicas: Peso y textura

Para determinar el peso de los tubérculos y así poder analizar la evolución del peso a lo largo del periodo de almacenamiento, se utilizó una balanza de precisión Mettler Toledo SB16001 (peso en gramos; error ± 0,1 g).

El análisis textural se realizó mediante ensayos de punción con un analizador de textura TA-XT2 (Stable Micro Systems Ltd, UK) utilizando el programa informático Texture Exponent y tomando como referencia los ensayos descritos por [6]. Se realizaron 4 punciones en la zona ecuatorial del tubérculo (posiciones opuestas y perpendiculares dos a dos) utilizando la sonda de aguja de punción (P/2N) de acero inoxidable y fijando como parámetros de ensayo una velocidad de 0,5 mm s^{-1} y una profundidad de penetración de 20 mm. Como variables de estudio se consideraron la fuerza máxima (N) y la pendiente de la curva de carga (N mm^{-1}), empleando posteriormente el valor medio de cada tubérculo en los análisis.

2.3. Propiedades ópticas: espectros NIR

Los espectros de reflectancia NIR de las patatas se obtuvieron con un analizador Luminar 5030 Miniature AOTF-NIR (Filtro Optoacústico Ajustable-Infrarrojo Cercano) (Brimrose, Baltimore, MD, USA). Se trata de un espectrofotómetro portátil con detector InGaAs que permite realizar medidas de reflectancia en el rango espectral de 1100 a 2300 nm con una velocidad de escaneo de 16000 longitudes de onda por segundo. En este estudio las señales emitidas por el detector fueron registradas con el programa informático Brimrose Analytical Software SNAP32! y transferidas a Unscrambler X (CAMO software, Oslo, Norway).

El espectro adquirido en cada medición se obtuvo como el promedio de 50 espectros, realizando en este caso las mediciones en intervalos de 2 nm en el rango 1100-2300 nm (601 valores de reflectancia por espectro). Se escanearon 4 puntos de la zona ecuatorial (opuestos y perpendiculares dos a dos) sobre los tubérculos crudos y sin pelar, utilizándose posteriormente el espectro medio de cada patata en los análisis.

2.4. Análisis estadístico: ANOVA

Los datos de peso y textura, obtenidos en cada día de ensayo, se estudiaron estadísticamente mediante el análisis de la varianza (ANOVA) para determinar si existan diferencias significativas entre grupos de datos. Se realizó un ANOVA para cada variable de estudio por separado (peso, fuerza máxima y pendiente) teniendo en cuenta los factores día de ensayo y variedad de patata, con un nivel de confianza del 95%. En aquellos casos en los que existían diferencias significativas, se realizó un test de comparación de medias de Duncan. Los análisis se llevaron a cabo con el programa estadístico SPSS (versión 23, SPSS Chicago, IL).

2.5. Análisis multivariante de datos

Para conseguir clasificar los tubérculos en función de la pérdida de calidad que experimentan las patatas a lo largo del periodo de almacenamiento, se realizaron dos tipos de análisis cualitativos: un análisis discriminante (DA) con las variables texturales (fuerza máxima y pendiente) y un análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) con los datos espectrales. En ambos casos se consideraron 4 grupos de clasificación, en función de los resultados del test ANOVA obtenidos para la variable textural fuerza máxima. Las clases se definieron como: Grupo 1 (día 1), Grupo 2 (día 19), Grupo 3 (día 36) y Grupo 4 (días 54 y 72). En los análisis no se consideró el factor variedad de manera independiente, al disponer de pocos tubérculos por variedad, si no que se estudiaron todas las patatas en su conjunto, aportando así una mayor variabilidad a los datos.

El DA es un método supervisado que busca la combinación lineal de las variables independientes que mejor explique los datos y que pueda diferenciar dos o más clases [7]. En este estudio se realizó un DA para las dos variables texturales juntas con SPSS (versión 23, SPSS Chicago, IL), evaluando la precisión del modelo con el porcentaje de muestras clasificadas correctamente (% CC) para cada grupo en la validación cruzada (CV).

El PLS-DA se trata de una técnica de reconocimiento de patrones donde la pertenencia a una clase se predice a partir de los espectros de las muestras por medio de la regresión PLS [8]. En este estudio, el 70% (175 muestras) de los datos iniciales se utilizó para la calibración y CV (método de persianas venecianas con 10 divisiones) del modelo, mientras que el 30% restante (75 muestras) se empleó para validarlo externamente.

Se aplicaron diferentes tratamientos a los datos espectrales, que incluían técnicas para la corrección de la dispersión y derivadas [9]. La precisión de los modelos PLS-DA desarrollados se evaluó considerando el % CC y los valores de sensibilidad y especificidad para cada grupo obtenidos en la validación externa. Tanto el tratamiento como el análisis discriminante de los datos se realizaron con el programa PLS-Toolbox (Eigenvector Research Inc., Wenatchee, WA) en MATLAB R2018a (The MathWorks, Natick, MA).

3. Resultados y discusión

La Tabla 1 muestra los resultados del test de Duncan obtenidos para el peso medio de cada variedad. Como se puede apreciar las patatas presentaron pesos muy diversos debido al propio genotipo de la variedad. Se observaron diferencias significativas entre las variedades Agria y Mirari (248 g frente a 83 g de peso medio), registrando unas diferencias de peso superiores al 66%. Además, la variabilidad individual dentro de cada variedad fue importante (26,7% aprox.), llegando a alcanzar en los casos más extremos unas diferencias de peso del 49% (Leire o Harana).

Tabla 1. Peso medio (g) y desviación estándar de cada variedad de patata. Las letras indican si existen diferencias significativas (p<0,05) de peso entre variedades (Test Duncan).

Variedad	Peso medio (g)	Variedad	Peso medio (g)
Agria	248,28 ± 124,81 a	Liberta	121,51 ± 45,17 fgh
Zorba	216,29 ± 75,90 ab	Brodick	120,17 ± 33,66 fgh
Leire	214,36 ± 46,19 ab	Orchesta	109,27 ± 24,79 fgh
Kennebec	208,22 ± 73,81 ab	Draga	104,25 ± 35,47 gh
Ikerne	203,54 ± 59,87 abc	Ambition	103,65 ± 33,00 gh
Picobello	182,74 ± 65,95 bcd	Rodeo	103,54 ± 34,05 gh
Monalisa	175,98 ± 83,64 bcde	Sante	102,43 ± 27,43 gh
Roja Riñon	158,00 ± 63,68 cdef	Action	98,65 ± 39,47 gh
Harana	139,90 ± 29,93 defg	Nela	97,87 ± 30,14 gh
Europrima	139,23 ± 30,66 defg	Soprano	97,57 ± 34,40 gh
Martina	133,13 ± 39,87 efgh	Entzia	94,39 ± 15,38 gh
Miren	132,16 ± 17,01 efgh	Mirari	83,69 ± 27,70 h
Megara	129,00 ± 34,00 efgh		

En la Figura 1 aparece representada la evolución del peso medio de los tubérculos durante el periodo que estuvieron almacenados. En líneas generales se observó una disminución del peso medio a lo largo del almacenamiento, existiendo diferencias significativas entre las patatas del primer (día 1) y del último día (72 días de almacenamiento) de ensayos. Las variedades que menor pérdida de peso sufrieron durante los 72 días (datos no mostrados) fueron Soprano y Zorba (1%), siendo Europrima la que mayores pérdidas obtuvo (11,31%).

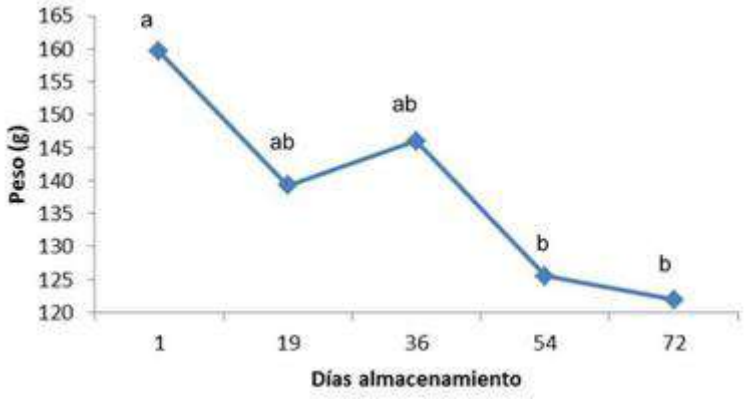


Figura 1. Evolución del peso medio (g) de las patatas a lo largo del almacenamiento. Las letras indican si existen diferencias significativas (p<0,05) entre los días (Test Duncan).

Con respecto a las variables de textura, se observó una tendencia descendente tanto de la fuerza máxima como de la pendiente a lo largo del almacenamiento de los tubérculos (Figura 2), existiendo diferencias significativas entre las patatas del día 1 y las almacenadas 72 días. Esta tendencia concuerda con los resultados de peso obtenidos, ya que con el tiempo se produce una pérdida de humedad en las patatas y por tanto de firmeza. Cuanto mayor es el contenido de agua en las patatas, más turgentes y firmes se encuentran, produciéndose en los ensayos de punción una fractura frágil de las células [10]. En las variedades de patata más firmes, como Zorba, la fuerza necesaria para penetrar los tubérculos en los ensayos (12,40 N) fue mayor que la resistencia que ofrecieron variedades menos firmes, como Nela, que apenas requirieron 8 N.

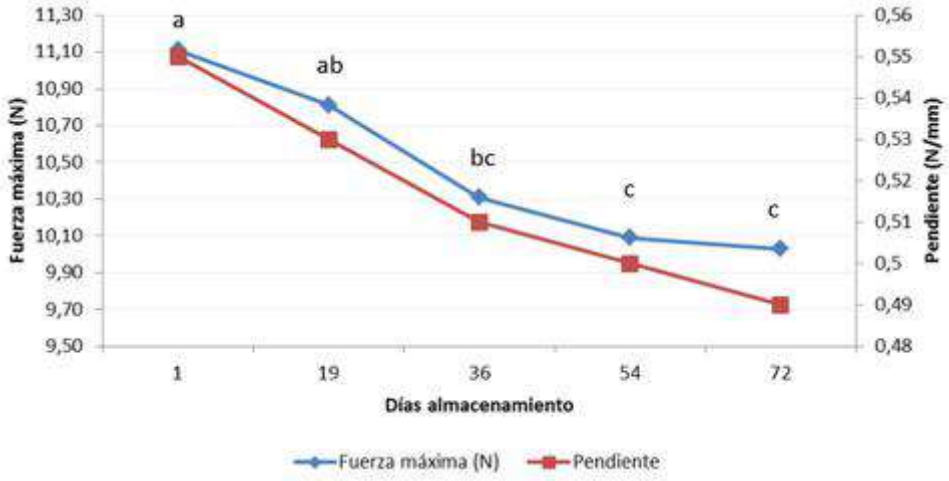


Figura 2. Evolución de la fuerza máxima (N) y la pendiente (N/mm) durante el almacenamiento de los tubérculos. Las letras indican si existen diferencias significativas ($p<0,05$) entre los días (Test Duncan).

En la Tabla 2 se muestran los resultados de clasificación obtenidos en los modelos desarrollados en este estudio considerando 4 clases en los datos según el tiempo de almacenamiento. En el caso del DA realizado con las variables texturales se especifica: el número de datos (n) empleados, el porcentaje total de patatas clasificadas correctamente (% CC) en la CV y la varianza explicada. En los PLS-DA desarrollados con los espectros NIR se especifica: el número de datos (n) empleados en la construcción del modelo, los pretratamientos aplicados a los datos espectrales, el número de variables latentes (LVs) empleadas, el % CC total obtenido en la validación externa y la varianza explicada por cada modelo.

Tabla 2. Resumen de los resultados de clasificación obtenidos en los análisis DA y PLS-DA.

Análisis	Variables	n	Pretratamiento	LVs	% CC	Varianza (%)
DA	Fmax -pendiente	243	-	-	40	100
PLS-DA	NIR	167	MSC	9	76,38	99,90
		166	MSC+1der	5	61,97	96,01
		179	SNV	9	70,83	99,84
		166	SNV+1der	5	64,79	95,98
		170	SNV+DT	9	76,39	99,98

Los modelos discriminantes desarrollados con los datos espectrales (PLS-DA) obtuvieron porcentajes de clasificación más elevados (>61%) que el desarrollado para las variables texturales (DA), en el que el porcentaje total de muestras clasificadas correctamente fue de tan solo un 40%. Estos resultados indican que, en este caso, no es posible clasificar las patatas según el tiempo de almacenamiento a partir de la textura, cuando se consideran como variables de estudio fuerza máxima y pendiente de la curva de carga obtenidas mediante ensayos de punción.

De todos los modelos PLS-DA (Tabla 2), los mejores resultados se obtuvieron para el modelo desarrollado con 9 LVs y la combinación de pretratamientos SNV (*Standard Normal Variate*) seguido de *Detrend* (DT), consiguiendo un % CC del 76,36% (99,98% de varianza explicada). En este modelo (Tabla 3), las muestras pertenecientes al Grupo 2 presentaron el mayor porcentaje de acierto con un 93,33% CC, siendo el Grupo 1 el que obtuvo el porcentaje más bajo (66,67% CC). De igual manera, fue el Grupo 2 el que obtuvo los mejores resultados de sensibilidad y especificidad (0,993 y 0,980 respectivamente), indicando que las muestras del Grupo 2 están mejor clasificadas dentro del grupo al que pertenecen que las del resto de grupos.

Tabla 3. Matriz de confusión y valores de sensibilidad y especificidad obtenidos en la validación externa del modelo PLS-DA con los pretratamientos SNV+DT.

		Grupo real (%)				Sensibilidad	Especificidad
		1	**2**	**3**	**4**		
Grupo estimado(%)	1	66,67	0	7,14	10,71	0,867	0,825
	2	0	93,33	0	3,58	0,933	0,980
	3	6,67	0	71,43	10,71	0,857	0,879
	4	26,66	6,67	21,43	75	0,679	0,682

4. Conclusiones

Este estudio demuestra el potencial de la espectroscopía NIR para discriminar tubérculos crudos de patata en función de la pérdida de calidad ocasionada durante el almacenamiento. Se observó una disminución del peso medio (en torno al 2,16% en todas las variedades ensayadas) y de la textura a lo largo de los 72 días de almacenamiento, debida a la pérdida de humedad y firmeza producida en las patatas.

Los modelos PLS-DA desarrollados para clasificar los tubérculos según sus espectros NIR obtuvieron los mayores porcentajes de acierto (>61%), siendo el PLS-DA con los pretratamientos SNV+DT el modelo con mejores resultados, llegando a clasificar correctamente un 76,39% de muestras.

Los resultados obtenidos en este estudio plantean la necesidad de seguir investigando en este campo, considerando un menor número de variedades con más muestras por variedad o probando métodos instrumentales y técnicas de clasificación distintas, y así poder alcanzar estrategias de control más robustas que permitan garantizar la calidad de los tubérculos.

5. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto INIA-FEDER RTA2013-00006-C03-01-03, el Gobierno Vasco, y la Universidad Pública de Navarra a través de la concesión de una ayuda para la Formación de Personal Investigador predoctoral 2017.

Referencias

1. FAO. Cultivos. 2017. Consulta 14/05/2019, en http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC.
2. Grassi S., Alamprese C. Advances in NIR spectroscopy applied to process analytical technology in food industries. Current Opinion in Food Science. 2018, 22, 17-21.
3. Kaur L., Singh J., Singh N., Ezekiel R. Textural and pasting properties of potatoes (Solanum tuberosum L.) as affected by storage temperature. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2007, 87, 520–526.
4. Chen L., Opara U.L. Texture measurement approaches in fresh and processed foods — A review. Food Research International. 2013, 51(2), 823-835.
5. López-Maestresalas, A. Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging for non-destructive quality inspection of potatoes. Universidad Pública de Navarra. 2016.
6. Kumar S., Khade H.D., Dhokane V.S., Behere A.G., Sharma A. Irradiation in combination with higher storage temperatures maintains chip-making quality of potato. Journal of Food Science. 2007, 72(6), S402–S406.
7. Naes T., Isaksson T., Fearn, T., Davies T. A user friendly guide to multivariate calibration and classification. NIR Publications, Chichester, UK. 2002.
8. Barker M., Rayens W. Partial least squares for discrimination. Journal of Chemometrics. 2003, 17(3), 166–173.
9. Nicolaï B.M., Beullen K., Bobelyn E., Peirs A., Saeys W., Theron K.I, Lammertyn J. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. Postharvest Biology and Technology. 2007, 46, 99–118.
10. Heltoft P., Wold A.B., Molteberg E.L. Effect of ventilation strategy on storage quality indicators of processing potatoes with different maturity levels at harvest. Postharvest Biology and Technology. 2016, 117, 21-29.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Evaluación metrológica de dos dispositivos comerciales para la estimación espectrofotométrica de la calidad interna en uvas

M. A. Momin[1], C. Valero[2], S. Bergman[1] D.C: Slaugther[1], I.R. Donis-González[1]

[1] BAE Dept. University of California - Davis; irdonisgon@ucdavis.edu
[2] Dept. Ing Agroforestal, Universidad Politécnica de Madrid; constantino.valero@upm.es

Resumen: El desarrollo de dispositivos de medida de la calidad interna de frutas de forma no destructiva mediante tecnologías NIR y similares es conocido desde hace varias décadas; sin embargo, su aplicación práctica en la industria es todavía escasa, especialmente mediante dispositivos portátiles cuya estimación sea fiable. En este trabajo se han usado dos equipos comerciales portátiles para la estimación de la calidad interna de frutos: el F-750 (Felix Instruments Inc., Camas, WA, USA) y el SCiO (Consumer Physics, Tel Aviv, Israel), en el rango de 740 a 1070 nm. Se aplicaron a la estimación no destructiva del contenido en materia seca (dry matter, DM) y sólidos solubles totales (total soluble solids, SS). Se emplearon un total de 450 frutos (150 por variedad) incluyendo uvas negras (Var. Autumn Royal), verdes (Var. Timpson) y rojas (Var. Sweet Scarlet) para generar y optimizar modelos de regresión mediante Partial Least-Squares (PLSR). Se tomaron seis espectros por baya en dos posiciones opuestas sobre la piel, manteniendo los frutos a tres temperaturas sucesivas (0, 10, y 20ºC). Los mejoren modelos de estimación se escogieron teniendo en cuenta su coeficiente de determinación (R^2), la 'Ratio of Performance to Deviation' (RPD), y el menor error de predicción de mínimos cuadrados (Root Mean Square Error of Prediction, RMSEP). Los modelos de estimación de DM consiguieron R^2 igual a 0.83 y 0.81, RMSEP de 1.40 y 1.44, y RPD de 2.35 y 2.29, para el equipo F-750 y el equipo SCiO, respectivamente. Por otro lado, los modelos de SS generaron R^2 de 0.98 y 0.97, RPD de 8.03 y 5.43, y RMSEP de 0.39 y 0.58 para el F-750 y el SCiO, respectivamente. En general, los modelos de DM y SS con ambos equipos resultaron prometedores, y los resultados obtenidos indican que ambos equipos pueden detectar de forma rápida y no destructiva la calidad interna de uvas frescas, de forma satisfactoria.

Palabras clave: NIR, equipos portátiles, sensor miniaturizado, PLS, preprocesado

1. Introducción

Las técnicas de medida no destructiva de la calidad interna de productos frescos y alimentos han estado en continua evolución desde hace décadas [3], incluyendo tecnologías tan diversas como el análisis de imagen, la espectroscopía, las técnicas acústicas, los sensores de aromas, etc. Entre ellas la espectroscopía infrarroja (NIR) ha demostrado su aplicabilidad como técnica rápida, no invasiva y simple para estimar parámetros relacionados con el estado interno de frutos. Combinada con técnicas quimiométricas de análisis de datos ha sido aplicada con éxito para determinar el contenido en diferentes constituyentes químicos de un gran número de especies vegetales [9]. En especial, en el caso de las uvas, tanto de consumo en fresco como para vinificación, existe un interés continuo en el desarrollo de método rápidos y fiables para la

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3294

estimación de su calidad [1, 5, 15]. Sin embargo, los recientes avances en la miniaturización de los equipos espectrofotométricos han dado lugar a nuevos dispositivos comercialmente disponibles, y los potenciales usuarios (técnicos agroalimentarios) demandan estudios con rigor científico que les aporten información sobre la fiabilidad de estos nuevos equipos. Tal es el caso que nos ocupa en este trabajo, en el que se compararon dos equipos portátiles NIR, uno de fabricación norteamericana con cierta trayectoria reconocida, frente a otro de mucho menor tamaño recientemente presentado (2017) por una *start-up* israelí.

2. Materiales y métodos

2.1 Muestras vegetales

Los Frutos fueron directamente cosechados en los campos de cultivo de productores comerciales de uva de mesa (Anthony's), en el sur de California, durante la segunda quincena de julio de 2017. En concreto se recogieron 150 bayas de uvas negras (var. Autumn Royal), verdes (var. Timpson) y rojas (var. Sweet Scarlet). Las bayas fueron seleccionadas en un estado adecuado de madurez comercial, pero buscando a la vez la máxima variabilidad posible. Todos los racimos se mantuvieron en cámara frigorífica (0ºC, 80RH%) hasta el momento de las medidas.

Para que el efecto de la temperatura sobre el espectro infrarrojo no afectara los resultados, se decidió medir todas las bayas repetidamente a 0ºC, 10ºC y 20ºC. En otras palabras, todas las muestras fueron mantenidas a 0ºC hasta la primera adquisición de espectros, posteriormente estabilizadas a 10ºC durante 1 hora y medidas nuevamente, y estabilizadas de nuevo a 20ºC para el ultimo registro de espectros y las medidas destructivas de referencia posteriores. La temperatura de las cámaras frigoríficas y de la pulpa de las bayas se monitorizó continuamente mediante sondas (termopares) instaladas en las bandejas demuestras y dentro de algunas uvas, con objeto de asegurar que las muestras alcanzaban las temperaturas deseadas.

2.2 Equipos de medida y adquisición de espectros

Se emplearon dos equipos portátiles para registrar los espectros NIR. Por un lado, el equipo de mano denominado 'F750' fabricado por Felix Instruments Inc. (WA, USA). Sus características técnicas se detallan en la Tabla 1. Se midieron las muestras con el dispositivo Felix F750 a todas las temperaturas (0, 10 y 20ºC) realizando las mediciones dentro de las cámaras de frío, para evitar alteraciones en las temperaturas debidas a la manipulación de los frutos. Se registró el espectro en ambas caras de cada baya, y se promedió por baya y por temperatura.

Los espectros registrados fueron transferidos a un PC mediante la tarjeta SD del F750. Los datos se graban en formato csv y se transfirieron a excel para ser preprocesados. El fabricante suministra un software propio que puede ser empleado para procesamiento y modelización de los datos; sin embargo, se prefirió emplear Matlab, como se detalla más adelante

Tabla 1. Características técnicas del espectrofotómetro de mano F750 (fuente Felix Instruments Inc.)

Sensor:	Carl Zeiss MMS-1 Spectrometer
Rango:	310-1100 nm
Tamaño de muestra espectral	3 nm
Resolución espectral:	8-13 nm
Fuente de luz:	lámpara de Xenon-Tungsteno
Lente:	Silicio fundido, con revestimiento para mejorar NIR
Obturador:	Estándar, pintado de blanco para referencia
Pantalla:	LCD transflectivo, visible a pleno sol
Interfaz PC:	USB y SD
Registro de datos:	Espectro en bruto, reflectancia, absorbancia, primera derivada
Medidas:	Absorbancia, segunda derivada
Alimentación:	Batería extraíble recargable de 3100 miliamperios hora, de ion litio
Duración de la batería:	Más de 1600 medidas
Almacenamiento	Tarjeta SD 32 Gg extraible
Cuerpo:	Caja de aluminio sólida de alta resistencia, con protecciones de goma
Dimensiones:	18 cm x 12 cm x 4,5 cm
Peso:	1,05 kg

El segundo equipo NIR empleado fue un espectrofotómetro de bolsillo denominado 'SCiO' y que es fabricado por Consumer Physics (Israel). Se trata de un micro-espectrofotómetro diseñado para estar siempre conectado via Bluetooth a un móvil o tablet, con objeto de transferir automáticamente los datos registrados a la página web del fabricante, donde posteriormente es posible realizar la modelización online. Los detalles técnicos de dicho equipo no son muy abundantes (tabla 2). Debido a la limitada capacidad de su batería interna, sólo fue posible registrar los espectros de las uvas a dos temperaturas (0 y 20ºC) pues fue necesario realizar una recarga de la batería durante las dos horas intermedias.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del espectrofotómetro SCiO (fuente ConsuperPhysics)

Dimensiones	Con cubierta protectora: 67.7 x 40.2 x 18.8mm Sin cubierta: 54 x 36.4 x 15.4mm
Peso	35 gr
Módulo del sensor	27.5 x 9.5 x 3.15mm
Distancia de medida	Desde 0 cm (en contacto) hasta 2 cm
Tiempo de medida	2-5 segundos
Conectividad	Requiere un dispositivo smartphone o Tablet con Bluetooth (de baja energía). Admite registro 'online' (internet) y 'offline' (local)
Rango de temperatura - registro	4-35°C
Rango de temperatura - apagado	-40-85°C
Compatibilidad App	iPhone 5, iOS 9, Android 4.3 y superiores

2.3 Ensayos de referencia

Tras el registro de espectros NIR a 20ºC las uvas fueron sometidas a diferentes medidas de referencia en laboratorio. Se registró el color (reflectancia VIS) de ambas caras de cada baya con un colorímetro de sobremesa (Minolta Chroma Meter; Konica Minolta, NJ, USA) guardando las coordenadas 'Lab ', promediadas por fruto. Una porción de la pulpa fue pesada y secada en horno según protocolo estándar para la estimación de la materia seca (dry matter DM, %). De forma análoga se realizaron dos medidas de DM por baya, que fueron promediadas.

Posteriormente se extrajo el jugo de las bayas y se midió su contenido en sólidos solubles (total soluble solids content TSS, ºBrix) usando un refractómetro digital de mesa (Atago, Japan); se realizaron dos medidas de ºBrix por baya, promediadas posteriormente.

2.4 Procesado de los espectros

Los espectros brutos registrados suelen contener información no relevante, además de información sobre las muestras, que complica su uso en modelos predictivos. Dicha información no relevante puede ser debida a ruido eléctrico, el fondo tras las muestras, la luz dispersada circundante, etc. Es necesario un preprocesado de los datos para disponer de un conjunto de espectros con información fiable para la modelización posterior. [6, 8]. Los métodos quimiométricos proponen diversas rutinas de preprocesado para espectros NIR, como la normalización, el cálculo de derivadas, el método 'standard normal variate' (SNV), la corrección de la dispersión multiplicativa ('multiplicative scattering correction' MSC), el suavizado, etc. En este estudio se han probado los efectos de varias de estas técnicas, incluyendo SNV, la corrección ortogonal ('orthogonal signal correction' OSC), derivadas (primera y segunda) y el suavizado mediante el algoritmo Savitzky–Golay, como pasos previos a la calibración de los modelos de estimación.

Para la creación de los modelos, el método multivariante de regresión por mínimos cuadrados parciales ('partial least squares' PLS) desarrollado por Herman Wold en 1960, requiere menos tiempo de cálculo y proporciona una manera fiable de seleccionar los factores que intervienen en el modelo de entre un grupo de variables altamente correlacionadas, por lo que ha sido empleado frecuentemente en calibración de espectros NIR [4, 8, 14]. En nuestro caso se empleó PLS para crear modelos lineales de estimación de dos parámetros de calidad interna de las uvas (materia seca -DM- y sólidos solubles -TSS-) a partir de la matriz de espectros originales y preprocesados. Se establecieron dos subgrupos de espectros, uno con el 75% de los datos para calibración de los modelos y para validación interna. El otro 25% se empleó para validación posterior externa de los modelos creados. La validación interna se realizó mediante el método de validación cruzada alternando consecutivamente subgrupos de 10 muestras en el set de calibración. La validación interna cruzada ayuda a detectar y evitar problemas de exceso de ajuste en los modelos (overfitting, modelos demasiado adaptados al set de datos, frecuentemente por exceso de variables seleccionadas, muy poco generalizables) o defecto de ajuste (underfitting, modelos con pobre estimación, frecuentemente por escaso número de variables independientes). En el proceso de selección de factores PLS, las variables latentes (LVs) fueron seleccionadas según su valor inferior del error medio cuadrático en la validación cruzada (root mean square error of cross-validation, RMSECV) mediante la aplicación reiterada de la calibración a bloques contiguos de 10 espectros [2, 11]

La capacidad predictiva de los modelos de calibración y validación fue determinada calculando diversos estadísticos, como el coeficiente de determinación (R^2) en los conjuntos de calibración y de validación externa, el error cuadrático medio de calibración (root mean square errors of calibration RMSEC), el error cuadrático medio de validación (root mean square errors of prediction RMSEP), el índice RPD (ratio performance deviation), y la variación (bias) entre el valor real y el estimado de los atributos de calidad de las uvas [7, 13].

Idealmente, un buen modelo debe presentar unos valores de RMSEC y RMSEP lo más bajos posibles, lo que indicará un buen ajuste al set de datos [8]. Un valor más alto de RPD indica un mejor modelo: valores de RPD entre 1.4 y 2 son aceptables para modelos de calibración, valores de RPD mayores 2.5 indican una capacidad de estimación excelente, mientras que un RPD inferior a 1.4 se considera insuficiente para una estimación de un parámetro continuo [10, 12]. El preprocesado de los datos, la creación de los modelos y las validaciones fueron realizadas usando Matlab R2018a (versión 9.4 Release March 2018, The Mathworks, Natick, USA) y el software PLS Toolbox (versión 7, Eigenvector Research, Inc. 2012, WA, USA).

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis quimicos de las muestras

En la Tabla 3 se muestra un resumen de las medidas de referencia en laboratorio de las uvas, tanto del contenido en materia seca (%) como de los azúcares (sólidos solubles, ºBrix). El rango de unos 20 puntos en ambos casos hace que el conjunto de datos sea aceptable para la creación de modelos de estimación de dichos parámetros de calidad interna.

Tabla 3. Estadística descriptiva de las muestras de uva medidas

Parámetros	**Materia seca (DM, %)**	**Sólidos solubles (TSS, ºBrix)**
Número de muestras	450	450
Mínimo	6.1	4.3
Máximo	24.6	21.1
Media	15.8	14.3
Mediana	16.0	14.5
Deviación típica	3.3	3.2
Varianza	11.2	10.3

3.2 Descripción de los espectros

En las Figuras 1 y 2 se muestran los espectros brutos de absorción de todas las muestras medidas, registrados tanto con el equipo Felix F750 (Fig. 1) como con el equipo SCiO (Fig. 2). Se observa que la tendencia general de los espectros es similar, pero hay mucha mayor variabilidad en la altura de los mismos (absorbancia media) en los espectros tomados con el SCiO (escala más amplia) que en los tomados con el F750. La diferente geometría óptica de los dos equipos posiblemente influya en una captación distinta de la luz hasta el sensor, y de la dispersión general de los fotones en el interior de la muestra. Igualmente se observa que la primera parte de algunos espectros (desde 750 hasta 825 nm aprox) es diferente en algunos casos, que corresponden a frutos de la variedad tinta. Ello se debe, seguramente, a compuestos químicos presentes sólo en esta variedad que modifican el patrón de absorción en la zona más cercana al visible.

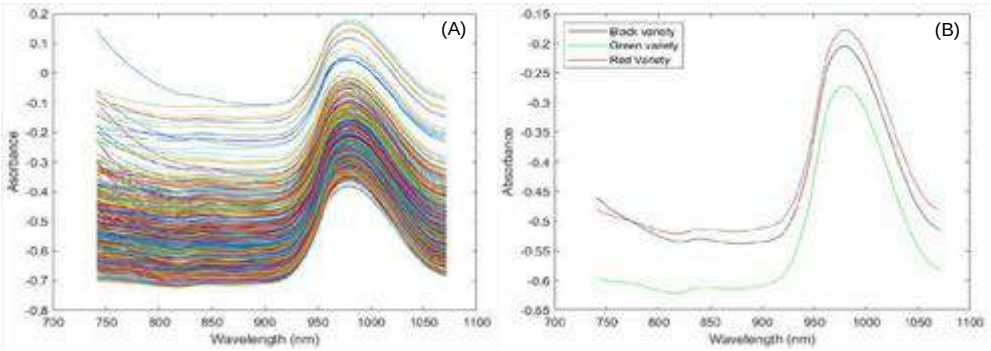


Figura 1. Espectros originales de absorbancia NIR (740 a 1070 nm) de las 450 uvas adquiridos con el equipo F-750 (A). Espectros medios de absorción de las tres variedades (B)

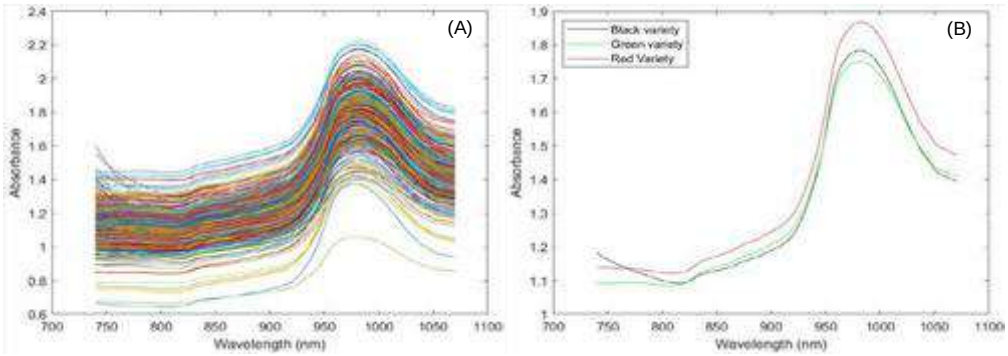


Figura 2. Espectros originales de absorbancia NIR (740 a 1070 nm) de las 450 uvas adquiridos con el equipo SCiO (A). Espectros medios de absorción de las tres variedades (B)

3.3 Efectos de los diferentes preprocesados

En los cuadros siguientes (Tablas 4, 5 y 6) se muestran los estadísticos calculados para todos los modelos PLS calibrados, realizados a partir de espectros originales o de espectros preprocesados (mediante SNV, OSC, primera derivada, segunda derivada y suavizado, respectivamente) para la estimación del contenido en materia seca (DM) con ambos equipos. Aunque no se observaron diferencias significativas entre los métodos de preprocesado, los modelos obtenidos a partir de datos normalizados mediante SNV y OSC produjeron mejores resultados en general a la hora de estimar materia seca (DM) y sólidos solubles (TSS), en ambos instrumentos.

Excepto para el caso de estimación de materia seca en uvas verdes (Tabla 5) todos los demás modelos incluyen más variables (LVs) en el caso de espectros tomados con el equipo SCiO que los modelos construidos con datos tomados con el equipo F750. Aun así, los valores del coeficiente de determinación de los primeros no suelen superar al de los segundos, si bien las diferencias son mínimas.

En las Tablas 7, 8 y 9 se muestran los modelos análogos, en este caso para la estimación del contenido en sólidos solubles (TSS) con ambos equipos de medida. Los resultados son, de nuevo, similares en ambos equipos, si bien el grado de ajuste de los modelos es bastante mayor (R^2 en torno a 0,95) para la estimación de TSS que para la de DM (cercano a 0,7).

Tabla 4. Resultados de los modelos PLS de calibración y validación externa para la estimación de DM en uvas negras

Tipo de espectros	N. de LVs		Calibración						Validación							
			R^2		RMSEC		RPD		R^2		RMSEP		RPD		Bias	
	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S
Original	7	11	0.61	0.71	1.74	1.49	1.60	1.87	0.73	0.69	1.37	1.57	1.92	1.68	-0.20	0.05
SNV	6	13	0.60	0.70	1.74	1.52	1.59	1.83	0.76	0.67	1.29	1.64	2.04	1.60	-0.13	0.16
OSC	6	13	0.63	0.77	1.68	1.33	1.65	2.09	0.74	0.65	1.37	1.76	1.93	1.50	-0.28	-0.12
FD	6	13	0.62	0.75	1.70	1.40	1.63	1.98	0.89	0.14	2.62	3.44	1.00	0.77	-0.40	1.46
SD	6	13	0.61	0.71	1.73	1.49	1.60	1.86	0.74	0.69	1.32	1.64	1.99	1.60	-0.09	0.05
Smoothing	6	13	0.58	0.67	1.78	1.58	1.56	1.76	0.79	0.65	1.20	1.69	2.19	1.56	-0.13	-0.09

SNV = Standard Normal Variate, OSC = Orthogonal Signal Correction, FD = First Derivative, SD = Second Derivative, F = F-750 meter, S = SCiO meter

Tabla 5. Resultados de los modelos PLS de calibración y validación externa para la estimación de DM en uvas verdes

Tipo de espectros	N. de LVs		Calibración						Validación							
			R^2		RMSEC		RPD		R^2		RMSEP		RPD		Bias	
	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S
Original	8	11	0.79	0.77	1.77	1.86	2.22	2.11	0.81	0.84	1.62	1.51	2.32	2.50	-0.22	-0.12
SNV	8	6	0.80	0.70	1.74	2.16	2.26	1.82	0.82	0.84	1.59	1.51	2.37	2.50	-0.28	-0.11
OSC	8	6	0.80	0.71	1.75	2.11	2.25	1.86	0.81	0.81	1.62	1.62	2.34	2.34	-0.14	-0.02
FD	8	6	0.66	0.48	2.27	2.85	1.73	1.38	0.70	0.58	2.36	5.69	1.60	0.67	0.53	3.14
SD	8	6	0.76	0.75	1.91	1.97	2.05	2.0	0.86	0.86	1.42	1.42	2.67	2.67	-0.21	-0.18
Smoothing	8	6	0.76	0.69	1.89	2.19	2.07	1.80	0.84	0.83	1.51	1.53	2.50	2.48	-0.31	0.00

SNV = Standard Normal Variate, OSC = Orthogonal Signal Correction, FD = First Derivative, SD = Second Derivative, F = F-750 meter, S = SCiO meter

Tabla 6. Resultados de los modelos PLS de calibración y validación externa para la estimación de DM en uvas rojas

Tipo de espectros	N. de LVs		Calibración						Validación							
			R^2		RMSEC		RPD		R^2		RMSEP		RPD		Bias	
	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S
Original	8	13	0.93	0.92	0.70	0.75	3.89	3.64	0.53	0.44	1.72	1.91	1.39	1.25	-0.19	-0.09
SNV	8	11	0.94	0.93	0.66	0.74	4.14	3.68	0.47	0.32	1.87	2.20	1.27	1.08	-0.21	-0.07
OSC	8	11	0.95	0.93	0.64	0.74	4.30	3.67	0.53	0.47	1.73	1.83	1.38	1.30	-0.22	-0.03
FD	8	11	0.70	0.66	1.48	1.59	1.84	1.72	0.26	0.04	2.51	2.45	0.95	0.97	0.71	-0.14
SD	8	11	0.94	0.93	0.67	0.74	4.05	3.70	0.50	0.45	1.79	1.88	1.33	1.27	-0.20	-0.09
Smoothing	8	11	0.93	0.92	0.72	0.81	3.82	3.38	0.49	0.43	1.81	1.92	1.32	1.24	-0.15	-0.07

SNV = Standard Normal Variate, OSC = Orthogonal Signal Correction, FD = First Derivative, SD = Second Derivative, F = F-750 meter, S = SCiO meter

Tabla 7. Resultados de los modelos PLS de calibración y validación externa para la estimación de TSS en uvas negras

Tipo de espectros	N. de LVs		Calibración						Validación							
			R^2		RMSEC		RPD		R^2		RMSEP		RPD		Bias	
	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S
Original	14	17	0.98	0.95	0.31	0.46	7.04	4.73	0.94	0.95	0.50	0.52	4.20	4.02	0.01	-0.00
SNV	14	14	0.99	0.96	0.26	0.41	8.35	5.25	0.96	0.94	0.43	0.54	4.95	3.91	-0.03	0.05
OSC	14	14	0.99	0.95	0.25	0.47	8.81	4.64	0.96	0.95	0.44	0.49	4.81	4.22	-0.02	0.02
FD	14	14	0.83	0.79	0.88	0.98	2.45	2.21	0.72	0.29	4.16	2.00	0.51	1.05	-0.29	0.97
SD	14	14	0.98	0.96	0.30	0.46	7.24	4.76	0.97	0.94	0.37	0.55	5.77	3.85	-0.04	0.08
Smoothing	14	14	0.98	0.94	0.28	0.54	7.62	4.04	0.96	0.94	0.41	0.53	5.17	3.99	-0.04	0.07

SNV = Standard Normal Variate, OSC = Orthogonal Signal Correction, FD = First Derivative, SD = Second Derivative, F = F-750 meter, S = SCiO meter

Tabla 8. Resultados de los modelos PLS de calibración y validación externa para la estimación de TSS en uvas verdes

Tipo de espectros	N. de LVs		Calibración						Validación							
			R^2		RMSEC		RPD		R^2		RMSEP		RPD		Bias	
	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S
Original	9	16	0.97	0.98	0.61	0.46	6.01	8.01	0.97	0.94	0.57	0.87	6.15	4.02	-0.12	-0.08
SNV	9	15	0.99	0.99	0.39	0.42	9.48	8.60	0.99	0.97	0.37	0.62	9.58	5.65	-0.15	-0.04
OSC	9	15	0.99	0.98	0.41	0.44	9.01	8.20	0.98	0.94	0.45	0.87	7.83	4.05	-0.12	-0.10
FD	9	15	0.72	0.76	1.94	1.77	1.88	2.06	0.90	0.59	3.10	2.71	1.13	1.29	-0.23	1.12
SD	9	15	0.98	0.99	0.45	0.43	8.11	8.43	0.98	0.94	0.48	0.89	7.30	3.95	-0.12	-0.09
Smoothing	9	15	0.96	0.98	0.44	0.51	8.30	7.12	0.98	0.96	0.47	0.75	7.43	4.68	-0.14	-0.02

SNV = Standard Normal Variate, OSC = Orthogonal Signal Correction, FD = First Derivative, SD = Second Derivative, F = F-750 meter, S = SCiO meter

Tabla 9. Resultados de los modelos PLS de calibración y validación externa para la estimación de TSS en uvas rojas

Tipo de espectros	N. de LVs		Calibración						Validación							
			R^2		RMSEC		RPD		R^2		RMSEP		RPD		Bias	
	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S
Original	8	14	0.98	0.95	0.32	0.55	8.02	4.68	0.96	0.88	0.46	0.80	4.85	2.80	0.03	-0.03
SNV	8	12	0.99	0.97	0.25	0.44	10.1	5.80	0.97	0.94	0.36	0.54	6.22	4.10	0.02	0.01
OSC	8	12	0.99	0.96	0.26	0.51	9.83	5.03	0.97	0.90	0.38	0.73	5.91	3.08	0.05	0.04
FD	8	12	0.62	0.71	1.59	1.38	1.62	1.86	0.32	0.60	3.60	4.63	0.62	0.48	1.90	3.14
SD	8	12	0.99	0.96	0.30	0.50	8.45	5.13	0.97	0.89	0.39	0.76	5.79	2.94	0.03	0.03
Smoothing	8	12	0.98	0.95	0.32	0.56	8.08	4.56	0.97	0.92	0.40	0.92	5.56	3.48	0.04	0.05

SNV = Standard Normal Variate, OSC = Orthogonal Signal Correction, FD = First Derivative, SD = Second Derivative, F = F-750 meter, S = SCiO meter

A modo de ejemplo, en las figuras siguientes (Fig 3 y 4) se muestran los gráficos de los mejores modelos de regresión lineal realizados con espectros registrados con el equipo F-750 (Figura 3) para la estimación de DM (arriba) y de TSS (abajo), tanto para el modelo de calibración (izquierda) como para la validación final (derecha). Igualmente la Figura 4 muestra modelos análogos, en este caso construidos a partir de espectros tomados con el equipo SCiO.

En ambos casos se confirma la mejor estimación del contenido en azúcares que el de materia seca. Los dos equipos ofrecen errores de estimación bajos y valores de RPD aceptables,

especialmente en el caso del dispositivo Felix F750 y el modelo de estimación de azúcares solubles. Los modelos construidos con el equipo SCiO, en general, presentan mayor variabilidad.

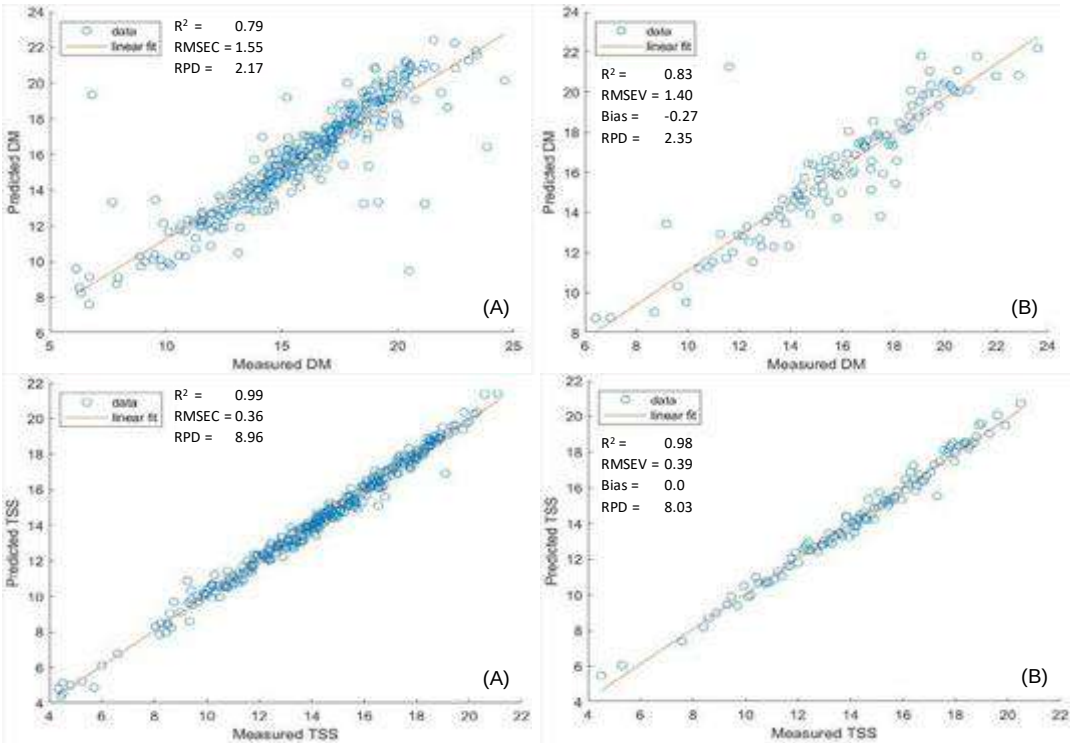


Figura 3. Equipo Felix F750: mejores modelos PLS de calibración (A) y validación (B) para la estimación de materia seca (DM, arriba) y sólidos solubles (TSS, abajo)

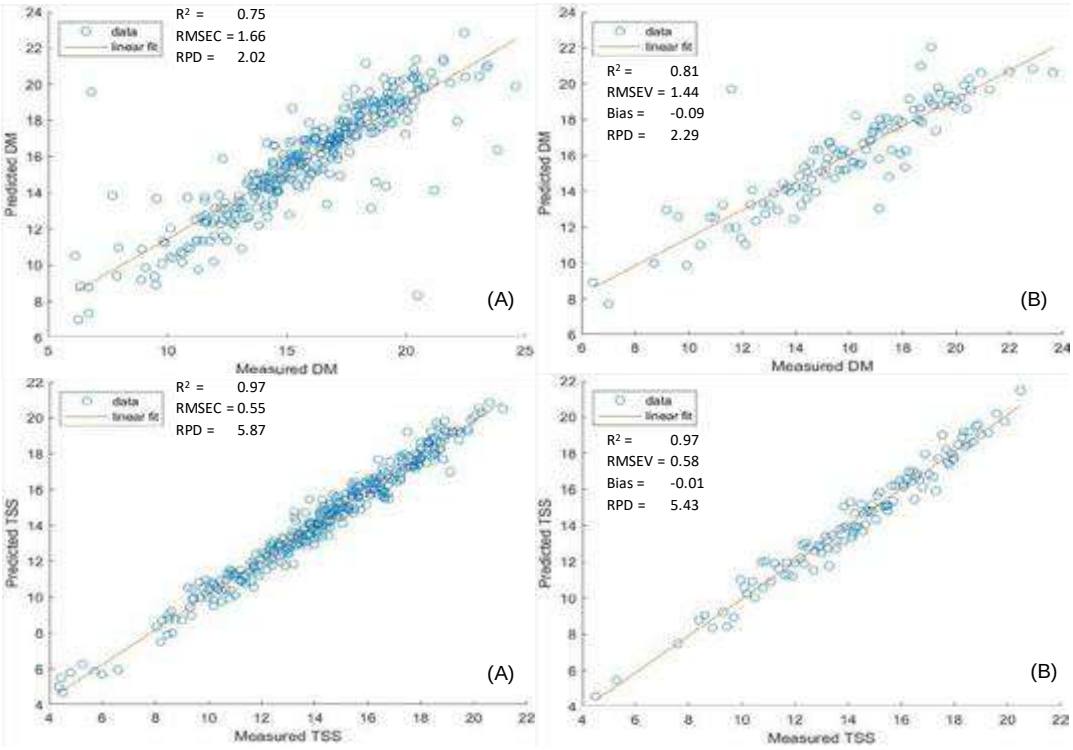


Figura 4. Equipo SCiO: mejores modelos PLS de calibración (A) y validación (B) para la estimación de materia seca (DM, arriba) y sólidos solubles (TSS, abajo)

4. Conclusiones

Se ha comprobado el funcionamiento de dos equipos comerciales de espectrofotometría NIR, el Felix F750 y el SCiO, sobre muestras de uvas de mesa, de tres variedades. Si bien difieren en su construcción y funcionamiento, los resultados obtenidos son comparables y satisfactorios. Se ha aplicado una variedad de técnicas de preprocesamiento de los espectros infrarrojos (sin procesado, SNV, OSC, 1ª y 2ª derivadas, suavizado) y se han desarrollado numerosos modelos de calibración para la estimación del contenido en materia seca y de sólidos solubles. Todos los modelos fueron validados tanto internamente (validación cruzada mediante bloques) y externamente (usando el 25% de la base de datos). Los resultados obtenidos muestran que ambos equipos tienen un desempeño correcto en la estimación del contenido en sólidos solubles, con valores de R^2 superiores a 0,9 en la mayoría de los casos; en cambio los modelos de estimación de la materia seca se obtuvieron valores de R^2 cercanos a 0,6-0,7 en muchos casos. El ajuste y errores de los modelos creados a partir del equipo Felix F750 son ligeramente mejores, si bien no hay grandes diferencias.

5. Agradecimientos

A todo el personal de la Universidad de California – Davis, por la sincera acogida y enorme disponibilidad para la realización de la estancia de C. Valero durante el verano de 2017, y a la financiación recibida para la misma desde el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de España, en la Modalidad A del Programa de estancias de movilidad de profesores e investigadores españoles en centros extranjeros (becas Salvador de Madariaga).

Referencias

1. Barnaba FE, Bellincontro A, Mencarelli F. Portable NIR-AOTF spectroscopy combined with winery FTIR spectroscopy for an easy, rapid, in-field monitoring of Sangiovese grape quality. J Sci Food Agric. 2014 Apr;94(6):1071-7. doi: 10.1002/jsfa.6391
2. Bona, E., Março, P.H., Valderrama, P., 2018. Chemometrics Applied to Food Control, in: Alexandru, G., Holban, A.-M. (Eds.), Food Control and Biosecurity. Elsevier Inc., London, pp. 105–133. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811445-2/00004-0
3. Chauhan, Om & Lakshmi, S & Pandey, Arun & Ravi, N & Gopalan, Natarajan & K. Sharma, R. (2017). Non-destructive Quality Monitoring of Fresh Fruits and Vegetables. Defence Life Science Journal. 2. 103. 10.14429/dlsj.2.11379.
4. Dale, L.M., Thewis, A., Rotar, I., Pierna, J.A.F., Boudry, C., Vidican, R.M., Baeten, V., 2012. Chemometric tools for NIRS and NIR hyperspectral imaging. Bull. UASVM Agric. 69, 70–76.
5. Fernández-Novales J, López MI, Sánchez MT, García-Mesa JA, González-Caballero V. Assessment of quality parameters in grapes during ripening using a miniature fiber-optic near-infrared spectrometer. Int J Food Sci Nutr. 2009;60 Suppl 7:265-77. doi: 10.1080/09637480903093116Fluvià Sabio, S., 2015. NIR techniques and chemometric data analysis applied to food adulteration detection. Universitat Politècnica de Catalunya.
6. Gupta, S.D., Ibaraki, Y., 2015. Plant image analysis. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL. https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b17441
7. Gutierrez Daniel, 2014. Ask a data scientiest: the bias vs variance tradeoff. Retrieved on 2019-03-25 [WWW Document]. https://doi.org/https://insidebigdata.com/2014/10/22/ask-data-scientist-bias-vs-variance-tradeoff/
8. Khodabakhshian, R., Emadi, B., Khojastehpour, M., Golzarian, R., Sazgarnia, A., 2017. Non-destructive evaluation of maturity and quality parameters of pomegranate fruit by visible / near infrared spectroscopy. Int. J. Food Prop. 20, 41–52. https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1126725
9. Nicolaı B.M., Beullensa K, Bobelyna E, Peirsa A, Saeysa W, Theronb K, Lammertyn J. Nondestructive measurement of fruit and vegetable qualityby means of NIR spectroscopy: A Review. Postharvest Biology and Technology 46 (2007) 99–118

10. Santos, L.R. dos, Zangirolami, M. de S., Silva, N.O., Valderrama, P., Março, P.H., 2018. Rapid non-invasive assessment of quality parameters in ground soybean using near-infrared spectroscopy. Pesqui. Agropecuária Bras. 53, 97–104. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000100011
11. Santos, P.M., Colnago, L.A., 2018. Comparison Among MIR, NIR, and LF-NMR Techniques for Quality Control of Jam Using Chemometrics. Food Anal. Methods 11, 2029–2034. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12161-018-1195-0
12. Suhandy, D., Yulia, M., 2017. The Use of Partial Least Square Regression and Spectral Data in UV-Visible Region for Quantification of Adulteration in Indonesian Palm Civet Coffee 2017.
13. Walther, B.A., Moore, J.L., 2005. The concepts of bias, precision and accuracy, and their use in testing the performance of species richness estimators, with a literature review of estimator performance 6.
14. Yeniay, O., Goktas, A., 2002. A comparison of partial least squares regression with other prediction methods. J. Math. Stat. 31, 99–111.
15. Urraca R, Sanz-Garcia A, Tardaguila J, Diago MP. Estimation of total soluble solids in grape berries using a hand-held NIR spectrometer under field conditions. J Sci Food Agric. 2016 Jul;96(9):3007-16. doi: 10.1002/jsfa.7470.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Frutas de hueso listas para consumo en punto de venta: instrumentación para la evaluación de la jugosidad

Eva Cristina Correa[1], César Asimbaya[1], Paola Baltazar[1], Belén Diezma[1]

[1] Laboratorio de Propiedades Físicas-Tecnologías Avanzadas en Agroalimentación (LPF-TAGRALIA), ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Puerta de Hierro, 2 - 4, 28040 Madrid, España, belen.diezma@upm.es

Resumen: La implantación de nuevas variedades de frutas de hueso, especialmente melocotones y nectarinas, ha aumentado la producción superficial, pero también la pérdida de ciertos atributos de calidad organoléptica. Complementariamente, en los últimos años está cobrando importancia comercial un segmento de consumidores que demanda frutos listos para comer en los lineales. Lo que trata de conseguirse mediante la aplicación de protocolos post-cosecha de pre-maduración y conservación basados en el binomio tiempo-temperatura. Sin embargo, estos procedimientos, validados en variedades anteriores, han mostrado deficiencias en las nuevas variedades, principalmente en lo que se refiere a la jugosidad, describiéndose frutos secos y con texturas gomosas. En este trabajo se estudian diferentes procedimientos instrumentales basados en propiedades ópticas y mecánicas para la evaluación objetiva de la jugosidad en melocotones y nectarinas sometidos a diferentes tratamientos post-cosecha que persiguen la obtención de frutos "*ready to eat*". Durante la campaña 2018 se han realizado medidas en 16 fechas de recolección, evaluando 5 variedades de melocotones y 9 variedades de nectarinas, tanto de carne blanca como amarilla. La jugosidad instrumental ha presentado un rango comprendido entre 1 y 10 cm2, mostrando diferencias significativas entre los protocolos postcosecha, especialmente en aquellos en los que se incluye vida en estantería. La evaluación sensorial muestra una alta correlación entre el descriptor crujientez y el descriptor jugosidad (-0.93). Al relacionar las determinaciones instrumentales de la jugosidad con la evaluación sensorial se constata que en la mayor parte de las variedades, aquellos frutos calificados como de alta jugosidad presentan áreas de jugo superiores a 4 cm^2. Lo que constituye una indicación instrumental objetiva de utilidad para el sector en la evaluación del estado de jugosidad de los frutos de hueso.

Palabras clave: Melocotón, nectarina, "*ready to eat*", calidad organoléptica, postcosecha.

1. Introducción

Los melocotones [Prunus persica (L.) Batsch] y nectarinas [P. persica (L.) Batsch, var. nectarina] tienen un endocarpio característico lignificado (hueso) que encierra la semilla, un mesocarpio carnoso y un exocarpio delgado. Sin embargo, las células del mesocarpio de las nectarinas tienen espacios intercelulares más pequeños que las de los melocotones y son, por lo tanto, más densos [1].

La mejora genética en frutos de hueso ha sido intensa en los últimos años, especialmente en melocotones y nectarinas, surgiendo de esto nuevas variedades precoces, más resistentes y

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3433

productivas, pero con pérdida de calidad organoléptica (falta de jugosidad principalmente y aparición de texturas gomosas) [2].

La lanosidad es un atributo sensorial negativo vagamente definido, consecuencia de un desorden textural derivado de un almacenamiento frigorífico inadecuado. La lanosidad (*woolliness*) se caracteriza por una falta de jugosidad y una textura harinosa [3].

Melocotones y nectarinas maduran y se deterioran rápidamente a temperatura ambiente. Por lo tanto, el almacenamiento en frío se utiliza para ralentizar estos procesos y el desarrollo de la descomposición. El rango ideal para almacenamiento de melocotones y nectarinas es de 0-3ºC, a esta temperatura la pulpa reducirá la incidencia de rotura interna o fruto lanoso [4].

El daño por frío está genéticamente influenciado (hay variedades que son más susceptibles que otras) y es consecuencia de una combinación inadecuada de temperatura y período de almacenamiento. Si el almacenamiento de melocotones a temperaturas entre 2-8°C excede aproximadamente a dos semanas se puede inducir falta de jugosidad en los frutos [3].

Actualmente se aplican protocolos postcosecha de premaduración y conservación basados en el binomio tiempo-temperatura que están validados para variedades tradicionales, pero que han mostrado deficiencias con las nuevas variedades, dando lugar a frutos menos jugosos y con texturas gomosas.

Por otro lado existe una tendencia hacia la compra de fruta madura "lista para comer" o "*ready to eat*" en los lineales, lo cual obliga a los productores a asegurar un volumen de producto que llegue en condiciones de madurez de consumo [5]. La firmeza de la zona ecuatorial de los melocotones y nectarinas es un buen indicador de la maduración. El ensayo normalizado Magness Taylor, es el que se utiliza de forma habitual en las empresas para identificar los lotes "*ready to eat*"[4]. Se constata sin embargo, que la categorización de los lotes en función de su firmeza no es suficiente para identificar adecuadamente los frutos maduros, es decir, blandos y jugosos, que el consumidor de la categoría comercial "*ready to eat*" busca. Sin embargo, para la determinación de la jugosidad no existe un procedimiento generalmente aceptado por los actores de la cadena logística, aunque se han sucedido diversos trabajos de investigación con el objetivo de especificar procedimientos instrumentales para la estimación de la jugosidad tanto mecánicos [6, 7], como ópticos [8] y sensoriales [9].

En este trabajo se estudian procedimientos instrumentales basados en propiedades ópticas y mecánicas para la evaluación objetiva de la jugosidad en nuevas variedades de melocotones y nectarinas sometidos a diferentes tratamientos postcosecha que persiguen la obtención de frutos "*ready to eat*".

2. Materiales y métodos

2.1. Material vegetal y tratamientos postcosecha

Para los ensayos se utilizaron melocotones y nectarinas en 16 fechas de recolección. Dicho material vegetal fue cultivado en la región noroeste de Murcia durante la campaña 2018 procedentes de la empresa Frutas Esther, S.A. El periodo de ensayos abarcó desde la semana 21 (2ª quincena de mayo) hasta la semana 38 (1ª quincena de septiembre). Las variedades ensayadas pertenecen a las nuevas variedades de alto contenido en sólidos solubles denominadas "*super sweet*", destinadas a la obtención de frutos "*ready to eat*". De las 9 variedades de nectarinas 4 fueron de pulpa blanca y 5 de pulpa amarilla, y de las 5 variedades de melocotones 3 fueron de pulpa blanca y 2 de pulpa amarilla. Se utilizaron un total de 1367 frutos: 485 fueron melocotones y 882 fueron nectarinas como se detalla en la Tabla 1.

Se aplicaron distintos protocolos post-cosecha, caracterizados por incluir siempre una fase de refrigeración a 3°C (F), que puede continuar con una fase de premaduración (P) intermedia en cámara a 20 °C y finalizarse con un periodo de vida en estantería (VE) de duración variable. La duración total del tratamiento postcosecha aplicado a los frutos fue muy variable oscilando entre

los 6 y 14 días, dependiendo de la combinación y duración de las fases de F, P y VE utilizada, siempre con el objetivo de conseguir un rango de variación máximo en los niveles de jugosidad de los frutos. Todos los lotes de frutos se ensayaron antes de iniciar su protocolo post-cosecha, el día después de recolección (R). Estos protocolos están descritos en la Tabla 2.

Tabla 1. Variedades de melocotones y nectarinas de pulpa blanca y amarilla ensayadas

Producto	Pulpa	Variedad	Fecha de recolección	nº frutos
Melocotón	blanca	Fresh Whitte	1 junio	84
Melocotón	blanca	Extreme 480	31 agosto	107
Melocotón	blanca	Extreme 493	7 septiembre	120
Melocotón	amarilla	Summer Rich	6 julio	100
Melocotón	amarilla	Extreme 460	24 agosto	74
Nectarina	blanca	Baltica	18 mayo	78
Nectarina	blanca	Garaco	1 junio	81
Nectarina	blanca	Garcica	15 junio	100
Nectarina	blanca	Extreme 895	7 septiembre	229
Nectarina	amarilla	Gartairo	15 junio	75
Nectarina	amarilla	Luciana	6 julio	100
Nectarina	amarilla	Red Jim	24 agosto	69
Total frutos				1367

Tabla 2. Protocolos post-cosecha ensayados, se sombrean en gris los protocolos que incluyen un periodo de vida en estantería. R: Recolección/Recepción; F: Frío, P: Premaduración; VE: Vida en estantería

Código	Descripción	Días postcosecha
A	R	2
B	R/F/P/F	7
J	R/F/P/F/VE	13-14
C	R/F	8
C_anom	R/P	6-7
G	R/VE	6
H	R/F/VE	12
D	R/F/P_f	8-9
E	R/F/P/VE	9-12

2.2. Metodología.

Cada fruto fue caracterizado en cada día de ensayo mediante su peso (P, kg); contenido en sólidos solubles (SS,°Brix), determinado a partir de unas gotas de zumo con un refractómetro digital ATAGO PR-101; Firmeza instrumental: mediante penetrómetro de sobremesa específico para frutos modelo FTA con un control básico de los parámetros de medida realizando el ensayo normalizado Magness Taylor (MT, N), se registró la fuerza máxima (firmeza) en N.

Para la determinación de la jugosidad y el contenido en agua de los frutos se realizaron los siguientes ensayos de referencia:

- Contenido de agua de los frutos (H, %); el porcentaje de agua sobre peso fresco de los frutos se determinó desecando aproximadamente 20 gramos de pulpa en estufa a 103°C hasta peso constante, mediante la expresión $H = (P_0 - P_f)/P_0 \cdot 100$.

- Jugosidad instrumental (AJUGO2, cm^2); cuantificación del jugo fácilmente extraíble de la pulpa mediante ensayo mecánico específico en FTA (descrito por [6]) en el que se recoge el zumo extravasado de la muestra de fruta en un papel absorbente estandarizado. La jugosidad instrumental se define como el área mojada (cm^2) sobre el papel.
- Jugosidad sensorial; se realizó un análisis sensorial mediante un panel de cata constituido por tres catadores, entrenados previamente para evaluar en los frutos los descriptores "jugosidad" y "crujientez". La escala fue de 0 a 9, correspondiendo el valor de 0 a la menor presencia del descriptor en la muestra y 9 a la máxima presencia. Se utiliza el valor promedio de las puntuaciones de los tres catadores para cada fruto.

Complementariamente se adquirió el espectro NIR de reflectancia en la zona ecuatorial de cada fruto sobre la cara más coloreada. Se empleó un espectrofotómetro de sobremesa Hamamatsu con un rango de 896 a 1684 nm y una resolución espectral de 3 nm. A partir de los espectros de reflectancia relativa se han generado modelos de estimación de las variables relativas a la jugosidad y al contenido de agua de los frutos mediante la aplicación de regresiones de mínimos cuadrados parciales (PLS, por sus siglas en inglés).

3. Resultados y discusión

3.1. Contenido de agua en el fruto

La Figura 1 muestra la evolución del contenido en agua del fruto en el momento de la recolección para melocotones y nectarinas en función de la variedad a lo largo de toda la campaña. Se observa una amplio rango de variación del contenido en agua en el caso de las nectarinas, entre el 90.7% de media para las nectarinas cosechadas del 1 al 15 de junio y el 82.7% para las cosechadas del 24 de agosto al 14 de septiembre. En el caso de los melocotones el rango de variación fue mucho menor oscilando entre el 89.7% a primeros de julio y el 84.8% a finales de agosto. El análisis de varianza corrobora la influencia de la fecha de recolección sobre el contenido en humedad de los frutos que disminuye significativamente ($F=105.7$, $p<0.05$) en las variedades más tardías. El almacenamiento postcosecha de forma general no produce cambios significativos en el contenido inicial de humedad de los frutos, aunque hay variedades que tras un protocolo de más de 10 días incluyendo vida en estantería experimentan mermas de hasta un 6% sobre peso fresco, lo que se sitúa en el límite que establece [10] para la apreciación visual de la marchitez.

3.2. Ensayos mecánicos

La Figura 2 muestra la evolución de la firmeza del fruto resultado del análisis factorial de varianza en función del tratamiento postcosecha (izquierda) y de los días de vida postcosecha (derecha) para melocotones y nectarinas. La Figura 2 (izquierda) indica que el tipo de tratamiento postcosecha utilizado tiene, como no podía ser de otro modo, un efecto significativo ($F=229.4$, $p<0.05$) en el ablandamiento del fruto, identificándose los tratamientos J, H y C_anom como los que de forma general permiten la maduración de los frutos dando como resultado frutos blandos con valores promedio de firmeza MT < 20 N, valor que la bibliografía considera como el límite entre listo para comprar y listo para comer [10]. Si se observa la evolución de la firmeza con los días postcosecha se observa que sólo aquellos tratamientos con una duración de vida postcosecha superior a los 12 días conducen al ablandamiento significativo ($F=135.19$, $p<0.05$) de los frutos por debajo de los 20 N. Los tratamientos J y H son tratamientos que incluyen premaduración y un periodo de vida en estantería superior a tres días con una duración total del protocolo mayor a 12 días. El tratamiento C_anom de 6 días de duración incluye un periodo de premaduración

continuado a 20ºC. La Figura 2 muestra también que los melocotones son significativamente más susceptibles al ablandamiento que las nectarinas (F=76.4, p<0.05), evolucionando bajo tratamientos que no son efectivos para las variedades de nectarinas estudiadas; este es el caso del tratamiento E que de nuevo se caracteriza por incluir un periodo de vida en estantería superior a 4 días con una duración total del protocolo postcosecha mayor a 12 días.

a. ***b.***

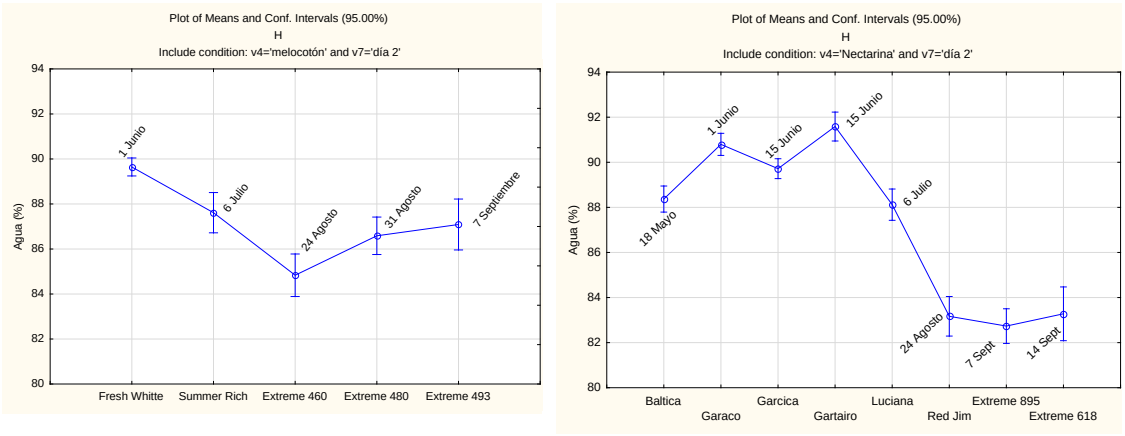


Figura 1. Porcentaje de agua sobre peso fresco de las variedades de melocotones (a) y nectarinas (b) en el momento de la recolección/recepción (se indica la fecha de recolección de cada variedad).

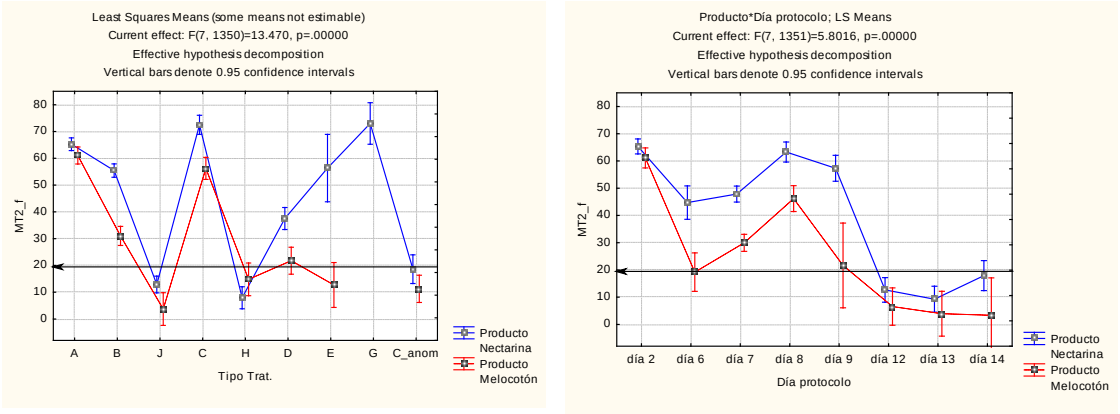


Figura 2. Resultado del análisis factorial de varianza para la variable firmeza MT (N) frente al tipo de tratamiento postcosecha y producto (izquierda) y dias de protocolo postcosecha y producto (derecha). La flecha horizontal indica el límite superior de 20 N que caracteriza a los frutos blandos.

3.3. Jugosidad sensorial

De forma análoga al punto 3.2. la Figura 3 muestra la evolución en este caso de la jugosidad sensorial, resultado del análisis factorial de varianza en función del tratamiento postcosecha (izquierda) y de los días de vida postcosecha (derecha) para melocotones y nectarinas. El tratamiento postcosecha utilizado tiene un efecto significativo (F=211.5, p<0.05) en la jugosidad del fruto. Según el panel de expertos, un fruto categorizado como jugoso es aquel que tiene una puntuación en el descriptor jugosidad por encima de 6. Atendiendo a este valor se identifican de nuevo los tratamientos J, H y C_anom como los que de forma general permiten el desarrollo de la jugosidad de melocotones y nectarinas. Si se observa la evolución de la jugosidad con los días postcosecha ((F=143.67, p<0.05), sólo aquellos tratamientos con una duración de vida postcosecha

superior a los 12 días dan como resultado frutos de jugosidad alta. Esta evolución especular de la jugosidad sensorial y de la firmeza de los frutos con el protocolo postcosecha queda corroborada en la Figura 3, que muestra que existe una correlación negativa significativa (r=-0.69) entre ambas variables. Se observa también una correlación negativa entre la jugosidad y la crujientez sensorial (-0.93).

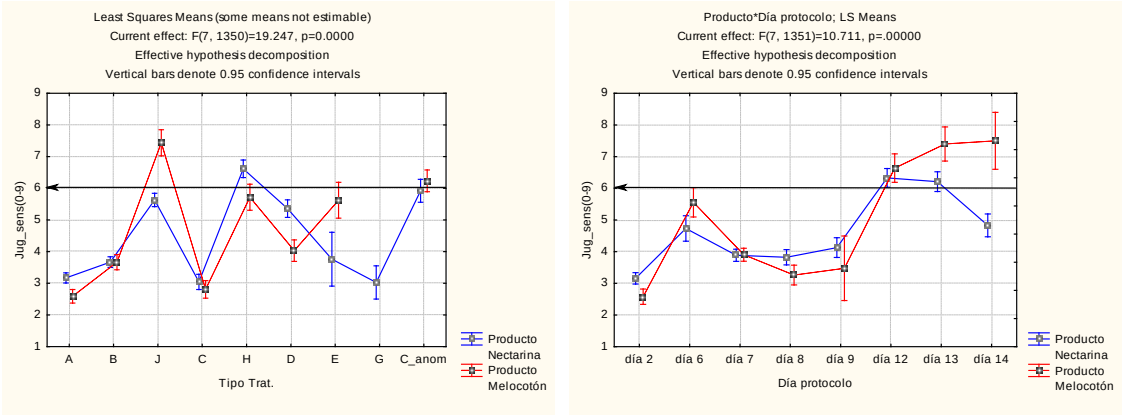


Figura 3. Resultado del análisis factorial de varianza para la variable jugosidad sensorial frente al tipo de tratamiento postcosecha y producto (izquierda) y días de protocolo postcosecha y producto (derecha). La flecha horizontal indica el límite inferior de 6 puntos que caracteriza a los frutos jugosos.

El panel de expertos define los frutos en madurez organoléptica como frutos blandos, que corresponderían con frutos con firmeza MT menor a 20 N, y jugosos, con puntuación en jugosidad sensorial por encima 6.

Atendiendo a estos límites se propone establecer tres categorías de firmeza: frutos duros MT≥40, blandos MT<20 N y de firmeza intermedia para el resto; y tres categorías de jugosidad sensorial de los frutos: frutos de jugosidad alta con jugosidad sensorial ≥6, de jugosidad baja con puntuación en jugosidad sensorial < 4, y de jugosidad intermedia para los que están entre ambos límites. Si se aplica esta categorización al conjunto de la población de melocotones y nectarinas se obtiene el resultado que aparece en la Figura 4. De los 1367 frutos ensayados sólo un 33% evolucionan hasta alcanzar una firmeza baja y sólo un 21% son capaces de desarrollar un jugosidad elevada tras los distintos tipos de protocolos postcosecha implementados.

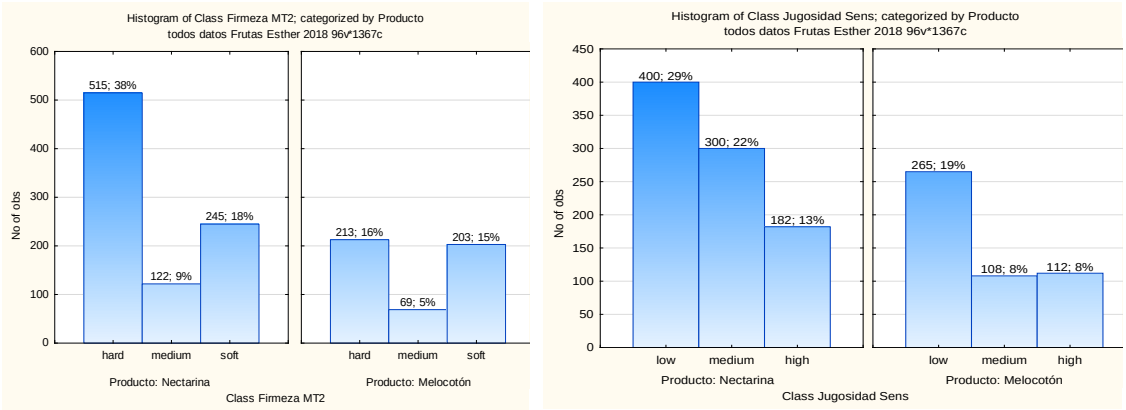


Figura 4. Histogramas de la distribución de la población de melocotones y nectarinas según las clases de firmeza instrumental (izquierda) y según las clases de jugosidad sensorial (derecha).

3.4. Identificación de frutos "ready to eat"

La jugosidad instrumental ha presentado un rango comprendido entre 1 y 15 cm^2. Existe cierta correlación significativa ($p<0.05$) y positiva entre la jugosidad instrumental y la jugosidad sensorial, aunque con un valor de 0.53. Se observa que el 85% de la población presenta valores de jugosidad instrumental por debajo de 4 cm^2, y sólo un 15% presenta valores por encima de 4 cm^2, segregando los protocolos post-cosecha en los que se incluye premaduración y vida en estantería, lo que supone duraciones de protocolos superiores a 9 días (áreas por encima de 4 cm^2) Figura 5. Se constata así que el procedimiento es poco sensible en los estadios de jugosidad sensorial baja. Por ello se procede a un análisis mediante la generación de categorías en función de los valores de firmeza y la jugosidad sensorial.

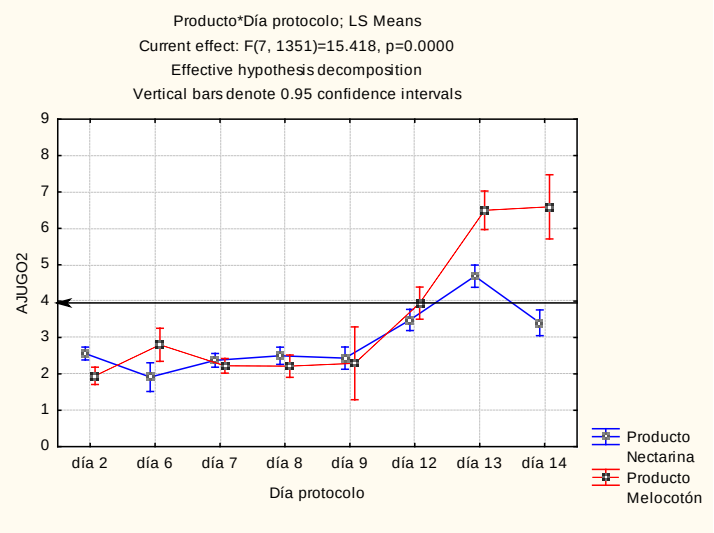


Figura 5. Resultado del análisis factorial de varianza para la variable jugosidad instrumental frente a días de protocolo postcosecha y producto. La flecha horizontal indica el límite inferior de 4 cm2 que caracteriza a los frutos jugosos

El análisis de la jugosidad instrumental de los frutos categorizados como blandos y jugosos, indica que el área de jugo promedio en los melocotones y nectarinas pertenecientes a esta clase es de 4.55 (±2.35) cm^2 y de 4.50 (±2.24) cm^2 respectivamente. Además el 90% de los frutos de esta clase tienen un área de jugo por encima de 2.25 cm^2 en melocotones y de 2.26 cm^2 en nectarinas. La Figura 6 muestra la representación de la firmeza instrumental MT (N) frente a la jugosidad instrumental (cm^2) de todos los melocotones (izquierda) y nectarinas (derecha). Sobre la Figura 6 se han delimitado en el cuadrante inferior derecho los frutos blandos (MT<20 N) con jugosidad instrumental superior a 2.25 cm^2 en melocotones y de 2.26 cm^2 en nectarinas, identificándose cada individuo en función de la categoría de jugosidad sensorial a la que pertenece. Se observa que el 88.4% de los melocotones sensorialmente jugosos (puntos verdes) y el 72.0% de las nectarinas de elevada jugosidad se sitúan en dicho cuadrante.

La Figura 7 vuelve a indentificar los tratamientos que incluyen periodos prolongados de vida en estantería en protocolos postcosecha de duración superior a los 12 días, J, H C_anom y E en melocotones y J y H principalmente en nectarinas como los protocolos ensayados capaces de desarrollar frutos blandos y de alta jugosidad.

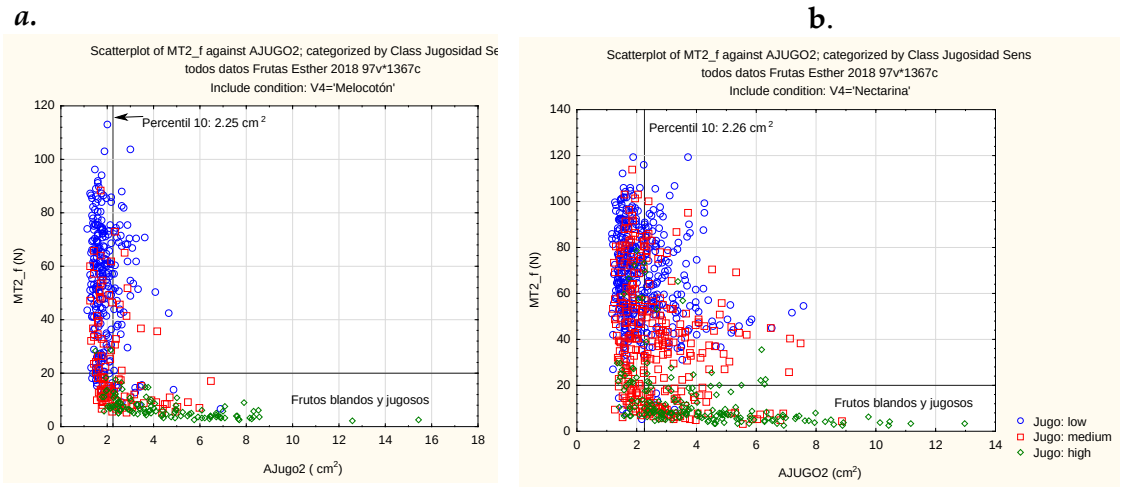


Figura 6. Representación de la dispersión de la jugosidad instrumental de los frutos según su firmeza instrumental, categorizados según la clase de jugosidad sensorial a la que pertenecen melocotones (a) y nectarinas (b). Las líneas negras indican los límites de firmeza y jugosidad que delimitan a los frutos blandos y jugosos.

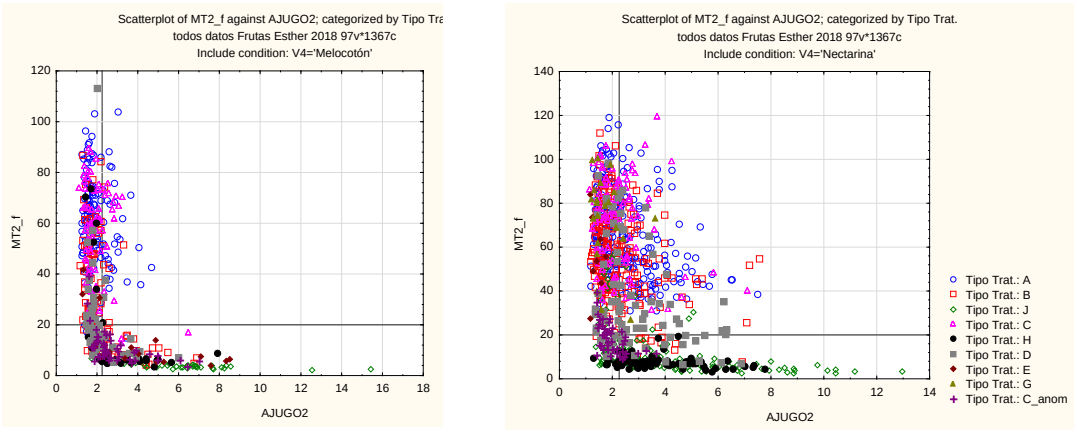


Figura 7. Representación de la dispersión de la jugosidad instrumental de los frutos según su firmeza instrumental, categorizados en función del tipo de tratamiento postcosecha aplicado a melocotones (a) y nectarinas (b). Las líneas negras indican los límites de firmeza y jugosidad que delimitan a los frutos blandos y jugosos

3.5. Estimaciones NIR

La Figura 8 y la Tabla 3 muestran el resultado de los modelos de estimación PLS aplicados sobre los espectros NIR de melocotones y nectarinas utilizando como referencia distintas variables relacionadas con la jugosidad de los frutos: humedad o contenido en agua del fruto, jugosidad sensorial y jugosidad instrumental.

Los modelos PLS obtenidos para los melocotones tienen un coeficiente de determinación entre el 0.67 y el 0.76, es decir que la varianza explicada por estos modelos oscila entre el 67% y el 76%. El SECV indica un error de estimación del 1.6% en la humedad, de 1.25 cm² en la jugosidad instrumental y 1.29 puntos en el caso de la jugosidad sensorial, estos errores junto con un valor de RPD que está próximo a 1.5, indican que estos modelos son como mucho capaces de generar estimaciones válidas para distinguir sólo entre categorías de frutos basadas en los valores de estas variables. En el caso de las nectarinas, se encuentra que el modelo PLS para estimar el contenido

de humedad de los frutos es mucho más robusto, alcanzando un 93% de varianza explicada y un RPD entre 2 y 3 lo que indica que la predicción cuantitativa de esta variable es posible incluso en los extremos. Esta diferencia entre la capacidad predictiva del modelo PLS aplicado a melocotones y aplicado a nectarinas es debida a que el rango de variación de la humedad en nectarinas es del 8%, frente a sólo el 2% en el caso de los melocotones.

En cuanto a la jugosidad instrumental se encuentra que el rango de variación es mayor en melocotones (14.3 cm^2) que en nectarinas (11.8 cm^2) y la ligera mayor proporción de frutos de jugosidad alta (23.1%) en melocotones que en nectarinas (20.6%), conduce a que los modelos de estimación de estas variables sean ligeramente peores en el caso de las nectarinas.

Tabla 3. Estadísticos que caracterizan la bondad de los modelos PLS basados en los espectros NIR para la estimación de humedad, jugosidad instrumental y jugosidad sensorial en melocotones y nectarinas.

	Melocotones				Nectarinas			
	r^2	Lv	secv	RPD	r^2	Lv	secv	RPD
Humedad (%)	0,73	11	1,624	1.4598	0,93	14	1,640	2.6617
Área de jugo (cm^2)	0,67	11	1,250	1.3499	0,54	14	1,327	1.1893
Jugosidad sensorial (0-9)	0,76	14	1,287	1.5363	0,65	15	1,333	1.3093

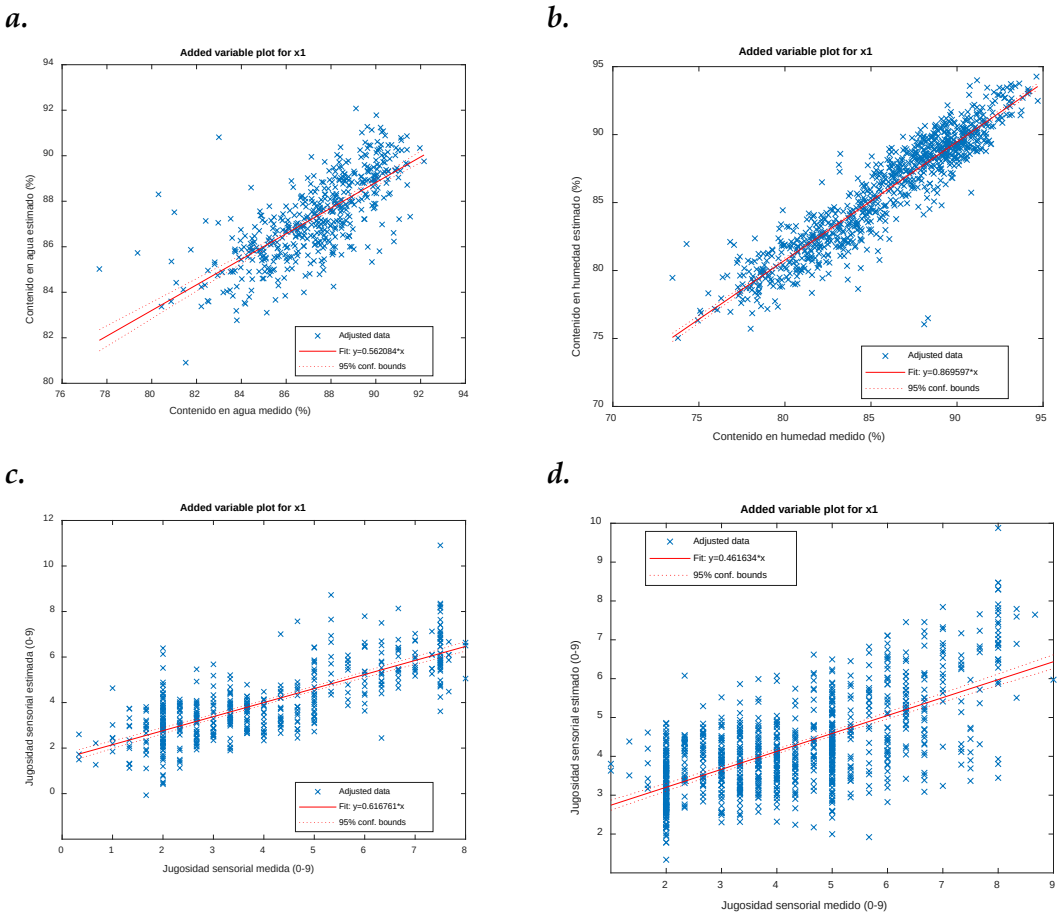


Figura 8. a. modelo de estimación de la humedad en melocotón y b. en nectarina; c; e. modelo de estimación de la jugosidad sensorial en melocotón y f. en nectarina.

La Figura 8 muestra que en el caso de las nectarinas es posible emplear el espectro NIR para estimar el contenido de humedad de los frutos en el momento de la recolección. Por otro lado, se observa cómo es posible estimar la jugosidad sensorial diferenciando entre frutos de jugosidad alta y frutos de jugosidad baja lo que resultaría suficiente para categorizar y diferenciar de forma no destructiva los frutos jugosos "ready to eat".

4. Conclusiones

Al relacionar las determinaciones instrumentales de la jugosidad con la evaluación sensorial se constata que en la mayor parte de las variedades, aquellos frutos calificados como de alta jugosidad (puntuación superior a 6 en la escala sensorial) presentan áreas de jugo superiores a 4 cm2. Lo que constituye una indicación instrumental objetiva de utilidad para el sector en la evaluación del estado de jugosidad de los frutos de hueso.

Mediante la espectroscopía NIR es posible categorizar la jugosidad sensorial, diferenciando entre frutos de jugosidad alta y frutos de jugosidad baja lo que resultaría suficiente para identificar de forma no destructiva los frutos jugosos.

Los frutos "ready to eat" se han definido como frutos blandos de jugosidad elevada. Se establece así una categorización en la que empleando una única máquina universal de ensayos se pueden identificar los lotes "ready to eat" como aquellos que simultáneamente presentan una firmeza Magness Taylor por debajo de 20 N y una jugosidad instrumental por encima de los 2.25 cm2. Se encuentran dentro de estos límites el 88.4% de los melocotones y el 72.0% de las nectarinas clasificadas sensorialmente como de alta jugosidad. Los tratamientos postcosecha que aúnan un periodo de premaduración con una etapa de vida en estantería, en protocolos de duración total superior a los 12 días se identifican como, de entre los ensayados, los capaces de desarrollar frutos blandos y de alta jugosidad.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Frutas Esther la colaboración prestada para el desarrollo del presente trabajo y la ayuda otorgada por el CDTI de referencia IDI-20170547, cofinanciada con fondos FEDER.

Referencias

1. Lurie, S. and C.H. Crisosto, Chilling injury in peach and nectarine. Postharvest Biology and Technology, 2005. 37(3): p. 195-208.
2. Cos, J., et al., Peach and nectarine breeding program imida-NOVAMED SL, to obtain new cultivars adapted to the region of Murcia. Acta horticulturae, 2012.
3. Brummell, D.A., et al., Cell wall metabolism during the development of chilling injury in cold-stored peach fruit: association of mealiness with arrested disassembly of cell wall pectins. Journal of Experimental Botany, 2004. 55(405): p. 2041-2052.
4. Crisosto, C.H., handling preconditioned tree fruit at the retail distribution centers. . Department of Pomology. University of California, Davis. at the Kearney Agricultural Center: p. 1-2 pag.
5. Maté, V., ¿Hay demasiados melocotones en España? El País, 2018. negocios: p. 1.
6. Contador, L., et al., A proposal for determining the flesh softening of peach and nectarine in postharvest through simplified targeted modeling. Scientia Horticulturae, 2016. 209: p. 47-52.
7. Infante, R., et al., Quantitative determination of flesh mealiness in peach Prunus persica L. (Batch.) through paper absorption of free juice. Postharvest Biology and Technology, 2009. 51(1): p. 118-121.
8. Sun, Y., et al., Hyperspectral reflectance imaging combined with chemometrics and successive projections algorithm for chilling injury classification in peaches. Lwt-Food Science and Technology, 2017. 75: p. 557-564.
9. Cano-Salazar, J., M.L. Lopez, and G. Echeverria, Relationships between the instrumental and sensory characteristics of four peach and nectarine cultivars stored under air and CA atmospheres. Postharvest Biology and Technology, 2013. 75: p. 58-67.
10. Kader, A.A., Postharvest biology of tropical and subtropical fruits, in Tecnología postcosecha de cultivos hortofrutícolas, A.A. Kader, Editor. 2007. p. 387-400.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Identificación de la presencia de oídio (*Erysiphe necator*) en racimos de uva mediante imágenes hiperespectrales

C. Pérez-Roncal[1], A. López-Maestresalas[1], C. López-Molina[3], D. Marín[2], J. Urrestarazu[2], S. Arazuri[1], L.G. Santesteban[2] y C. Jarén[1]

[1] Dpto. Ingeniería, Universidad Pública de Navarra. Campus Arrosadia, 31006 Pamplona, España; claudia.perez@unavarra.es
[2] Dpto. Agronomía, Biotecnología y Alimentación, Universidad Pública de Navarra. Campus Arrosadia, 31006 Pamplona, España
[3] Dpto. Estadística, Informática y Matemáticas, Universidad Pública de Navarra. Campus Arrosadia, 31006 Pamplona, España

Resumen: El oídio es una de las enfermedades fúngicas más importantes en la vid, que afecta negativamente al rendimiento del cultivo y la calidad del producto. La infección inicial, apenas perceptible visualmente, dificulta la detección de la enfermedad en fases tempranas, y no es hasta etapas intermedias cuando se detectan los síntomas visibles. Por ello, el objetivo de este trabajo es evaluar la utilidad de la tecnología de imágenes hiperespectrales (HSI) para detectar la presencia de oídio en racimos de uva. Se recogieron 30 racimos de uva de la variedad Mazuelo, 15 racimos afectados y otros 15 libres de oídio, que se escanearon con un sistema hiperespectral sensible en el rango NIR (900-1700 nm). Las imágenes adquiridas fueron normalizadas y segmentadas, obteniendo información espectral y espacial de cada muestra. Se desarrollaron modelos discriminantes por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA), aplicando diferentes pretratamientos espectrales, para conseguir diferenciar píxeles sanos de píxeles con oídio en los racimos. Los mejores resultados se obtuvieron aplicando la combinación de pretratamientos Suavizado, Variable Normalizada Estándar (SNV) y Centrado Medio (MC), con un porcentaje de acierto del 85,3% en la validación cruzada del modelo y una correcta clasificación e identificación de píxeles en la validación. Los resultados preliminares obtenidos sugieren la posibilidad de utilizar la tecnología HSI para la detección de oídio en racimos de uva.

Palabras clave: análisis de imagen, HSI-NIR, quimiometría, enfermedades fúngicas, *Vitis vinifera* L.

1. Introducción

El oídio (*Erysiphe necator*) está considerado mundialmente como una de las enfermedades fúngicas más importantes en la vid, causante de daños significativos sobre el cultivo. Estos incluyen la pérdida de rendimiento y la depreciación de la calidad del vino o de la uva [1].

La propensión de las cepas a sufrir oídio depende de la sensibilidad de la variedad a esta enfermedad y de las condiciones climáticas en las que se desarrolle el cultivo, pudiendo afectar a cualquier órgano verde de la planta (brotes, hojas y racimos) [1]. La infección inicial, en focos aislados y apenas perceptibles visualmente, dificulta la detección de la enfermedad en fases tempranas. Así pues, suelen ser los agricultores los encargados de detectar los síntomas más

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3434

evidentes de la enfermedad, que no aparecen hasta etapas intermedias o tardías de la misma. Por tanto, el poder disponer de técnicas que permitan detectar la enfermedad de manera fiable antes de que se manifiesten los síntomas visibles supone un importante avance [2].

En los últimos años, los sensores ópticos han demostrado ser una efectiva herramienta de análisis para la evaluación de la calidad e inocuidad en cultivos y productos agroalimentarios [3]. En concreto, la tecnología de imágenes hiperespectrales (HSI) se presenta como una de las técnicas más prometedoras, ya que no solo es capaz de detectar y cuantificar las enfermedades, sino que permite diferenciar entre éstas y las reacciones de las plantas huésped al ataque de patógenos [4]. Por ello, el objetivo de este trabajo es evaluar la utilidad de la tecnología de imágenes hiperespectrales (HSI) para detectar la presencia de oídio en racimos de uva.

2. Materiales y métodos

2.1. Material vegetal

En este estudio se utilizaron 30 racimos de uva de la variedad Mazuelo (*Vitis vinifera* L.) muestreados en un viñedo de la Ribera del Alto Ebro en Navarra (España) en la campaña de 2017. Los racimos se recogieron en una fase del ciclo próxima a vendimia (22 de agosto, estado fenológico maduración), seleccionando dos clases de muestras en campo: 15 racimos visualmente sanos de cepas libres de oídio (clase sano, S), y 15 racimos con síntomas visibles de oídio de cepas afectadas por esta enfermedad (clase oídio, O). Tras la recogida, los racimos se conservaron congelados a -23 °C hasta la realización de los análisis. Previo a la adquisición de las imágenes hiperespectrales, los racimos se almacenaron durante 24 h en una cámara frigorífica (3 ± 1 °C) para propiciar una descongelación lenta y, una vez descongelados, se identificaron, pesaron y fotografiaron (imagen RGB de referencia) individualmente.

2.2. Adquisición de imágenes hiperespectrales

Las imágenes de los racimos se adquirieron con un sistema hiperespectral de escaneado lineal sensible en el rango NIR de 900-1700 nm compuesto por: una cámara Xeva 1.7-320 (Xenics, Leuven, Belgium) con detector InGaAs de resolución 320x256 píxeles, acoplada a un espectrógrafo ImSpector N17E (Specim, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) y a un objetivo con distancia focal de 16 mm; una plataforma lineal (LEFS25, SMC Corporation, Tokio, Japan) para desplazar las muestras bajo el campo visual de la cámara (línea tras línea); y 4 lámparas halógenas de 46W (Lexman) para iluminar el área de escaneo. Durante la adquisición de imágenes el sistema se cubrió con una tela negra para conseguir una iluminación homogénea y evitar luz ambiental. Un ordenador equipado con los softwares Xeneth 2.5 y ACT Controller permitió establecer los parámetros de funcionamiento de la cámara y la plataforma respectivamente, así como registrar las imágenes.

Se escaneó una cara por racimo, fijando una distancia de separación plataforma-objetivo de 300 mm y ajustando el tiempo de integración en la cámara a 2 ms para evitar la saturación del sensor. Así, cada línea de muestra escaneada (entre 162 y 296 líneas por muestra) tenía una resolución espacial de 0,56 mm/píxel (320 píxeles) y una resolución espectral de 3,125 nm (256 bandas/píxel). Además, se adquirieron las imágenes de las referencias blanca (Spectralon, Reflectance Standard 99%, Labsphere) y negra (colocando la tapa negra opaca al objetivo) necesarias para la corrección de las imágenes de racimo.

2.3. Procesamiento de imágenes

Primero se realizó la construcción del hipercubo de cada racimo, apilando las imágenes de las líneas de muestra escaneadas, tras lo cual se corrigieron para obtener la reflectancia relativa (R) de las imágenes hiperespectrales según la Ecuación (1):

$$R = \frac{I_m - I_n}{I_b - I_n}, \quad (1)$$

donde *Im* es la intensidad de radiación adquirida de la muestra, *In* es la intensidad de radiación de la referencia negra, e *Ib* es la intensidad de radiación de la referencia blanca.

A continuación, las imágenes se segmentaron para separar la región de interés, es decir, el racimo, de las zonas saturadas y el fondo, siguiendo el algoritmo presentado en [5]. Este método utiliza métricas de Baddeley para medidas de contraste local, a partir de las cuales se definen superpíxeles en la imagen que serán finalmente umbralizados utilizando el algoritmo de Otsu [6]. En este caso, se consideraron saturados todos los píxeles con más de un 2% del rango espectral saturado. Además, se eliminaron los valores de reflectancia en el rango 900-1050 nm debido al ruido presente en esa región del espectro.

Posteriormente, se extrajo la información relevante contenida en los hipercubos pasando de una matriz 3D (hipercubo) a una matriz de 2 dimensiones con los valores de reflectancia de los píxeles de racimo en las longitudes de onda seleccionadas (206, entre 1050 y 1700 nm). En las 10 primeras imágenes de cada clase (2/3 de las muestras por clase), este proceso se realizó con la herramienta HYPER-Tools [7] seleccionando manualmente 15 píxeles de baya por muestra y utilizando las imágenes RGB de cada racimo como referencia. En el caso de las muestras sanas se seleccionaron 15 píxeles sanos, mientras que en las muestras enfermas los 15 píxeles se seleccionaron de zonas con síntomas visibles de oídio. La matriz resultante (300 filas x 206 columnas) se utilizó como grupo de calibración para desarrollar el modelo discriminante. En el resto de imágenes de cada clase (5 de S y 5 de O), el proceso se ejecutó de forma automática obteniendo para cada muestra una matriz con todos los píxeles de racimo incluidos en la máscara segmentada. Estas últimas se utilizaron para validar externamente el modelo.

El procesamiento de imágenes se realizó en MATLAB R2017b (The Mathworks, Natick, MA).

2.4. Análisis multivariante de datos

Una vez obtenidas las matrices con los espectros de los píxeles de racimo, se utilizó PLS-Toolbox (Eigenvector Research Inc., Wenatchee, WA) en MATLAB® para llevar a cabo el tratamiento y análisis discriminante de los datos.

Se utilizó el método de análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) para diferenciar dos clases de píxeles en los racimos según el grado de síntomas (sano y oídio). El PLS-DA es una técnica de clasificación supervisada donde la pertenencia a una clase se predice a partir de los espectros de la muestra por medio de la regresión PLS [8]. En este estudio, 2/3 de las muestras (20 racimos) se utilizaron para la calibración y validación cruzada (CV; método de persianas venecianas con 10 divisiones) del modelo, y el 1/3 restante (10 racimos) se empleó para la validación externa. Se desarrollaron modelos PLS-DA aplicando diferentes pretratamientos espectrales, que incluían técnicas de corrección de la dispersión y derivadas [9].

Un hecho relevante del proceso de aprendizaje fue que, si bien las muestras estaban etiquetadas a nivel de racimo, la clasificación (calibración y validación cruzada) se hizo por espectros de píxeles. Esto tuvo un doble impacto en el proceso. Primero, al no ser capaces de etiquetar cada uno de los píxeles de cada una de las muestras, era probable que hubiese clases severamente solapadas (tener espectros sanos en las muestras enfermas, y suceder también lo contrario). Segundo, la caracterización de cada muestra en la fase de validación (validación externa) se dio por voto mayoritario entre la clasificación individual de espectros en cada uno de los píxeles. En este sentido, la fase de clasificación de muestras tuvo dos sub-fases: etiquetado individual de píxeles y selección de clase por voto mayoritario.

La precisión de los modelos desarrollados se evaluó considerando el porcentaje de píxeles clasificados correctamente (%CC) y los valores de sensibilidad y especificidad para cada clase obtenidos en la CV [10], y el porcentaje de píxeles por clase obtenidos para cada muestra en la validación externa.

3. Resultados y discusión

La Figura 1 muestra los espectros de reflectancia medios (normalizados) de los píxeles seleccionados para cada clase (sano y oídio) en el grupo de calibración, una vez eliminados los valores en el rango 900-1050 nm por ruido espectral. Se observaron diferencias en la magnitud de reflectancia de ambas clases a lo largo de todo el espectro, presentando valores más altos el espectro medio de la clase oídio.

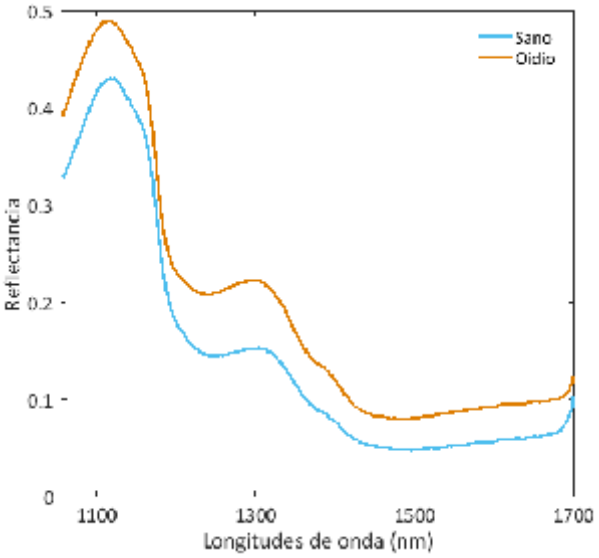


Figura 1. Espectros de reflectancia medios normalizados de los píxeles de racimo seleccionados para las clases sano y oídio en el grupo de calibración, medidos en el rango 1050-1700 nm.

En la Tabla 1 se muestran los resultados del modelo PLS-DA desarrollado para la combinación de pretratamientos que mejor clasificación de píxeles obtuvo. De las diferentes técnicas probadas, los mejores resultados se obtuvieron al aplicar suavizado por el método de Savitzky-Golay utilizando un polinomio de orden 0 y una ventana de 15 puntos, seguido de variable normalizada estándar (SNV, Standard Normal Variate) y centrado medio (MC, Mean Center), consiguiendo un porcentaje total de acierto en CV de 85,3%. El número de variables latentes (LVs) para la construcción del modelo se seleccionó como aquel que minimiza el error medio en la calibración y CV, empleando en este caso 5 LVs con un 97% de la varianza espectral explicada.

Como se puede observar en la Tabla 1, tanto el %CC (88,67%) como la sensibilidad (0,880) fue mayor en los píxeles de la clase oídio, obteniendo en general buenos resultados de clasificación en ambas clases.

Tabla 1. Resultados de clasificación en la validación cruzada (CV) del modelo PLS-DA desarrollado con la combinación de pretratamientos Suavizado+SNV+MC.

Clase	Pretratamiento	LVs	n	Sensibilidad	Especificidad	%CC
Sano	Suavizado + SNV	5	300	0,827	0,880	83,33
Oídio	+ MC			0,880	0,827	88,67

En la Figura 2 se muestran los resultados de clasificación obtenidos en la validación externa del modelo realizada para cada muestra (5 de S y 5 de O) de manera independiente. En esta figura aparece representado el porcentaje de píxeles clasificados como sanos en cada muestra validada,

obtenido a partir de la probabilidad de pertenencia de cada uno de los píxeles a las dos clases consideradas.

Como se aprecia en la Figura 2, más del 75% de los píxeles en las muestras sanas se clasificaron como sanos, siendo el porcentaje de píxeles de la clase oídio de entre un 13-25%. Al contrario que en las muestras enfermas, en las que el porcentaje de píxeles sanos fue inferior al 35%. Estos porcentajes tienen sentido, en la medida en que una muestra enferma puede tener zonas cuyo nivel de afección sea nulo o insignificante. Dicho de otra forma, una muestra enferma no tiene por qué estar completamente afectada.

La Figura 2, además, ilustra las características del proceso ya comentadas en la Sección 2.4. La dificultad en el validación, debida a la imposibilidad de etiquetado de píxeles individuales, hace que las muestras sanas tengan ciertos píxeles clasificados como clase oídio, y *vice versa*. Sin embargo, al clasificar las muestras de manera global, y no los píxeles de manera individual, el sistema puede separar cómodamente las muestras enfermas de las sanas.

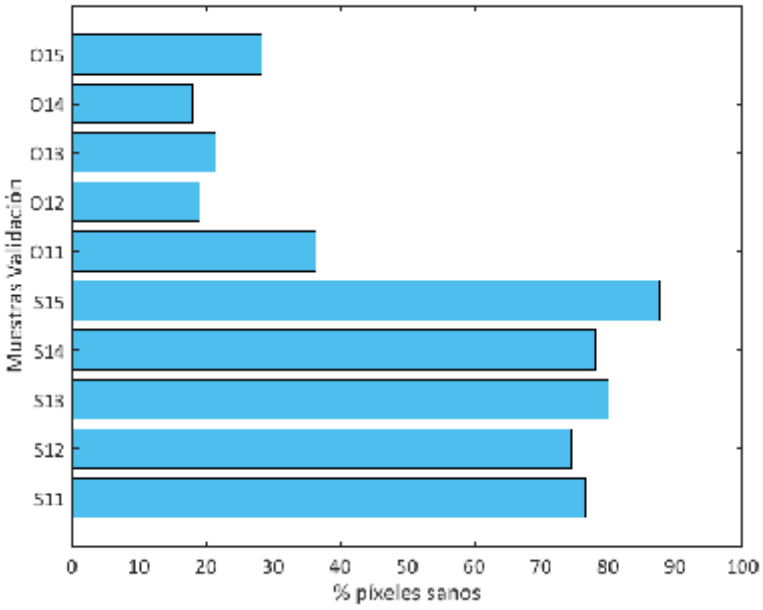
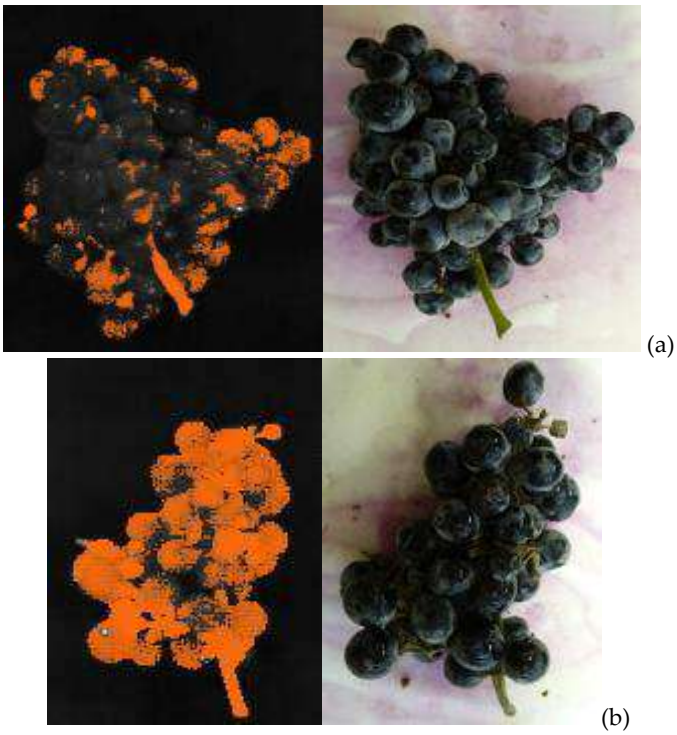


Figura 2. Porcentaje de píxeles clasificados como sanos en las muestras de las clases sano (S11 a S15) y oídio (O11 a O15) empleadas en la validación externa del modelo PLS-DA.

Estos porcentajes de clasificación concuerdan con la información obtenida en las visualizaciones, ya que en las muestras sanas los pixeles naranjas (oídio) se concentran principalmente en las zonas del raspón y en menor medida en las bayas (Figura 3(a)), y en las muestras enfermas la mayoría de los píxeles aparecen en color naranja (Figura 3(b)). Es importante señalar la coherencia espacial de la clasificación de los píxeles en la imagen. En la Figura 3(a) se observa cómo los píxeles mal clasificados (afectados por oídio) se localizan en zonas determinadas de la imagen (superficies inclinadas en bayas, o pedúnculo). Al mismo tiempo, las bayas iluminadas de manera normal, con superficie visible perpendicular a la dirección de la cámara, rara vez se confunden con zonas enfermas. Esto sugiere que, efectivamente, la existencia de oídio en el racimo produce un efecto detectable en el espectro adquirido en las bayas que, si bien confundible con otros hechos físicos (iluminación, inclinación, etc.), lo hace claramente distinguible de las bayas no enfermas.


(a)

(b)

Figura 3. Visualización de la clasificación de píxeles en validación (gris: sano; naranja: oídio) e imagen RGB del racimo en las muestras S14 (a) y O14 (b).

4. Conclusiones

Este estudio sugiere que la utilización combinada de imágenes hiperespectrales NIR con análisis discriminantes PLS-DA permite la clasificación de racimos de uva en función de la presencia de oídio. El modelo PLS-DA desarrollado aplicando la combinación de pretratamientos Suavizado+SNV+MC obtuvo los mejores resultados, consiguiendo un porcentaje de acierto en CV del 85,3% y una correcta clasificación e identificación de píxeles en la validación (>65%).

Teniendo en cuenta que se trata de un estudio preliminar, que debería haber sido validado en un mayor número de muestras y probado diferentes métodos quimiométricos, la tecnología HSI en el rango NIR presenta un gran potencial para ser utilizada en la detección de otras enfermedades y fisiopatías de la vid.

En estudios futuros se pretende continuar con esta línea de investigación, trabajando con muestras frescas e incrementando el tamaño muestral, por un lado, y mejorando los algoritmos de segmentación y seleccionando un número óptimo de longitudes de onda que permitan reducir el tiempo de procesamiento y análisis de los datos, por otro, para poder realizar una detección real en campo.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado gracias al Proyecto DECIVID (2017-2019) correspondiente a la convocatoria de Ayudas a Proyectos de I+D de la Consejería de Desarrollo Económico del Gobierno de Navarra, el Proyecto TIN2016-77356-P (AEI, Feder/UE), y la Universidad Pública de Navarra a través de la concesión de dos ayudas para la Formación de Personal Investigador predoctoral 2017.

Referencias

1. Oberti R., Marchi M., Tirelli P., Calcante A., Iriti M., Borghese A. N. Automatic detection of powdery mildew on grapevine leaves by image analysis: Optimal view-angle range to increase the sensitivity. Computers and Electronics in Agriculture. 2014, 104, 1-8.
2. Mahlein A.K. Plant disease detection by imaging sensors–parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. Plant Disease. 2016, 100(2), 241-251.
3. Wu D., Sun D-W. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review — Part I: Fundamentals. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2013, 19, 1-14.
4. Oerke E.C., Herzog K., Toepfer R. Hyperspectral phenotyping of the reaction of grapevine genotypes to Plasmopara viticola. Journal of Experimental Botany. 2016, 67(18), 5529-5543.
5. Lopez-Molina C., Ayala-Martini D., Lopez-Maestresalas A., Bustince H. Baddeley's Delta metric for local contrast computation in hyperspectral imagery. Progress in Artificial Intelligence. 2017, 6(2), 121-132.
6. Otsu N. A threshold selection method for gray-level histograms. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1979, 9(1), 62-66.
7. Mobaraki N., Amigo J.M. HYPER-Tools. A graphical user-friendly interface for hyperspectral image analysis. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2018, 172, 174-187.
8. Barker M., Rayens W. Partial least squares for discrimination. Journal of Chemometrics. 2003, 17(3), 166–173.
9. Vidal M., Amigo J.M. Pre-processing of hyperspectral images. Essential steps before image analysis. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2012, 117, 138-148.
10. Ballabio D., Consonni V. Classification tools in chemistry. Part 1: linear models. PLS-DA. Analytical Methods. 2013, 5(16), 3790-3798.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre **2019**

Identificación optimizada de las longitudes de onda relevantes en espectros NIR de aceituna

Natalia Hernández-Sánchez[1] y María Gómez-del-Campo[2]

[1] Laboratorio de Propiedades Físicas-Tecnologías Avanzadas en Agroalimentación (LPF-TAGRALIA), ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Puerta de Hierro, 2 - 4, 28040 Madrid, España; n.hernandez@upm.es

[2] CEIGRAM, ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Puerta de Hierro, 2 - 4, 28040 Madrid, España; maria.gomezdelcampo@upm.es

Resumen: En el presente trabajo se analiza un novedoso procedimiento de selección de las longitudes de onda que contienen la información más relevante para la estimación de aceite y humedad en aceitunas intactas. Para ello se partió de espectros NIR completos con 700 variables, en los que se analizó el efecto de los pre-tratamientos clásicos. Los resultados pusieron de manifiesto que estos pre-tratamientos pueden tener un efecto negativo, pues llegan a eliminar información espectral relacionada con los contenidos de aceite y agua. Además, los datos crudos, no tratados, ofrecieron estimaciones adecuadas. Este resultado es de gran relevancia a la hora de la simplificación de los modelos de estimación, pues promueve el uso individual de longitudes de onda, en contraposición a los pre-tratamientos clásicos, que requieren normalmente el espectro completo para realizar la corrección. A continuación se llevó a cabo una selección jerárquica de longitudes de onda aplicando un criterio basado en la covarianza entre variables y en la ortogonalización de los espectros respecto de la variable que se va seleccionando, método CovSel. Esta ortogonalización optimiza la selección, ya que los espectros NIR se caracterizan por la altísima correlación entre las longitudes de onda contiguas. La identificación de un número reducido de longitudes de onda permite avanzar en el desarrollo de dispositivos multiespectrales, sencillos y portátiles, como cámaras, que podrían ser utilizados tanto en campo, como en ambientes industriales y de laboratorio.

Palabras clave: Espectroscopia; Inspección de alimentos; Pre-tratamientos espectrales; Selección de variables

1. Introducción

El conocimiento del contenido de aceite y agua de las aceitunas es fundamental para el manejo del cultivo, la decisión del momento de cosecha y el ajuste de las máquinas que intervienen en el proceso de extracción de aceite.

La espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIR) ha demostrado su capacidad para determinar el contenido de aceite y agua de las aceitunas intactas [1, 2, 3]. Sin embargo, la simplificación de los procedimientos y de los equipos es de gran interés para el sector oleícola.

El análisis de los datos espectrales NIR generalmente involucra el manejo de cientos de variables que están altamente correlacionadas. Además, la necesidad de un preprocesamiento espectral previo al desarrollo de modelos de regresión aumenta los requisitos computacionales.

El presente trabajo recoge los principales resultados de un estudio sobre la viabilidad de estimar el contenido de aceite y agua mediante métodos computacionales más simples enfocados en algunas longitudes de onda en lugar de todo el espectro desarrollado por

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3425

Hernández-Sánchez y Gómez-del-Campo [4]. La identificación de las longitudes de onda de interés se realizó mediante el método propuesto por Roger et al. [5] de selección de variables denominado CovSel (Covariance Selection).

2. Materiales y métodos

Se utilizaron aceitunas de la variedad Arbequina obtenidas en diferentes plantaciones, diferentes alturas dentro del árbol y diferentes orientaciones de las líneas de cultivo para incrementar la variabilidad del estado de madurez y, en consecuencia, del contenido de aceite y agua, y, con ello, la variabilidad en los datos espectrales.

El conjunto completo comprendió un total de 95 muestras, con alrededor de cien aceitunas en cada muestra. Las muestras se dividieron aleatoriamente en dos conjuntos: conjunto de calibración con 80 muestras para el desarrollo del modelo; y test set con 15 muestras para validación externa.

La humedad se determinó gravimétricamente y se expresó como porcentaje del peso fresco. El contenido de aceite se midió a partir de frutos de oliva secos utilizando un NMR Minispec NMS100 (Bruker Optik GmbH).

Los espectros NIR se obtuvieron con un equipo FOSS NIRSystems 5000 en el rango de 1100-2500 nm a una resolución de 2 nm (total de 700 longitudes de onda) en modo de reflectancia, luego se transformaron en valores de absorbancia como log (1/R).

Se evaluaron diferentes técnicas de preprocesamiento espectral, incluido el no tratamiento previo de los datos. Se aplicaron las técnicas más comunes, como MSC, algoritmo de suavizado y derivación SavGol con ventana de 21 longitudes de onda, polinomio de tercer grado y primera derivada (SavGol21_3_1); SavGol con ventana de 21 longitudes de onda, polinomio de tercer grado y segunda derivada (SavGol21_3_2), SNV y DT. Para combinar la reducción de los efectos multiplicativos y aditivos debidos a la dispersión, SavGol21_3_2 con SNV; y DT con SNV también se aplicaron.

La selección de la longitud de onda se llevó a cabo de acuerdo con la metodología explicada por Roger et al. [5]. Se definieron tres enfoques: a) selección de longitudes de onda independientes para cada modelo de estimación (aceite y humedad); b) selección de longitudes de onda para modelo que estime ambos parámetros a la vez; c) Selección de índices de longitudes de onda comunes para modelos independientes.

Para el primer enfoque, CovSel se ejecutó en los espectros NIR sin tratamiento previo (matriz X) y los vectores de contenido de aceite (base húmeda) y el vector de contenido de agua (base húmeda) independientemente, con un límite de 15 pasos. Esto produjo una selección de 15 longitudes de onda ordenadas. Las variables se introdujeron paso a paso en los modelos de mínimos cuadrados clásicos. Se construyeron hasta 15 modelos con un número creciente de variables en el orden previamente obtenido (desde una variable hasta 15). La validación cruzada produjo una curva de SEC y una curva de SECV que guió la elección del modelo final.

Para el segundo enfoque, CovSel se ejecutó en la matriz X y la matriz Y con el contenido de aceite y de agua, con un límite de 15 pasos. Esto produjo una selección de 15 longitudes de onda ordenadas también. CovSel se ejecutó una segunda vez para cada parámetro de forma independiente para producir tres clasificaciones de las 15 variables seleccionadas. Análogamente, se calcularon series de 15 modelos de regresión por mínimos cuadrados, una serie para cada respuesta. Los modelos óptimos fueron elegidos estudiando la evolución de la SECV.

Para el tercer enfoque, los índices se calcularon como combinaciones de alturas de pico relativas. CovSel se aplicó para identificar los índices con la mejor capacidad para estimar el contenido de aceite en base al peso fresco (% de materia fresca). Los índices seleccionados se utilizaron para generar modelos para estimar el contenido de agua (% de materia fresca). Al hacerlo, las longitudes de onda requeridas se limitarían a un número óptimo bajo.

Todos los modelos seleccionados se aplicaron al conjunto de validación. Los indicadores de desempeño fueron R^2, SEP y RPIQ.

3. Resultados y discusión

Se partió de espectros NIR completos con 700 variables, en los que se analizó el efecto de los pre-tratamientos clásicos. Los resultados pusieron de manifiesto que estos pre-tratamientos pueden tener un efecto negativo, pues llegan a eliminar información espectral relacionada con los contenidos de aceite y agua (Figura 1). Además, los datos crudos, no tratados, ofrecieron estimaciones adecuadas. Este resultado es de gran relevancia a la hora de la simplificación de los modelos de estimación, pues promueve el uso individual de longitudes de onda, en contraposición a los pre-tratamientos clásicos, que requieren normalmente el espectro completo para realizar la corrección.

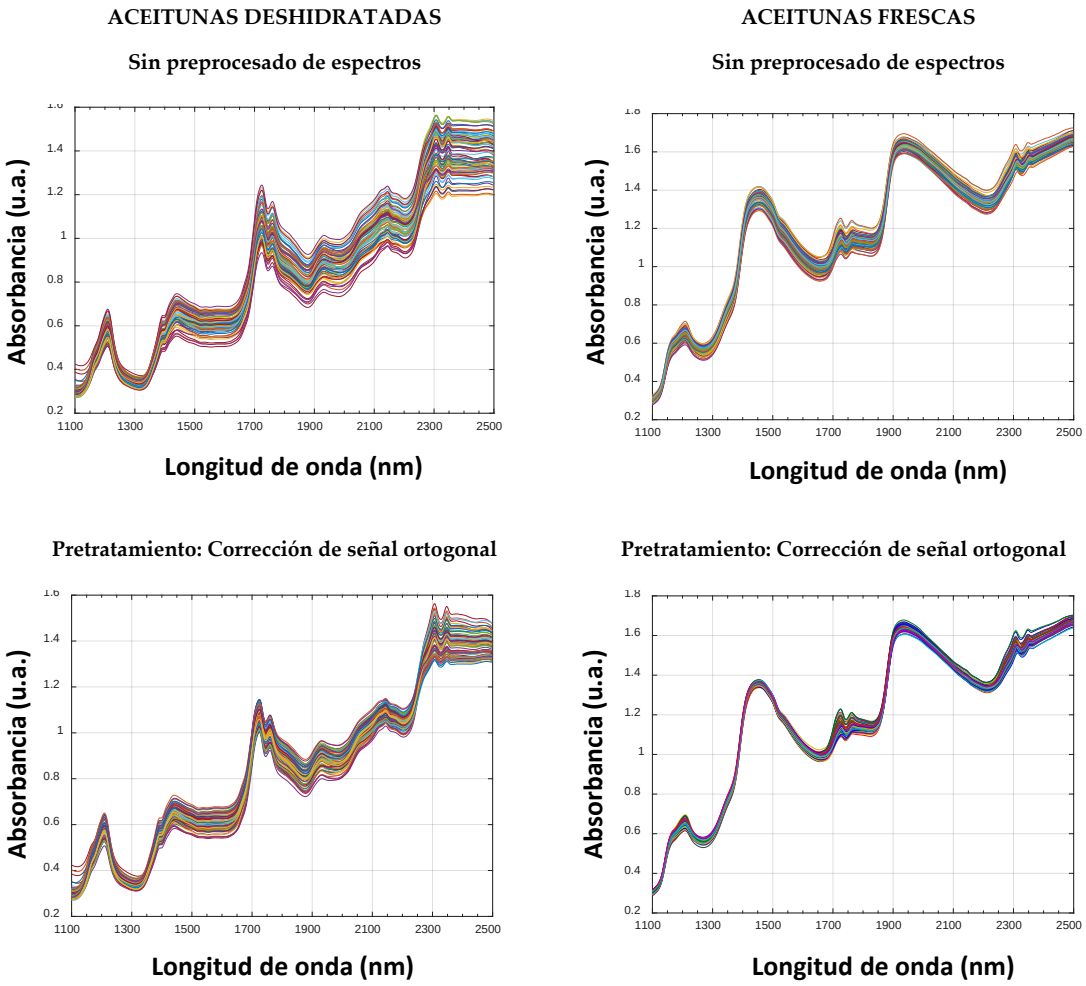


Figura 1. Espectros de absorbancia de aceitunas deshidratadas y aceitunas frescas. Arriba: espectros crudos. Abajo: espectros con un pretratamiento de ortogonalización para eliminar la variabilidad que no está relacionada con el parámetro a estimar, disminuyendo la dispersión de los espectros.

A continuación se llevó a cabo una selección jerárquica de longitudes de onda aplicando un criterio basado en la covarianza entre variables y en la ortogonalización de los espectros respecto de la variable que se va seleccionando. Esta ortogonalización optimiza la selección, ya

que los espectros NIR se caracterizan por la altísima correlación entre las longitudes de onda contiguas.

CovSel clasifica las k variables más útiles de X (matriz de datos) en el orden decreciente de su interés. La variable más útil se selecciona en cada paso. Covsel presenta la ventaja de maximizar la covarianza entre X e Y (matriz de propiedades a estimar) en lugar de la correlación. Para dos variables con la misma correlación con Y, se elegirá la que tenga la mayor covarianza. A continuación, los datos se proyectan ortogonalmente a esta variable seleccionada, lo que elimina la información que se correlaciona con ella. Como las variables vecinas en los espectros NIR están altamente correlacionadas, esta proyección disminuye drásticamente la varianza de las variables adyacentes a la seleccionada. Por lo tanto, la identificación de la siguiente variable en el siguiente paso no tendrá en cuenta dichas variables adyacentes. La consecuencia es que las variables que muestran altas variaciones desempeñan un papel importante en el modelo de regresión (Figura 2). CovSel también trata con Y que contiene múltiples respuestas y realiza la selección de variables en función de su covarianza global con todas las propiedades que se deben predecir.

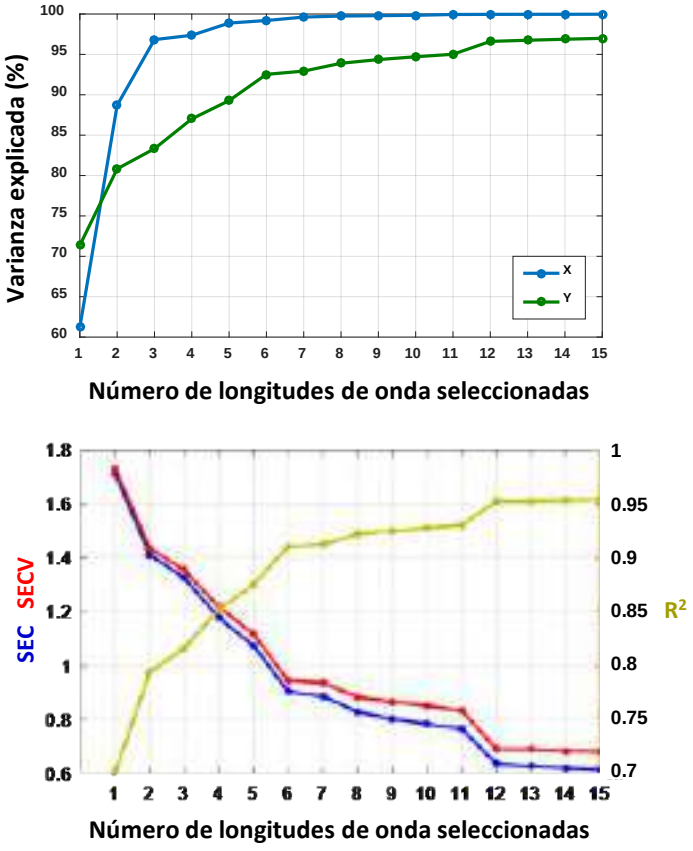


Figura 2. Evolución de la varianza explicada, errores de estimación y R^2 para modelos con número creciente de longitudes de onda seleccionadas mediante el procedimiento CovSel.

Los modelos de estimación desarrollados con los datos espectrales NIR al completo (700 longitudes de onda) sin pretratameintos obtuvieron un r^2 para el conjunto de validación externa de 0.9 para el contenido de aceite y 0.92 para el agua; RPIQt fue 4,9 y 4,3 respectivamente. La identificación de una relación entre la absorbancia a 1724 nm y a 1760 nm con el contenido de aceite, permitió restringir las longitudes de onda a tres. Para el contenido de aceite, el r^2 alcanzó 0,88 y RPIQt fue 4,4. Para el contenido de agua, el valor de r^2 fue de 0,84 y el RPIQt fue de 3,1

(Figura 3). La calidad de la estimación con solo tres longitudes de onda fue comparable al obtenido con PLSR en 700 variables.

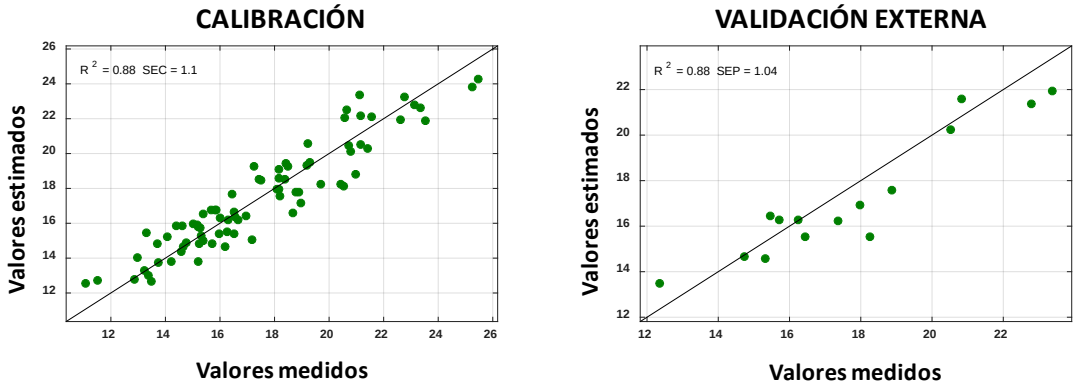


Figura 3. Valores estimados del contenido de aceite (% peso fresco) frente a los valores medidos con métodos de referencia. El modelo de estimación incluye tres longitudes de onda: 1206 nm, 1724 nm y 1760 nm.

4. Conclusiones

La identificación de un número reducido de longitudes de onda para la estimación de los contenidos de aceite y agua en aceituna mediante procedimientos basados en la covarianza permite avanzar en el desarrollo de dispositivos multiespectrales, sencillos y portátiles, como cámaras, que podrían ser utilizados tanto en campo, como en ambientes industriales y de laboratorio.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a Jacinto Cabetas de El Carpio de Tajo (Toledo), Antonio Capitán de Écija (Sevilla), Casas de Hualdo de Puebla de Montalbán (Toledo) y Todolivo de Pedro Abad (Córdoba) por el acceso a los olivares donde se llevó a cabo esta investigación.

Agradecemos a Beatriz Somoza-Rodríguez por su asistencia en la recopilación de datos de espectros NIR. Además, los autores agradecen a Jean Michel Roger de Irstea, UMR ITAP, (Francia) su valioso asesoramiento en quimiometría.

Referencias

1. Cayuela J A and Camino, M dCP. 2010. Prediction of quality of intact olives by near infrared spectroscopy. Eur. J. Lipid Sci. Technol. 112, 1209-1217.
2. Salguero-Chaparro L., Baeten V., Fernández-Pierna J.A., Peña-Rodríguez, F. Near infrared spectroscopy (NIRS) for on-line determination of quality parameters in intact olives, Food Chem. 2013, 139, 1121-1126.
3. Salguero-Chaparro L, and Peña-Rodríguez F. On-line versus off-line NIRS analysis of intact olives. LWT - Food Sci. Technol. 2014, 56, 363-369.
4. Hernandez-Sanchez N., Gomez-del-Campo M. From NIR spectra to singular wavelengths for the estimation of the oil and water contents in olive fruits. GRASAS Y ACEITES. 2018, 69 (4), 1-13.
   Roger J.M., Palagos B., Bertrand D., Fernandez-Ahumada E. CovSel: Variable selection for highly multivariate and multi-response calibration. Application to IR spectroscopy. Chemometr. Intell. Lab. Syst. 2011, 106, 216-223.

X Congreso Ibérico de Agroingeniería
X Congresso Ibérico de Agroengenharia
Huesca, 3-6 septiembre 2019

Obtención y caracterización de aceites de frutos secos vírgenes

J.E. Pardo[1], A. Rabadán[1], M.E. Copete[1], E. López[1], A. Alvarruiz[1], R. Góme[1]z, M. Álvarez-Ortí[1]

[1] Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes (ETSIAM). Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). Campus Universitario, s/n. 020171 Albacete; Jose.PGonzalez@uclm.es.

Resumen: En este trabajo se ha evaluado el proceso de obtención del aceite contenido en el interior de diferentes frutos secos, a partir de su caracterización físico-química y sensorial. En la prensa hidráulica se ha evaluado la presión y el tiempo de extracción, mientras que en la de tornillo, la influencia de la temperatura y la velocidad de extracción. El contenido en aceite de los frutos secos ha variado en función del tipo de fruto seco considerado y del tipo de prensa utilizada en la extracción. Se ha encontrado una gran similitud entre los aceites vírgenes de almendra y los de pistacho; en el extremo opuesto se encuentran los de de nuez. Los aceites se han caracterizado, con respecto a su composición lipídica, por su bajo contenido en ácidos grasos saturados y el predominio de los mono y poliinsaturados. Con respecto a la estabilidad, el aceite de nuez se muestra como el menos estable, debido seguramente a su bajo contenido en ácido oleico y a su menor contenido en tocoferoles y polifenoles totales. Con respecto a la caracterización sensorial, los consumidores han valorado positivamente todos los aceites obtenidos, con independencia del tipo de prensa utilizado y el atributo sensorial evaluado.

Palabras clave: prensa, tornillo, hidráulica, calidad, estabilidad

1. Generalidades

Dentro de la agricultura tradicional española se encuentra el cultivo de árboles frutales productores de frutos secos. Su especial capacidad de adaptación al medio físico y climático mediterráneo les permite ocupar tierras marginales, de elevada pendiente, donde, con frecuencia, no existe un cultivo alternativo; en muchas zonas de España, estos cultivos complementan las rentas económicas de los agricultores jugando, a la vez, un importante papel en la conservación de los suelos.

En la actualidad, el sector está pasando por un buen momento, sobre todo en el caso del almendro y del pistacho, debido al incremento del precio de los frutos secos producidos. Esto ha llevado a un aumento, año tras año, de las tierras dedicadas a estos cultivos, ocupándose parcelas de mayor tamaño y de mejor calidad agronómica que las tradicionales. Esto no quita que exista una importante competencia externa, debido, en unos casos, al mayor potencial productivo y a la utilización de técnicas de producción intensivas (caso de Estados Unidos) y, en otros, al menor coste de explotación y de mano de obra (Irán, China, India y Turquía).

A nivel nacional, las comunidades autónomas que están creciendo en superficie de cultivo de frutos de cáscara son, en primer lugar, Castilla-La Mancha, seguida de cerca por Murcia y, a mayor distancia, por Extremadura y Castilla-León. Estos cultivos entrarán en producción en unos años, lo que incrementará considerablemente la producción nacional, pudiéndose llegar a la obtención de excedentes, si las condiciones climáticas acompañan. Es por ello, por lo que sería interesante la búsqueda de nuevos usos para estos producots, como sería el caso de la

doi: 10.26754/c_agroing.2019.com.3321

extracción del aceite virgen contenido en su interior, que pudiera utilizarse en gastronomía o en cosmética, mantenimiento así la rentabilidad de estos cultivos.

Dentro de este grupo de árboles frutales destacan en nuestro país el almendro, la nuez y el pistacho. También presentan gran interés y, por tanto, deberían tenerse en cuenta, la avellana, el cacahuete, la castaña o los piñones, aunque, en esta comunicación nos centraremos en los tres primeros, al ser los más importantes en Castilla-La Mancha, comunidad autónoma en la cual desarrollamos nuestra actividad investigadora.

2. Obtención de aceites vírgenes de frutos secos

El proceso de obtención de aceite es muy similar en todos los frutos secos considerados. La recolección se realiza, habitualmente, antes que comiencen las lluvias de otoño (agosto-octubre). Seguidamente se procede al descortezado, consistente en la eliminación de la cáscara verde exterior adherida al fruto y que no se ha perdido al caerse del árbol. Después del descortezado, los frutos se someten a secado, el cual puede realizarse de muy diferentes maneras. Sobre sacos a temperatura ambiente, en estufa de aire caliente, mediante ventilador, en secadero de aire caliente, etc. Mediante el secado, la humedad relativa se reduce de forma considerable hasta un 5-8%, según el fruto seco considerado (Almendra: 7%; Nuez: 8%; Pistacho: 5%).

El secado rápido de los frutos secos es una operación fundamental desde el punto de vista comercial (un mal secado disminuye la rentabilidad de la operación, así como la vida útil de los frutos por su gran tendencia al enranciamiento) y sanitario (un buen secado evita el crecimiento y proliferación del hongo *Aspergillus flavus*, y por tanto, la producción de aflatoxinas).

Posteriormente, se procede al descascarado, proceso por el cual se separa el grano de la cáscara. Este puede realizarse de forma manual o mediante equipos más o menos sofisticados.

Tras el proceso de extracción del aceite, queda una torta o pelet duro y compactado, según se utilice prensa hidráulica o de tornillo, respectivamente, que tras ser triturada se convierte en una harina (Figura 1), apta para su consumo humano o el aprovechamiento agrícola,con lo que se consigue el aprovechamiento integral de los frutos secos..



Figura 1. Aspecto externo del pelet (prensa de tornillo) resultante del proceso de extracción, y de la harina de nuez desgrasada, tras su trituración.

La operación más importante e influyente en el proceso de obtención del aceite de los frutos secos, y que, por tanto, hay que optimizar, con vistas a obtener un producto final de mayor calidad, es la extracción. Para la extracción del aceite de los frutos secos existen diferentes alternativas, aunque, como ocurre con las semillas, será seguramente la extracción con disolventes la que proporcionará un mayor rendimiento industrial [1]. Los equipos tradicionales utilizan altas presiones, altas temperaturas y productos químicos, por lo que no se conseguirá una calidad óptima del aceite, debido a la aparición de sabores indeseables y a la inactivación de vitaminas y sustancias activas presentes en la materia prima [2], lo que obligará

al refinado de los mismos y, en este caso, ya no podremos hablar de aceites vírgenes. En los últimos años, la extracción con fluidos supercríticos (CO2), ha experimentado un importante auge como alternativa a los métodos de extracción con disolventes convencionales [3]; el empleo de temperaturas y presiones más bajas da lugar a productos de mayor calidad [4]. El único inconveniente, aunque importante es el elevado precio de los equipos que complica su uso, incluso a nivel de investigación, limitándose su uso a productos que tengan un valor final muy alto.

Una alternativa al empleo de disolventes es el uso del prensado. Se pueden utilizar prensas hidráulicas y prensas de tornillo. Por regla general, la extracción con prensas hidráulicas ofrece una menor rentabilidad por la elevada mano de obra que requiere, sin embargo, los aceites así obtenidos encontrarán, posiblemente, una mayor aceptación, pues al trabajar a temperatura ambiente, mantienen mejor sus propiedades físico-químicas y sensoriales.

Nuestro grupo de investigación en la UCLM (Calidad, Seguridad e Higiene de Productos Agroalimentarios) dispone de una prensa hidráulica, diseñada ex profeso por nosotros y construida por la empresa MECAMAQ (Vila-Sana, Lleida, España), a partir del modelo DEVF 80 (Figura 2).



Figura 2. Prensa hidráulica. Aspecto externo y detalle interior.

En los estudios realizados sobre la optimización de la extracción del aceite de frutos secos mediante esta prensa, hemos evaluado la influencia de la presión y del tiempo de extracción. Se han considerado tres presiones de extracción (80 kg cm^{-2}, 120 kg cm^{-2} y 160 kg cm^{-2}) y tres tiempos de extracción (2 min, 3 min y 4 min, para la almendra; 1 min, 2 min y 3 min, para la nuez, debido a su mayor facilidad de extracción; y 10 min, 12 min y 15 min, para el pistacho, por todo lo contrario). La cantidad de materia prima de partida ha sido, en todos los casos, de 800 g (200 g por pañito).

La extracción con prensas de tornillo exige un acondicionamiento térmico del material, lo que conlleva, en principio, una disminución de la calidad del producto final. Nuestro grupo de investigación dispone de una prensa de tornillo comercial (Komet Oil Press CA59G – IBG Monforts Oekotec GmbH & Co. kg, Mönchengladbach, Germany) (Figura 3). En dicha prensa hemos evaluado la influencia de la temperatura y de la velocidad de extracción. Se han considerado cinco temperaturas de extracción (50ºC, 75ºC, 100ºC, 150ºC y 200ºC), y tres velocidades de extracción (mínima - 17 rpm -, media - 49 rpm - y máxima -96 rpm -).

No se han ensayado temperaturas ni superiores ni inferiores a las seleccionadas, ya que no pueden superarse los 200ºC y la prensa no puede funcionar correctamente por debajo de los 50ºC. En realidad, las temperaturas indicadas se corresponden con la temperatura exterior de la boquilla de la prensa de tornillo, al ser calentada con el anillo calefactor, siendo la temperatura máxima real de los aceites la recogida en la tabla 1.



Figura 3. Prensa de tornillo. Aspecto externo y detalle de la boquilla en funcionamiento.

El tiempo necesario para la extracción del aceite contenido en el interior de 600 g de almendra ha sido de 56 min, 22 min y 14 min, según se hayan utilizado las velocidades de 17 rpm, 49 rpm y 96 rpm, respectivamente, siempre y cuando haya funcionado correctamente el equipo (temperaturas más altas); en los casos de la nuez y el pistacho, los tiempos han sido de 60 min, 24 min y 16 min, y 40 min, 15 min y 8 min, respectivamente, para las mismas velocidades.

Tabla 1. Temperatura máxima real de los aceites de frutos secos extractados en función de la temperatura exterior de la boquilla, calentada mediante anillo calefactor

Temperatura de la boquilla (ºC)	**Temperatura máxima real de los aceites de frutos secos (ºC)**								
	Almendra			**Nuez**			**Pistacho**		
	17 rpm	**49 rpm**	**96 rpm**	**17 rpm**	**49 rpm**	**96 rpm**	**17 rpm**	**49 rpm**	**96 rpm**
50	48	47	46	48	-	-	40	39	36
75	52	51	49	51	49	-	43	40	38
100	59	57	56	53	52	51	45	41	40
150	70	68	62	73	66	62	61	53	47
200	80	78	73	84	74	71	75	65	53

Cuando se utiliza la prensa hidráulica, es necesario, previamente, el triturado del fruto seco, antes de la formación de los pañitos.

3. Composición lipídica de los frutos secos

El contenido en aceite de los frutos secos varía en función del tipo de fruto seco considerado y del tipo de prensa utilizada en el proceso de extracción. En el caso de la almendra, los rendimientos oscilan entre un 45 y un 52%, si utilizamos una prensa de tornillo, y entre un 33 y un 43%, si la prensa es hidráulica. En el caso de la nuez, los intervalos son de 50-65% y 46-55%, respectivamente, siendo para el pistacho de 27-36% y 26-31%, respectivamente. Como puede observarse, para los tres frutos secos estudiados, los rendimientos siempre descienden al utilizarse la prensa hidráulica.

La determinación real de la temperatura de los aceites se determinó mediante el uso de termopares (Figura 4).

Los frutos secos, en general, se caracterizan, con respecto a su composición lipídica, por su bajo contenido en ácidos graso s saturados y el predominio de los mono y poliinsaturados [5,6]. Otras determinaciones de interés en la caracterización de los aceites vírgenes de frutos secos, son la composición en esteroles (esteroles totales, campesterol y estigmasterol), y las

relacionadas con la estabilidad de los mismos (tocoferoles totales, polifenoles totales y estabilidad oxidativa) (Tabla 2).

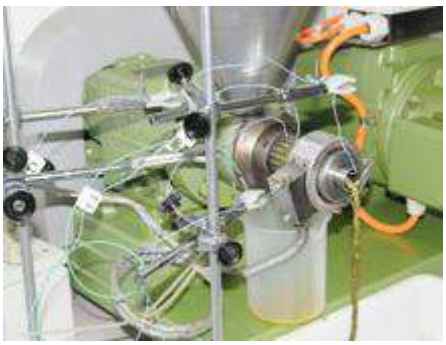


Figura 4. Determinación mediante termopares de la temperatura real de los aceites.

Con respecto al contenido en ácidos grasos, encontramos una gran similitud entre los aceites vírgenes de almendra y los de pistacho, caracterizados por un elevado contenido en ácido oleico y un bajo contenido de los ácidos linoleico y linolénico [7,8,9], lo que les aproxima a los aceites de oliva vírgenes [10,11]. Sólo el contenido en ácido palmítico parece diferenciarles, siempre a favor del aceite de pistacho. En el extremo opuesto se encuentra el aceite virgen de nuez, presentando un bajo contenido en ácido oleico y altos contenidos en cuanto a los ácidos linoleico y linolénico [12]. Con respecto al ácido palmítico, ocupa una posición intermedia entre el aceite de almendra y el de pistacho.

Tabla 2. Valores mínimos y máximos de los principales parámetros físico-químicos evaluados a los aceites de frutos secos considerados

Parámetros físico-químicos	**Aceite de almendra**		**Aceite de nuez**		**Aceite de pistacho**	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Ácido palmítico(%)	6,5	7,7	7,4	8,0	9,0	11,2
Ácido oleico (%)	65,3	72,8	14,2	19,0	56,5	73,3
Ácido linoleico (%)	17,0	23,6	56,0	60,3	13,2	29,6
Ácido linolénico (%)	0,05	0,09	12,1	12,5	0,27	0,45
Esteroles totales (mg/kg)	1819	2552	1380	1461	2991	4281
Campesterol (%)	2,4	3,5	4,7	5,0	3,1	4,8
Estigmasterol (%)	0,6	2,0	0,2	0,3	0,5	2,9
Tocoferoles totales (mg/kg)	263	503	201	386	244	559
Polifenoles totales (mg/kg)	18,7	32,3	17,0	29,0	13,5	45,8
Estabilidad oxidativa (h)	18,7	26,5	6,4	6,9	27,4	64,7

Al analizar el contenido en esteroles totales, se observan mayores valores en el aceite virgen de pistacho, separándose claramente del aceite virgen de almendra; el aceite virgen de nuez vuelve a diferenciarse claramente de los otros dos aceites, en especial del de pistacho, acercándose a los contenidos observados en el aceite de oliva virgen. Con respecto al campesterol, los menores valores se encuentran en el aceite de almendra, seguidos por el de pistacho, siendo en el aceite de nuez donde se han encontrado mayores contenidos.

Con respecto a los parámetros de estabilidad, el aceite de nuez se muestra de forma clara como el menos estable, debido seguramente a su bajo contenido en ácido oleico y también a su menor contenido en tocoferoles y polifenoles totales. La mayor estabilidad se encuentra en el

aceite virgen de pistacho, acercándose a la estabilidad encontrada en los aceites de oliva virgen procedentes de la variedad *Arbequina*, aunque muy por debado de los aceites de oliva virgen de las variedades *Picual* y *Cornicabra* [10,11].

4. Características sensoriales de los aceites vírgenes de frutos secos

En la bibliografía consultada, no hemos encontrado referencia alguna relacionada con las características sensoriales de los aceites vírgenes de frutos secos. Solamente contamos con los resultados obtenidos por nuestro grupo de investigación, a partir de la colaboración con la empresa Albaga SAT nº 6.200 (Hellín, Albacete), a partir de un contrato de I+D. En dicho estudio evaluamos las consideraciones afectivas (opiniones) de los consumidores con respecto a los distintos aceites de frutos secos obtenidos, mediante el uso de pruebas de medición del grado de satisfacción y de pruebas de preferencia. También se ha evaluado el efecto del tostado de los frutos secos sobre los aceites obtenidos.

En este estudio, los consumidores han valorado positivamente todos los aceites de frutos secos extractados, con independencia del tipo de prensa utilizado (hidráulica o tornillo), y para todos los atributos sensoriales evaluados (color, olor y sabor). En los aceites extractados con prensa de tornillo, los peores valores los han obtenido las muestras procesadas a 50ºC y 75ºC, debido posiblemente al mal funcionamiento del equipo a bajas temperaturas. En cambio, los mejores resultados los han obtenido los aceites elaborados a temperaturas medias-altas (100-150ºC). Recordamos que las temperaturas citadas son las que alcanza la boquilla externa de la prensa de tornillo, pero no la temperatura real de los aceites que es considerablemente menor. En cuanto a los aceites obtenidos mediante prensa hidráulica, las condiciones de extracción (presión y tiempo) no han afectado a las características sensoriales de los aceites, pues no se han detectado diferencias significativas con respecto a ninguno de los atributos analizados.

Los consumidores también han valorado positivamente los aceites de frutos secos extractados con prensa hidráulica tras el tostado de los mismos. En los aceites de almendra y pistacho se valoran más los tostados a alta temperatura (100-150ºC), mientras que en la nuez ocurre lo contrario (50ºC).

Al comparar las muestras extractadas mediante prensa hidráulica con las extractadas con prensa de tornillo, no se han encontrado diferencias significativas con respecto a ningún atributo sensorial evaluado, sí exceptuamos el caso del color en el aceite de pistacho, donde el color verde hierba obtenido con prensa de tornillo lo hace más atractivo que el amarillo de la prensa hidráulica.

Al comparar los aceites extractados con prensa hidráulica, con y sin tostado de la materia prima, en el caso de la almendra y el pistacho se han valorado mejor los tostados, debido posiblemente a que es ésta la manera habitual de consumo de estos frutos secos, mientras que el caso de la nuez ocurre lo contrario, debido posiblemente al mismo motivo.

En este mismo estudio, y tras la formación de 7 jueces entrenados, que constituyeron un panel de cata de aceite de frutos secos, se llevaron a cabo distintas pruebas descriptivas. Destacamos en este trabajo la nota de cata relativa al aceite de almendra tostada, al de nuez fresca y al de de pistacho tostado:

Aceite de almendra tostada:

Aceite de color amarillo claro, con olor y sabor a almendra tostada, mostrando además un dulzor muy manifiesto y un agradable postgusto.

Aceite de nuez fresca:

Aceite de color amarillo pálido, con olor intenso a nuez fresca, muy fino y elegante, combinando en boca el sedoso gusto a nuez fresca con agradables toques dulzones.

Aceite de pistacho tostado:

Aceite de color verde hierba, con toques frutados y tostados en nariz y un gusto intenso a pistacho tostado en boca, muy fino y elegante.

Referencias

1. Guerra E.G., Zúñiga M.E. Tratamiento enzimático en la extracción de aceite de pipa de uva, Vitis vinifera, por prensado en frío. Grasas y Aceites. 2003, 54(1), 53-57.
2. Sineiro J., Domínguez H., Núñe, M.J. Pepitas de uva como fuente de aceite y proteína. Alimentación, Equipos y Tecnología. 1995, abril, 49-56.
3. Mendiola J.A., Herrero M., Cifuente, A., Ibáñez E. Use for compressed fluids for sample preparation: Food applications. J. Chromatography. 2007, 1152, 234-246.
4. Marzouki H., Piras A., Marongiu B., Rosa A., Dessi M.A. Extraction and separation of volatile and fixed oils from berries of Laurus nobilis L. by supercritical CO2. Molecules. 2008, 13, 1702-1711.
5. Maguire L.S., O´Sullivan S.M., Galvin K., O´Connor T.P., O´Brien N.M. Fatty acid profile, tocopherol, squalene and phytosterol content of walnuts, almonds, peanuts, hazelnuts and the macadamia nut. Int. J. Food Sci. Nutr. 2004, 55, 171-178.
6. Sena-Moreno E., Pardo J.E., Pardo-Giménez A-. Gómez R., Álvarez-Ortí R. Differences in oils from nuts extracted by means of two pressure systems. International Journal of Food Properties. 2016, 19(12), 2750-2760.
7. Rabadán A., Álvarez-Ortí M., Gómez R., Alvarrui, A., Pardo J.E. Optimization of pistachio oil extraction regarding processing parameters of screw and hydraulic presses. LWT – Food Science and Technology. 2017, 83, 79-85.
8. Rabadán A., Álvarez-Ortí, M., Gómez R., Pardo-Giménez A., Pardo J.E. Suitability of Spanish almond cultivars for the industrial production of almond oil and defatted flour. Scientia Horticulturae. 2017, 225, 539-546.
9. Rabadán A., Álvarez-Ortí M., Gómez R., Miguel C. de, Pardo J.E. Influence of genotype and crop year in the chemometrics of almond and pistachio oils. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2018, 98, 2402-2410.
10. Pardo J.E., Cuesta M.A., Alvarruiz A. Evaluation of potential and real quality of virgin olive oil from the designation of origin (D.O.) "Aceite Campo de Montiel" (Ciudad Real, Spain). Food Chemistry. 2007, 100, 977-984.
11. Pardo J.E., Cuesta M.A., Alvarruiz A., Granell J.D., Álvarez-Ortí M. Evaluation of potencial and real qualities of virgin olive oil from the designation of origin (DO) "Aceite Montes de Alcaraz" (Albacete, Spain). Food Chemistry. 2011, 124, 1684-1690.
12. Rabadán A., Pardo J.E., Pardo A., Álvarez-Ortí M. Effect of genotype and crop year on the nutritional value of walnut virgin oil and defatted flour. Science of the Total Environment. 2018, 674, 1092-1099.