

La alimentación en producción intensiva de animales monogástricos: Un elemento clave para reducir su impacto ambiental

A. Cerisuelo^{1,*} y S. Calvet²

¹ Centro de Investigación y Tecnología Animal, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, Pol. La Esperanza 100, 12400 Segorbe, Castellón, España

² Instituto de Ciencia y Tecnología Animal, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España

Resumen

La alimentación animal es un factor clave para garantizar la sostenibilidad de la ganadería, especialmente en la producción intensiva de monogástricos. El impacto ambiental de este sector está principalmente relacionado con la producción de materias primas para piensos y la gestión de deyecciones. Las materias primas que conforman un pienso determinan su huella ambiental. En nuestras condiciones, la sustitución de soja por fuentes proteicas locales y un aumento en el uso de subproductos podrían, inicialmente, mejorar la sostenibilidad de los piensos. Sin embargo, para valorar las ventajas ambientales reales es necesario disponer de información precisa sobre el origen y los efectos en la digestibilidad de los nutrientes y la productividad de estas materias primas. Por otro lado, existe una relación directa entre la alimentación, excreción de nutrientes y emisión de gases a partir de las excretas en porcino y aves. La reducción de proteína de los piensos reduce las emisiones de amoníaco de las excretas. Para otros nutrientes como la fibra y la grasa, esta relación es más compleja. La implementación de estrategias basadas en la nutrición de precisión, el uso de tecnología (pretratamientos y enzimas) para aumentar la digestibilidad de las materias primas o el control de la salud intestinal de los animales es fundamental para aumentar la eficiencia en el uso de recursos y reducir el impacto ambiental de la ganadería. Este trabajo describe el estado del arte de la formulación de piensos sostenibles y la mejora en el aprovechamiento de nutrientes.

Palabras clave: Estrategias alimentación, piensos sostenibles, excreción de nutrientes, amoníaco, gases de efecto invernadero, porcino, aves.

Feeding in monogastric animals: A key element to reduce its environmental impact

Abstract

Animal nutrition is a key factor in guaranteeing the sustainability of livestock farming, especially in the intensive production of monogastrics. The environmental impact of this sector is mainly related to the production of feedstuffs and manure management. Feed ingredients determine the environmental footprint of feeds. Under our conditions, soy replacement with local protein sources and an increase in the use of by-products could, initially, improve the sustainability of feeds. However, in order to assess

* Autor para correspondencia: cerisuelo_alb@gva.es

Cita del artículo: Cerisuelo A, Calvet S (2020). La alimentación en producción intensiva de animales monogástricos: Un elemento clave para reducir su impacto ambiental. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 116(5): 483-506. <https://doi.org/10.12706/itea.2020.039>

the real environmental benefits of these strategies, it is necessary to have accurate information about the origin and the effects on nutrient digestibility and productivity of these ingredients. On the other hand, there exists a direct relationship between feeding, nutrient excretion and gas emission from excreta in pigs and poultry. Reducing protein in feed reduces ammonia emission from excreta. However, for other nutrients like fiber and fat, this relationship is more complex. The implementation of strategies based on precision nutrition, the use of technology (pre-treatments and enzymes) to increase the digestibility of feedstuffs or the control of gut health is essential to increase the efficiency in the use of resources and reduce the environmental impact of livestock. This work describes the state of the art in the formulation of sustainable feeds and the improvement in the use of nutrients.

Keywords: Feeding strategy, sustainable feeds, nutrient excretion, greenhouse gases, ammonia, pigs, poultry.

Introducción

En un marco de emergencia climática que reclama acción urgente para combatir el cambio climático y la previsión de aumento de la demanda mundial de productos animales en respuesta al crecimiento demográfico que se espera, la actividad ganadera se enfrenta al importante reto de satisfacer esta demanda de manera sostenible. Dada su relevancia, este reto forma parte de los objetivos contemplados en la nueva Agenda para el Desarrollo Sostenible 2030 promovida por la UNESCO (UNESCO, 2017). Este reto debe ir acompañado del compromiso social de producir alimentos seguros y de calidad, en base a un marco legal europeo cada vez más exigente en términos de seguridad alimentaria y bienestar animal. En esta aventura, la alimentación animal juega un papel clave a varios niveles. En términos generales, la alimentación supone entre un 60-80 % de los costes de producción en las explotaciones, e influye directamente en el rendimiento productivo y salud de los animales, la seguridad del producto final y el impacto ambiental de la ganadería. Especialmente en los sistemas de producción intensiva en los que la dependencia de los recursos externos para la alimentación de los animales es total, es imprescindible contar con el sector de la alimentación animal para garantizar la sostenibilidad social, económica y ambiental de la

ganadería (FAO, 2014; FEFAC, 2016). En los sistemas de producción intensiva de porcino y aves, la mayor parte de los impactos ambientales están asociados a la obtención de las materias primas para la fabricación de piensos (incluyendo el cultivo, transporte y procesado de las materias primas; Lassaletta *et al.*, 2019). Por otra parte, la eficiencia con la que los animales aprovechan los alimentos condiciona los impactos asociados a la gestión de sus deyecciones, que son la otra gran fuente de contaminación procedente de la ganadería (MITECO, 2019). Conscientes de su importancia, la comunidad científica y el propio sector ganadero impulsan la búsqueda de estrategias de alimentación sostenibles para reducir el impacto ambiental de la ganadería. Es destacable, en este sentido, el esfuerzo dedicado en los últimos años a la aplicación de metodologías de cálculo de huella ambiental en el campo de la alimentación animal para la formulación de piensos sostenibles (Mackenzie *et al.*, 2016; Garcia-Launay *et al.*, 2018). Igualmente, el desarrollo de tecnología dirigida a aumentar el aprovechamiento de los nutrientes y reducir su excreción, tales como los sistemas de alimentación de precisión, tecnología de tratamiento de materias primas y aditivos en piensos ha sido relevante en los últimos años (revisado por Rojas y Stein, 2017 y Pomar y Remus, 2019). Por otro lado, la existencia de una relación positiva entre la salud gastroin-

testinal de los animales, la eficiencia y el impacto ambiental de la ganadería es cada vez más evidente (revisado por Celi *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2020). La salud podría convertirse en un criterio importante para la formulación de piensos sostenibles en el futuro.

Este trabajo pretende describir los avances en el conocimiento de la relación entre la alimentación y el impacto ambiental en la producción intensiva de porcino y aves, así como proponer estrategias alimentarias de mitigación dirigidas a conseguir una ganadería futura neutra en carbono.

Origen del impacto ambiental de la ganadería intensiva y relación con la alimentación

El impacto de la ganadería intensiva de monogástricos está principalmente asociado a la producción de materias primas para la fabricación de piensos y el manejo de las deyecciones ganaderas (Leip *et al.* 2015; Tallentire *et al.*, 2017; Lassaletta *et al.*, 2019; MITECO, 2019). Conocer los motivos por los cuales estas son las principales fuentes de contaminación es fundamental a la hora de identificar opciones para su mitigación.

Producción de materias primas para la fabricación de los piensos

El sector ganadero, en particular la ganadería intensiva consume una elevada cantidad de recursos en forma de uso de suelo, agua y nutrientes (Lassaletta *et al.*, 2019) y moviliza una cantidad de nutrientes creciente a nivel mundial. En este sentido, aproximadamente el 33 % de las tierras de cultivo a nivel mundial se dedican a producción de forrajes y piensos.

Según datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2018), la producción de piensos compuestos en España para animales de abasto en 2018 se cifró en

36.1 millones de toneladas, situándose a la cabeza de la Unión Europea. Estos piensos incluyen materias primas nacionales, pero también materias primas importadas. La fabricación de pienso para porcino y aves representa alrededor de un 67 % del total. En los sistemas intensivos de producción animal, la producción de materias primas para la fabricación de piensos tiene un elevado impacto ambiental y es una de las claves para la reducción de la huella de carbono asociada a los productos de origen animal (Leip *et al.* 2015; Tallentire *et al.*, 2017; Lassaletta *et al.*, 2019). El impacto ambiental de las materias primas suele cuantificarse mediante modelos de análisis de ciclo de vida (LCA, del inglés *life cycle analysis*) en los que se tienen en cuenta, básicamente, los "inputs" necesarios para su producción y el impacto ambiental que la obtención, procesado y transporte, y otros procesos involucrados, que cada ingrediente puede ocasionar a diferentes niveles: emisión de gases de efecto invernadero (impacto cambio climático), potencial eutrofización, potencial de acidificación, uso de energía, uso de suelo, uso de agua, entre otros. En términos generales, la producción de materias primas para piensos, contribuye en una proporción mayoritaria en estos componentes (Figura 1): un 50-85 % de la huella de carbono por 1 kg de carne, un 64-97 % del potencial de eutrofización, un 70-96 % del uso de energía y prácticamente todo del impacto relacionado con el cambio de uso de suelo del impacto ambiental de la producción de cerdos y aves (van der Werf *et al.*, 2005; Leinonen *et al.*, 2012; revisado por Nijdam *et al.*, 2012; McAuliffe *et al.*, 2017; Tallentire *et al.*, 2017). Sin embargo, la importancia de los diferentes factores en el impacto global puede cambiar según el tipo de producto (carne vs. huevos) o el sistema de producción (industrial vs. parque; batería vs. suelo) y, lógicamente, el origen y tipo de materias primas que incluyen los piensos (van der Werf *et al.*, 2005; Leinonen *et al.*, 2012; Tallentire *et al.*, 2018).

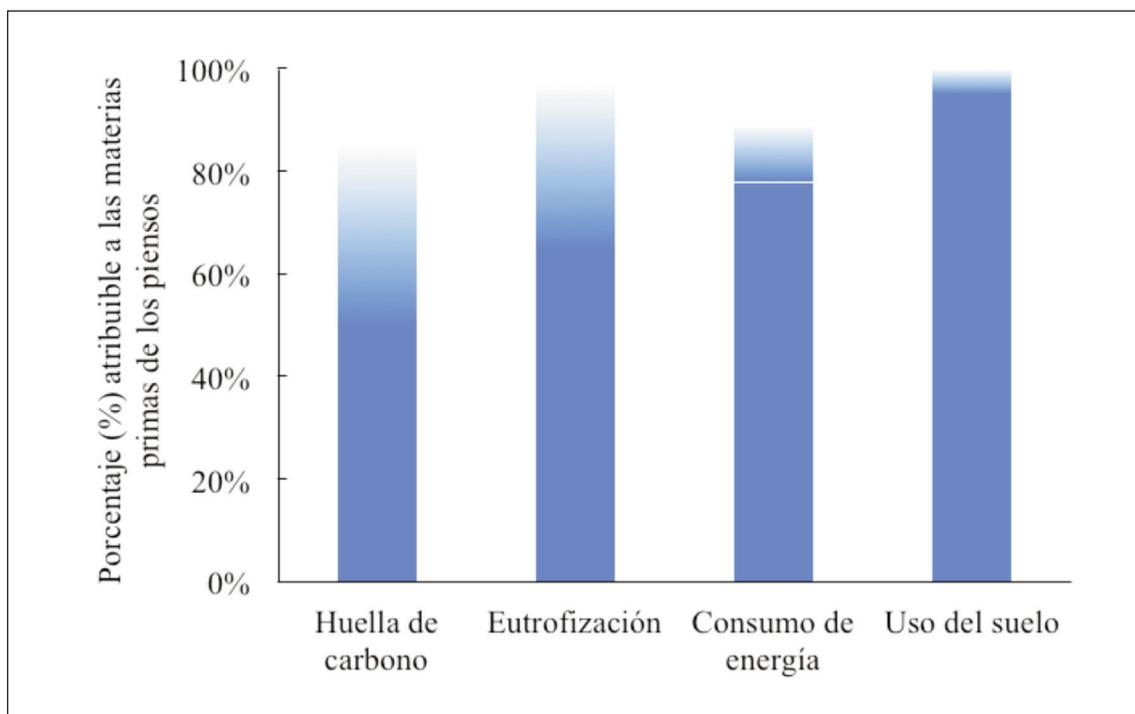


Figura 1. Porcentajes de distintos componentes de la huella ambiental (huella de carbono, eutrofización, consumo de energía y uso del suelo) atribuibles a la obtención de las materias primas para la fabricación de piensos en animales monogástricos. La parte de las columnas con tono de color degradado indica la variación entre estudios. Fuentes: van der Werf *et al.* (2005), Leinonen *et al.* (2012), Nijdam *et al.* (2012), McAuliffe *et al.* (2017), Tallentire *et al.* (2017).

Figure 1. Percentages of different components of the environmental footprint (carbon footprint, eutrophication, energy consumption and land use) attributable to obtaining raw materials for the production of feed in monogastric animals. The part of the columns with a gradient color tone indicates the variation among studies. Sources: van der Werf et al. (2005), Leinonen et al. (2012), Nijdam et al. (2012), McAuliffe et al. (2017), Tallentire et al. (2017).

La obtención de materias primas constituye una fuente indirecta de emisiones principalmente por el consumo energético de la elaboración de fertilizantes, por las emisiones de óxido nitroso (N_2O) en suelos de cultivo, por el transporte internacional y, en su caso, por las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) asociadas los cambios de uso del suelo. En relación al cambio de uso de suelo, este factor es importante en materias primas para las cuales su cultivo implica una transformación de suelo forestal en tierras de cultivo.

Esto es especialmente relevante en el caso de la soja, cuyo cultivo en extensas áreas de Brasil, Argentina y Estados Unidos está asociado a la deforestación, aunque también afecta a otras materias primas mayoritarias en piensos de monogástricos como los cereales. El cambio en el uso del suelo se asocia a una pérdida de sumideros de CO_2 y se traduce en mayores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) atribuibles a la producción de piensos (revisado por Nijdam *et al.*, 2012). Además, el cultivo de materias primas a me-

nudo implica un consumo de recursos hídricos importante (revisado por Nijdam *et al.*, 2012), que es también contemplado en el análisis de su huella ambiental.

Por otro lado, particularmente Europa es generalmente deficitaria en fuentes de proteína y la necesidad de importación de estas fuentes de proteína aumenta en el coste ambiental de la fabricación de piensos. Según indica el balance proteico para alimentación animal 2019/2020 (Comisión Europea, 2020), la Unión Europea está cerca de la autosuficiencia en ingredientes con un bajo (<15 %), bajo-medio (15-30 %) o muy elevado (>50 %) contenido en proteína, pero no en productos con un contenido medio-alto en proteína (30-50 %), entre los que se encuentran las fuentes de proteína más habituales en piensos, como las harinas de oleaginosas. La necesidad de importar estas materias primas no sólo aumenta en el coste ambiental de los piensos sino también la dependencia de países terceros, especialmente en el caso de la soja para la cual Europa importa el 97 % del producto.

Al margen de los efectos de las materias primas en el impacto ambiental de los piensos, no olvidemos que ingredientes como los cereales y la soja compiten directamente con la alimentación humana y que, en un futuro, estos serán cada vez menos competitivos en alimentación animal (Schader *et al.*, 2015; Lassaletta *et al.*, 2019). Igualmente, es importante destacar que el cultivo de materias primas como la soja o el aceite de palma puede conllevar implicaciones negativas sobre los derechos humanos que conviene controlar, para favorecer la sostenibilidad social, económica y ambiental de la fabricación de los piensos.

Dada a la importancia de la producción de materias primas en el impacto ambiental y social de la ganadería y la elevada y creciente demanda de producción de pienso en España, se deduce que la adopción de medidas de mitigación en este campo puede ser muy efectiva para incrementar la sostenibilidad del sector ganadero.

Impacto ambiental de las deyecciones ganaderas

Las deyecciones ganaderas contienen una buena parte de los nutrientes ingeridos por los animales, y esto supone un riesgo ambiental si éstas no se tratan de forma conveniente. En el trabajo de revisión de Lin *et al.* (2017) se indica que la tasa de excreción de nitrógeno (N) es aproximadamente 2/3 del N ingerido en cerdos de cebo, y más de la mitad en aves y que la eficiencia de utilización del fósforo (P) en animales no rumiantes es generalmente baja (20-27 %).

La forma habitual de gestión de estas deyecciones es el retorno a los campos de cultivos. La aplicación de estiércoles debe realizarse en todo caso de acuerdo con indicaciones agronómicas, es decir, a la dosis y en los momentos adecuados para cada cultivo, respetando además la dosis máxima de 170 kg de N por hectárea y año establecidos normativamente en Europa (BOE, 1996). En zonas de elevada concentración ganadera, este requisito no siempre es fácil de mantener por la elevada producción de purines. El riesgo de contaminación se multiplica al incrementar las dosis sobre las que se consideran convenientes, puesto que los nutrientes del estiércol acaban concentrados en el suelo, pueden llegar a las aguas o pasan a la atmósfera contaminando el medio terrestre, acuático y atmosférico. Actualmente en España la ganadería contribuye, junto con la fertilización inorgánica, a un importante excedente de N en los ecosistemas agrarios. Por tanto, el papel de la ganadería sobre el medio ambiente debe considerarse de forma integrada con otros sectores.

Adicionalmente, las deyecciones ganaderas son fuente importante de emisiones gaseosas, principalmente amoníaco (NH₃) y GEI como el metano (CH₄) o el N₂O, sobre las cuales existen compromisos internacionales de reducción como la Directiva Techos (DOUE, 2016) para el NH₃ o el Acuerdo de París para las

emisiones de GEI. En España, cerca del 70 % de las emisiones de NH_3 están relacionadas con la actividad ganadera, tanto por las emisiones en la propia granja como en la aplicación de los estiércoles a campo (MITECO, 2019). Las granjas porcinas y avícolas supusieron en 2017 un 17 % y 8 % del total de emisiones de NH_3 a la atmósfera, respectivamente, sin contar las emisiones de la aplicación de los estiércoles a campo. Respecto a los GEI, las emisiones directas del ganado suponen un porcentaje relativamente bajo, pero relevante: cerca de 24 millones de toneladas de CO_2 equivalente lo que representa, aproximadamente, un 6 % del total de las emisiones asociadas a la actividad humana en España (MITECO, 2019). El CH_4 es el principal GEI emitido por la ganadería. El ganado porcino, a pesar de tener una reducida emisión de CH_4 de origen entérico, tiene una elevada emisión de CH_4 asociada a la gestión de los purines, totalizando unos 6,2 millones de toneladas de CO_2 equivalente en 2017 (MITECO, 2019). Por el contrario, las aves tienen un sistema digestivo y un tipo de estiércol que no favorecen la emisión de CH_4 , y su contribución es muy inferior al porcino (MITECO, 2019).

Numerosos estudios en la literatura evidencian que existe una relación directa entre la alimentación, excreción de nutrientes y emisión de gases a partir de las excretas en porcino y aves. Esta relación se basa en la asunción de que la composición de los piensos es capaz de modificar el comportamiento digestivo de los animales y, con ello, el aprovechamiento de los nutrientes (digestibilidad) y la capacidad de fermentación intestinal. Estas modificaciones afectarán a la composición y características del purín y, con ello, a las emisiones de gases.

En la tabla 1 se muestran algunos de los trabajos más relevantes publicados hasta el momento donde se relaciona el tipo de dieta (variación en ingredientes/nutrientes) con las

emisiones de NH_3 y CH_4 a partir de las excretas de porcino y aves. A nivel particular para cada uno de los nutrientes del pienso, estos trabajos sugieren que la relación entre la composición de los piensos, las excretas y las emisiones de gases derivadas puede ser muy compleja. El nutriente más evaluado hasta el momento y que muestra una relación más directa con las emisiones de gases a partir del purín es la proteína bruta (PB) o N. Es ampliamente reconocido que el contenido en PB del pienso está directamente relacionado con la excreción de N ureico y, por tanto, con las emisiones de NH_3 (Ferguson *et al.*, 1998; Portejoie *et al.*, 2004; Sajeev *et al.*, 2018; Lemme *et al.*, 2019). Se estima que por cada unidad porcentual de reducción de la ingesta de PB las emisiones de NH_3 pueden reducirse entre un 8-9 % de promedio en porcino y ponedoras alimentados con piensos con niveles moderados de PB (entre 12 % y 20 % en porcino, 11,5 % y 15,0 % en gallinas reproductoras, (Portejoie *et al.*, 2004; van Emous *et al.*, 2019). En el caso de pollos broiler, esta reducción podría ser mayor ya que parten de niveles de proteína superiores en los piensos. En este sentido, Ferguson *et al.* (1998) reportan una reducción de alrededor de un 16 % en las emisiones al bajar el nivel de PB del 21,5 % al 19,6 % en los piensos. Esta evidencia es tan sólida, que la reducción del contenido de PB de los piensos para reducir la excreción de N (suplementando con aminoácidos sintéticos, AA) es una de las estrategias alimentarias de reducción de emisiones propuesta por la Comisión Europea en las Conclusiones de Mejores Técnicas Disponibles (DOUE, 2017).

En referencia a otros nutrientes del pienso como la fibra o la grasa, su relación con las emisiones de gases a partir de las excretas es menos consistente. Un aumento de la fibra en la dieta parece tener un efecto mitigador en las emisiones de NH_3 procedentes de las excretas tanto en porcino como en gallinas

Tabla 1. Efectos de la inclusión de ingredientes o variación en los nutrientes de piensos de porcino y aves sobre las emisiones de amoníaco (NH₃) y metano (CH₄) derivadas de las excretas.

Table 1. Effects of different ingredient inclusion or nutrient variation in pigs and poultry feeds on ammonia (NH₃) and methane (CH₄) emission from excreta.

Referencia	Especie	Nutriente/Ingrediente ¹	Efectos sobre emisiones de NH ₃ ²	Efectos sobre emisiones de CH ₄ ^{2,3}
Ferguson et al. (1998)	Broiler	Proteína bruta	+	Nd
Canh et al. (1998)	Porcino	Fibra fermentable (pulpa de remolacha)	-	Nd
Portejoie et al. (2004)	Porcino	Proteína bruta	+	Nd
Leek et al. (2004)	Porcino	Grasa (aceite de palma, aceite de soja)	No afecta	Nd
Roberts et al. (2007)	Gallina ponedora	Proteína bruta y fibra (DDGS maíz, harinilla de trigo y cascarilla de soja)	Proteína bruta: no afecta Fibra: -	Nd
O'Shea et al. (2009)	Porcino	Proteína bruta y fibra fermentable (pulpa de remolacha)	Fibra: - Proteína bruta: +	Nd
Wu-Haan et al. (2010)	Gallina ponedora	Fibra (DDGS)	-	Nd
Hernández et al. (2011)	Porcino	Proteína bruta (niveles comerciales)	+	Nd
Jarret et al. (2011)	Porcino	Proteína bruta y fibra (DDGS, pulpa de remolacha, harina de colza)	Proteína bruta: + Fibra: -	Fibra: No afecta (/L purín); + (animal)
Jarret et al. (2012)	Porcino	Fibra (DDGS y harina de colza)	-	No afecta
Yusrizal et al. (2013)	Gallina ponedora	Harina de palma	-	Nd
Li et al. (2014)	Gallina ponedora	Fibra (DDGS)	-	+
Antezana et al. (2015)	Porcino	Grasa (jabón cálcico) y fibra (pulpa cítrica)	Grasa: - Fibra: no afecta	Grasa: + Fibra: -

Fuente: elaboración propia.

¹ DDGS: granos secos de destilería con solubles.

² +: la emisión aumenta con el aumento/inclusión del nutriente/ingrediente, -: la emisión se reduce con el aumento/inclusión del nutriente/ingrediente.

³ Nd: no determinado.

Tabla 1. Efectos de la inclusión de ingredientes o variación en los nutrientes de piensos de porcino y aves sobre las emisiones de amoníaco (NH_3) y metano (CH_4) derivadas de las excretas (continuación).
 Table 1. Effects of different ingredient inclusion or nutrient variation in pigs and poultry feeds on ammonia (NH_3) and methane (CH_4) emission from excreta (continuation).

Referencia	Especie	Nutriente/Ingrediente ¹	Efectos sobre emisiones de NH_3 ²	Efectos sobre emisiones de CH_4 ^{2, 3}
Beccaccia et al. (2015)a	Porcino	Fibra fermentable e insoluble (pulpa cítrica, harina de garrofa)	-	-
Beccaccia et al. (2015)b	Porcino	Fuente de proteína (harina de soja, harina de girasol, DDGS)	Harina de soja < Harina de girasol DDGS intermedios	Harina de soja < Harina de girasol DDGS intermedios
Rubayet-Bostami et al. (2017)	Broiler	Grasa (aceite de soja, grasa de aves, sebo, manteca y sebo, manteca de cerdo)	Menores con aceite de soja y grasa de aves	Nd
Ferrer et al. (2018a)	Porcino	Fibra insoluble (pulpa de aceituna)	-	No afecta
Ferrer et al. (2020)	Porcino	Fibra insoluble (pulpa de aceituna)	No afecta	No afecta
Ferrer et al. (2018b)	Porcino	Fibra fermentable (pulpa cítrica)	-	-
Reza et al. (2018)	Porcino	Proteína bruta y fibra bruta	Proteína bruta: +	Fibra: + (tendencia)
Lemme et al. (2019)	Broilers	Proteína bruta	+	Nd
Shabani et al. (2019)	Broilers	Fuente de proteína (ensilado de pescado vs. harina de soja)	ensilado pescado < harina soja	Nd
Van Emous et al. (2019)	Gallinas reproductoras pesadas	Proteína bruta	+	Nd

Fuente: elaboración propia.

¹ DDGS: granos secos de destilería con solubles.

² +: la emisión aumenta con el aumento/inclusión del nutriente/ingrediente, -: la emisión se reduce con el aumento/inclusión del nutriente/ingrediente.

³ Nd: no determinado.

ponedoras (Roberts *et al.*, 2007; Wu-Haan *et al.*, 2010; Jarret *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2014; Beccaccia *et al.*, 2015a; Ferrer *et al.*, 2018a). Contrariamente a lo que se ha sugerido hasta el momento, estudios realizados en nuestro grupo de investigación indican que este efecto podría ser independiente del tipo de fibra (soluble o insoluble) (Beccaccia *et al.*, 2015a). Sin embargo, el mecanismo de acción que subyace podría ser diferente para las diferentes fuentes de fibra. En el caso de la fibra soluble, esta sería utilizada por los microorganismos intestinales, incrementando la proporción de N en heces (proteína microbiana) y reduciendo la cantidad de N eliminado por orina (N ureico) y, en consecuencia, las emisiones de NH_3 del purín (Canh *et al.*, 1998; Beccaccia *et al.*, 2015a). Además, algunos autores reportan una reducción del pH de la orina como consecuencia de la inclusión de fibra soluble que favorecería la reducción de las emisiones de NH_3 . En el caso de la fibra insoluble, sin embargo, una reducción significativa de la digestibilidad de nutrientes, la PB entre ellos, incrementaría la presencia de N en las heces reduciendo N en orina (Beccaccia *et al.*, 2015a). La fibra en la dieta parece también ejercer un efecto sobre las emisiones de CH_4 del purín, aunque este efecto ha sido menos estudiado y es muy variable. Algunos estudios sugieren una reducción en el potencial de emisión de CH_4 expresado en ml/g materia orgánica (de entre un 10 % y un 20 % aproximadamente) con la incorporación de subproductos fibrosos como la harina de colza en piensos de porcino (Torres-Pitarch *et al.*, 2014; Jarret *et al.*, 2011). Sin embargo, otros no observan diferencias claras en la emisión de CH_4 con la incorporación de DDGS o harina de colza (Jarret *et al.*, 2012) o incluso sugieren aumentos en gallinas ponedoras (Li *et al.*, 2014). En relación a los efectos del nivel de grasa, el número de trabajos que estudian la relación entre la grasa en las excretas y las emisiones

de gases es escaso. Una de las posibles razones para creer que este nutriente no tiene importancia en heces es que, generalmente, su digestibilidad en piensos suele ser elevada (>90 %) y, por lo tanto, su presencia en heces es baja. Sin embargo, el potencial calorífico de la grasa es muy elevado. En estudios en los que se utilizaron grasas menos digestibles en piensos (Antezana *et al.*, 2015; Rubayet-Bostami *et al.*, 2017) se sugiere que la grasa en el purín puede potenciar las emisiones de CH_4 , al contrario de lo que sucede a nivel de rumen en el que un aporte de grasa inhibe algunas poblaciones bacterianas y la producción de CH_4 entérico.

Resultados obtenidos en el marco de experimentos llevados a cabo por nuestro grupo de investigación demuestran que el efecto de la alimentación en las emisiones de gases puede ser evidente incluso a nivel de suelo. En este sentido, se ha observado que los purines obtenidos de animales alimentados con piensos ricos en fibra fermentable (pulpa cítrica) son capaces de reducir la emisión de CH_4 y N_2O al ser aplicados al suelo (Sánchez-Martín *et al.*, 2017).

Más allá de los niveles y tipo de nutrientes, también ciertos aditivos o compuestos bioactivos (aceites esenciales, polifenoles, antioxidantes...) muestran capacidad para reducir las emisiones de gases. Su potencial efecto modulador de la microbiota o sobre la digestibilidad de los nutrientes podrían explicar estos efectos.

Por lo tanto, la relación entre la alimentación, la composición de las excretas y las emisiones de gases derivadas es evidente, aunque su interpretación, especialmente en el caso de los efectos de la fibra y la grasa, es compleja y sujeta a numerosas interacciones. Factores como el tipo/composición de estos nutrientes, su interacción con otros nutrientes de la dieta y la incapacidad, a menudo, de separar los efectos de cada nutriente son al-

gunos de los responsables de esta complejidad. Es necesario, por lo tanto, profundizar en el conocimiento de esta relación, prestando especial atención a las interacciones entre nutrientes y a los procesos físico-químicos y microbiológicos que desencadenan estas emisiones, con el objetivo de poder sumar nuevas estrategias alimentarias basadas en la composición química de las dietas para reducir el impacto ambiental de la ganadería.

Estrategias de alimentación para mitigar el impacto ambiental de la ganadería intensiva

A nivel legal, la adopción de medidas nutricionales para mitigar el impacto ambiental de la ganadería intensiva de cerdos y aves es ya una realidad, a través de la publicación de la Decisión de Ejecución de la Comisión Europea 2017/302 por la que se establecen las conclusiones sobre las mejores técnicas disponibles (MTD) en el marco de la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo (DOUE, 2017). Esta Decisión obliga a que el sector adopte estrategias entre las que se incluyen la reducción de los niveles de proteína y la utilización de aditivos en piensos para mejorar la eficiencia de utilización de los nutrientes. Esta publicación es el principio de un previsible recorrido legal que se endurecerá en el futuro.

En base a los conocimientos científicos actuales y la tecnología disponible, en este apartado se destacan algunas de las estrategias de alimentación más relevantes que pueden contribuir a mitigar el impacto ambiental de la ganadería intensiva. Estas se basan fundamentalmente en: 1) reducir el impacto ambiental de la fabricación de piensos; 2) reducir la excreción de nutrientes; 3) mejorar la salud de los animales.

Reducción del impacto ambiental de la fabricación de piensos

Tal y como ya se ha comentado, la elección de las materias primas que forman parte de los piensos incide directamente en la sostenibilidad económica, ambiental y social de la ganadería. En la actualidad, los piensos se formulan obedeciendo principalmente a criterios productivos y económicos. Otros aspectos ambientales y sociales no son habitualmente contemplados en la toma de decisiones a la hora de formular piensos. Sin embargo, ya son numerosos los trabajos científicos que aportan información sobre el impacto ambiental de una gran variedad de materias primas utilizadas en piensos a través del cálculo del LCA (Wilfart *et al.*, 2016; Mackenzie *et al.*, 2016; Garcia-Launay *et al.*, 2018), por lo que la posibilidad de incluir esta información en las matrices de formulación está cada vez más cerca. Disponer de estas bases de datos es el primer paso para poder formular con criterios ambientales. Sin embargo, en estos mismos trabajos se destaca la importancia de estandarizar las metodologías de cálculo de LCA y adaptar los cálculos a las circunstancias de cada país para aumentar su fiabilidad y precisión.

Los resultados de algunos de los trabajos más completos en este sentido permiten clasificar los ingredientes en varios grupos según su impacto ambiental (Wilfart *et al.*, 2016): 1) Alto impacto: incluye ingredientes de origen industrial como los AA sintéticos, vitaminas y el aceite de soja. El nivel de inclusión de estos ingredientes en los piensos es bajo, y también lo es el margen de sustitución por otros con menor impacto; 2) Bajo impacto: incluye subproductos provenientes directamente del campo o de las industrias. Debido a la baja necesidad de inputs que tiene el sistema para su producción (son productos secundarios derivados de otras producciones principales), su impacto ambiental en los pien-

Los piensos pueden ser menores, especialmente si se trata de subproductos de proximidad, es decir, producidos cerca de las fábricas de pienso y explotaciones. Son, por lo tanto, materias primas con las que se podría reducir el impacto ambiental de los piensos; 3) Impacto variable: en este grupo se sitúan la mayor parte de los ingredientes habituales en los piensos de porcino y aves, tales como los cereales y las oleaginosas. El impacto de estas materias primas depende de las prácticas de cultivo (fertilización, riego...) en el lugar de origen, disponibilidad local y contenido en nutrientes, entre otros factores.

Con esta información, *a priori*, las mejores opciones para reducir el impacto ambiental de los piensos son la utilización de subproductos (en sustitución de otras materias primas más contaminantes) y la elección de cereales y oleaginosas con menor impacto ambiental, o incluso su sustitución por materias primas alternativas más sostenibles. En el caso de los cereales, conocer bien las características de cada cultivo es esencial ya que pequeñas sustituciones entre cereales pueden mejorar sustancialmente la sostenibilidad ambiental de los piensos sin diferencias notables en parámetros nutricionales y, en ocasiones, apenas variaciones en precio del pienso (van der Werf *et al.*, 2005). Con respecto a las oleaginosas, como ya se ha comentado, debido a la necesidad de importación y su relación con la deforestación, el uso de soja puede incrementar el impacto ambiental de los piensos. En Europa, estrategias como la optimización de la fertilización de los cultivos, el uso de ingredientes producidos a nivel local, el uso de trigo vs. maíz y la sustitución de soja por otras materias primas proteicas locales como la harina de colza pueden mejorar la huella ambiental de la fabricación de piensos (van der Werf *et al.*, 2005; Garcia-Launay *et al.*, 2018; Tallentire *et al.*, 2018). Además, a nivel general se establece que cuanto mayor sea la variedad de materias primas disponibles,

mayor será la capacidad de cada región para aumentar la sostenibilidad de los piensos (Tallentire *et al.*, 2017).

Merece la pena destacar que, en el caso de los AA sintéticos, su inclusión en los piensos de porcino y aves permite reducir el nivel de PB y, con ello, la excreción de N y emisión de NH_3 , si afectar a los rendimientos productivos (Kebreab *et al.*, 2016). Por todo ello, a pesar de ser ingredientes de alto impacto, su uso contribuye a mejorar su sostenibilidad de la ganadería.

En lo que respecta a la utilización de subproductos, su valorización en alimentación animal forma parte del concepto de "Economía Circular" basado en el reciclaje de materiales con el fin de cerrar los ciclos de nutrientes, que promueve la Comisión Europea con fines medioambientales y económicos en su Plan de Acción para la Economía Circular. Tanto por su condición de producto secundario a una actividad principal como por su carácter generalmente local, su aprovechamiento en alimentación animal contribuye a la reducción del impacto ambiental de los piensos (Schader *et al.*, 2015; Wilfart *et al.*, 2016; Saleemdeeb *et al.*, 2017; Lassaletta *et al.*, 2019) y el aumento del desarrollo local de la ganadería, además de ser una vía de eliminación de "residuos" para las industrias. Otro aspecto importante de los subproductos es que generalmente no compiten con alimentación humana, lo que les confiere ventajas sociales y económicas (Schader *et al.*, 2015; Lassaletta *et al.*, 2019) frente a los cereales y la soja, por ejemplo, quienes pueden ser ingredientes principales en la dieta humana.

España, por su tradición agrícola, es una gran productora de subproductos agroindustriales procedentes de la industria agroalimentaria y potencialmente utilizables en alimentación animal como la pulpa de aceituna, pulpa cítrica, bagazo de cerveza, subproductos del vino y del procesado de cereales. Además, es tam-

bién relevante la producción de subproductos procedentes de la industria energética (producción de biocombustibles) como la harina/torta de colza o girasol y los granos secos de destilería (DDGS), aunque la disponibilidad de éste último en Europa es baja, que principalmente aportan proteína en los piensos y raciones. En el afán de reducir la dependencia por la soja y aliviar el déficit proteico de la UE, se está potenciando el cultivo de otras oleaginosas como camelina (Ferrer *et al.*, 2019a) o de leguminosas grano como fuentes proteicas alternativas. También en este sentido, se está trabajando con otras fuentes de proteína alternativas en la UE como la harina de insectos, microalgas o los aislados de proteína microbiana que pueden llegar a convertirse en fuentes de proteína sostenibles en la UE a corto-medio plazo (Tallentire *et al.*, 2018; revisado por Pinotti *et al.*, 2019).

Pese a sus ventajas medioambientales, existen todavía importantes limitaciones de carácter nutricional y logístico, que impiden el uso óptimo y generalizado de algunos subproductos en piensos de aves y porcino como son: 1) un conocimiento insuficiente de su valor nutricional; 2) la elevada variabilidad en su composición; 3) su generalmente elevado contenido en fibra y la presencia de factores antinutricionales (FAN) que pueden afectar a la digestibilidad de los nutrientes; 4) la limitada disponibilidad de algunos subproductos debido a su estacionalidad o baja producción (por ejemplo en el caso de las nuevas fuentes de proteína) y 5) la necesidad de transformación o adecuación de muchos de ellos para ser utilizados por las fábricas de pienso (ej. deshidratación, peletización...). En términos prácticos, para poder utilizar subproductos agroindustriales con garantías es fundamental conocer con precisión su valor nutricional y el nivel óptimo de inclusión en piensos ya que, por su naturaleza fibrosa, su inclusión a niveles no óptimos podría reducir la digestibilidad de los nutrientes, y comprometer sus

ventajas ambientales (Beccaccia *et al.*, 2015a; Ferrer *et al.*, 2018a; Ferrer *et al.*, 2020).

Por lo tanto, aunque la información existente para poder formular piensos con criterios de sostenibilidad es cada vez mayor, este campo aún requiere un importante esfuerzo a nivel de investigación y tecnología para conseguir una implementación práctica con garantías. Por otro lado, existen cada vez más evidencias (la crisis del COVID-19 la más reciente) que nos recuerdan que el mercado de las materias primas puede ser muy volátil y que poder contar con materias primas producidas a nivel local y, prácticamente, sin competencias en alimentación humana como los subproductos puede ser parte del futuro de la alimentación animal. Por lo tanto, es de esperar que su uso se vea incrementado en los próximos años.

Reducción de la excreción de nutrientes

En general, el riesgo ambiental de las deyecciones ganaderas es mayor a medida que su volumen y contenido en nutrientes es más elevado. Para minimizar este riesgo es necesario optimizar el aporte y el uso de los nutrientes dentro de los diferentes sistemas ganaderos, ya sea mediante un mayor ajuste a las necesidades reales de los animales o un aumento de la digestibilidad de los nutrientes, tal y como se describe a continuación.

Ajuste del aporte de nutrientes a las necesidades reales de los animales: alimentación de precisión

La alimentación de precisión es un concepto que está ganando importancia en la producción de porcino y aves debido a su vinculación con un aumento de la eficiencia y bienestar animal y la reducción de los costes de alimentación e impacto ambiental (Andretta *et al.*, 2016; Zuidhof *et al.*, 2017; revisado por Pomar y Remus, 2019). El objetivo de la

alimentación de precisión es mejorar el ajuste de los aportes nutricionales a las necesidades reales de los animales. En general, en los actuales sistemas de alimentación se proporciona el mismo pienso a todos los animales de la misma condición (fase fisiológica) durante largos períodos de tiempo (por ejemplo, más de 3 meses en cerdas gestantes, 30 días en cerdos de cebo, 10-15 días en pollos broiler o varios meses en gallinas ponedoras). Sin embargo, las necesidades reales de nutrientes de los animales pueden cambiar casi diariamente en algunas fases fisiológicas ya que son enormemente dependientes del n° parto, peso y sexo, entre otros (revisado por Solà-Oriol y Gasa, 2017). Cuanto mejor sea el ajuste de los aportes nutricionales a las necesidades reales de los animales menor será la cantidad de nutrientes excretados y el impacto ambiental de las deyecciones. A modo de ejemplo, estudios recientes indican que la adaptación diaria individual de las dietas a las necesidades en cerdos de cebo reduce la ingesta de lisina en más del 25 %, los costes de alimentación en más del 10 % por animal, la excreción de N y P en un 30 % y 14 %, respectivamente (Andretta *et al.*, 2016). Además, este tipo de alimentación tiene otras consecuencias ambientales como son la reducción del impacto sobre el cambio climático y el potencial de eutrofización y acidificación del medio en un 6 % y un 5 %, respectivamente (Andretta *et al.*, 2018). La aplicación práctica de la alimentación de precisión en granjas comerciales requiere: 1) conocer de manera precisa las necesidades reales de los animales y sus variaciones en función de la edad, fase fisiológica, peso, sexo, línea genética, tipo de alojamiento, condiciones ambientales, condiciones sanitarias, entre otros; 2) conocer de manera precisa el valor nutricional de los ingredientes utilizados en los piensos; 3) fabricar piensos de manera precisa acorde a la composición real las materias primas; 4) disponer de equipos de medición a tiempo real para monitorizar el peso y con-

sumo de los animales, así como las condiciones ambientales de las naves (temperatura, humedad, gases); 5) disponer de sistemas de alimentación que permitan individualizar la alimentación (por animal o por grupo).

En este sentido, las tablas de necesidades y recomendaciones nutricionales publicadas por organismos como National Research Council (NRC), the Central Bureau for Livestock Feeding (CVB) y la Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (FEDNA), son cada vez más precisas y ya tienen en cuenta factores como la genética y la fase de producción para establecer recomendaciones, aunque otros factores importantes como el número de parto o el sexo aún no se contemplan. Así mismo, como resultado de un importante esfuerzo realizado por la comunidad científica en los últimos años, la disponibilidad de datos de valor nutricional de materias primas en forma de nutrientes digestibles verdaderos (energía neta, digestibilidad ileal estandarizada para AA y minerales) es cada vez mayor, lo que aumenta la precisión en la formulación de raciones. En cuanto a la tecnología que acompaña a la fabricación de los piensos y los sistemas de alimentación de precisión, a nivel de la industria de fabricación de piensos es ya posible implementar medidas de análisis rápido de materias primas mediante tecnología NIR online, para un mayor ajuste de las formulaciones al valor real de los nutrientes de cada materia prima. Igualmente, el desarrollo de sistemas de alimentación individualizada para todas las fases de crecimiento en aves y porcino está siendo importante en la actualidad, aunque éstos todavía no están plenamente disponible a nivel comercial. Por todo ello, la alimentación de precisión está cada vez más cerca de ser una realidad en las explotaciones de porcino y aves.

Sin embargo, aunque la implementación de los sistemas de alimentación individualizada permitirá avanzar en la puesta en práctica de

la nutrición de precisión, los expertos indican que el fin último para una verdadera alimentación de precisión es la nutrición personalizada (Zuidhof *et al.*, 2017; revisado por Pomar y Remus, 2019). Para hacerla posible, el futuro de la alimentación de precisión requerirá la búsqueda de biomarcadores del perfil metabólico y microbiota intestinal que permitan evaluar, de manera personalizada, el balance nutricional, eficiencia y bienestar de los animales y ajustar los aportes nutricionales a cada caso.

Incremento de la digestibilidad de los piensos

Hoy por hoy no es posible formular piensos 100 % aprovechables por los animales, pero si es posible adoptar medidas para maximizar su biodisponibilidad y reducir la presencia de nutrientes en las heces y orina. Entre estas medidas se encuentran: 1) formular piensos con materias primas más digestibles y 2) aumentar la digestibilidad de las materias primas y piensos mediante el uso de tecnología.

1) Digestibilidad intrínseca de las materias primas: La digestibilidad de los diferentes nutrientes puede ser muy variable según la materia prima de la que se trate. Lógicamente, una mayor digestibilidad de las materias primas implica una mayor digestibilidad del pienso y un menor volumen de excretas, nutrientes excretados y potencial contaminante asociado. En general, las materias primas con un mayor contenido en fibra y/o FAN o que han sido sometidas a tratamientos por calor, como ocurre con algunos subproductos agroindustriales, pueden presentar una menor digestibilidad de sus nutrientes y aumentar el volumen de excretas (Jarret *et al.*, 2012; Beccaccia *et al.* 2015a; Ferrer *et al.*, 2018a), reduciendo así la ventaja ambiental que les confiere el hecho de ser subproductos. Sin embargo, esto no es siempre así y depende de la materia prima en cuestión. A modo de ejemplo, estudios recientes en nuestro grupo de investigación (Beccaccia *et al.*, 2015a; Fe-

rrer *et al.*, 2018a; Ferrer *et al.*, 2018b) indican que la inclusión de subproductos fibrosos como la pulpa de aceituna o la pulpa cítrica a niveles elevados (20-50 %) en piensos de porcino reducen las emisiones de NH_3/L de purín. A estos niveles de inclusión, la pulpa de aceituna reduce de manera significativa la digestibilidad de los nutrientes y aumenta el volumen de excretas (Ferrer *et al.*, 2018a). Sin embargo, la pulpa cítrica apenas modifica el volumen de excretas, probablemente por el tipo de fibra que contiene (soluble y fermentable). Por lo tanto, a nivel global, la ventaja ambiental de la reducción de las emisiones de NH_3 será únicamente real para el caso de la pulpa cítrica. En este sentido, muchos de los trabajos que relacionan la alimentación y las emisiones de gases de las excretas obvian el dato de la digestibilidad y cantidad de excreta, que es fundamental para interpretar el éxito de una estrategia de alimentación para reducir el impacto ambiental.

Por lo tanto, es importante señalar que más allá de únicamente considerar su origen y método de obtención, conocer la digestibilidad de las materias primas y sus efectos sobre el pienso es clave para estimar su verdadera implicación en la sostenibilidad global de un pienso.

2) Mejora de la digestibilidad mediante tecnología: pretratamientos y uso de enzimas: La aplicación de determinadas condiciones de molienda (martillos o rodillos), tratamientos de deshidratación o hidrotérmicos (peletización, extrusión, expansión...) o incluso biológicos de las materias primas pueden mejorar su contenido en nutrientes digestibles para porcino y aves, especialmente interesante cuando se trata de materias primas fibrosas (revisado por de Vries *et al.*, 2012; Rojas y Stein, 2017; Kiarie y Mills, 2019 y Olukomaiya *et al.*, 2019). Igualmente, el uso de enzimas exógenas y otros aditivos constituye una estrategia tecnológica ya habitual hoy en día para mejorar la utilización digestiva de los nutrientes del pienso (revisado por Rojas y Stein, 2017 y Raza *et al.*, 2019).

En cuanto a la molienda, es bien conocido que la reducción del tamaño de partícula de los ingredientes mejora la digestibilidad de sus nutrientes (revisado por Amerah *et al.*, 2007; Vukmirovi *et al.*, 2017 y Kiarie y Mills, 2019). Sin embargo, una excesiva presencia de partículas finas puede ser perjudicial para la salud digestiva en porcino y aves. En general, se consideran óptimos tamaños de partícula entre 500-1600 μm en porcino y entre 600-900 μm en broilers (revisado por Amerah *et al.*, 2007 y Vukmirovi *et al.*, 2017), aunque esto puede variar según la forma de presentación del pienso. En aves, sin embargo, es cada vez más evidente que por su fisiología digestiva, estimular la actividad de la molleja con presentaciones más groseras puede tener beneficios a nivel de digestibilidad de nutrientes y reducción de emisiones de NH_3 (Kheravii *et al.*, 2017; Wang-Li *et al.*, 2020). En cuanto a los tratamientos hidrotérmicos, la peletización de los piensos ofrece innumerables ventajas en relación a la higienización del pienso, la ingestión y la digestibilidad de la energía de los piensos (revisado por Vukmirovi *et al.*, 2017 y Kiarie y Mills, 2019). Tratamientos más agresivos como son la expansión o la extrusión pueden promover la solubilización de la fibra y mejorar su digestibilidad (revisado por Rojas y Stein, 2017). Sin embargo, además de que en la mayoría de ocasiones no son justificables en términos económicos y medioambientales, estos tratamientos pueden perjudicar la digestibilidad de otros nutrientes como la PB y AA y aumentar la viscosidad de la digesta, aspecto fundamental para la digestibilidad de los nutrientes en las aves (Almeida *et al.*, 2013; revisado por Vries *et al.*, 2012).

Al margen de los tratamientos más convencionales, en los últimos años están ganando protagonismo los tratamientos biológicos como la biotransformación mediante fermentación sólida de materias primas, también especialmente interesante en aquellas más fi-

brasas y proteicas (revisado por Ajila *et al.*, 2012 y Olukomaiya *et al.*, 2019). Se trata de un proceso sencillo en el que un material orgánico es fermentado sin presencia de líquido. Entre sus ventajas más importantes se encuentra el aumento del contenido y disponibilidad de la proteína principalmente y, en ocasiones, también el aumento del contenido lipídico de las materias primas (Ahmed *et al.*, 2014; Aljuobori *et al.*, 2017). Además, esta tecnología reduce el contenido lignocelulósico (fibra) de las materias primas y es capaz de aumentar de la biodisponibilidad de los nutrientes y reducir el contenido en factores antinutricionales como el ácido fítico, polifenoles y taninos (Shi *et al.*, 2017). Todas estas características la hacen ideal para el tratamiento y mejora del valor nutricional de subproductos fibrosos como la pulpa de manzana, cítrica o el bagazo de cerveza, aunque también se utiliza en otras materias primas proteicas como la harina de soja o las leguminosas grano (revisado por Olukomaiya *et al.*, 2019).

Por otro lado, el uso de aditivos como las enzimas exógenas para mejorar la digestibilidad de los piensos está ya muy extendido en alimentación de porcino y aves. Aunque la función principal de las enzimas es tratar de mejorar la digestibilidad de los nutrientes de los piensos mediante hidrólisis directa, también se les atribuyen funciones como mejorar la palatabilidad de los piensos, reducir la viscosidad intestinal, modificar el lugar de digestión de algunos nutrientes y modular las poblaciones microbianas del intestino (revisado por Ajila *et al.*, 2012; Cowieson y Roos, 2016 y Raza *et al.*, 2019). Entre las más utilizadas hoy en día se encuentran las fitasas, amilasas, β -glucanasas y xylanases, que contribuyen a mejorar la digestibilidad del P de los cereales, almidón y fibra, respectivamente.

La efectividad de las fitasas se ha ido incrementando con el tiempo. Las nuevas generaciones de fitasas disponibles a nivel comercial

son capaces de reemplazar hasta 2,0 g/kg de P inorgánico del fosfato monocálcico o bicálcico utilizado en piensos de aves, cuando se utilizan a dosis de entre 250 FTU/kg y 1000 FTU/kg de pienso (Dersjant-Li *et al.*, 2020). Además, la mayoría de fitasas presentan demostrados efectos extra fosfóricos, tales como un incremento de la digestibilidad del Ca, energía, PB y AA, lo que contribuye a reducir la cantidad de estos nutrientes en las excretas. El efecto de las carbohidrasas sobre la digestibilidad de los nutrientes es, sin embargo, menos consistente. Su uso en dietas de aves que incluyen cereales, en especial trigo y cebada, es ya rutinario para reducir la viscosidad provocada por los β -glucanos y arabinosilanos de los cereales y aumentar su digestibilidad. En porcino, sin embargo, los resultados publicados hasta el momento en la bibliografía son menos consistentes. Las principales razones que explicarían la falta de solidez de los resultados podrían ser la edad de los animales, la composición del pienso base o la eficacia de las diferentes enzimas, entre otras (revisado por Rojas y Stein, 2017; Kiarie y Mills, 2019). Tal y como sugieren algunos trabajos de revisión (de Vries *et al.*, 2012 y Rojas y Stein, 2017), el uso de enzimas en combinación con los pretratamientos hidrotérmicos puede potenciar la efectividad de ambas tecnologías mejorando la digestibilidad de la fibra (entre 1,5 y 6 veces más) y reduciendo la viscosidad de la digesta (entre 3 y 4 veces más) en comparación con únicamente el uso de enzimas. Es posible que los tratamientos térmicos realicen modificaciones en la pared celular de los ingredientes y mejoren la accesibilidad de los enzimas a los polisacáridos no amiláceos de la matriz. Otros trabajos van más allá y sugieren que las carbohidrasas son efectivas, pero para garantizar un óptimo funcionamiento es necesario conocer de manera precisa la composición en carbohidratos (a partir de técnicas de cromatografía, por ejemplo) del pienso o materias primas y adaptar el tipo o combinación

de enzimas al sustrato a degradar (Jaworski *et al.*, 2015). Este aspecto es sobre todo importante en materias primas fibrosas como los subproductos, en los que la matriz de carbohidratos puede ser muy compleja y difícil de abordar adecuadamente con las carbohidrasas convencionales. En este sentido, la inclusión de otras carbohidrasas como pectinasas, mannanasas y -galactosidasas en los complejos enzimáticos puede ser de interés de cara a ampliar su efectividad en estas materias primas (revisado por Menezes-Blackburn y Greiner, 2015).

Las proteasas, sin embargo, son enzimas relativamente nuevas en formato mono-enzima. Su disponibilidad en el mercado y uso en piensos es todavía bajo, a pesar de que sus efectos sobre la digestibilidad de los AA y reducción de la excreción de N son prometedores en aves y porcino (Cowieson *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2020). Un aumento en la precisión y especificidad de los complejos de carbohidrasas y el desarrollo y registro de nuevas proteasas parecen ser algunas de las tareas pendientes de la industria y la comunidad científica para los próximos años.

En definitiva, el desarrollo tecnológico alrededor de la mejora del aprovechamiento de los nutrientes en los sectores del porcino y aves se está convirtiendo en una pieza clave para mejorar la sostenibilidad de los piensos, especialmente cuando se utilizan materias primas fibrosas como los subproductos, que se espera cobren cada vez más importancia en los piensos.

Mejora de la salud gastrointestinal

La alimentación es un factor clave en la salud gastrointestinal de los animales y esta, a su vez, está directamente relacionada con la salud general, metabolismo y eficiencia productiva de los animales (revisado por Celi *et al.*, 2017). Por lo tanto, la implementación de

estrategias nutricionales que garanticen una óptima salud gastrointestinal tendrá también efectos positivos sobre la sostenibilidad de la ganadería.

En términos de salud gastrointestinal, la microbiota representa el compromiso entre la funcionalidad de la barrera gastrointestinal, la síntesis de nutrientes beneficiosos, la obtención de energía a partir de componentes de la dieta y los efectos nocivos de la inflamación y enfermedad (revisado por Celi *et al.*, 2017). La composición de la microbiota y los metabolitos producidos por las bacterias son vitales para el mantenimiento de una óptima salud intestinal. Algunas de las estrategias alimentarias que contribuyen a mantener o mejorar la salud intestinal de los animales son: 1) utilización de materias primas de calidad y adecuadas a cada tipo animal para asegurar un aprovechamiento óptimo de los nutrientes; 2) incorporación de fuentes de fibra en los piensos; 3) utilización de aditivos y compuestos bioactivos y 4) utilización de alimentos fermentados, entre otras. Una adecuada selección de ingredientes acorde a la edad de los animales y una adaptación de los nutrientes aportados a las necesidades reales de los animales mediante alimentación de precisión es fundamental para garantizar una salud digestiva óptima. En este sentido, un exceso en el aporte de nutrientes en la dieta o una reducción de la digestibilidad de estos nutrientes puede provocar disbiosis e inflamación intestinal (revisado por Oviedo-Rondón, 2019). Numerosos estudios avalan, por ejemplo, que la presencia de PB en el tracto gastrointestinal puede provocar este tipo de problemas en cerdos y aves (Drew *et al.*, 2004; Heo *et al.*, 2010). Por otro lado, el contenido en fibra de los alimentos está recibiendo en estos últimos años una elevada atención debido a su potencial efecto beneficioso sobre la salud intestinal (revisado por Celi *et al.*, 2017 y Mahmood y Guo, 2020). Este efecto se basa, principal-

mente, en un efecto prebiótico que estimula el crecimiento de las bacterias comensales como las bifidobacterias o lactobacillus y previene la colonización de patógenos oportunistas como las enterobacterias como resultado de su fermentación (Moset *et al.*, 2015; Kheravii *et al.*, 2017).

Por lo tanto, la fibra es capaz de modular el microbioma intestinal, mejorando la salud digestiva de los animales. Sin embargo, estos efectos pueden ser diferentes según el tipo de fibra ya que su composición condiciona el grado y lugar de fermentación. Para entender sus efectos y optimizar el uso funcional de la fibra es necesario conocer el impacto de la forma física, tipo y cantidad de fibra sobre la salud digestiva, así como su posible influencia sobre la actividad hepática y cerebral, como ya se ha descrito en algunos estudios (revisado por Mahmood y Guo, 2020).

Por otro lado, el uso de aditivos como los probióticos, ácidos y enzimas exógenos, así como la presencia de compuestos bioactivos (alcaloides, ácidos grasos esenciales, glicósidos, fenoles, taninos, péptidos y saponinas) en los piensos son capaces de modular las poblaciones microbianas en el tracto gastrointestinal (revisado por Kiarie *et al.*, 2013; Romero *et al.*, 2018; Ferrer *et al.*, 2019b) y mejorar la salud intestinal de los animales. En el caso concreto de las enzimas exógenas, su efecto modulador de la microbiota se ha descrito recientemente, junto con su consideración como posible alternativa a los antibióticos (revisado por Kiarie *et al.*, 2013) por su capacidad de liberar nutrientes (sustratos) de los piensos que favorezcan poblaciones específicas de bacterias. Además, las enzimas son capaces de trasladar el lugar de la digestión a segmentos intestinales anteriores donde producirán oligosacáridos fermentables con un efecto beneficioso en el pH intestinal y la proliferación de enterocitos. Por su parte, los compuestos bioactivos identificados en algunas materias primas, como los

subproductos provenientes del procesado de frutas y verduras o incluso aislados de estos compuestos, son también capaces de modular la microbiota intestinal promoviendo las bacterias beneficiosas, el sistema inmune y la activación de numerosos genes relacionados con la salud (revisado por Kiarie *et al.*, 2013; Romero *et al.*, 2018; revisado por Oviedo-Rondón, 2019).

Por lo tanto, aunque la mayoría de estas estrategias se han desarrollado con la finalidad de minimizar el uso de antimicrobianos en el actual escenario europeo, algunos estudios demuestran ya como sus comentados efectos positivos sobre la salud intestinal repercuten directamente sobre la digestibilidad de los nutrientes, eficiencia y emisiones de gases contaminantes (Jeong *et al.*, 2019; Shabani *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020) y, en consecuencia, sobre la sostenibilidad ambiental de las explotaciones.

Conclusiones

La alimentación animal juega un papel clave en la sostenibilidad de la ganadería. La formulación de piensos sostenibles con el medio ambiente y la implementación de medidas para reducir el volumen de las deyecciones y la excreción de nutrientes se reconocen como estrategias viables para mitigar el impacto ambiental de la producción intensiva de porcino y aves. Estos sectores ya aplican de manera habitual medidas como la reducción del contenido en proteína de los piensos o el uso de aditivos para incrementar la digestibilidad de los piensos y salud de los animales. Sin embargo, otras medidas como la formulación con criterios ambientales o la implementación de los sistemas de alimentación de precisión se encuentran aún en fase de desarrollo y validación para ser utilizadas a nivel comercial. Probablemente, el éxito global de la alimentación como medida de mitigación del

impacto ambiental de la ganadería radique en el uso de varias estrategias conjuntamente y el desarrollo de herramientas que integren información relativa al coste ambiental de las materias primas, la digestibilidad de los nutrientes, los potenciales de emisión de gases contaminantes a partir de las excretas y la productividad/eficiencia de los animales. Para ello, es fundamental continuar con los esfuerzos dedicados a la estandarización de las metodologías de cálculo de la huella ambiental y el avance en el conocimiento en la relación entre la alimentación, salud, eficiencia e impacto ambiental de la ganadería.

Referencias bibliográficas

- Ahmed A, Zulkifli I, Farjam AS, Abdullah N, Liang JB, Awad EA (2014). Effect of solid state fermentation on nutrient content and ileal amino acids digestibility of canola meal in broiler chickens. *Italian Journal of Animal Science* 13: 3293. <https://doi.org/10.4081/ijas.2014.3293>
- Ajila CM, Brar SK, Verma M, Tyagi RD, Godbout S, Valéro JR (2012). Bio-processing of agro-byproducts to animal feed. *Critical Reviews in Biotechnology* 32(4): 382-400. <https://doi.org/10.3109/07388551.2012.659172>
- Aljuobori A, Idrus Z, Soleimani AF, Abdullah N, Juan Boo L (2017). Response of broiler chickens to dietary inclusion of fermented canola meal under heat stress condition. *Italian Journal of Animal Science* 16: 546e51. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2017.1292830>
- Almeida FN, Htoo JK, Thomson J, Stein HH (2013). Amino acid digestibility of heat damaged distillers dried grains with solubles fed to pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 4(1): 44. <https://doi.org/10.1186/2049-1891-4-44>
- Amerah AM, Ravindran V, Lentle RG, Thomas DG (2007). Feed particle size: Implications on the digestion and performance of poultry. *World's Poultry Science Journal* 63: 439-55. <https://doi.org/10.1017/S0043933907001560>

- Andretta I, Pomar C, Rivest J, Pomar J, Radünz J (2016). Precision feeding can significantly reduce lysine intake and nitrogen excretion without compromising the performance of growing pigs. *Animal* 10: 1137-1147. <https://doi.org/10.1017/S1751731115003067>
- Andretta I, Hauschild L, Kipper M, Pires PGS, Pomar C (2018). Environmental impacts of precision feeding programs applied in pig production. *Animal* 12(9): 1990-1998. <http://dx.doi.org/10.1017/S1751731117003159>
- Antezana W, Calvet S, Beccaccia A, Ferrer P, de Blas C, García-Rebollar P, Cerisuelo A (2015). Effects of nutrition on digestion efficiency and gaseous emissions from slurry in growing pigs: III. Influence of varying the dietary level of calcium soap of palm fatty acids distillate with or without orange pulp supplementation. *Animal Feed Science and Technology* 209: 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.07.022>
- Beccaccia A, Calvet S, Cerisuelo A, Ferrer P, García-Rebollar P, de Blas C (2015a). Effects of nutrition on digestion efficiency and gaseous emissions from slurry in growing-finishing pigs. I. Influence of the inclusion of two levels of orange pulp and carob meal in isofibrous diets. *Animal Feed Science and Technology* 208: 158-169. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.07.008>
- Beccaccia A, Cerisuelo A, Calvet S, Ferrer P, Estellés F, de Blas C, García-Rebollar P (2015b). Effects of nutrition on digestion efficiency and gaseous emissions from slurry in growing pigs: II. Effect of protein source in practical diets. *Animal Feed Science and Technology* 209: 137-144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.07.021>
- BOE, (1996). Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias. Boletín Oficial del Estado, núm. 61, de 11 de marzo de 1996, pp. 9734-9737.
- Canh TT, Sutton AL, Aarnink AJA, Verstegen AWA, Schrama JW, Bakker GCM (1998). Dietary carbohydrates alter the fecal composition and pH and the ammonia emission from slurry of growing pigs. *Journal of Animal Science* 76: 1887-1895. <https://doi.org/10.2527/1998.7671887x>
- Celi P, Cowieson AJ, Fru-Nji F, Steinert RE, Klunenter AM, Verlhac V (2017). Gastrointestinal functionality in animal nutrition and health: New opportunities for sustainable animal production. *Animal Feed Science and Technology* 234: 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.09.012>
- Comisión Europea (2020). EU+UK feed protein balance sheet – 2019-20. Disponible en: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/food-farming-fisheries/farming/documents/eu-uk-feed-protein-balance-sheet_2019-2020_en.pdf (consultado: 27 octubre 2020).
- Cowieson AJ, Roos FF (2016). Toward optimal value creation through the application of exogenous mono-component protease in the diets of non-ruminants. *Animal Feed Science and Technology* 221: 331-340. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.04.015>
- Cowieson AJ, Bhuiyan MM, Sorbara JOB, Pappenberger G, Pedersen MB, Choct M (2020). Contribution of individual broilers to variation in amino acid digestibility in soybean meal and the efficacy of an exogenous monocomponent protease. *Poultry Science* 99: 1075-1083. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psj.2019.10.001>
- Dersjant-Li Y, Archer G, Stiewert AM, Brown AA, Sobotik EB, Jasek A, Marchal L, Bello A, Sorg RA, Christensen T, Kim HS, Mejdal R, Nikolaev I, Pricelius S, Haaning S, Sorensen JF, de Krijg A, Sewalt V (2020). Functionality of a next generation biosynthetic bacterial 6-phytase in enhancing phosphorus availability to broilers fed a corn-soybean meal-based diet. *Animal Feed Science and Technology* 264: 114481. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114481>
- De Vries S, Pustjens A, Schols HA, Hendriks WH, Gerrits W (2012). Improving digestive utilization of fiber-rich feedstuffs in pigs and poultry by processing and enzyme technologies: A review. *Animal Feed Science and Technology* 178: 123-138. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.10.004>
- DOUE (2016). Directiva (UE) 2016/2284 del Parlamento Europeo y del Consejo de 14 de diciembre de 2016 relativa a la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos, por la que se modifica la Directiva

- 2003/35/CE y se deroga la Directiva 2001/81/CE. Diario Oficial de la Unión Europea L344, de 17 de febrero de 2016, pp. 1-31.
- DOUE (2017). Decisión de Ejecución (UE) 2017/302 de la Comisión, de 15 de febrero de 2017, por la que se establecen las conclusiones sobre las mejores técnicas disponibles (MTD) en el marco de la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo respecto a la cría intensiva de aves de corral o de cerdos. Documento Oficial de la Unión Europea L43, de 21 de febrero de 2017, pp. 231-279.
- Drew MD, Syed NA, Goldade BG, Laarveld B, Van Kessel AG (2004). Effects of dietary protein source and level on intestinal populations of *Clostridium perfringens* in broiler chickens. *Poultry Science* 83: 414-420. <https://doi.org/10.1093/ps/83.3.414>
- FAO (2014). Towards a concept of sustainable animal diets: report based on the collated results of a survey of stakeholder views. FAO Animal Production and Health reports 7, Rome, Italia. 81 pp. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i4146e.pdf> (consultado el 15 abril 2020).
- FEFAC (2016). Vision on animal feed industry: A knowledge driven, reliable partner of a competitive livestock sector. Disponible en: <http://www.fefac.eu/files/67547.pdf> (consultado el 30 marzo 2020).
- Ferguson NS, Gates RS, Taraba JL, Cantor AH, Pescatore AJ, Ford MJ, Burnham DJ (1998). The effect of dietary crude protein on growth, ammonia concentration, and litter composition in broilers. *Poultry Science* 77: 1481-1487. <https://doi.org/10.1093/ps/77.10.1481>
- Ferrer P, García-Rebollar P, Cerisuelo A, Ibáñez MA, Rodríguez CA, Calvet S, de Blas C (2018a). Nutritional value of crude and partially defatted olive cake in finishing pigs and effects on nitrogen balance and gaseous emissions. *Animal Feed Science and Technology* 236: 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.12.014>
- Ferrer P, Calvet S, García-Rebollar P, de Blas C, Piquer O, Moset V, Cerisuelo A (2018b). Does the source of citrus pulp affect digestion in pigs? *Advances in Animal Biosciences* 9(S2): 482.
- Ferrer P, Piquer O, Gómez EA, Gasa J, Cano JL, Cerisuelo A (2019a). Valor nutricional de los subproductos de *Camelina sativa* en porcino: resultados preliminares. XVIII Jornadas sobre Producción Animal, 7-8 de mayo, Zaragoza, España, pp. 239-241.
- Ferrer P, Calvet S, Roca M, Cambra-López M, Cerisuelo A (2019b). Efecto de la inclusión de pulpa de naranja sobre los rendimientos productivos, los metabolitos fecales y el microbioma intestinal en cerdos de engorde. XVIII Jornadas sobre Producción Animal, 7-8 de mayo, Zaragoza, España, pp. 242-244.
- Ferrer P, Calvet S, García-Rebollar P, de Blas C, Jiménez-Belenguer AI, Hernández P, Piquer O, Cerisuelo A (2020). Partially defatted olive cake in finishing pig diets: implications on performance, faecal microbiota, carcass quality, slurry composition and gas emission. *Animal* 14(2): 426-434. <https://doi.org/10.1017/S1751731119002040>
- García-Launay F, Dusart L, Espagnol S, Laisse-Redoux S, Gaudré D, Méda B, Wilfart A (2018). Multiobjective formulation is an effective method to reduce environmental impacts of livestock feeds. *British Journal of Nutrition* 120: 1298-1309. <https://doi.org/10.1017/S0007114518002672>
- Heo JM, Kim JC, Hansen CF, Mullan BP, Hampson DJ, Pluske JR (2010). Feeding a diet with a decreased protein content reduces both nitrogen content in the gastrointestinal tract and post-weaning diarrhoea, but does not affect apparent nitrogen digestibility in weaner pigs challenged with an enterotoxigenic strain of *Escherichia coli*. *Animal Feed Science and Technology* 160: 148-159. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.07.005>
- Hernández F, Martínez S, López C, Megías MD, López M, Madrid J (2011). Effect of dietary crude protein levels in a commercial range, on the nitrogen balance, ammonia emission and pollutant characteristics of slurry in fattening pigs. *Animal* 5(8): 1290-1298. <https://doi.org/10.1017/S1751731111000115>
- Jarret G, Cozannet P, Martinez J, Dourmad JY (2011). Effect of different quality wheat dried distiller's grain solubles (DDGS) in pig diets on composition of excreta and methane production from faeces and slurry. *Livestock Science* 140(1-3): 275-282. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.04.006>

- Jarret G, Cerisuelo A, Peu P, Martinez J, Dourmad JY (2012). Impact of pig diets with different fibre contents on the composition of excreta and their gaseous emission and anaerobic digestion. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 160: 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.029>
- Jaworski NW, Lærke HN, Bach Knudsen KE, Stein HH (2015). Carbohydrate composition and *in vitro* digestibility of dry matter and nonstarch polysaccharides in corn, sorghum, and wheat and coproducts from these grains. *Journal of Animal Science* 93: 1103-1113. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8147>
- Jeong YD, Ko HS, Hosseindoust A, Choi YH, Chae BJ, Yu DJ, Cho ES, Cho KH, Shim SM, Ra CS, Choi JW, Jang A, Kim YI, Kim JS (2019). *Lactobacillus*-based fermentation product and lactose level in the feed for weanling pigs: Effects on intestinal morphology, microbiota, gas emission, and targeted intestinal coliforms. *Livestock Science* 227: 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.06.018>
- Kiarie E, Romero LF, Nyachoti CM (2013). The role of added feed enzymes in promoting gut health in swine and poultry. *Nutrition Research Reviews* 26(1): 71-88. <https://doi.org/10.1017/S0954422413000048>
- Kiarie EG, Mills A (2019). Role of feed processing on gut health and function in pigs and poultry: conundrum of optimal particle size and hydrothermal regimens. *Frontiers in Veterinary Sciences* 6: 19. <https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00019>
- Kebreab E, Liedke A, Caro D, Deimling S, Binder M, Finkbeiner M (2016). Environmental impact of using specialty feed ingredients in swine and poultry production: A life cycle assessment. *Journal of Animal Science* 94: 2664-2681. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9036>
- Kheravii SK, Swick RA, Choct M, Wu SB (2017). Coarse particle inclusion and lignocellulose-rich fiber addition in feed benefit performance and health of broiler chickens. *Poultry Science* 96: 3272-3281. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pex123>
- UNESCO (2017). La UNESCO Avanza La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Disponible en: https://es.unesco.org/creativity/sites/creativity/files/247785sp_1_1_1.compressed.pdf (consultado el 25 agosto 2020).
- Lassaletta L, Estellés F, Beusen AHW, Bouwman L, Calvet S, van Grinsven HJM, Doelman JC, Stehfest E, Uwizeye A, Westhoek H (2019). Future global pig production systems according to the Shared Socioeconomic Pathways. *Science of The Total Environment* 665: 739-751. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.079>
- Leek ABG, Beattie V, O'Doherty J (2004). The effects of dietary oil inclusion and oil source on apparent digestibility, faecal volatile fatty acid concentration and manure ammonia emission. *Animal science* 79: 155-164. <https://doi.org/10.1017/S135772980005462X>
- Leinonen I, Williams AG, Wiseman J, Guy J, Kyriazakis I (2012). Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Egg production systems. *Poultry Science* 91(1): 26-40. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01635>
- Leip A, Billen, G, Garnier J, Grizzetti B, Lassaletta L, Reis S, Simpson D, Sutton MA, de Vries W, Weiss F, Westhoek H (2015). Impacts of European livestock production: nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity. *Environmental Research Letters* 10: 115004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/115004>
- Lemme A, Hiller P, Klahsen M, Taube V, Stegmann J, Simon I (2019). Reduction of dietary protein in broiler diets not only reduces n-emissions but is also accompanied by several further benefits. *Journal of Applied Poultry Research* 28: 867-880. <https://doi.org/10.3382/japr/pfz045>
- Li W, Li QF, Powers W, Karcher D, Angel R, Applegate TJ (2014). Effects of distillers dried grains with solubles and mineral sources on gaseous emissions. *Journal of Applied Poultry Research* 23: 41-50. <https://doi.org/10.3382/japr.2013-00802>
- Lin L, Xiu-dong L, Xu-gang L (2017). Nutritional strategies for reducing nitrogen, phosphorus and trace mineral excretions of livestock and poultry. *Journal of Integrative Agriculture* 16(12): 2815-2833. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61701-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61701-5)

- Liu X, Kim SH, Kim IH (2020). Effects of the combination of multistrain probiotics and *Castanea crenata* shell extract on growth performance, nutrient digestibility, fecal microbial shedding, meat quality, noxious gas emissions, and blood parameters in finishing pigs. *Livestock Science* 240: 104185. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104185>
- Mackenzie SG, Leinonen I, Ferguson N, Kyriazakis I (2016). Towards a methodology to formulate sustainable diets for livestock: accounting for environmental impact in diet formulation. *British Journal of Nutrition* 115: 1860-1874. <https://doi.org/10.1017/S0007114516000763>
- Mahmood T, Guo Y (2020). Dietary fiber and chicken microbiome interaction: Where will it lead to? *Animal Nutrition* 6: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2019.11.004>
- MAPA (2018). Datos de producción de piensos 2018 CNCAA – Informe interno. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/alimentacion-animal/2018-informedatos-deproducciondepiensosenespana2018_tcm30-512133.pdf (consultado el 11 marzo 2020).
- McAuliffe GA, Takahashi T, Mogensen L, Hermansen JE, Sage CL, Chapman DV, Lee MRF (2017). Environmental trade-offs of pig production systems under varied operational efficiencies. *Journal of cleaner production* 165: 1163-1173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.191>
- Menezes-Blackburn D, Greiner R (2015). Enzymes Used in Animal Feed: Leading Technologies and Forthcoming Developments. En: *Functional Polymers in Food Science* (Ed. Cirillo G, Gianfranco Spizzirri UG, Lemma F), pp. 47-73. Publisher: Scrivener Publishing. <https://doi.org/10.1002/9781119108580.ch4>
- MITECO (2019). Sistema Español de Inventario de Emisiones. Inventario 1990-2017. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/> (Consultado el 20 julio 2019).
- Moset V, Piquer O, Cervera MC, Fernandez C, Hernández P, Cerisuelo A (2015). Ensiled citrus pulp as a by-product feedstuff for finishing pigs: nutritional value and effects on intestinal microflora and carcass quality. *Spanish Journal of Agricultural Research* 13(3): e0607. <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2015133-6717>
- Nijdam D, Rood T, Westhoek H (2012). The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes. *Food Policy* 37: 760-770. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.08.002>
- Olukomaiya O, Fernando C, Mereddy R, Li X, Sultanbawa Y (2019). Solid-state fermented plant protein sources in the diets of broiler chickens: A review. *Animal Nutrition* 5: 319-330. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2019.05.005>
- O'Shea CJ, Lynch B, Lynch MB, Callan JJ, O'Doherty JV (2009). Ammonia emissions and dry matter of separated pig manure fractions as affected by crude protein concentration and sugar beet pulp inclusion of finishing pig diets. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 131(3-4): 154-160. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.01.019>
- Oviedo-Rondón EO (2019). Holistic view of intestinal health in poultry. *Animal Feed Science and Technology* 250: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.01.009>
- Pinotti L, Giromini C, Ottoboni M, Tretola M, Marchis D (2019). Review: Insects and former food stuffs for upgrading food waste biomasses/streams to feed ingredients for farm animals. *Animal* 13(7): 1365-1375. <https://doi.org/10.1017/S1751731118003622>
- Pomar C, Remus A (2019). Precision pig feeding: a breakthrough toward sustainability. *Animal Frontiers* 9(2): 52-59. <https://doi.org/10.1093/af/vfz006>
- Portejoie S, Dourmad JY, Martínez J, Lebreton Y (2004). Effect of lowering dietary crude protein on nitrogen excretion, manure composition and ammonia emission from fattening pigs. *Livestock Production Science* 91(1-2): 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2004.06.013>
- Raza A, Bashir S, Tabassum R (2019). An update on carbohydrases: growth performance and intestinal health of poultry. *Heliyon* 5: e01437. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01437>

- Reza A, Balcells J, Morazan H, Alvarez-Rodriguez J, Babot D, De la Fuente G (2018). The impact of reducing dietary crude protein and increasing total dietary fiber on hindgut fermentation, the methanogen community and gas emission in growing pigs. *Animal Feed Science and Technology* 245: 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.09.005>
- Roberts SA, Xin H, Kerr BJ, Russell JR, Bregendahl K (2007). Effects of dietary fiber and reduced crude protein on ammonia emission from laying-hen manure. *Poultry Science* 86: 1625-1632. <https://doi.org/10.1093/ps/86.8.1625>
- Rojas OJ, Stein HH (2017). Processing of ingredients and diets and effects on nutritional value for pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 8: 48. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0177-1>
- Romero C, Medina E, Brenes M (2018). New by products rich in bioactive substances from the olive oil mill processing. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 98(1): 225-230. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8460>
- Rubayet-Bostami ABM, Mun HS, Kim GI, Seilsuth S, Yang CJ (2017). Evaluation of dietary fat sources on growth performance, excreta microbiology and noxious gas emissions in Ross broilers. *African Journal of Agricultural Research* 12(23): 1980-1992. <https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12373>
- Salemdeeb R, Ermgassen EKH, Kim MH, Balmford A, Al-Tabbaa A (2017). Environmental and health impacts of using food waste as animal feed: a comparative analysis of food waste management options. *Journal of Cleaner Production* 140: 871-880. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.049>
- Sánchez-Martín L, Beccaccia A, de Blas C, Sanz-Cobeña A, García-Rebollar P, Estellés F, Marsden A, Chadwick D, Vallejo A (2017). Diet management to effectively abate N₂O emissions from surface applied pig slurry. *Agriculture Ecosystems & Environment* 239: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.007>
- Sajeev EPM, Amon B, Ammon C, Zollitsch W, Winiwarter W (2018). Evaluating the potential of dietary crude protein manipulation in reducing ammonia emissions from cattle and pig manure: A meta-analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 110(1): 161-175. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9893-3>
- Schader C, Muller A, Scialabba NEH, Hecht J, Isensee A, Erb KH, Smith P, Makkar HPS, Klocke P, Leiber F, Schwegler P, Stolze M, Niggli U (2015). Impacts of feeding less food-competing feedstuffs to livestock on global food system sustainability. *Journal of the Royal Society Interface* 12: 20150891. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0891>
- Shabani A, Jazi V, Ashayerizadeh A, Barekatin R (2019). Inclusion of fish waste silage in broiler diets affects gut microflora, cecal short-chain fatty acids, digestive enzyme activity, nutrient digestibility, and excreta gas emission. *Poultry Science* 98: 4909-4918. <http://dx.doi.org/doi:10.3382/ps/pez244>
- Shi C, Zhang Y, Lu Z, Wang Y (2017). Solid-state fermentation of corn-soybean meal mixed feed with *Bacillus subtilis* and *Enterococcus faecium* for degrading antinutritional factors and enhancing nutritional value. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 8: 50. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0184-2>
- Solà-Oriol D, Gasa J (2017). Feeding strategies in pig production: Sows and their piglets. *Animal Feed Science and Technology* 233: 34-52. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.07.018>
- Tallentire CW, Mackenzie SG, Kyriazakis I (2017). Environmental impact trade-offs in diet formulation for broiler production systems in the UK and USA. *Agricultural Systems* 154: 145-156. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.03.018>
- Tallentire CW, Mackenzie SG, Kyriazakis I (2018). Can novel ingredients replace soybeans and reduce the environmental burdens of European livestock systems in the future? *Journal of Cleaner Production* 187: 338-347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.212>
- Torres-Pitarch A, Moset V, Ferrer P, Cambra-López M, Hernández P, Coma J, Pascual M, Serrano P, Cerisuelo A (2014). The inclusion of rapeseed meal in fattening pig diets, as a partial

- replacer of soybean meal, alters nutrient digestion, faecal composition and biochemical methane potential from faeces. *Animal Feed Science and Technology* 198: 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.09.017>
- van der Werf HMG, Petit J, Sanders J (2005). The environmental impacts of the production of concentrated feed: The case of pig feed in Bretagne. *Agricultural Systems* 83: 153-177. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.03.005>
- van Emous RA, Winkel A, Aarnink AJA (2019). Effects of dietary crude protein levels on ammonia emission, litter and manure composition, N losses, and water intake in broiler breeders. *Poultry Science* 98: 6618-6625. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pez508>
- Vukmirovi D, olovi R, Rakita S, Brlek T, uragi O, Solà-Oriol D (2017). Importance of feed structure (particle size) and feed form (mash vs. pellets) in pig nutrition – A review. *Animal Feed Science and Technology* 233: 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.06.016>
- Wang-Li L, Xu Y, Shivkumar AP, Williams M, Brake J (2020). Effect of dietary coarse corn inclusion on broiler live performance, litter characteristics, and ammonia emission. *Poultry Science* 99: 869-878. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.10.010>
- Wilfart A, Espagnol S, Dauguet S, Tailleur A, Gac A, Garcia-Launay F (2016). ECOALIM: a dataset of environmental impacts of feed ingredients used in French animal production. *PLoS ONE* 11(12): e0167343. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167343>
- Wu-Haan W, Powers W, Angel R, Applegate TJ (2010). The use of distillers dried grains plus solubles as a feed ingredient on air emissions and performance from laying hens. *Poultry Science* 89: 1355-1359. <https://doi.org/10.3382/ps.2009-00471>
- Yu J, Yu G, Yu B, Zhang Y, He J, Zheng P, Mao X, Luo J, Huang Z, Luo Y, Yan H, Wang Q, Wang H, Chen D (2020). Dietary protease improves growth performance and nutrient digestibility in weaned piglets fed diets with different levels of soybean meal. *Livestock Science* 241: 104179. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104179>
- Yusrizal Y, Angel R, Adrizal A, Wanto BE, Fakhri S, Yatno Y (2013). Feeding native laying hens diets containing palm kernel meal with or without enzyme supplementations. 2. Excreta nitrogen, ammonia, and microbial counts. *Journal of Applied Poultry Research* 22: 269-278. <https://doi.org/10.3382/japr.2012-00633>
- Zuidhof MJ, Fedorak MV, Ouellette CA, Wenger II (2017). Precision feeding: Innovative management of broiler breeder feed intake and flock uniformity. *Poultry Science* 96: 2254-2263. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pex013>

(Aceptado para publicación el 29 de octubre de 2020)