

CIUDADES VERDES EN EL MUNDO

Beneficios energéticos de las envolventes vegetales

Francesca Olivieri

Dra. Arquitecta

Profesora del Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas
de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura (UPM)

**Arquitectura y
vegetación**

**Evolución
histórica**

Efectos

**Metodología de
investigación**

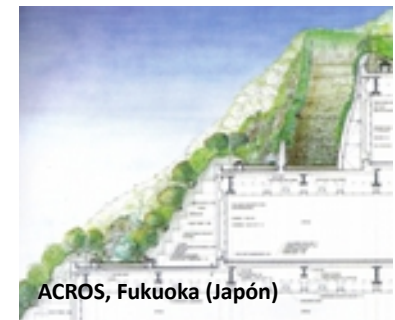
**Caso de estudio 1:
cubierta ecoógica**

**Caso de estudio 2:
fachada vegetal**

Trabajos futuros

ARQUITECTURA Y VEGETACIÓN

- La **relación** entre **arquitectura** y **naturaleza** ha sido siempre **muy estrecha**
- Desde la **primera idea de habitáculo**, el hombre ha estado relacionado con la vegetación, por tratarse del **material que tenía a su alcance** y daba **respuesta a sus necesidades**
- La **necesidad** de participar, integrarse, dominar, transformar y **convivir con la naturaleza** es característica innata de la condición humana
- **Una de las maneras** en las que se ha manifestado y se sigue manifestando la relación entre hombre y naturaleza **es a través de la integración de vegetación en edificios**
- Es en este marco en el que surgen las **envolventes vegetales**

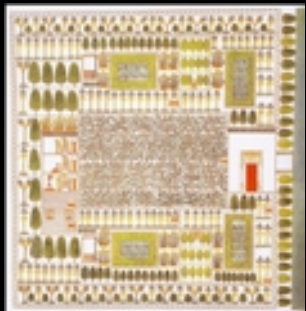


EVOLUCIÓN HISTÓRICA

- ▶ Las envolventes vegetales siempre han estado presentes en la arquitectura pero su **papel en relación a los edificios** ha ido **evolucionando** a lo largo de la **Historia**
- ▶ La **evolución** de las cubiertas y fachadas verdes se puede dividir en tres épocas:
 - Desde **la Antigüedad** hasta 1865
 - Desde **1865** hasta la Segunda Guerra Mundial
 - Desde la **posguerra hasta la actualidad**

EVOLUCIÓN HISTÓRICA

- Las envolventes vegetales siempre han estado presentes en la arquitectura pero su **papel en relación a los edificios** ha ido evolucionando a lo largo de la Historia
- La **evolución** de las cubiertas y fachadas verdes se puede dividir en tres épocas:
 - Desde **la Antigüedad** hasta 1865



Jardín egipcio
s. XV a. C.

Jardines de Babilonia
s. VII a. C.

Mausoleo de Adriano
s. II d. C.

Villa romanas
s. II d. C.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA

- Desde la **Antigüedad** hasta 1865



Monasterios y fortificaciones de la *Edad media*

Jardines colgantes en los palacios de la *Época renacentista*

- Desde **1865** hasta la Segunda Guerra Mundial

Arquitecto **Von Rabitz**

Tratado sobre las **ventajas ecológicas** y **medioambientales** de las **cubiertas verdes**



La cubiertas verdes se empiezan a **emplear** para **fines sociales e higiénicos** en los **barrios obreros**

EVOLUCIÓN HISTÓRICA

- Desde **1865** hasta la Segunda Guerra Mundial

Inicio del siglo XX

Arquitectos de fama internacional (**Markelius, Aalto, Wright, Le Corbusier**)
Integración de vegetación en el edificio y alrededores



Las **cubiertas verdes** se consideran un **elemento funcional** de la **arquitectura**



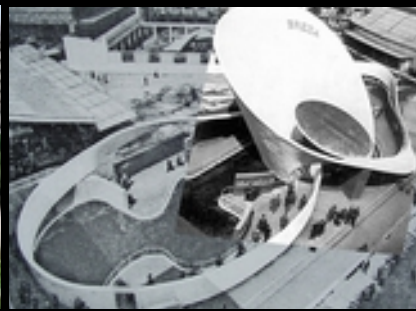
Le Corbusier (1887 – 1965)

EVOLUCIÓN HISTÓRICA

- Desde la posguerra hasta la actualidad



Años '40



Años '50



Años '60



Años '70



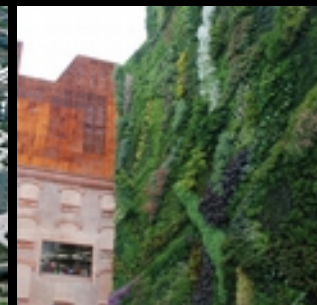
Años '80



Años '90



Años 2000

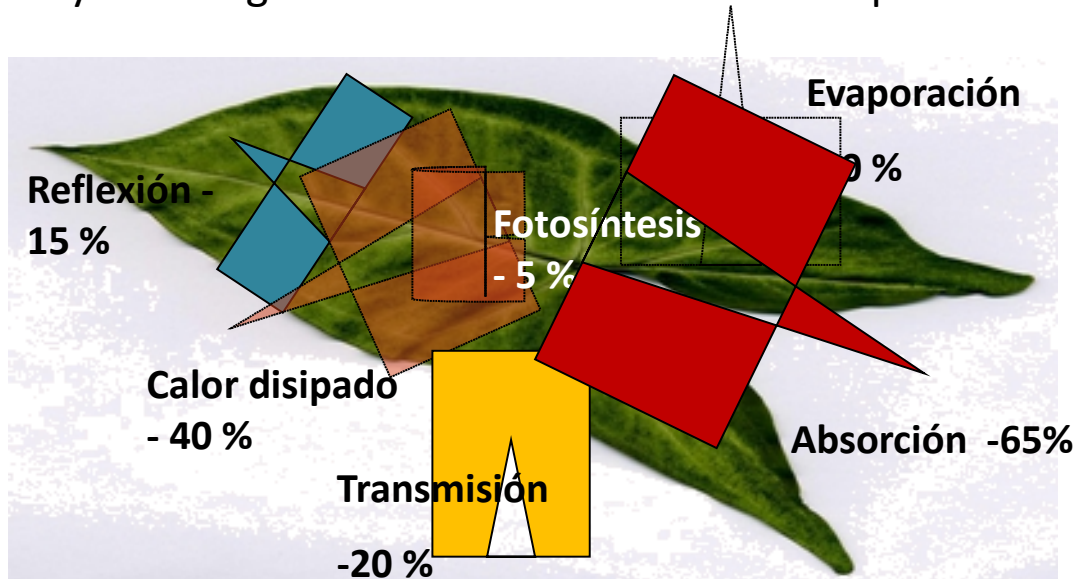


EVOLUCIÓN HISTÓRICA



EFECTOS DE LA VEGETACIÓN-

La **gran ventaja** del uso de vegetación en **localidades con elevada irradiación** está vinculada a la capacidad de las plantas de **absorber la mayor parte de la radiación solar recibida** y la consiguiente **utilización de la misma para sus funciones biológicas**



El **creciente interés** por **integrar superficies vegetales** en entornos arquitectónicos y urbanos se ve reflejado en el **desarrollo** gradual de **nuevas líneas de investigación** sobre fachadas y cubiertas vegetales durante los últimos años

EFECTOS DE LA VEGETACIÓN-

Los estudios se centran en el **análisis del comportamiento energético** de este tipo de envolventes y los **efectos** derivados de su aplicación en **edificios y medioambiente**, desde puntos de vista muy diversos:

- **Reducción de la demanda de energía para calefacción y refrigeración**
- **Reducción del efecto isla de calor urbano (UHI)**
- **Filtración de contaminantes** presentes en el aire
- **Regulación del ciclo hidrológico**
- **Reducción del ruido en la calle**
- **Protección de la biodiversidad en zona urbana**
- **Beneficios sociales y psicológicos**

EFFECTOS DE LA VEGETACIÓN-

- **Reducción de la demanda de energía para refrigeración**

En verano, la vegetación actúa como una **capa protectora** que **sombrea** los elementos de la envolvente

Aunque la superficie de la envolvente pueda ser **sombreada** mediante elementos que **no sean vegetales**, estos elementos **reflejarían o absorberían** la mayoría de **radiación solar recibida**

Sin embargo, la **vegetación** utiliza la **mayor parte** de la energía recibida para sus **funciones biológicas**

- **Reducción del efecto isla de calor urbano**

La vegetación se considera como una de las **medidas más eficaces** para la **mejora del microclima urbano** si su **aplicación** fuera a **gran escala**

Se han realizado **numerosos estudios** sobre el efecto de **cubiertas verdes** (Wong, Santamouris, Köhler, Takebayashi, etc.)

En **fachada** (Wong 2010), sistema con sustrato → reducción de la temperatura del aire exterior **hasta 3.3 °C** a 15 cm de distancia, percibiéndose **hasta 60 cm** de distancia

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Estas **líneas de investigación** tienden a basar sus conclusiones en **datos experimentales** de monitorizaciones y ensayos o en resultados de simulaciones

La complejidad y existencia de **gran variedad** tanto de **programas de simulación** como de **metodologías de ensayo y monitorización** se debe precisamente a la **dificultad de no poder tratar** los principales componentes de las envolventes vegetales

- vegetación
- sustrato
- agua

como cualquier otro material

Tanto la **vegetación** como el **sustrato** son **materiales complejos**, cuya **caracterización** difícilmente puede ser unívoca, al ser **siempre determinantes** las **condiciones de contorno**

Todas **estas particularidades** hacen que la investigación en este campo **sea dinámica** y en **continuo avance**, con una **amplia perspectiva de futuro** hacia nuevas vías de **desarrollo aún por alcanzar**

- Para cuantificar los **beneficios energéticos** de las **envolventes vegetales** se mostrarán los resultados de **dos investigaciones** realizadas en los **últimos años**

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Colmenar Viejo (Madrid) - España [40°24' N 3°34' W]

Colaboración UPM – Intemper
S.A.
Monitorización de una
fachada vegetal



Agugliano (Ancona) - Italia [43°35' N 13°30' E]

Colaboración UPM – UNIVPM
Monitorización de una **cubierta ecológica**



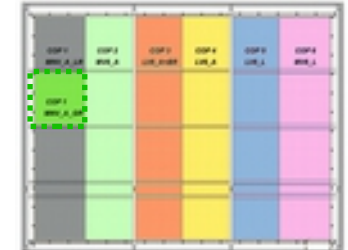
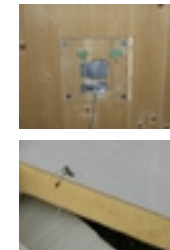
- Para cuantificar los **beneficios energéticos** de las **envolventes vegetales** se mostrarán los resultados de **dos investigaciones** realizadas en los **últimos años**

MONITORIZACIÓN DE UNA CUBIERTA ECOLÓGICA (Ancona, Italia)

Colaboración UPM – UNIVPM

- ▶ Períodos de monitorización: **junio, julio, agosto y septiembre de 2010, 2011 y 2012**
- ▶ **Localización** del edificio experimental: **Agugliano (Ancona, Italia)**

Ancona [43°35' N 13°30' E]



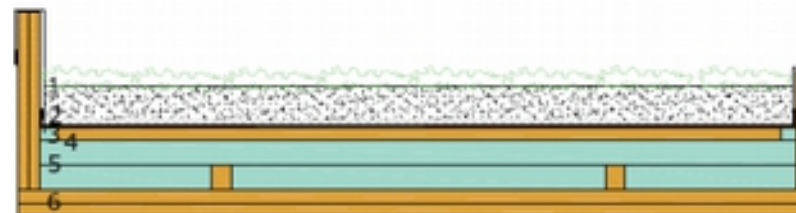
- ▶ Dimensiones: **8,20 x 10,50 m** Superficie: **86,10 m²** Volumen: **250 m³**
- ▶ Cubierta orientada a sur dividida en seis partes de mismas dimensiones
- ▶ **Cubierta ecológica 1,58 x 2,00 m**

MONITORIZACIÓN DE UNA CUBIERTA ECOLÓGICA (Ancona, Italia)

Colaboración UPM – UNIVPM

Cubierta ecológica $U = 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Capa	e [m]	λ [W/mK]
Vegetación	0,200	-
Sustrato	0,150	0,33
Fieltro (polipropileno)	0,001	0,220
Elemento de drenaje (polietileno)	0,002	0,380
Aire (en el elemento de drenaje)	0,023	-
Fieltro (polipropileno)	0,004	0,220
Cobre	0,001	380
OSB	0,015	0,130
Poliestireno expandido	0,120	0,035
Madera	0,050	0,120



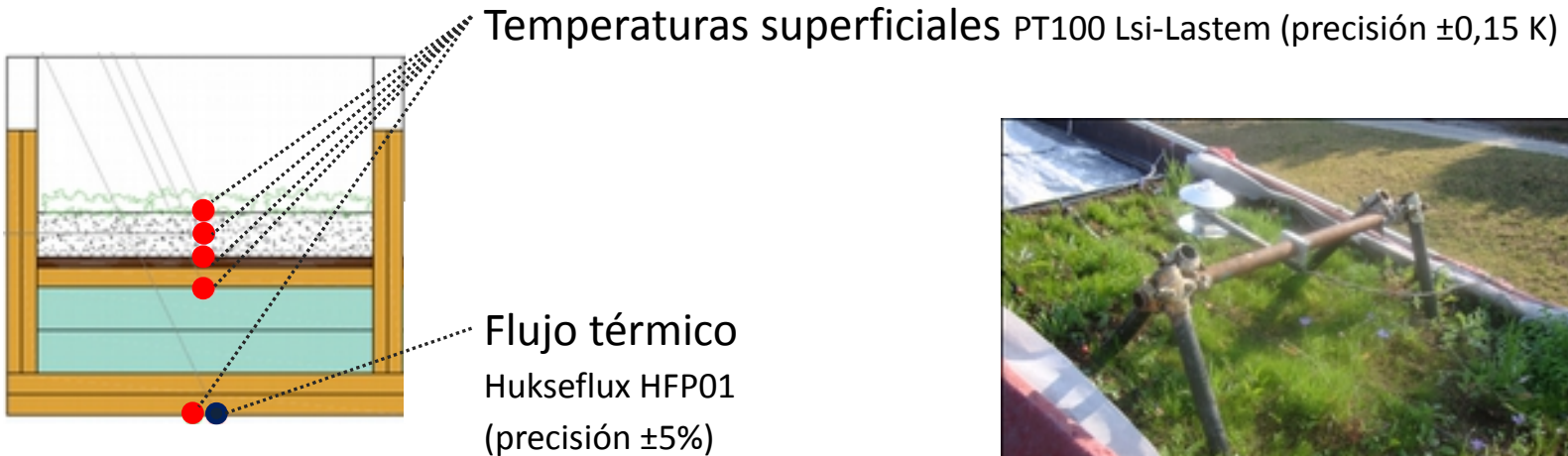
MONITORIZACIÓN DE UNA CUBIERTA ECOLÓGICA (Ancona, Italia)

Colaboración UPM – UNIVPM

Cubierta ecológica $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Temperatura y HR del aire exterior

DMA 572.1 Lsi-Lastem, precisión ($\pm 0,20 \text{ K}$ y $\pm 2\%$)



Temperatura y HR del aire interior

DMA 572.1 Lsi-Lastem (precisión $\pm 0,20 \text{ K}$ y $\pm 2\%$)

MONITORIZACIÓN DE UNA CUBIERTA ECOLÓGICA (Ancona, Italia)

Colaboración UPM – UNIVPM

- ▶ Durante los períodos de monitorización la vegetación tiene **diferentes grado de desarrollo**

Grado de desarrollo de la vegetación

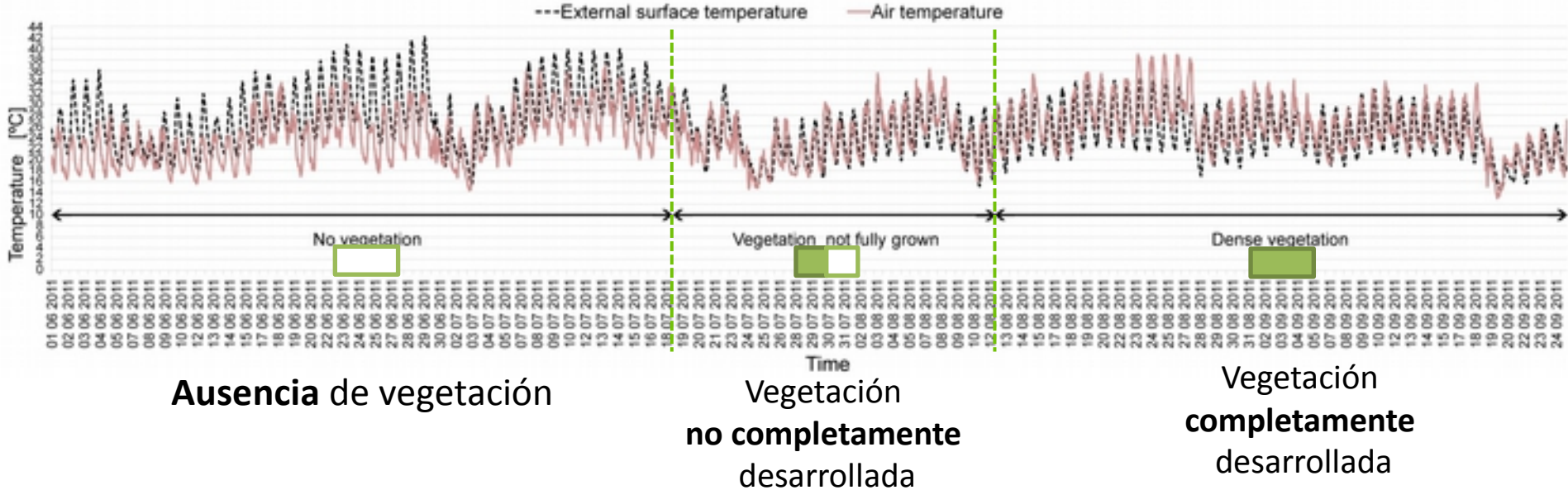
desde 01.06.2010 hasta 14.07.2010	vegetación no completamente desarrollada
desde 15.07.2010 hasta 30.09.2010	vegetación completamente desarrollada
desde 01.06.2011 hasta 18.07.2011	ausencia de vegetación
desde 19.07.2011 hasta 11.08.2011	vegetación no completamente desarrollada
desde 12.08.2011 hasta 30.09.2011	vegetación completamente desarrollada
desde 14.06.2012 hasta 30.09.2012	ausencia de vegetación

3

MONITORIZACIÓN DE UNA CUBIERTA ECOLÓGICA (Ancona, Italia)

Colaboración UPM – UNIVPM

- Para el primer análisis se escogen **tres períodos** con condiciones meteorológicas parecidas caracterizados cada uno por un diferente grado de **desarrollo de la vegetación**
- En cada periodo se compara **la temperatura superficial exterior con la temperatura del aire**

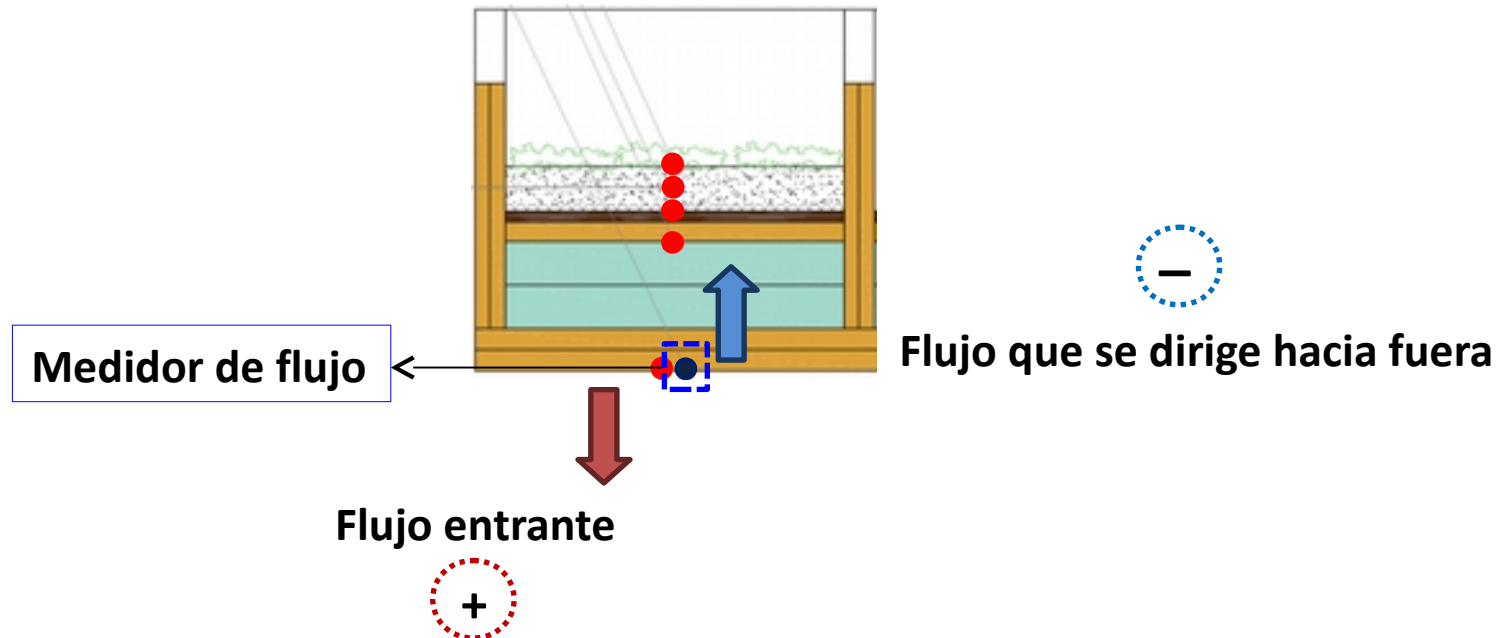


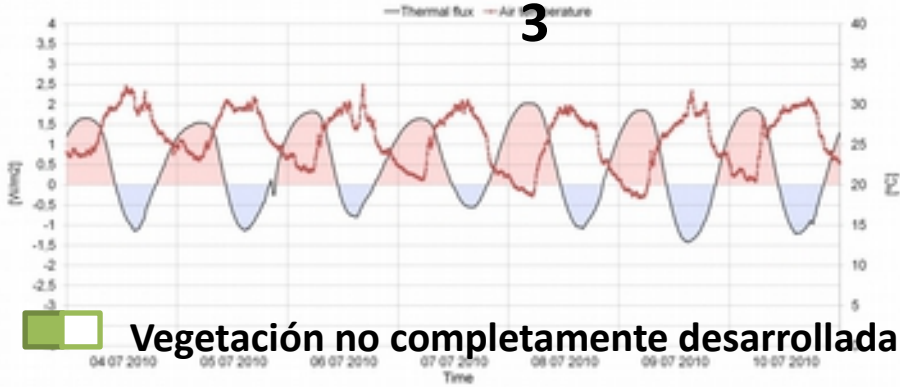
- Cuando la **vegetación** es **ausente** la **temperatura superficial exterior** de la cubierta **superior** a la **temperatura del aire**, al contrario cuando la **vegetación** está **completamente desarrollada** la temperatura superficial es inferior a la temperatura del aire

MONITORIZACIÓN DE UNA CUBIERTA ECOLÓGICA (Ancona, Italia)

Colaboración UPM – UNIVPM

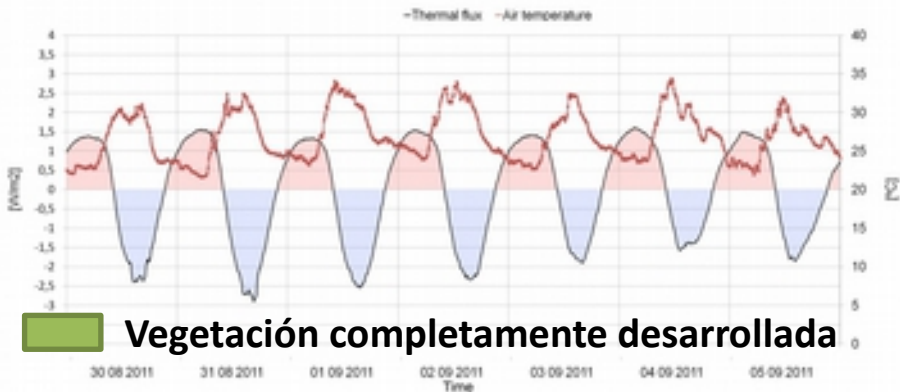
- ▶ Para el segundo análisis se escogen **tres períodos** con condiciones meteorológicas parecidas caracterizados cada uno por un diferente grado de **desarrollo de la vegetación**
- ▶ En cada periodo se compara **el flujo de calor entrante en el edificio** con el flujo de calor que se **dirige hacia fuera**





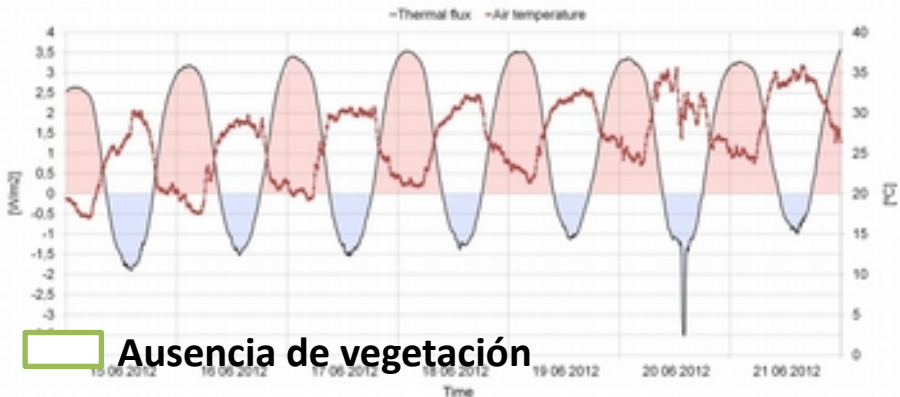
Vegetación no completamente desarrollada

- Energía entrante
- Energía saliente



Vegetación completamente desarrollada

- Energía entrante
- Energía saliente

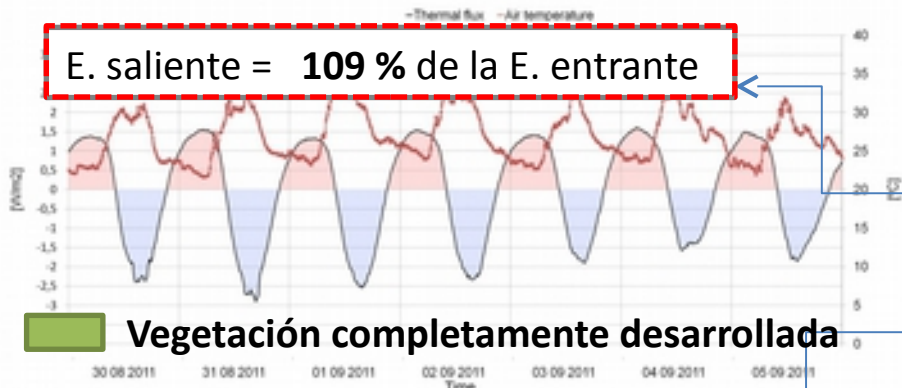


Ausencia de vegetación

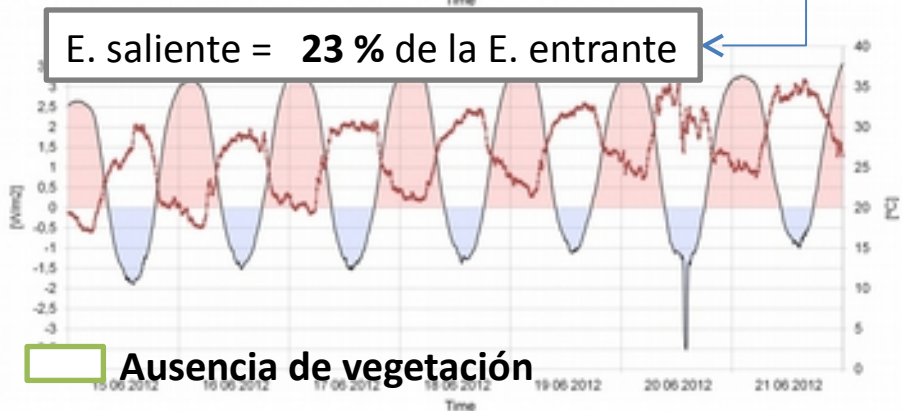
- Energía entrante
- Energía saliente



Vegetación no completamente desarrollada



Vegetación completamente desarrollada



Ausencia de vegetación

Semana	Energía entrante [Wh/m ²]	Energía saliente [Wh/m ²]
4-10/07/2010	123.8	-44.1
30/08-05/09/2011	97.2	-105.9
15-21/06/2012	246.3	-57.3

MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)

- Construcción de un **prototipo experimental** a escala real en un edificio de oficinas de la **empresa Intemper** situado en **Colmenar Viejo**

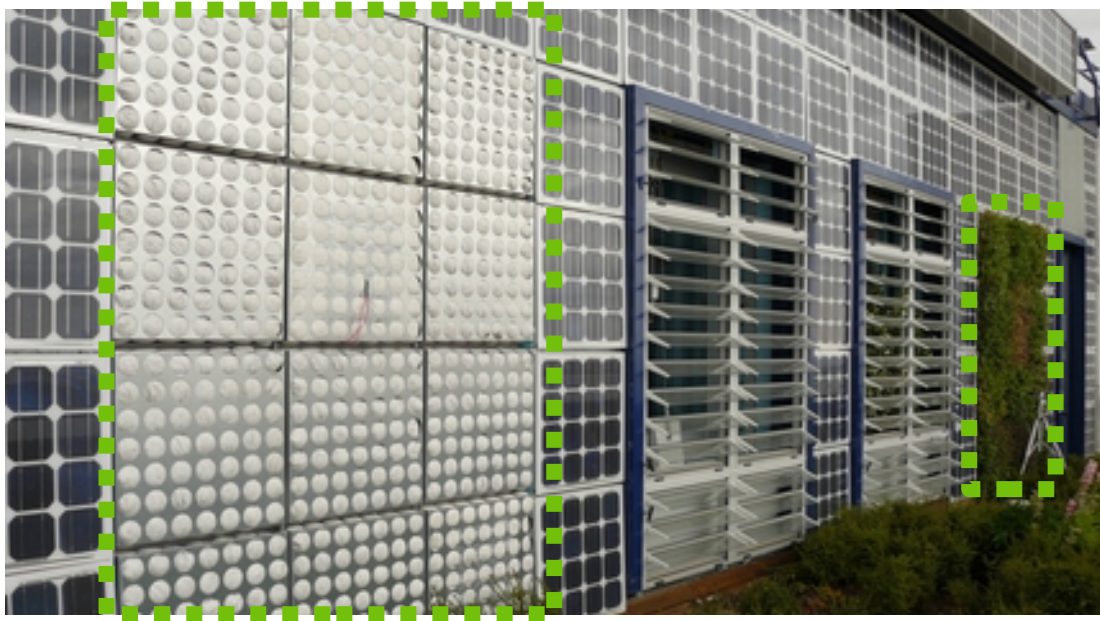


- **Prototipo experimental** como parte integrante de la **fachada orientada a sur** en la segunda planta del edificio
- **Fachada completamente soleada** tanto en verano como en invierno

MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)

- **Análisis y comparación** de los datos térmicos obtenidos a través de la **monitorización de dos de las cuatro fachadas**



- **PRIMERA FASE de monitorización** [01/01/2009 hasta 08/11/2011]
- **SEGUNDA FASE de monitorización** [01/07/2012 hasta 05/09/2012]

MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)

- ▶ **Cuatro espacios idénticos** en dimensión [1,8m x 1,8m x 2,4m] y composición de cerramientos, tan sólo difiriendo en el cerramiento correspondiente a la fachada sur

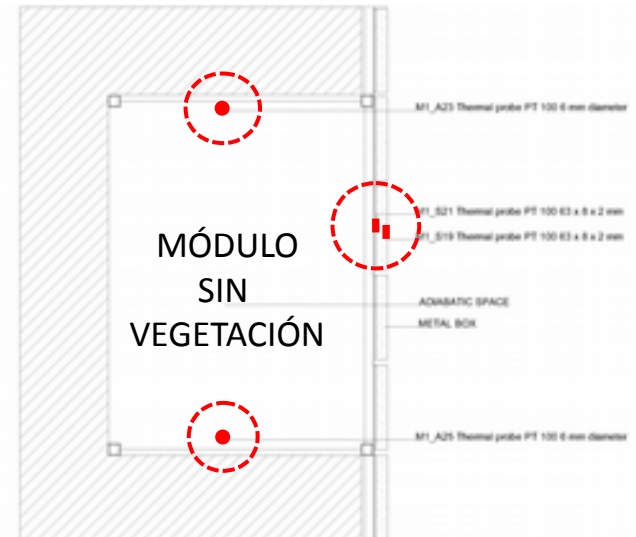
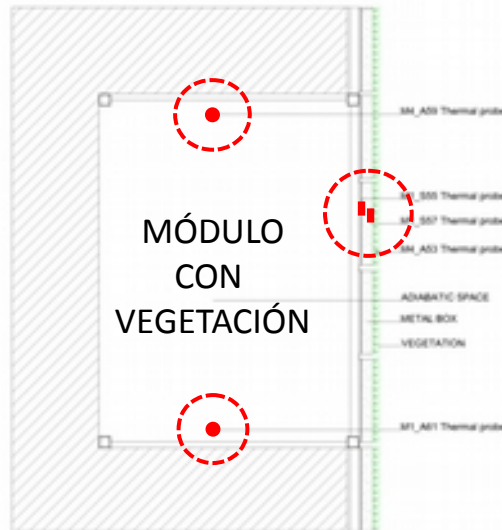


- ▶ Espacios **completamente aislados entre sí**
 - Capa de 0,60m de **poliestireno extruido** [$\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{mK})$] en suelo, techo y paredes de cada ambiente
 - $R_{\text{tot}} \text{ capas de separación} = 17,8 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ $R_{\text{tot}} \text{ suelo y techo} = 17,2 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$
- ▶ Las **transferencias de calor** se producen única y exclusivamente **por la fachada**

MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)

- Control directo de las **condiciones climáticas locales** a través de una **estación meteorológica** junto al edificio experimental



- Obtención de **datos de temperatura y de flujo térmico**
 - Sensores de **temperatura ambiente**
 - Sensores de **temperatura superficial**
 - Medidores de **flujo térmico**

MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)

- **SEGUNDA FASE de MONITORIZACIÓN** desde 01/07/2012 hasta 05/09/2012
- Comprobar la **efectividad del recubrimiento vegetal** en fachadas **aisladas**
Cerramientos constituidos por **paneles modulares** [0,60m x 0,60m x 0,08m]
 - Poliéstireno extruido $e=0,07$ m $\lambda= 0,035$ W/(mK)
 - Caja metálica, sustrato, riego por goteo, estructura de anclaje y soporte vertical
 - Capa de vegetación de *sedum* como acabado exterior de uno de los paneles



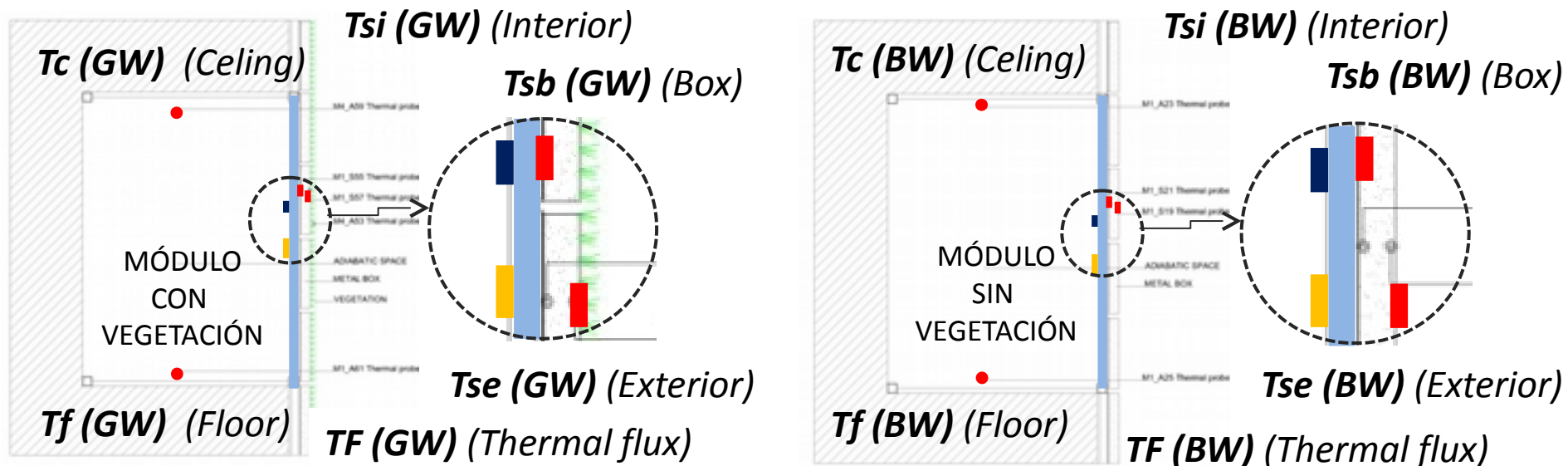
MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)

- **SEGUNDA FASE de MONITORIZACIÓN** desde 01/07/2012 hasta 05/09/2012
- Módulo con vegetación → **GW** (*Green Wall*) Módulo sin vegetación → **BW** (*Bare Wall*)

UGW = 0,37 W/(m²K)

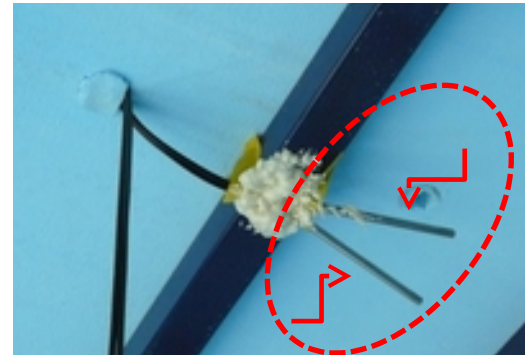
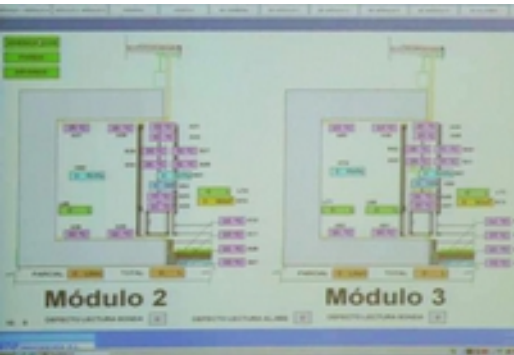
UBW = 0,33 W/(m²K)



MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)

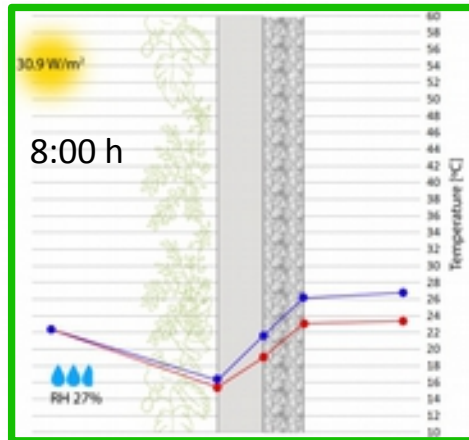
- Se toman valores **cada 5 min**



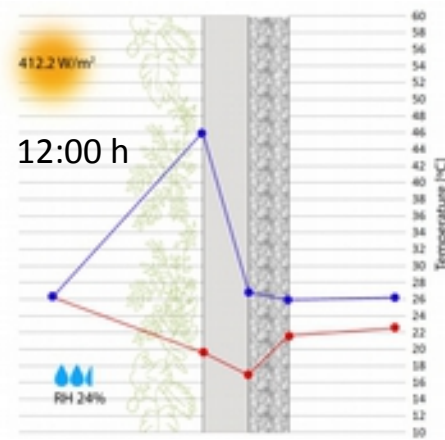
- **Temperatura superficial** RTD PT100 planas de 63 x 8 x 2mm (precisión $\pm 0,15$ K)
- **Temperatura ambiente** RTD PT100 L=100 mm de 6 mm de diámetro
 - **Fluxímetro** Huseflux HFP01 (precisión ± 5 %)
- Para comprobar la **fiabilidad** de la medida se **duplican las termorresistencias**

MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

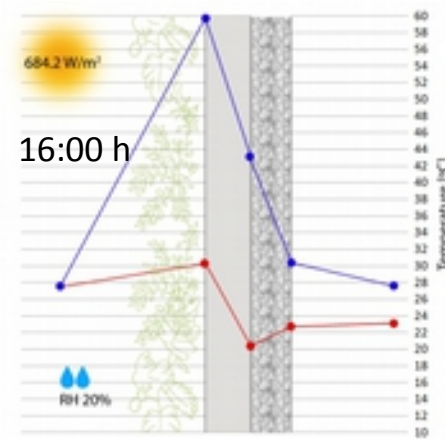
Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)



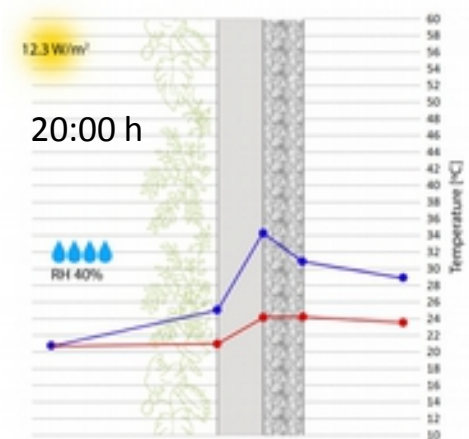
— BW — GW



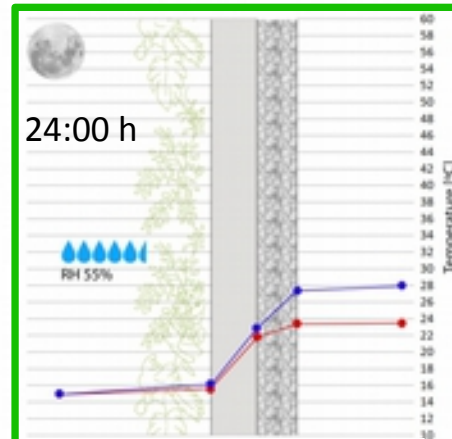
— BW — GW



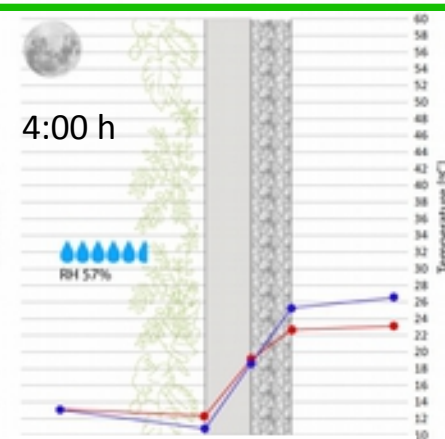
— BW — GW



— BW — GW



— BW — GW

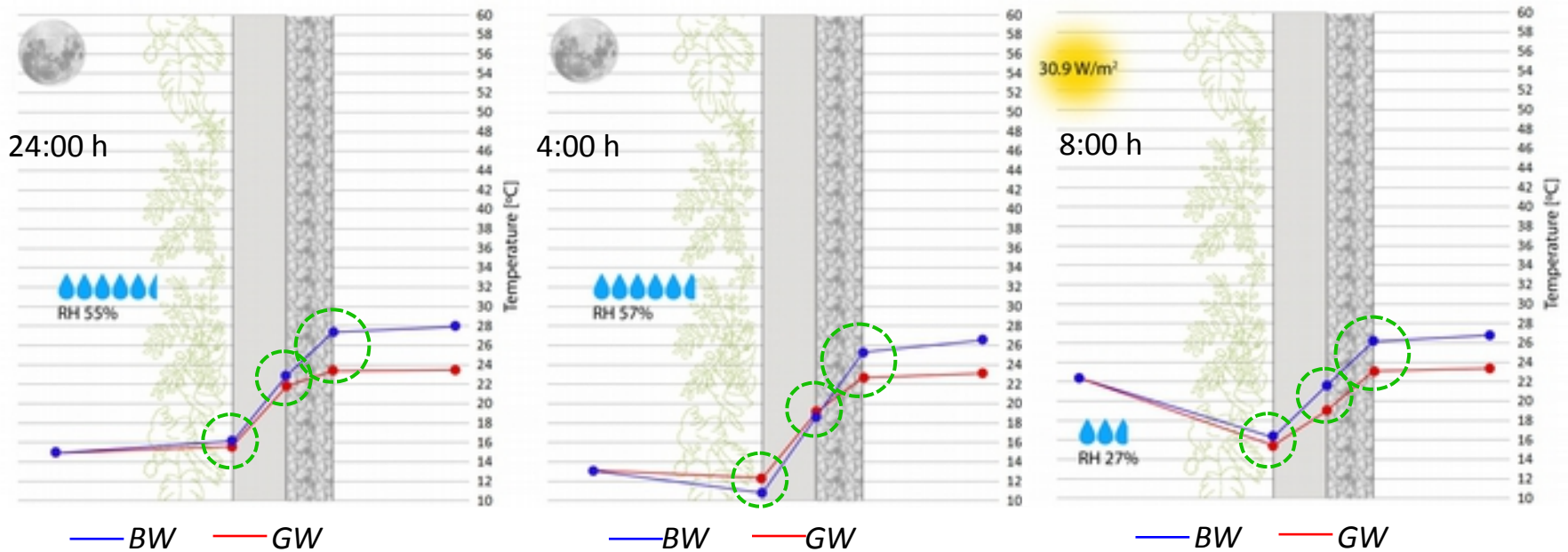


— BW — GW

3

MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)



Noche y mañana

$$T_{se} (GW) \sim T_{se} (BW)$$

$$T_{sb} (GW) < T_{sb} (BW) \Rightarrow$$

$$T_i (GW) < T_i (BW)$$

Presencia de agua en el sustrato del panel vegetal

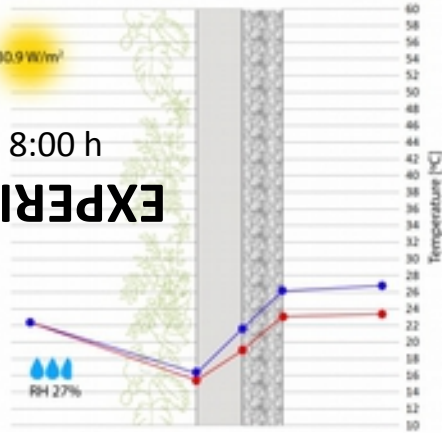


Enfriamiento evaporativo provocado unas horas antes

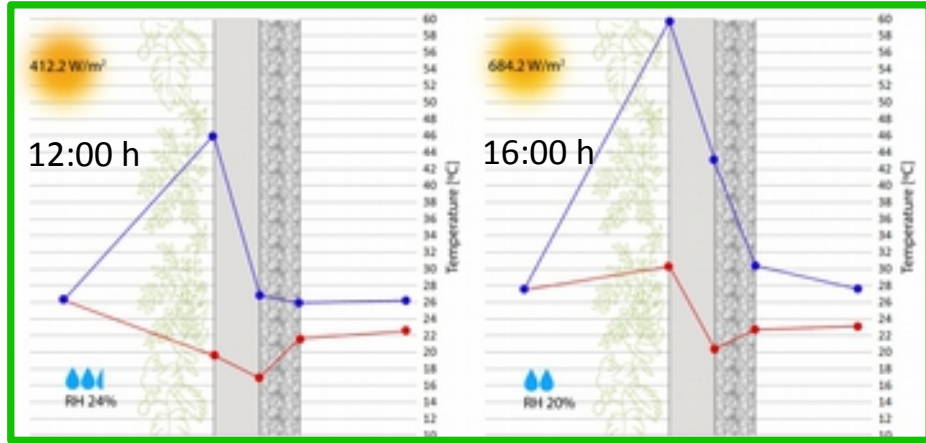
MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)

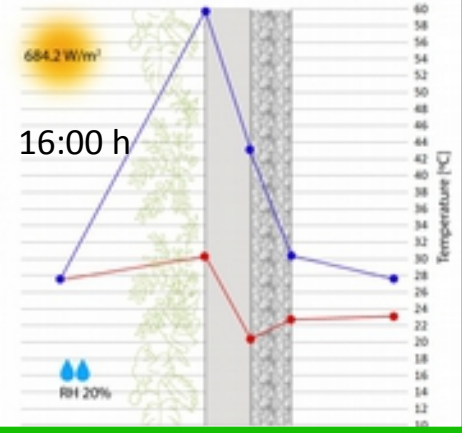
EXPERIMENTO



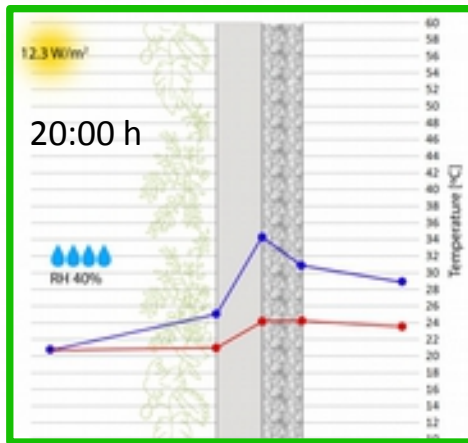
— BW — GW



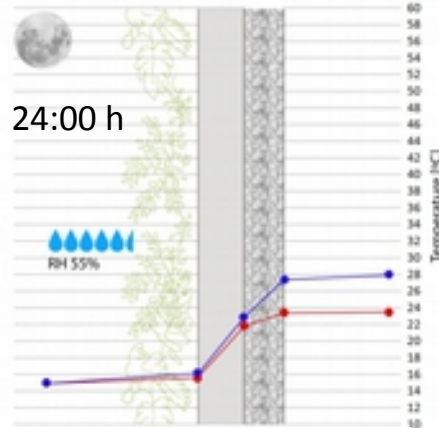
— BW — GW



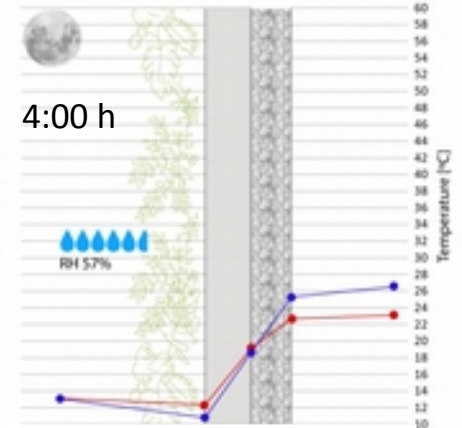
— BW — GW



— BW — GW



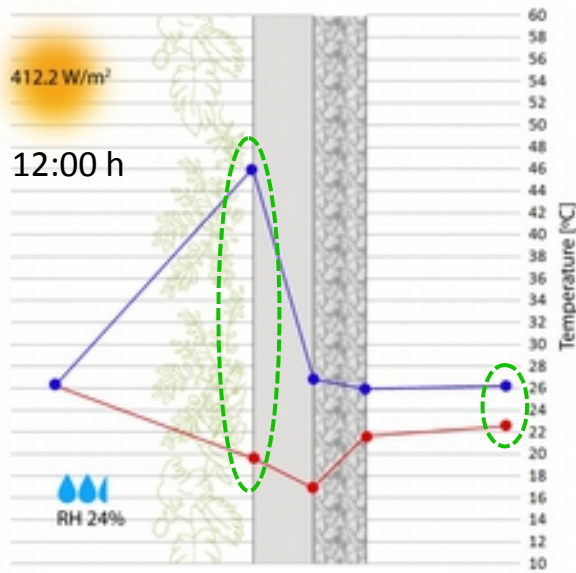
— BW — GW



— BW — GW

MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)



— BW — GW

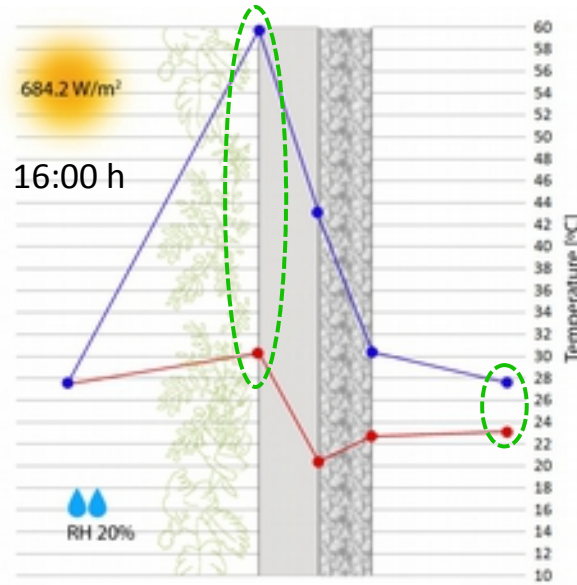
Día

$T_{se} (GW) \sim T_o$

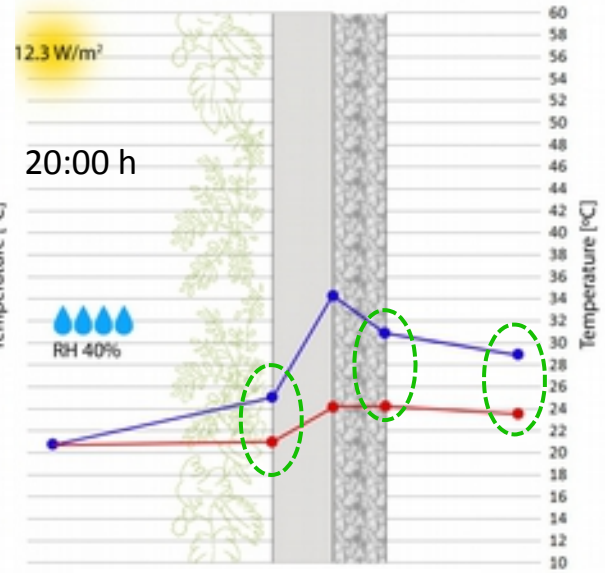
$T_{se} (BW) \gg T_o$



$T_{se} (BW) \gg T_{se} (GW) \iff [(T_i (BW) - T_i (GW))] \sim 5 \text{ } ^\circ\text{C}$



— BW — GW



— BW — GW

Tarde

$T_{se} (BW) > T_{se} (GW)$

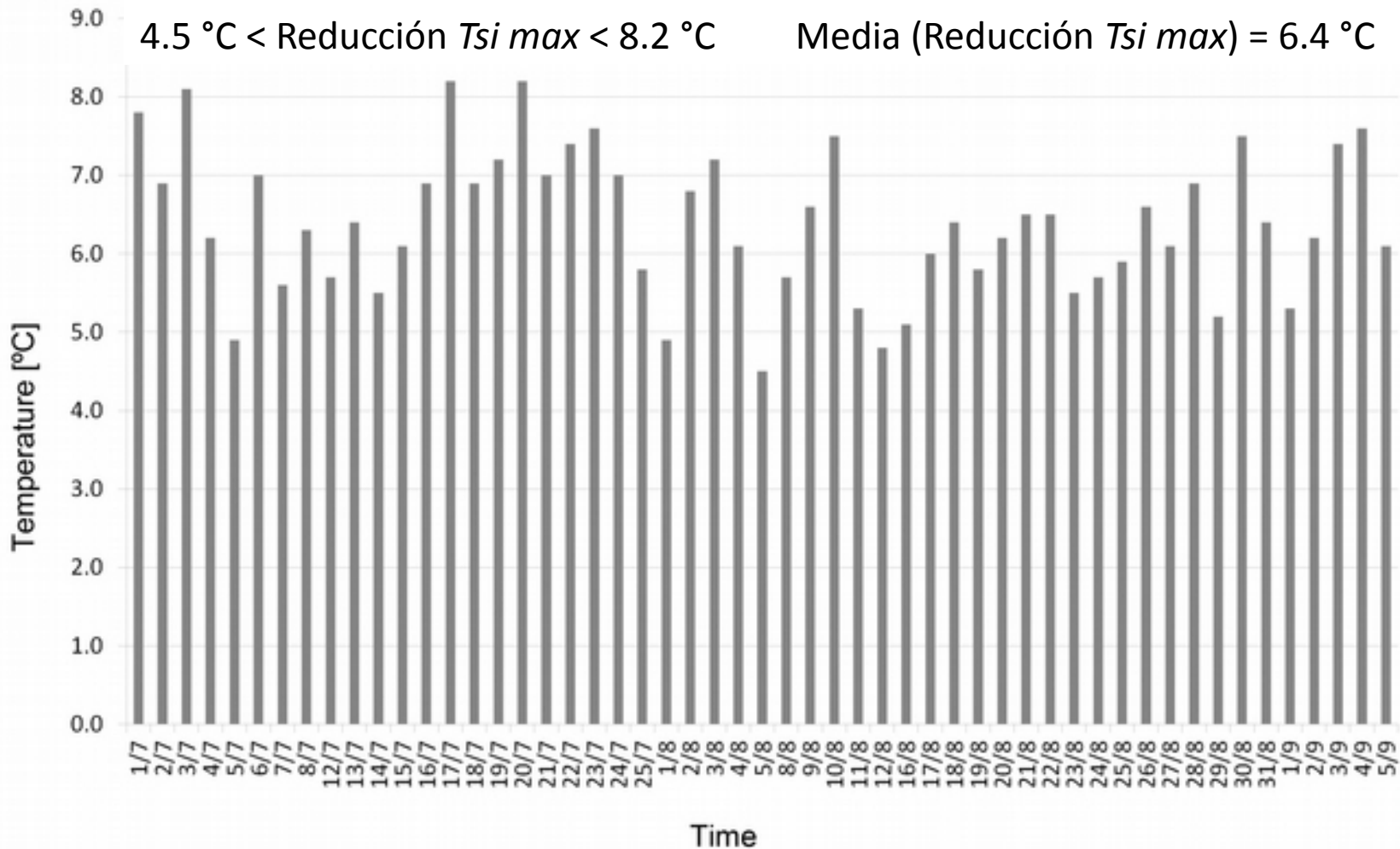


$[(T_i (BW) - T_i (GW))] \sim 5 \text{ } ^\circ\text{C}$

$[(T_{si} (BW) - T_{si} (GW))] \sim 7 \text{ } ^\circ\text{C}$

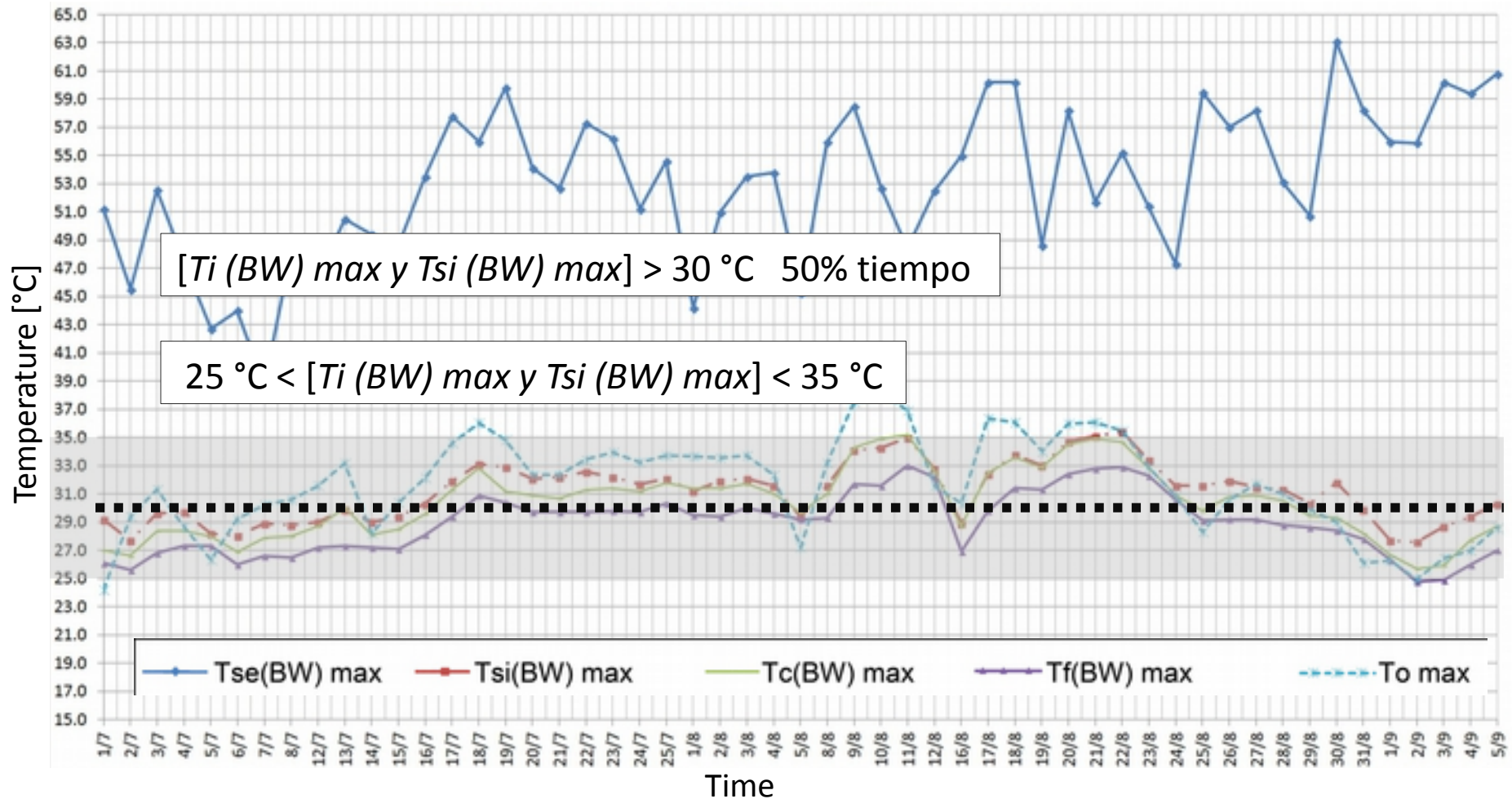
MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)



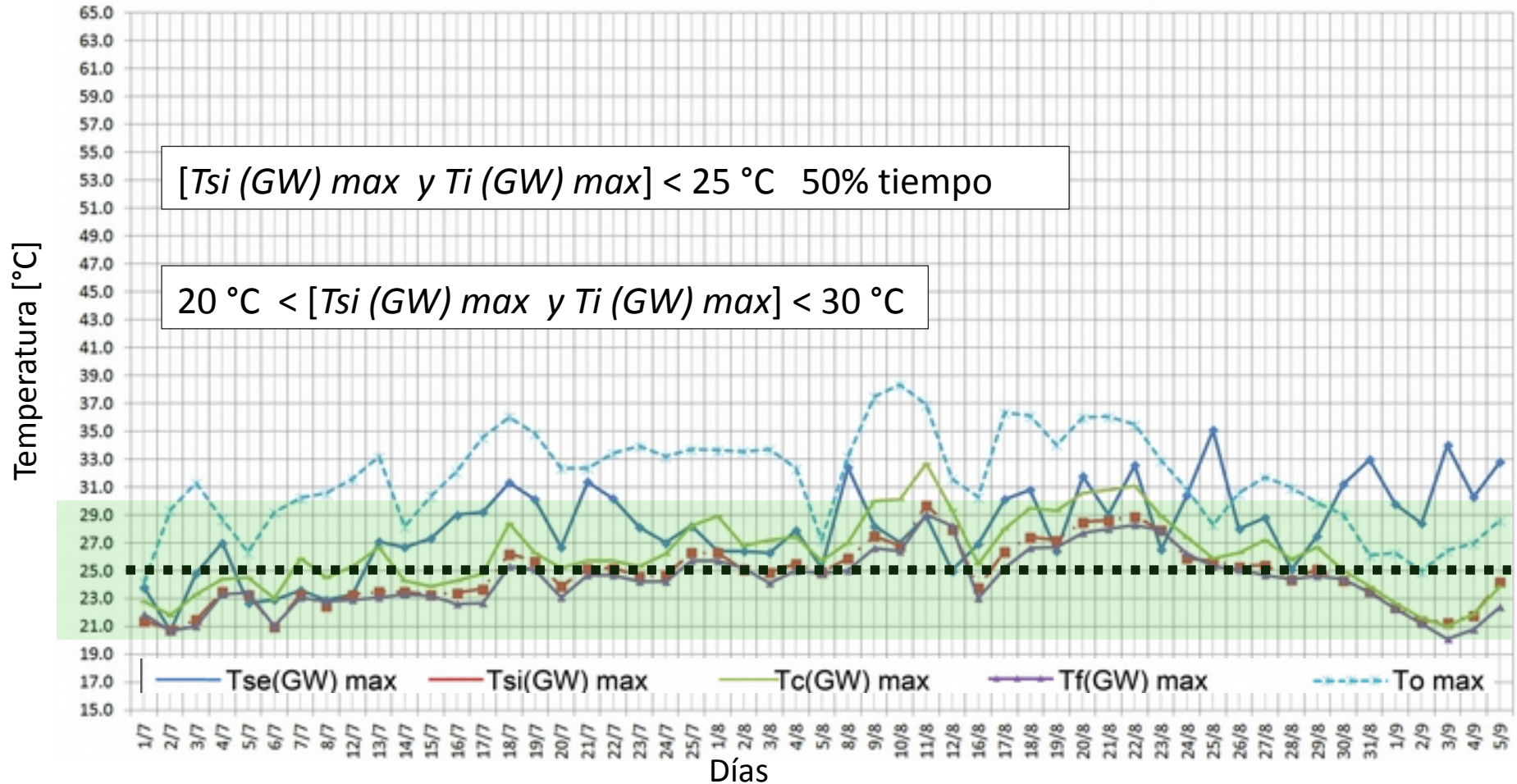
MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)



MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)



MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)

Temperaturas medias del aire exterior e interior	T_o	T_i (GW)	T_i (BW)
T media (°C)	25,1	23,6	27,7
T media nocturna(°C)	21,9	23,7	27,9
T media diurna(°C)	27,9	23,2	27,4

$$(GW, T_i - T_o) = -1,5 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (BW, T_i - T_o) = 2,6 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

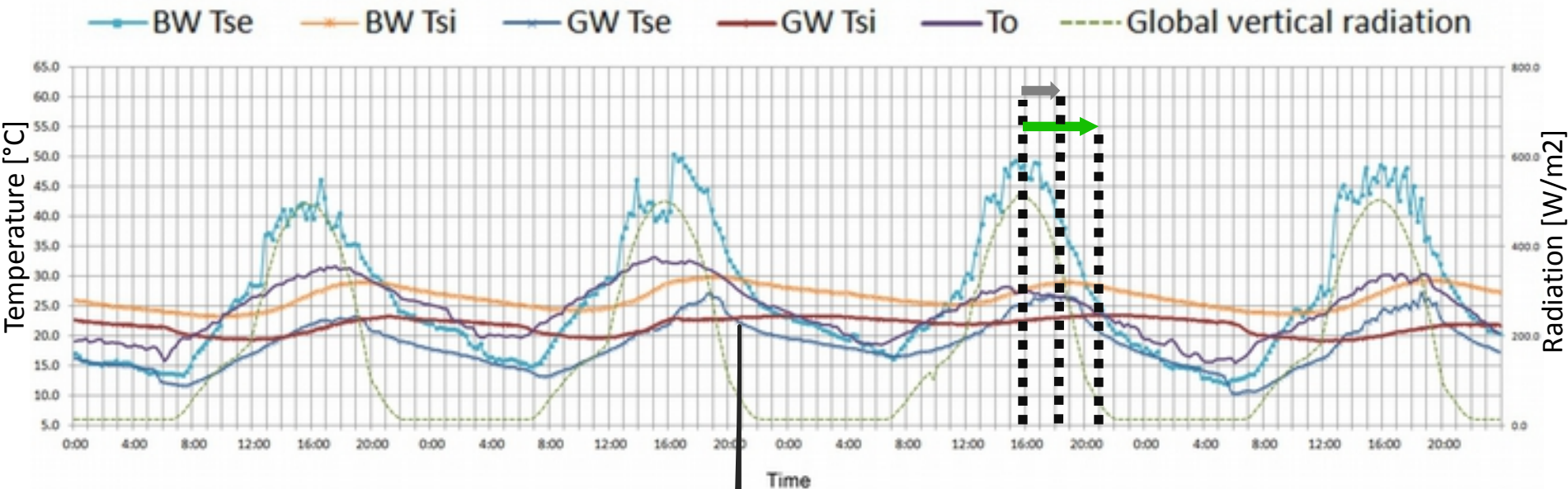
Día

$$(GW, T_i - T_o) = -4,7 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (BW, T_i - T_o) = -0,5 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)

497 W/m² < Irradiancia max días julio < 515 W/m²



Irradiancia max días julio → 15:45 h

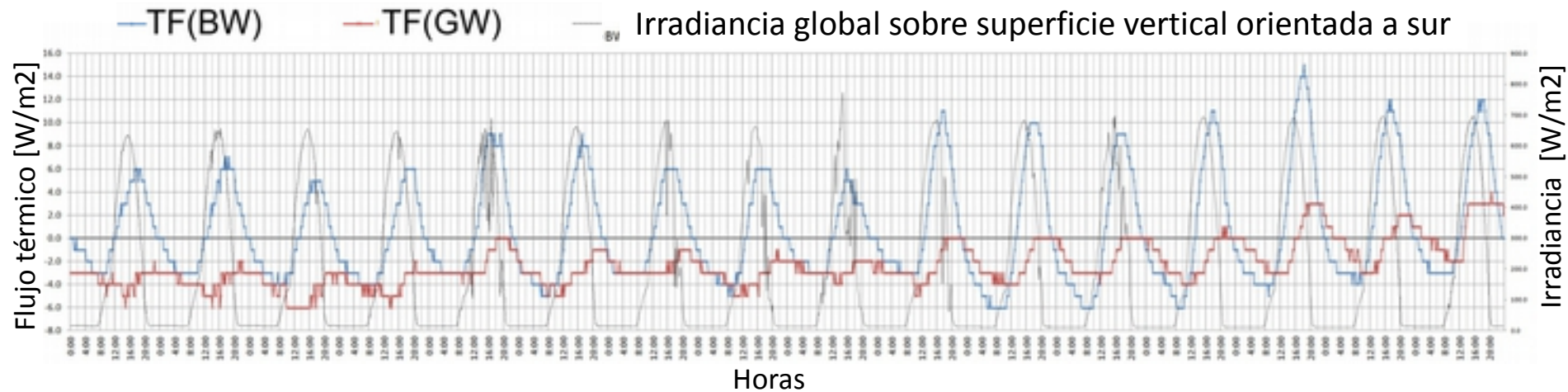
BW, Tsi, max → 18:30 h

GW, Tsi, max → 20:30 h

Retardo de 2 horas en el pico máximo de *Tsi*

MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)



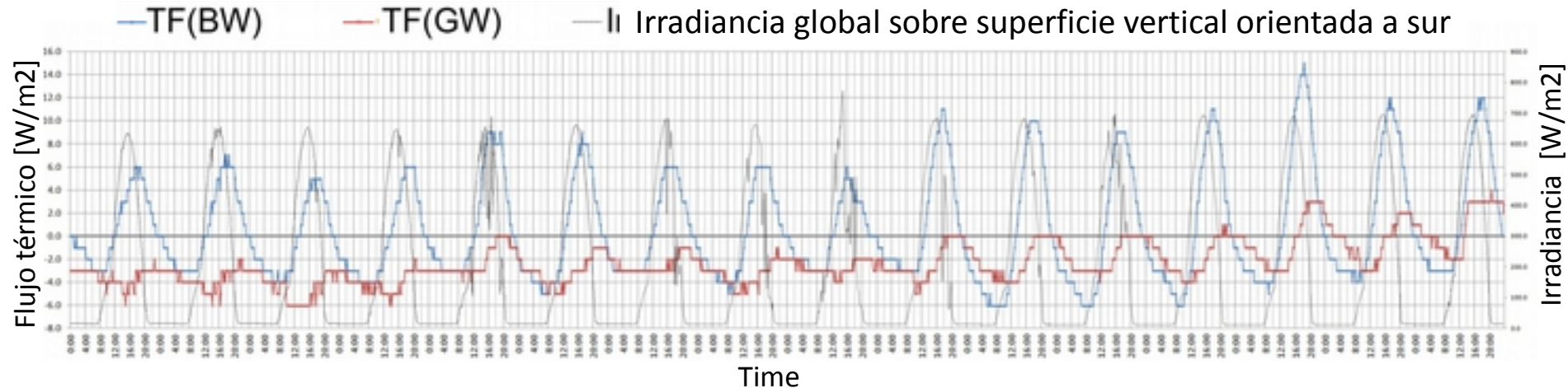
Flujo >0 ⇐ Flujo entrante en el módulo

Flujo <0 ⇐ Flujo que se dirige hacia el exterior (almacenado)

- GW → flujos negativos >> flujos positivos
- BW → alternancia constante de flujos positivos y negativos

MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)



Período	Módulo sin vegetación (<i>BW</i>)		Módulo con vegetación (<i>GW</i>)	
	E. Entrante (Wh/m²)	E. Saliente (Wh/m²)	E. Entrante (Wh/m²)	E. Saliente (Wh/m²)
21/08 -05/09	837,5	582,2	61,8	952,1

- Energía entrante a través de *GW* = **7%** de energía entrante a través de *BW*
- Energía entrante a través de *GW* = **6,5 %** de energía saliente
- Energía entrante a través de *BW* = **144%** de energía saliente

TRABAJOS FUTUROS

- **Monitorización** de edificios con envolventes vegetales bajo **reales condiciones de uso**
 - Colaboración UPM – UAQ
- **Implementación** de un sistema de **fachada vegetal** de producción local y de bajo impacto ambiental **en un edificio piloto** de la Universidad Autónoma de Querétaro (México)
- El proyecto se origina para **dar solución a un problema concreto de falta de confort térmico** en la mayoría de **edificios modernos** existentes en **esta región**





Gracias por vuestra atención

Beneficios energéticos de las envolventes vegetales

Francesca Olivieri

Dra. Arquitecta

Profesora del Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas
de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura (UPM)

francesca.olivieri@upm.es