

## 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**

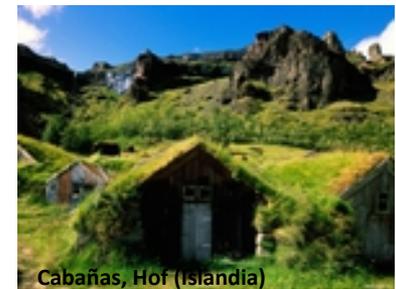
**Trabajos futuros**

## 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**



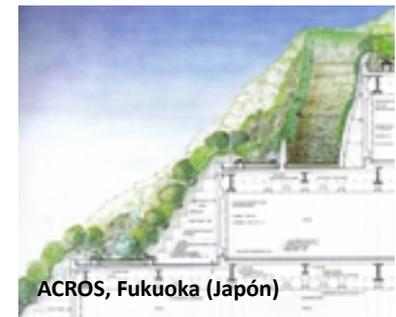
Monasterio, Ostrog (Montenegro)



Cabañas, Hof (Islandia)



Forest spiral, Darmstadt (Alemania)



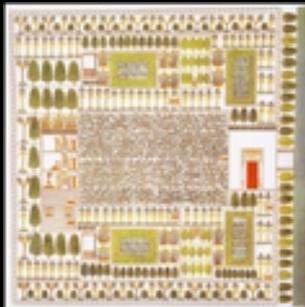
ACROS, Fukuoka (Japón)

## 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

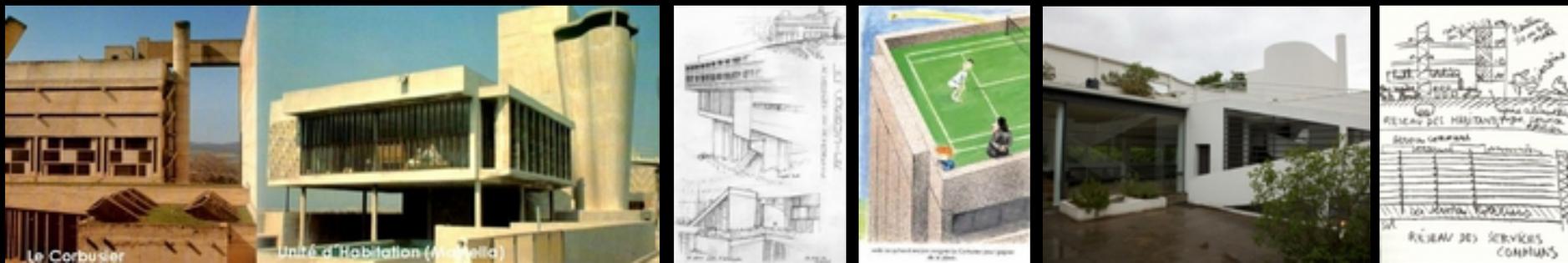
- Desde **1865** hasta la Segunda Guerra Mundial

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



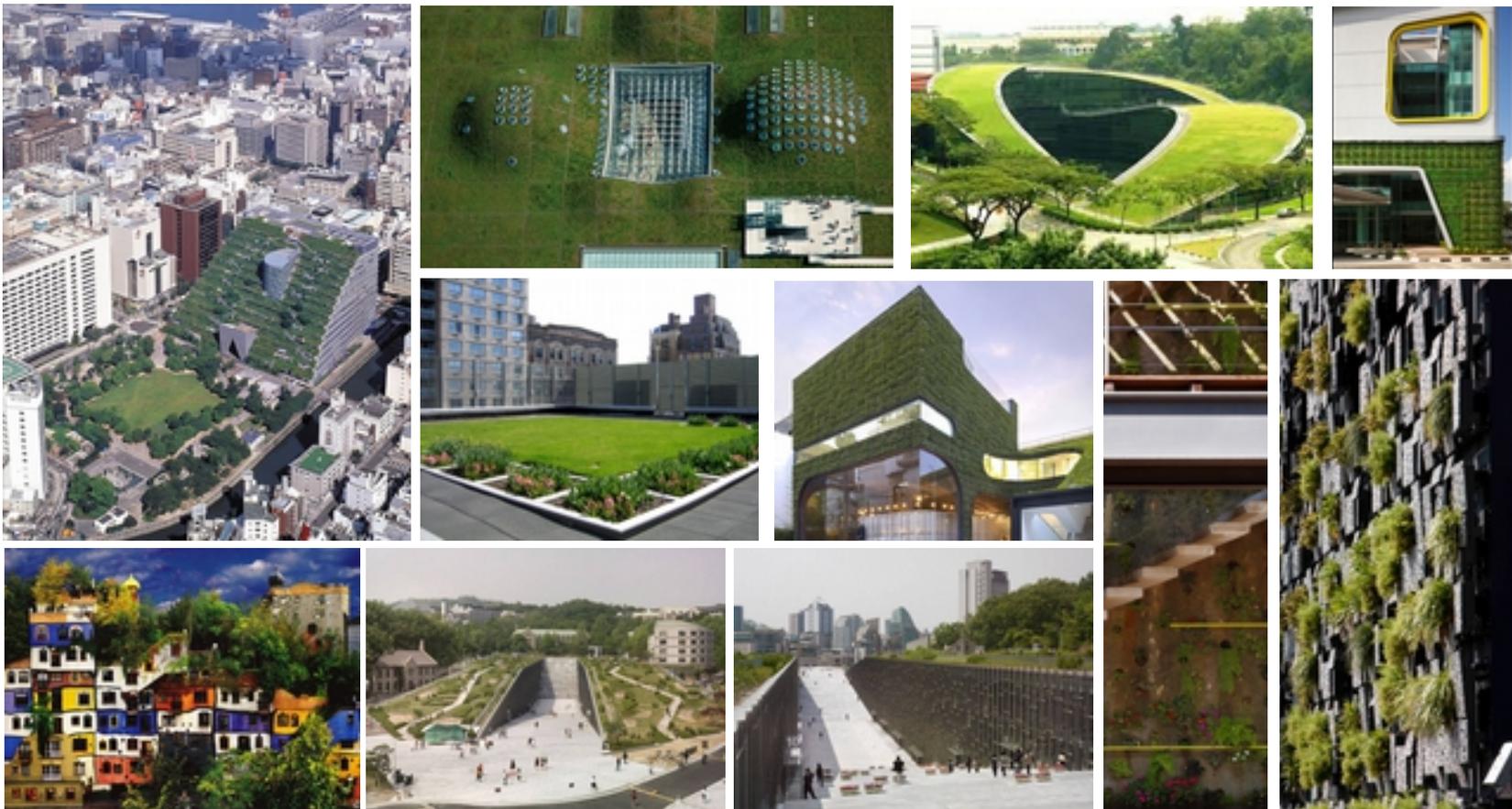
Años '90



Años 2000

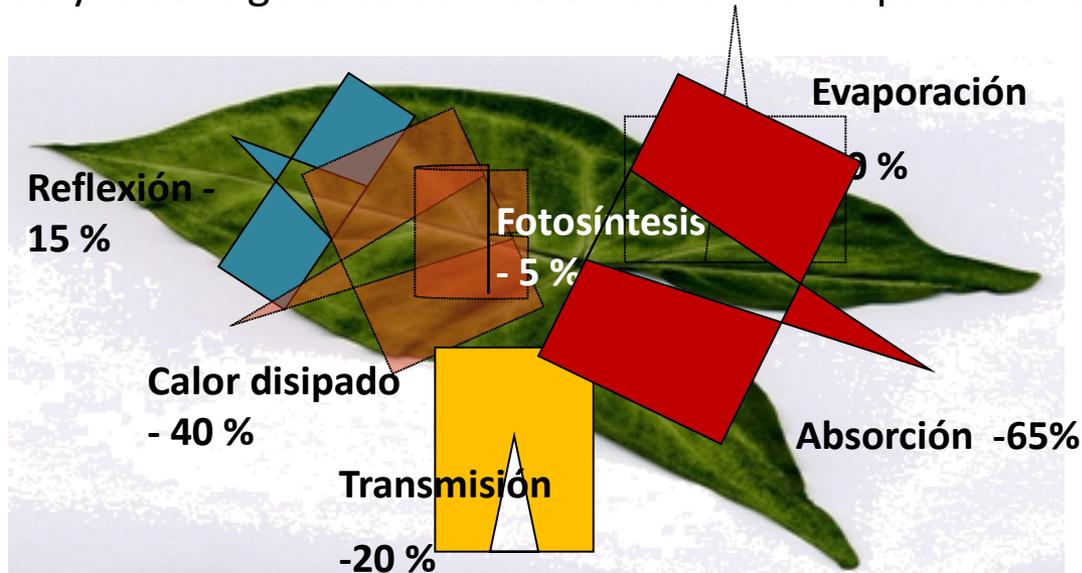


## EVOLUCIÓN HISTÓRICA



## 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**



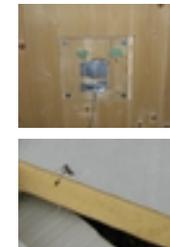
- Para cuantificar los **beneficios energéticos** de las **envolventes vegetales** se mostrarán los resultados de **dos investigaciones** realizadas en los **últimos años**

# 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]



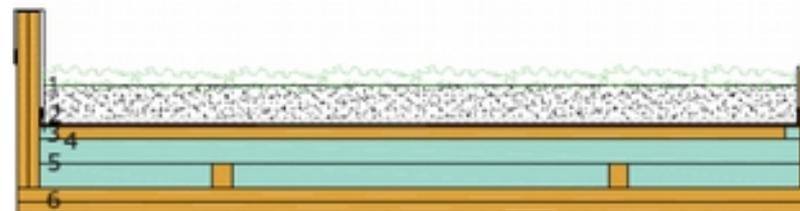
- ▶ Dimensiones: **8,20 x 10,50 m** Superficie: **86,10 m2** Volumen: **250 m3**
- ▶ Cubierta orientada a sur dividida en seis partes de mismas dimensiones
- ▶ **Cubierta ecológica 1,58 x 2,00 m**

# 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]	$\lambda$ [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



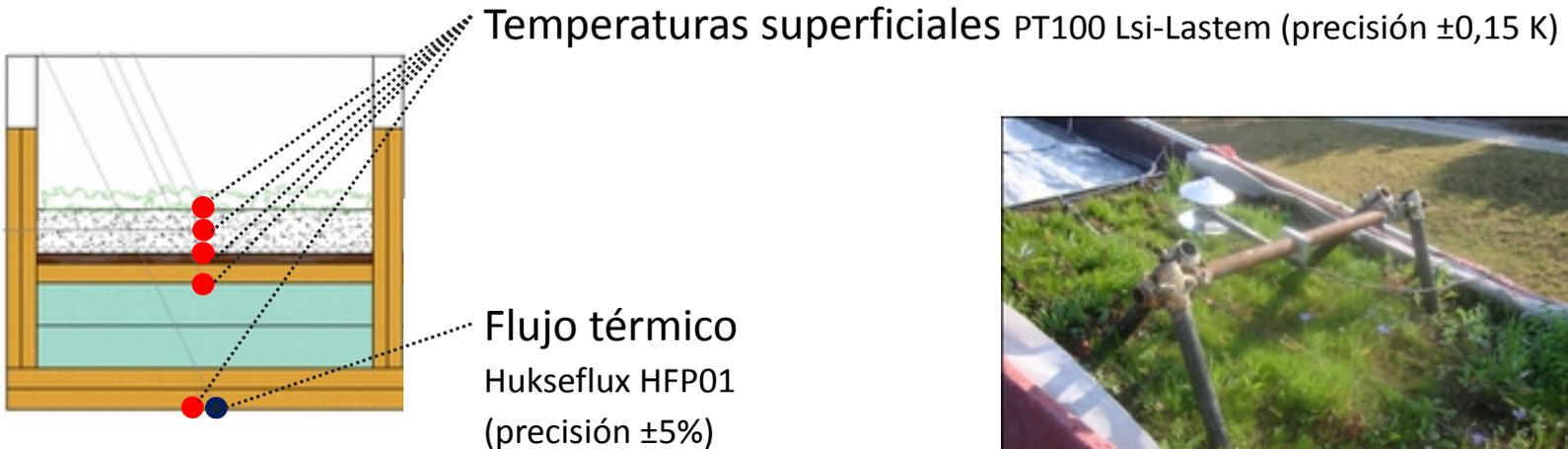
# MONITORIZACIÓN DE UNA CUBIERTA ECOLÓGICA (Ancona, Italia)

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

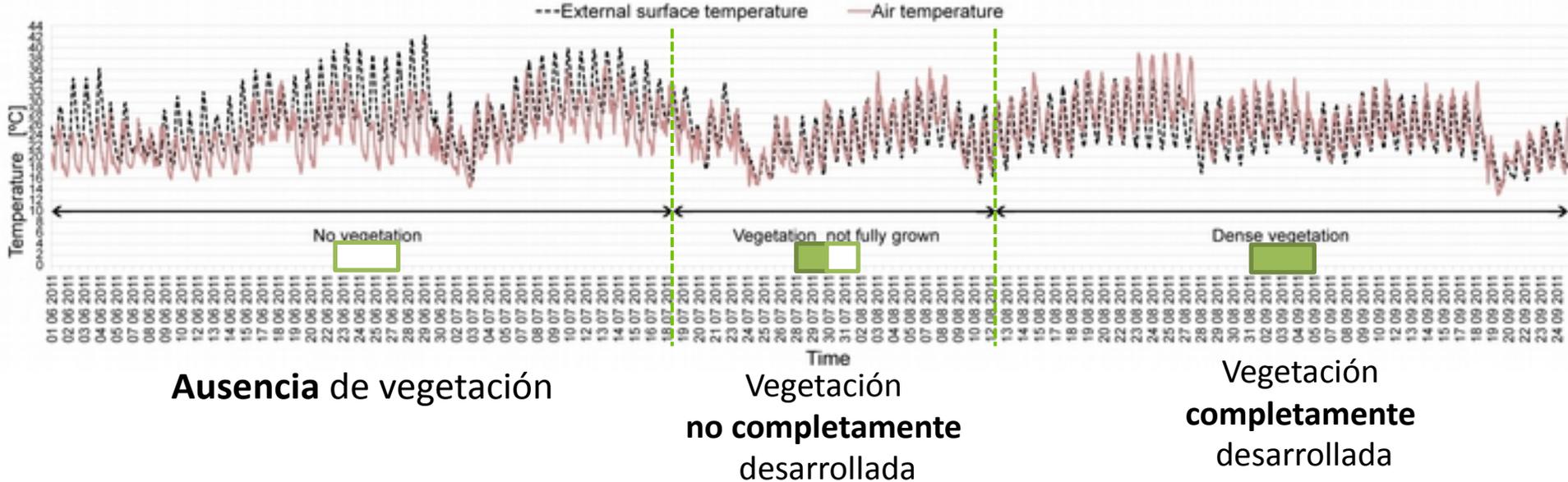
desde 01.06.2010 hasta 14.07.2010	vegetación <b>no completamente</b> desarrollada
desde 15.07.2010 hasta 30.09.2010	vegetación <b>completamente</b> desarrollada
desde 01.06.2011 hasta 18.07.2011	<b>ausencia</b> de vegetación
desde 19.07.2011 hasta 11.08.2011	vegetación <b>no completamente</b> desarrollada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

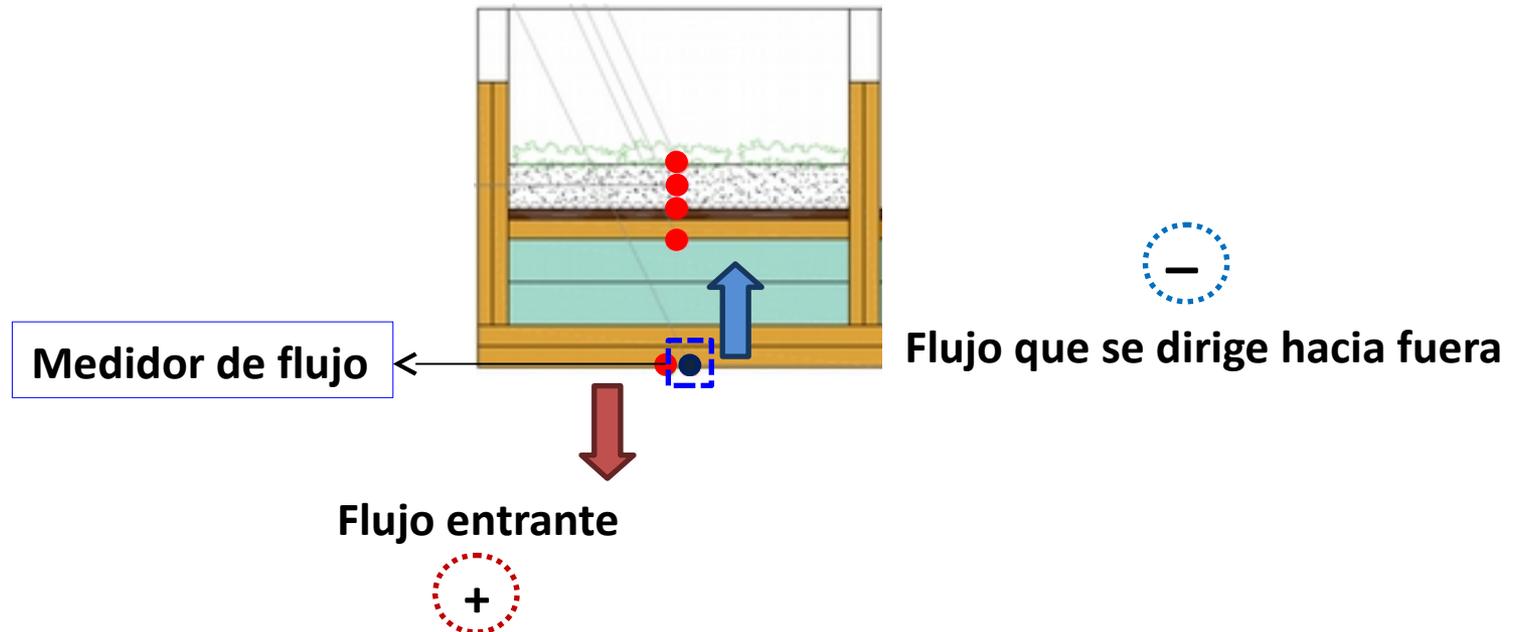


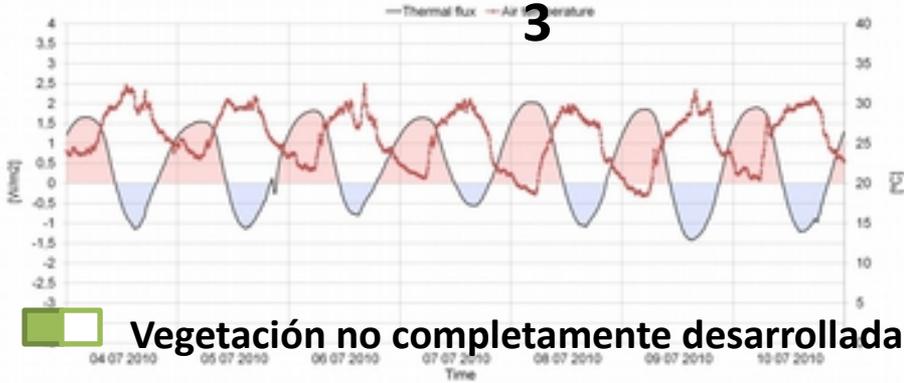
- Cuando la **vegetación** es **ausente** la **temperatura superficial exterior** de la cubierta **superior** a la **temperatura del aire**, al contrario cuando la **vegetación** está **completamente desarrollada** la temperatura superficial es inferior a la temperatura del aire

## MONITORIZACIÓN DE UNA CUBIERTA ECOLÓGICA (Ancona, Italia)

Colaboración UPM – UNIVPM

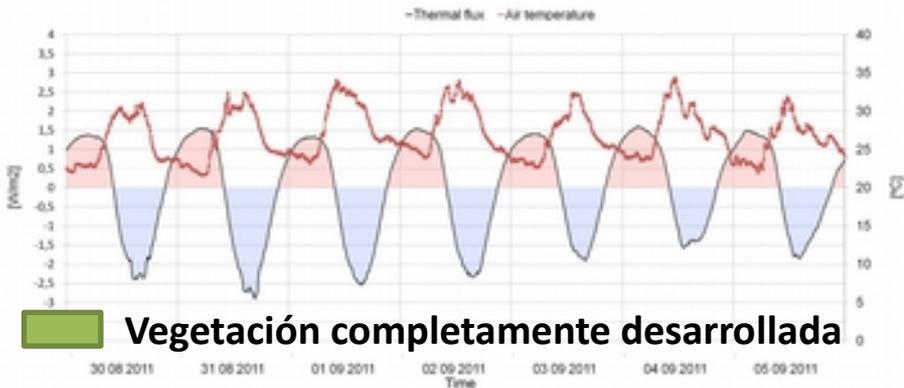
- ▶ Para el segundo análisis se escogen **tres períodos** con condiciones meteorológicas parecidas caracterizados cada uno por un diferente grado de **desarrollo de la vegetación**
- ▶ En cada periodo se compara **el flujo de calor entrante en el edificio** con el flujo de calor que se **dirige hacia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





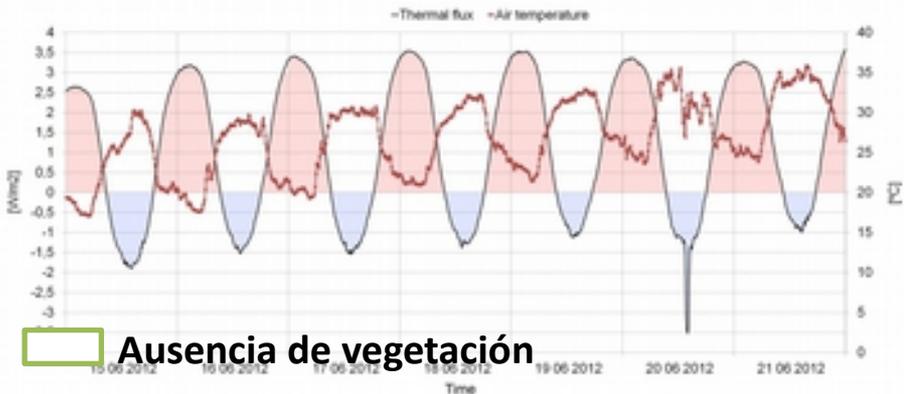
- Energía entrante
- Energía saliente

Vegetación no completamente desarrollada



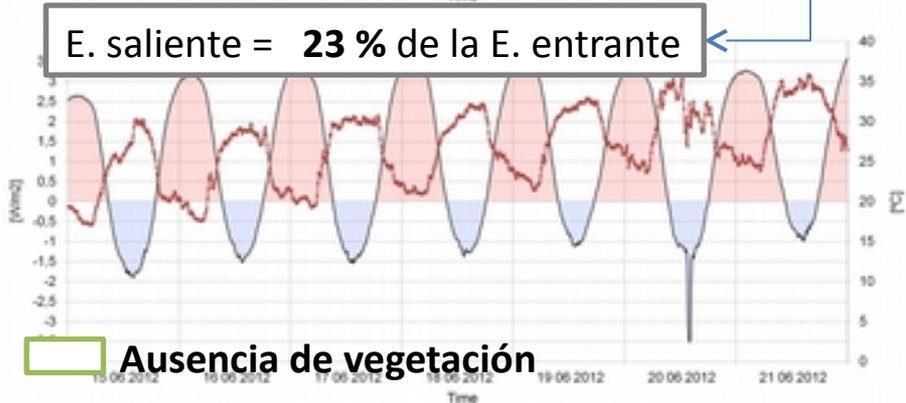
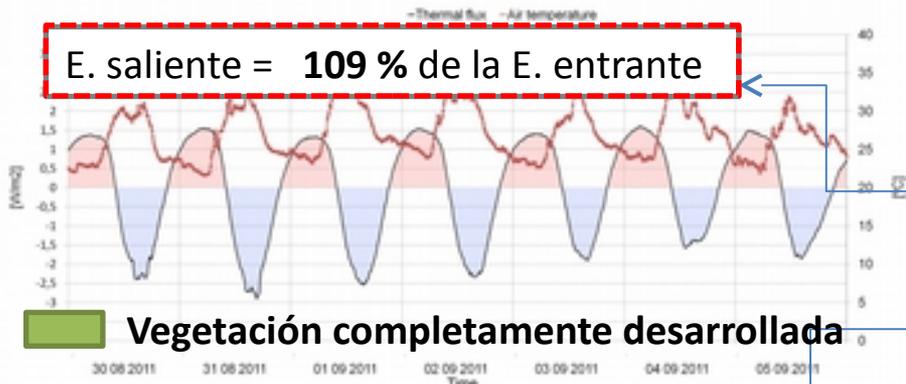
- Energía entrante
- Energía saliente

Vegetación completamente desarrollada



- Energía entrante
- Energía saliente

Ausencia de vegetación



Semana	Energía entrante [Wh/m <sup>2</sup> ]	Energía saliente [Wh/m <sup>2</sup> ]
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

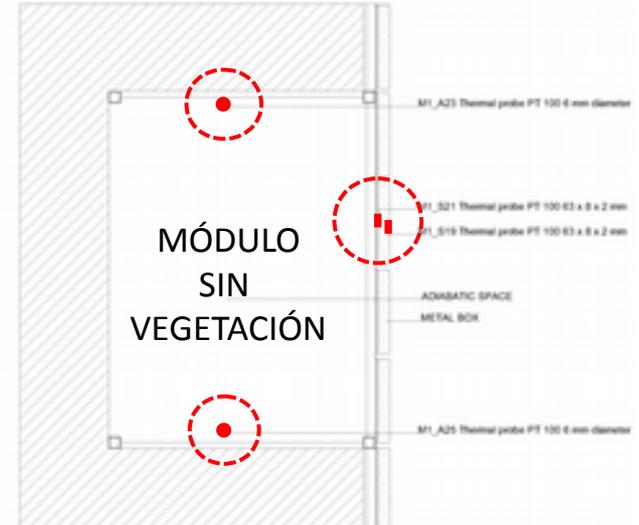
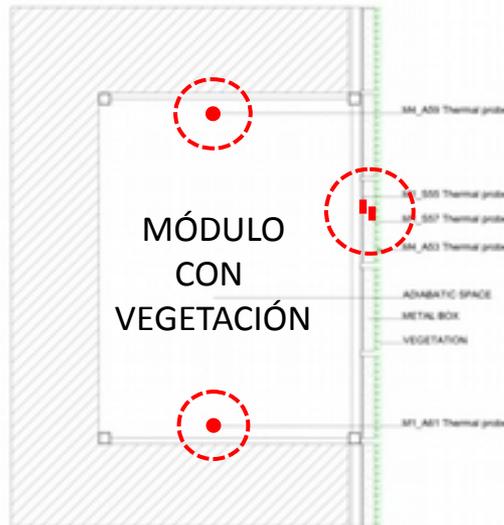


- ▶ Espacios **completamente aislados entre sí**
  - Capa de 0,60m de **poliestireno extruido** [ $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{mK})$ ] en suelo, techo y paredes de cada ambiente
  - $R_{\text{tot}} \text{ capas de separación} = 17,8 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$   $R_{\text{tot}} \text{ suelo y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

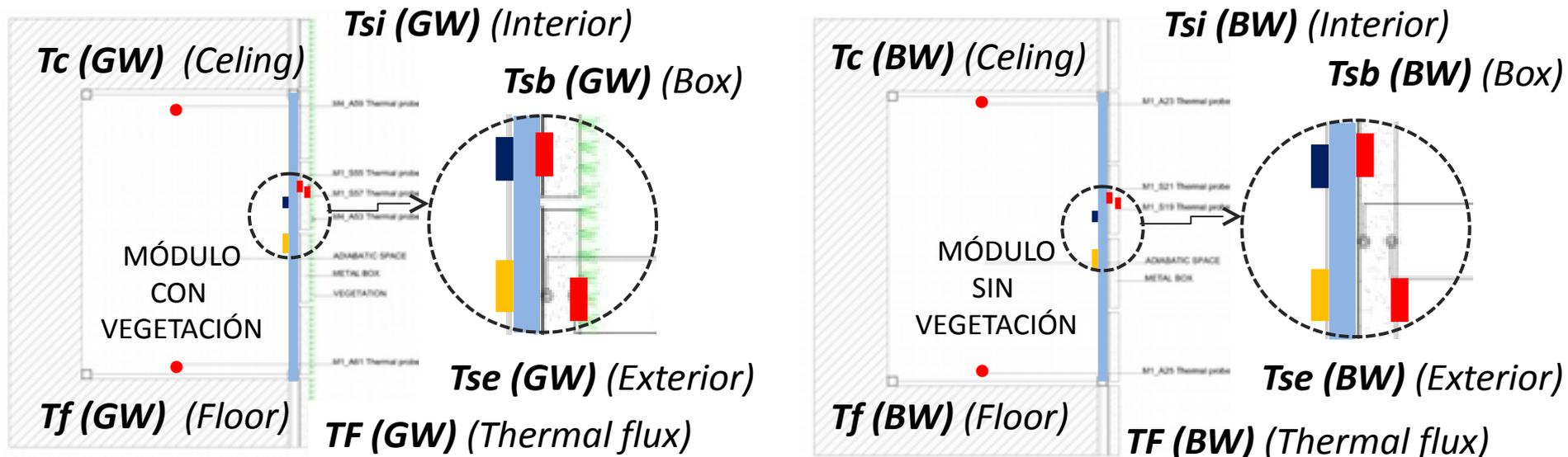
- **SEGUNDA FASE de MONITORIZACIÓN** desde 01/07/2012 hasta 05/09/2012
- Comprobar la **efectividad del recubrimiento vegetal** en fachadas **aisladas**  
Cerramientos constituidos por **paneles modulares** [0,60m x 0,60m x 0,08m]
  - Poliéstireno extruido  $e=0,07$  m  $\lambda= 0,035$  W/(mK)
  - Caja 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)

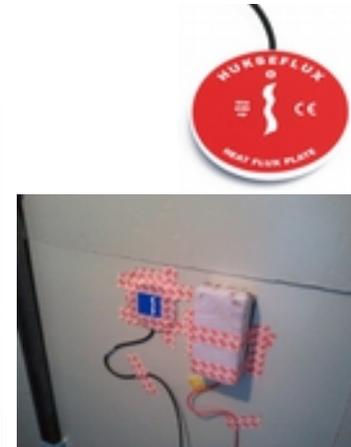
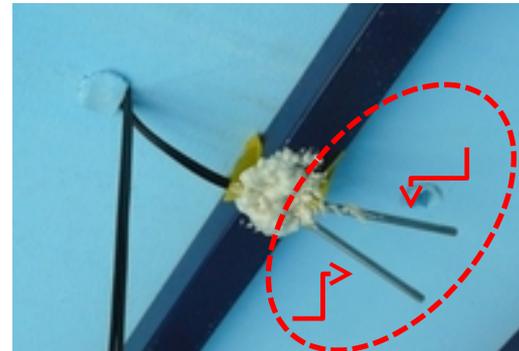
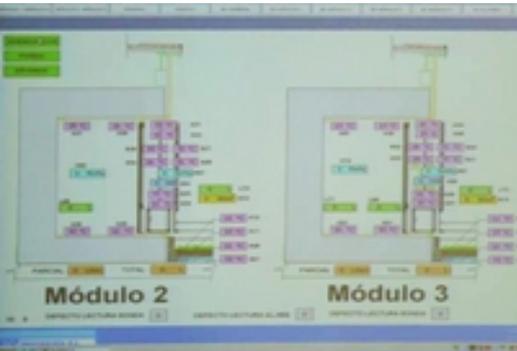
- **SEGUNDA FASE de MONITORIZACIÓN** desde 01/07/2012 hasta 05/09/2012
- Módulo con vegetación → **GW** (*Green Wall*) Módulo sin vegetación → **BW** (*Bare Wall*)  
 $UGW = 0,37 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$                        $UBW = 0,33 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



## MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

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

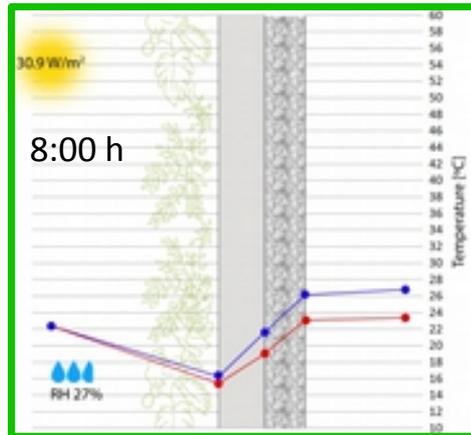
- Se toman valores **cada 5 min**



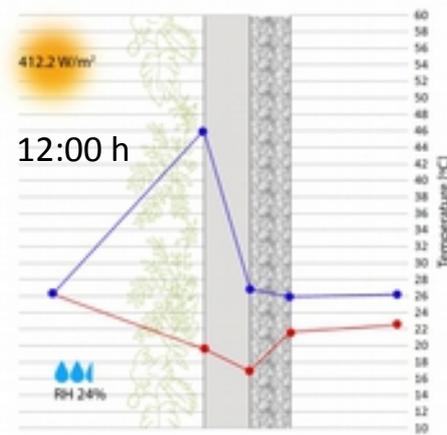
- **Temperatura superficial** RTD PT100 planas de 63 x 8 x 2mm (precisión  $\pm 0,15$  K)
- **Temperatura ambiente** RTD PT100 L=100 mm de 6 mm de diámetro
  - **Flujímetro** Huseflux HFP01 (precisión  $\pm 5$  %)
- Para comprobar la **fiabilidad** de la medida se **duplican las termorresistencias**

# MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

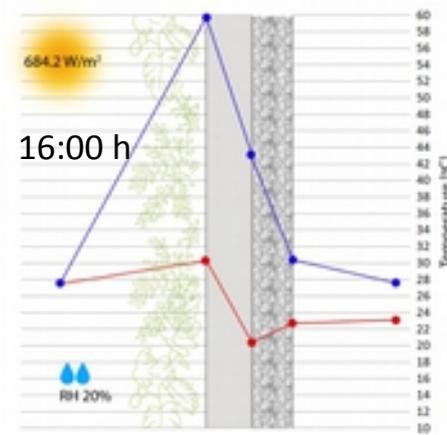
Colaboración UPM – Intemper S.A. (Proyecto CECOS)



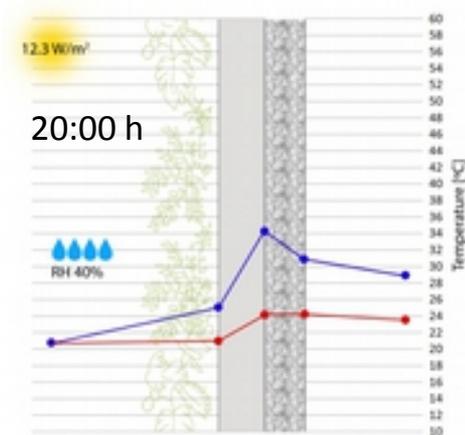
— BW — GW



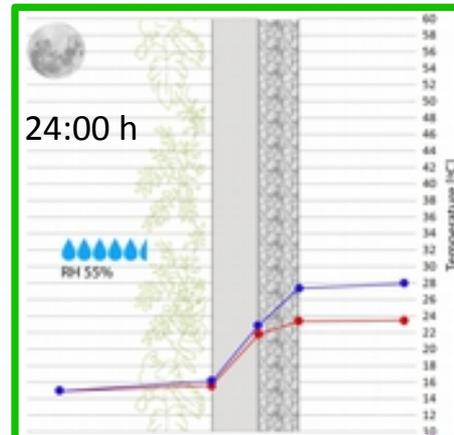
— BW — GW



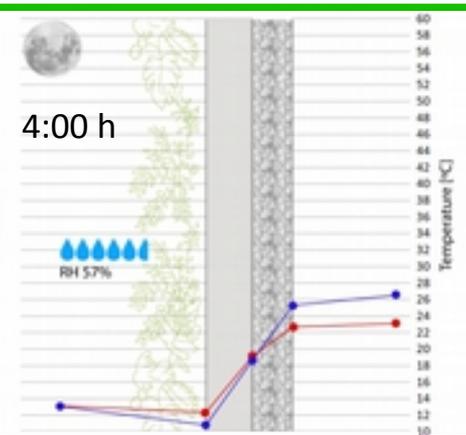
— BW — GW



— BW — GW



— BW — GW

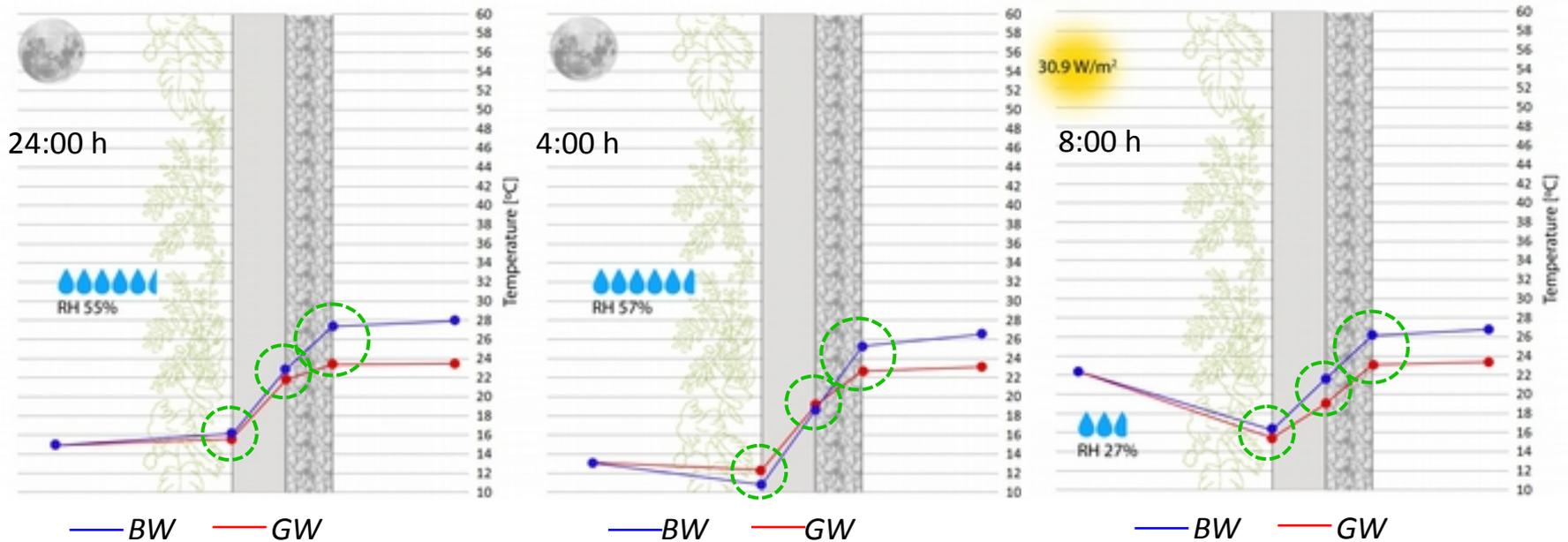


— BW — GW

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

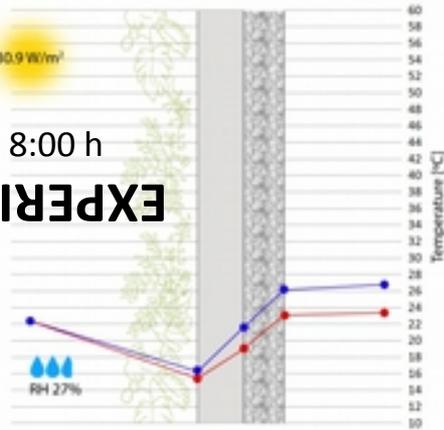


Enfriamiento evaporativo provocado unas horas antes

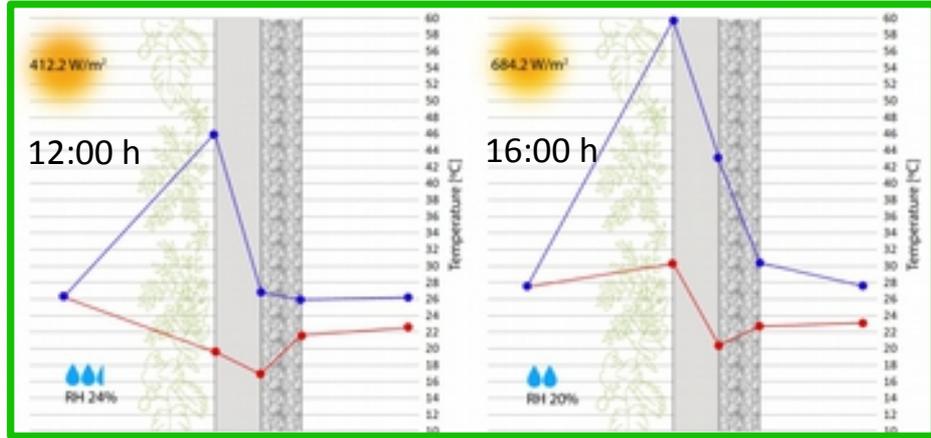
# MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

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

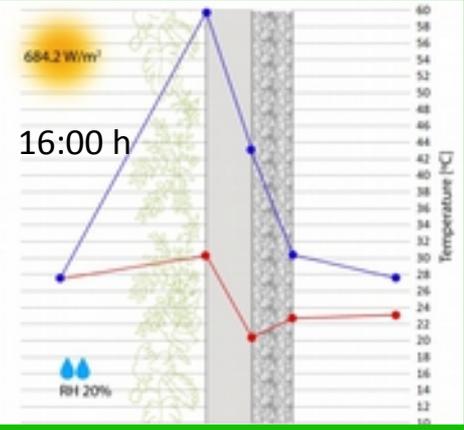
EXPERIMENTO



— BW — GW



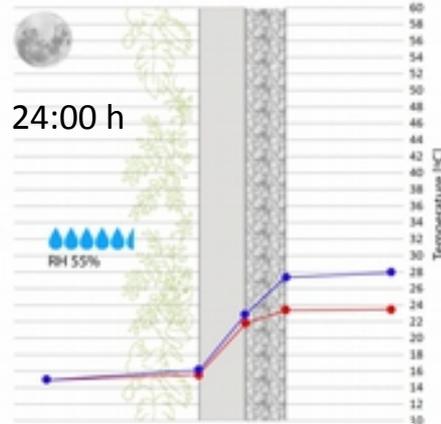
— BW — GW



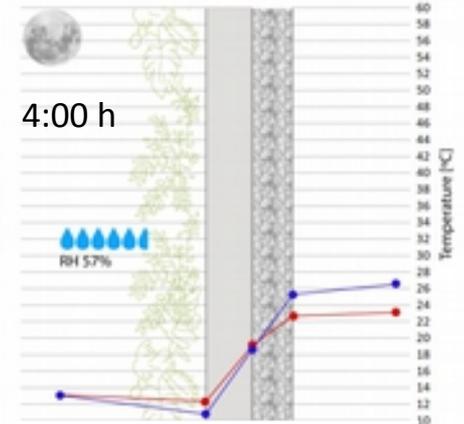
— BW — GW



— BW — GW



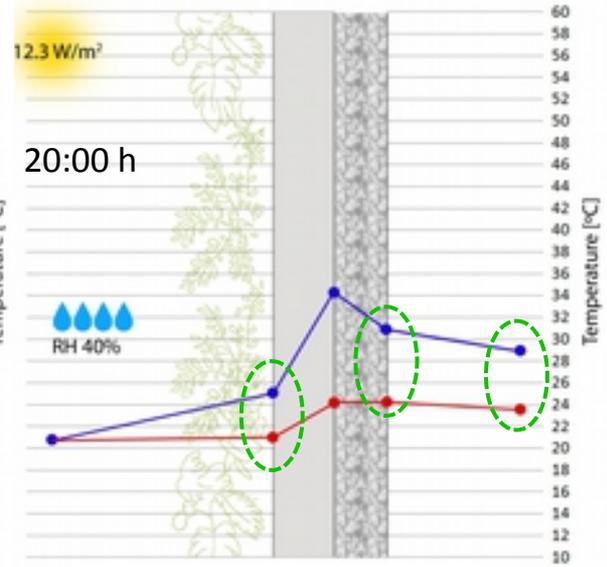
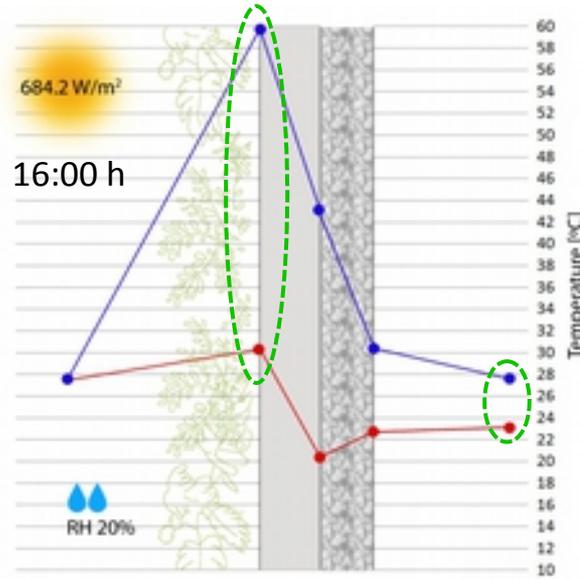
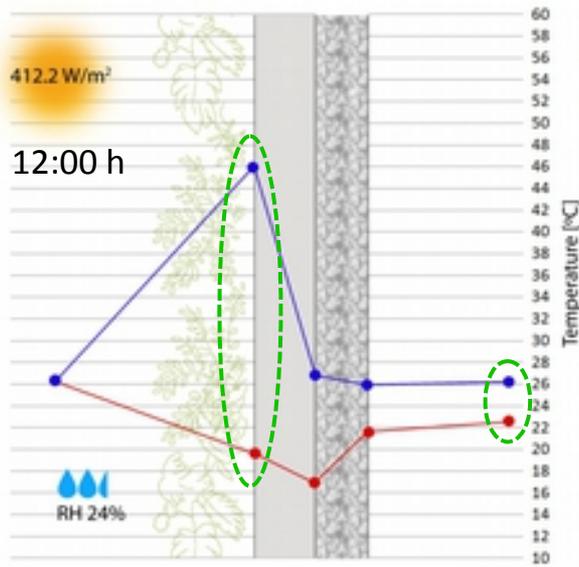
— BW — GW



— BW — GW

# MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

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



— BW — GW

— BW — GW

— BW — GW

**Día**

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



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

**Tarde**

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

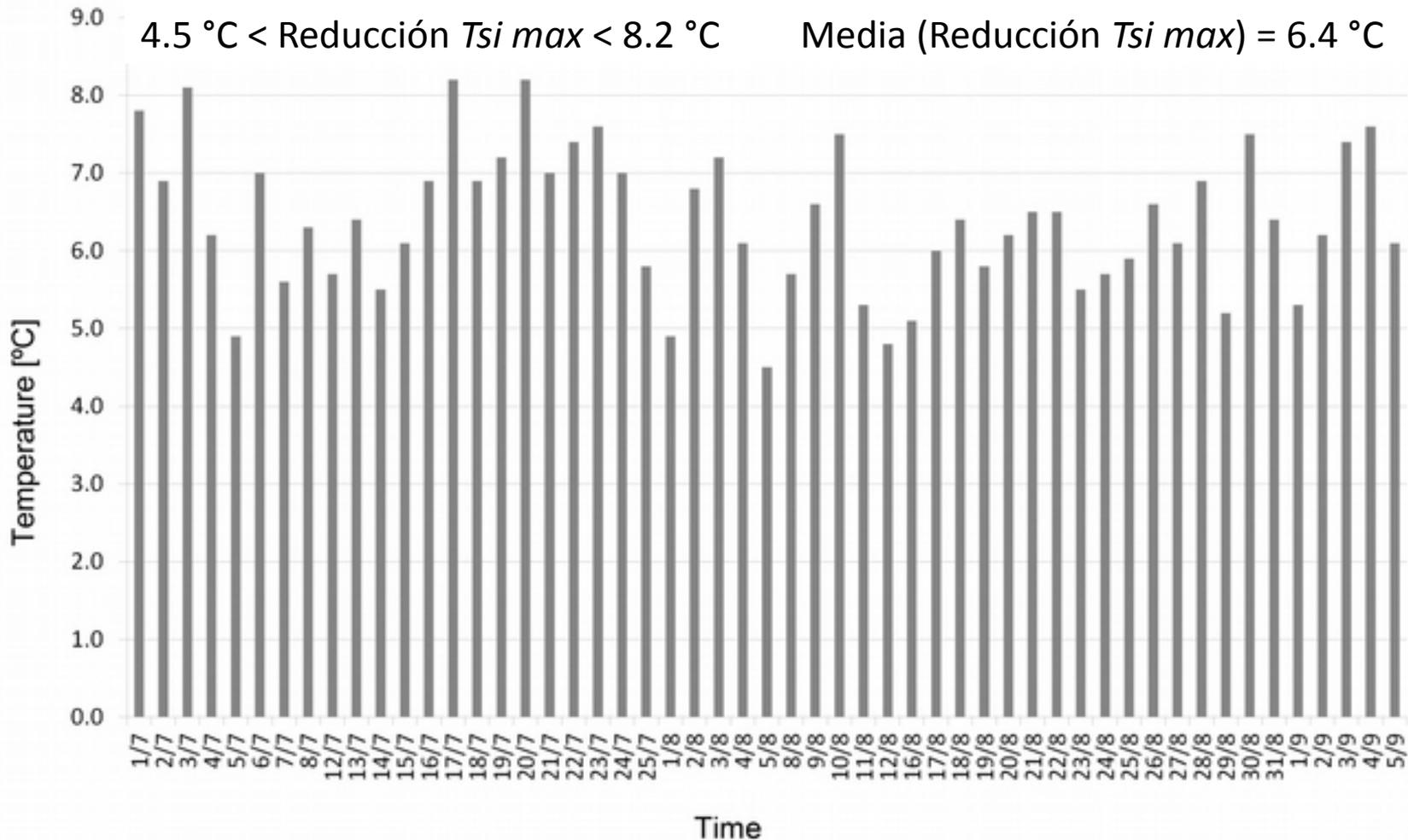


$[(T_i (BW) - T_i (GW))] \sim 5 \text{ } ^\circ\text{C}$

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

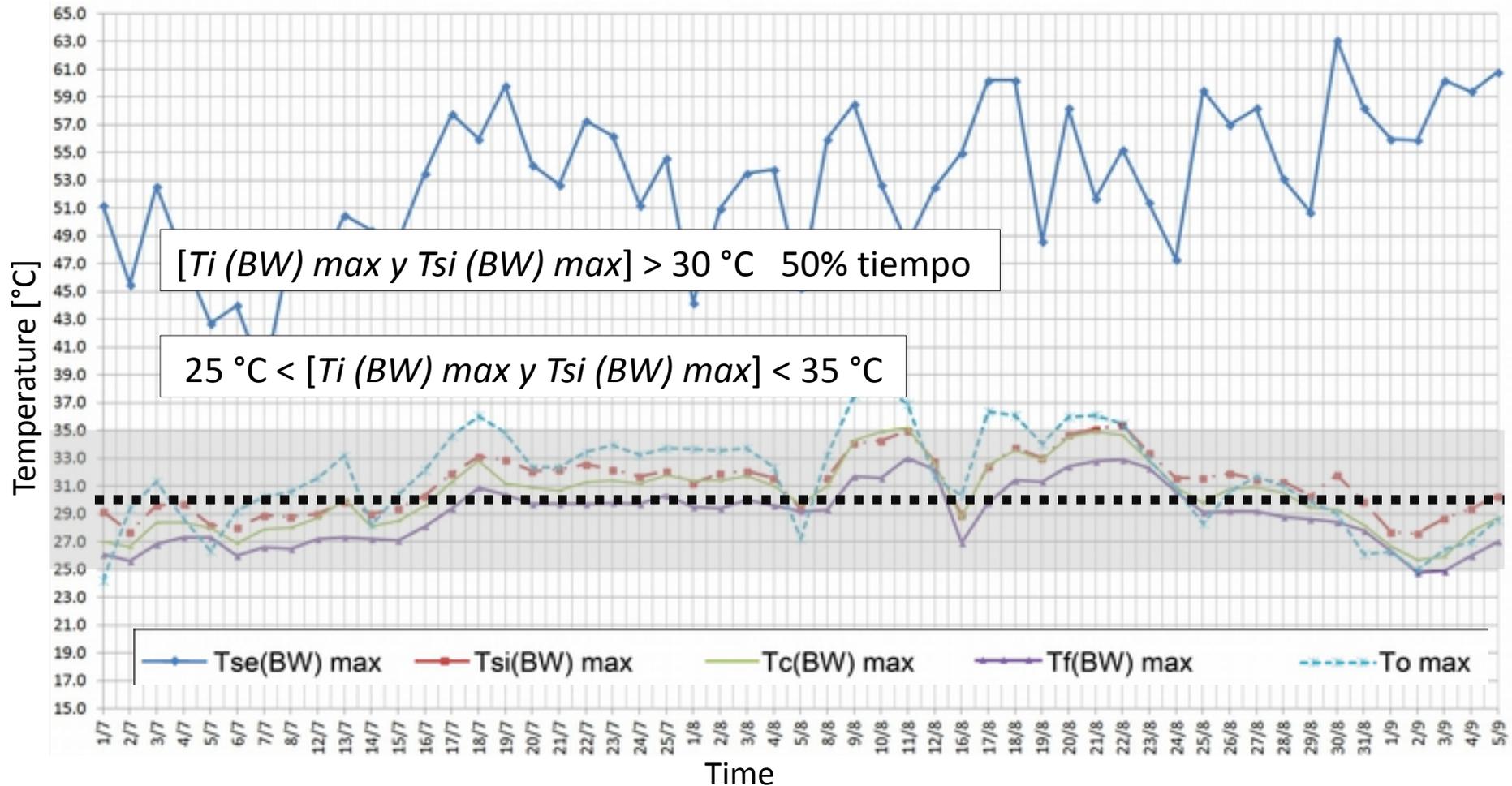
## MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

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



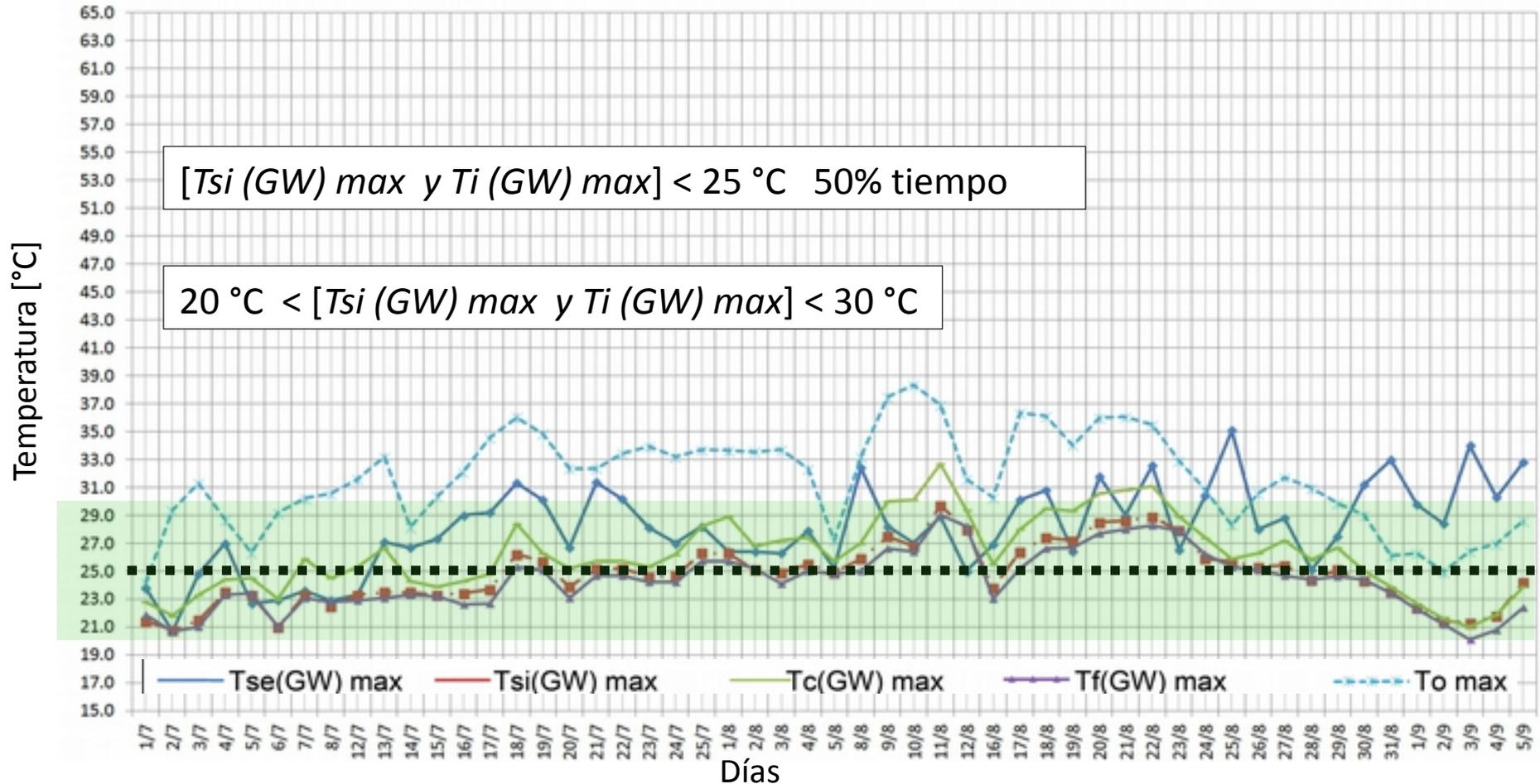
## MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

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

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

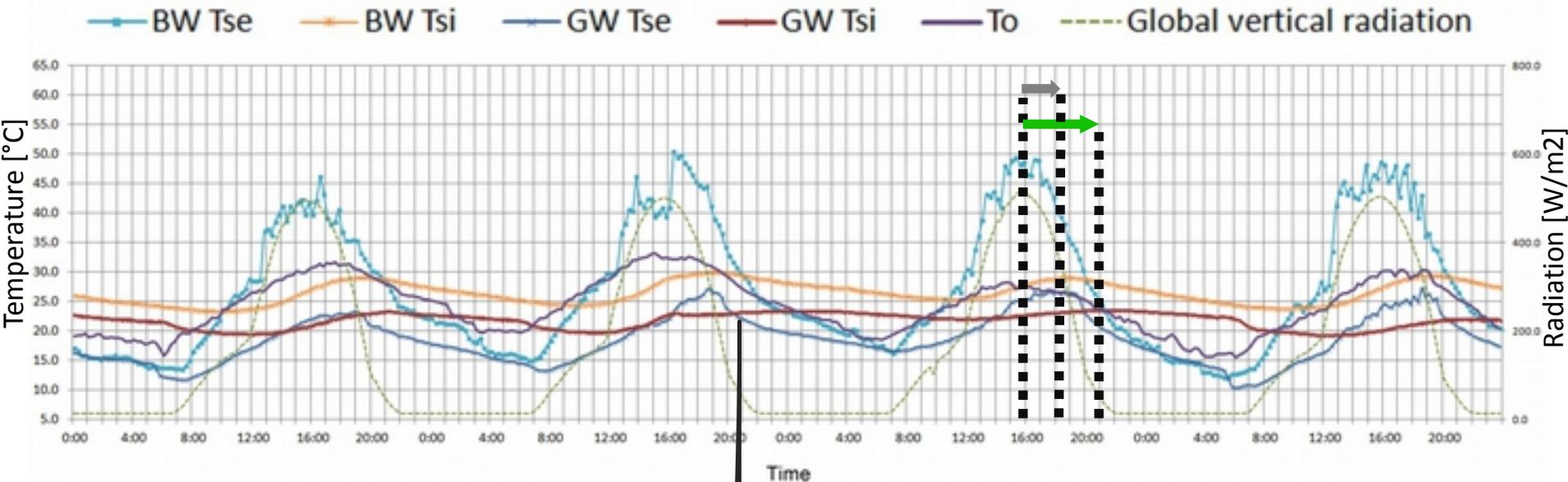
**Día**

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

# MONITORIZACIÓN DE UNA FACHADA VEGETAL (Colmenar Viejo, España)

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

497 W/m<sup>2</sup> < Irradiancia max días julio < 515 W/m<sup>2</sup>



Irradiancia max días julio → 15:45 h

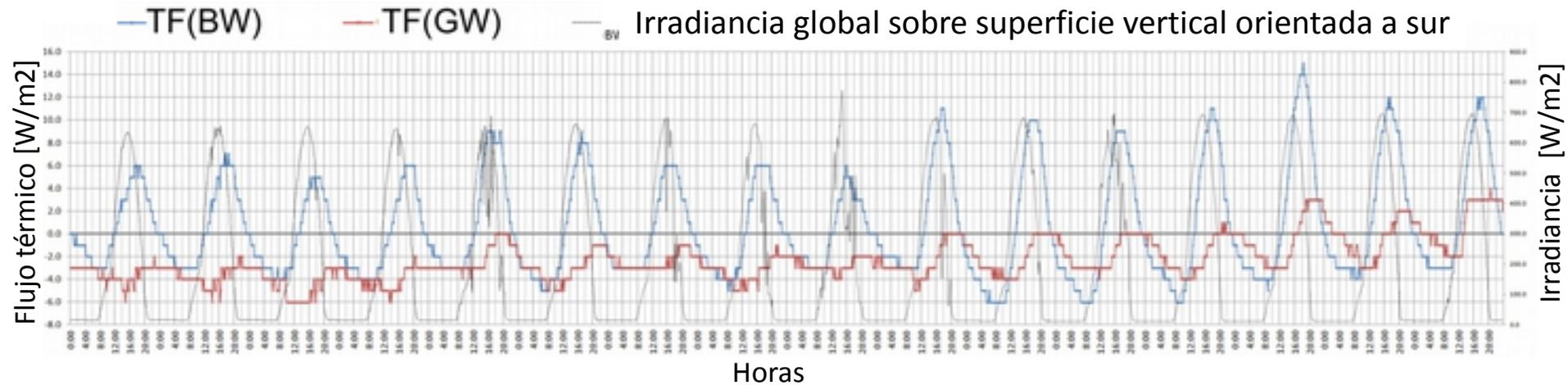
*BW, Tsi, max* → 18:30 h

*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)



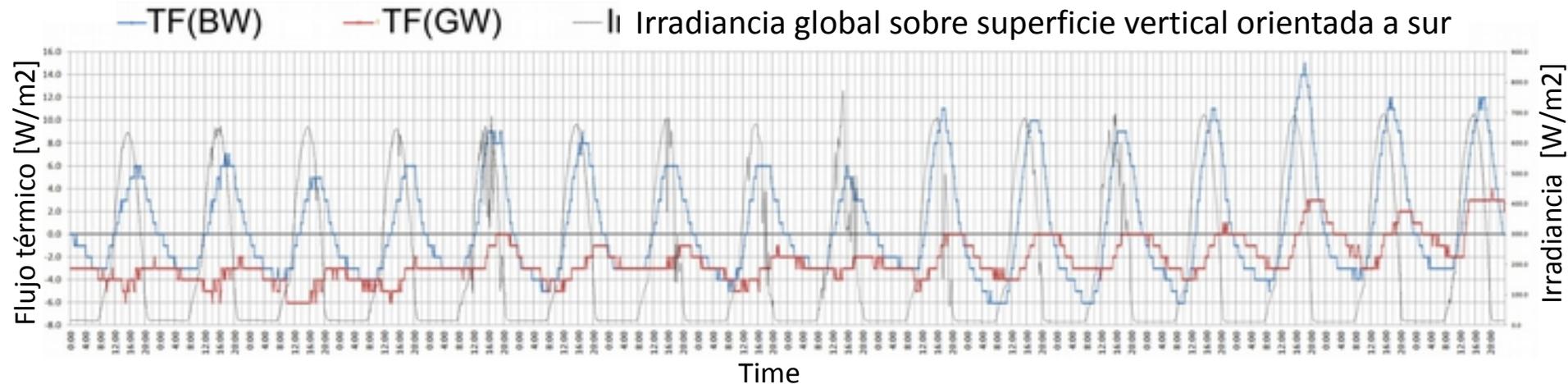
Flujo >0 ⇐ Flujo entrante en el módulo

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/m <sup>2</sup> )	E. Saliente (Wh/m <sup>2</sup> )	E. Entrante (Wh/m <sup>2</sup> )	E. Saliente (Wh/m <sup>2</sup> )
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](mailto:francesca.olivieri@upm.es)**