

Física de Edificios: Transmisión de calor y masa en cerramientos

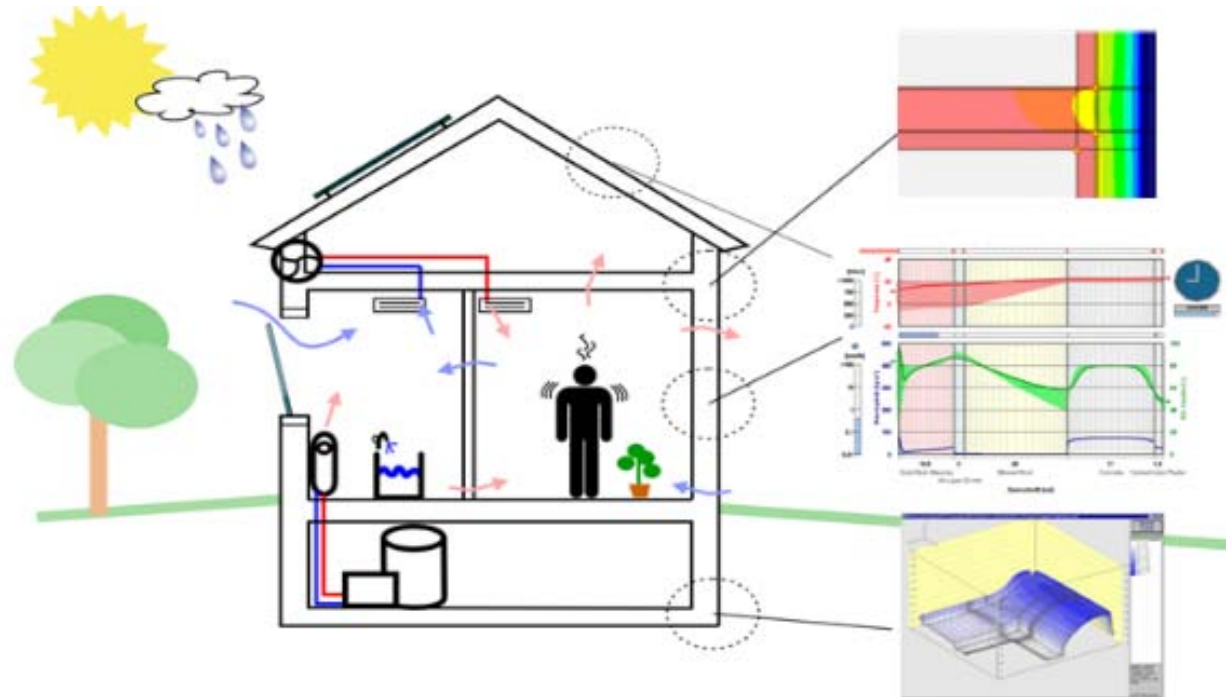


Figura: Fraunhofer Institute for Building Physics IBP
https://wufi.de/en/wp-content/uploads/sites/11/2014/04/800x321_WUFI-Plus-Schaubild.png

- Iñaki Gómez Arriaran
- Moises Odriozola Maritorea
- Koldobika Martín Escudero
- Estibaliz Pérez Iribarren
- Iker González Pino
- Naiara Romero Antón



Makina eta Motor
Termikoak Saila
Departamento de Máquinas
y Motores Térmicos

ikasTHERM
ACTIVE LEARNING IN THERMAL ENGINEERING



CAPACIDAD DE AMORTIGUACIÓN DE LA HUMEDAD INTERIOR EN EDIFICIOS



- LOS FACTORES
 - El balance higroscópico

- El nivel de humedad interior en un edificio depende de muchos factores:
 - el clima
 - la ventilación
 - la tasa de producción de humedad de los ocupantes
 - el comportamiento higroscópico de los materiales que conforman la envolvente y el mobiliario y les permiten intercambiar humedad con el aire interior.



Equilibrio higroscópico en edificios

- El nivel de humedad interior en un edificio depende de muchos factores:
 - el clima
 - la ventilación
 - la tasa de producción de humedad de los ocupantes
 - el comportamiento higroscópico de los materiales que conforman la envolvente y el mobiliario y les permiten intercambiar humedad con el aire interior.



Equilibrio higroscópico en edificios

- Los materiales porosos que forman los revestimientos interiores de los cerramientos, son capaces de moderar los niveles de humedad interior y por lo tanto de mejorar el confort y la calidad del aire en los edificios
- Al mismo tiempo, implican un bajo consumo de energía para moderar los niveles de humedad interior
- Por lo tanto, pueden considerarse un sistema pasivo porque funcionan sin aporte de energía externa.



Equilibrio higroscópico en edificios

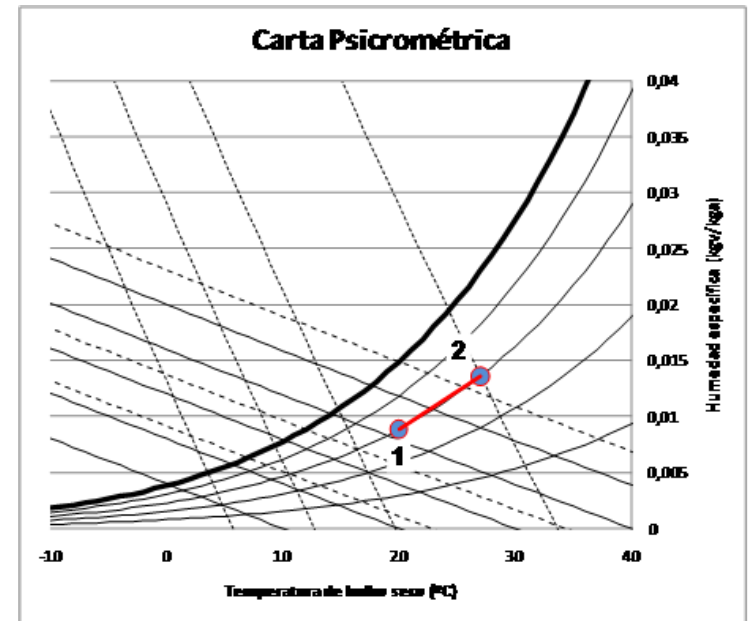
- Con el fin de ilustrar el impacto potencial de los materiales higroscópicos en el aire interior, el siguiente ejemplo es muy ilustrativo. Supongamos que en un recipiente sellado en donde el aire está inicialmente a 60% de humedad relativa y 20 °C, se coloca algodón previamente llevado al equilibrio con esas mismas condiciones de 60% de humedad relativa y 20 °C.





Equilibrio higroscópico en edificios

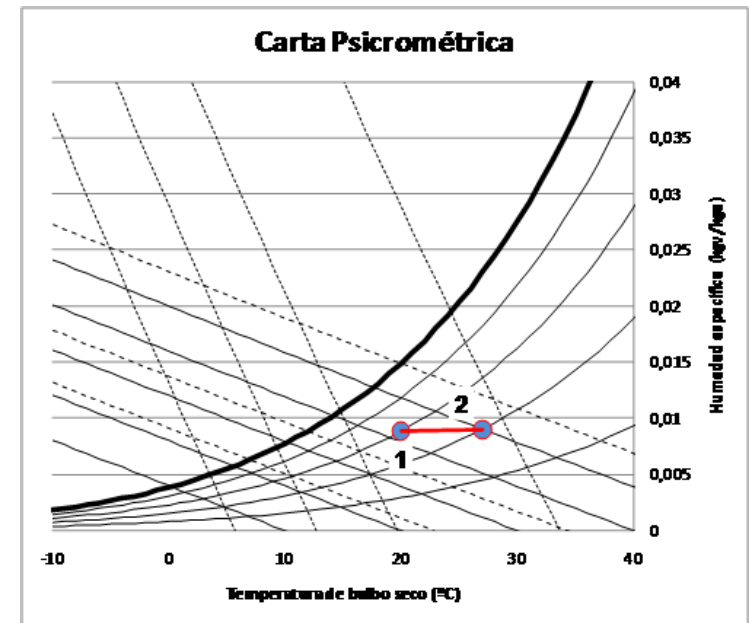
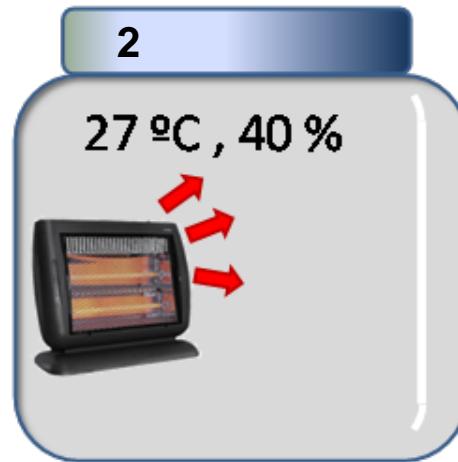
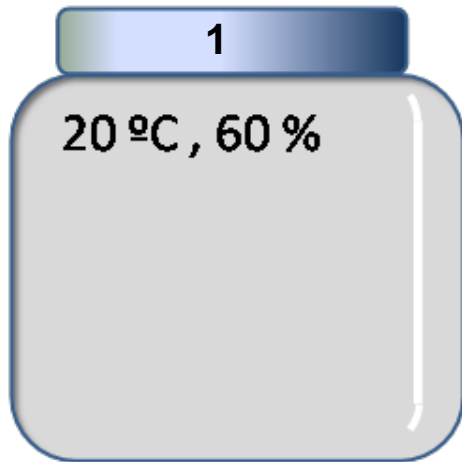
- Si la temperatura aumentase en el recipiente, el algodón sería capaz de mantener la humedad relativa del aire casi constante mientras que habría disminuido en la ausencia de cualquier material higroscópico. El algodón actúa como depósito tampón o “buffer” de humedad.





Equilibrio higroscópico en edificios

- Si no hubiera algodón en el recipiente (es decir, si no hubiese material higroscópico), el calentamiento sensible del aire del recipiente (de 20 °C a 27 °C) conllevaría una disminución de la humedad relativa, pasando del 60% al 40%.





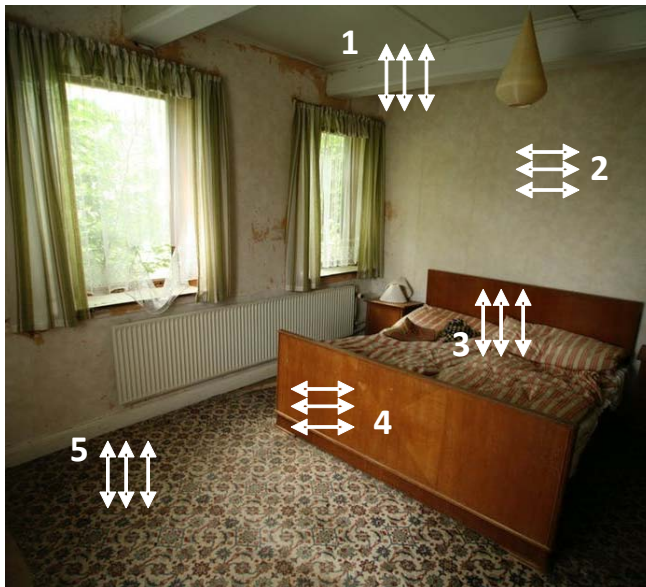
Equilibrio higroscópico en edificios

- Mientras que la temperatura del aire comienza a subir junto con su presión de saturación, la humedad relativa en el aire tiende hacia valores más bajos. Casi al instante, el algodón reacciona según su isoterma de desorción y libera vapor de agua.
- Debido a que el material higroscópico almacena un contenido volumétrico de agua mucho mayor que el aire, el agua perdida por el algodón apenas afecta a su contenido de humedad en equilibrio mientras que afecta en gran medida la presión de vapor del aire.
- En consecuencia, la caída de humedad relativa causada por la modificación de la temperatura del aire es compensada por el vapor de agua que sale del material. En definitiva, hay una capacidad reguladora del material que impide cualquier variación abrupta de la humedad relativa del recipiente, amortiguándola.



Equilibrio higroscópico en edificios

- En un edificio real, la capacidad de amortiguar las variaciones de humedad relativa del aire interior viene dada por los materiales de los muebles y elementos interiores o enseres como alfombras, colchas, edredones, almohadas, libros, etc. así como por las capas superficiales interiores de la envolvente del edificio



Elementos con capacidad de amortiguación de las oscilaciones de humedad relativa del aire interior:

1-2: Superficies interiores de la envolvente

3-4-5: Mobiliario y enseres.



Equilibrio higroscópico en edificios

- la capacidad de intercambio de humedad de un material poroso no sólo depende de su capacidad para almacenar agua, sino también de su capacidad para transportar dicho vapor de agua desde/hacia su interior, es decir, de la resistencia a la difusión del agua en la matriz porosa. En el fenómeno intervienen mecanismos de almacenamiento y de transporte de humedad.
- Si tanto su capacidad de almacenamiento de humedad como su permeabilidad al vapor son altas, la capacidad de amortiguación de las variaciones de humedad puede actuar de forma eficiente como un medio pasivo para la regulación de las condiciones del aire interior.



Equilibrio higroscópico en edificios

- Esta forma de regulación pasiva de la humedad puede ser especialmente apropiada para los museos, archivos documentales, galerías de arte, bibliotecas, y también para el patrimonio arquitectónico (por ejemplo, edificios históricos que permitan acceso de los visitantes), donde los elementos que se exhiben o almacenan son sensibles a la humedad y pueden estar sometidos a variaciones periódicas en las cargas de humedad.



- La necesidad de un sistema de control de humedad pasivo fiable es vital para la preservación de objetos de museo o medios sensibles como tela, lienzo y papel.



Equilibrio higroscópico en edificios

FACTORES QUE DETERMINAN LA HR interior

- El nivel de humedad interior depende de :

1. el clima exterior
2. la tasa de ventilación
3. la producción de humedad de los ocupantes
4. la **inercia higroscópica de los materiales** que conforman **la envolvente y el mobiliario**.

→ Balance higroscópico del recinto



Equilibrio higroscópico en edificios

Inercia higrotérmica

- **Inercia térmica:** efecto combinado de absorber, almacenar y emitir energía térmica desde/hacia los alrededores en respuesta a los cambios en las condiciones térmicas ambientales
- **Inercia higroscópica:** efecto combinado de absorber, almacenar y emitir humedad desde/hacia los alrededores en respuesta a los cambios en las condiciones higrotérmicas ambientales



Balance higroscópico

El mantenimiento de unas condiciones higrotérmicas adecuadas depende de que se alcance un equilibrio entre los flujos de humedad entrantes y salientes. Dicho equilibrio, en un régimen dinámico, vendrá determinado por la inercia higroscópica de los espacios interiores.

fuentes de humedad higroscópica

2-Tasa de ventilación

3- Producción de vapor interior

Inercia
higroscópica

Amortiguación de
las variaciones
de HR



sumideros de humedad
higroscópica

2- Tasa de ventilación



Inercia higrotérmica

- Al igual que en edificios diseñados adecuadamente, con un favorable factor de utilización, la masa térmica puede reducir la demanda global de energía, y mejorar el confort térmico.
- Del mismo modo, el uso de materiales con **alto MBV permite regular los picos de humedad relativa interior** al ser absorbidas las cargas de humedad por la envolvente del edificio, **para ser restituidas como ganancias latentes favorables durante los períodos de baja humedad.**



Balance higroscópico

Aplicando la condición de equilibrio higroscópico, se obtiene el balance higroscópico del espacio interior, en el que se recoge la contribución de todos estos factores a la evolución del contenido de humedad en el espacio interior:

$$\frac{V}{R_v T_i} \cdot \frac{\partial P_{vi}}{\partial t} = \frac{nV}{3600 R_v T_i} \cdot (P_{ve} - P_{vi}) + \dot{G}_v - \sum_{j=1}^k A_{sj} \cdot g_{mbj}$$

Renovaciones de aire

Producción de vapor

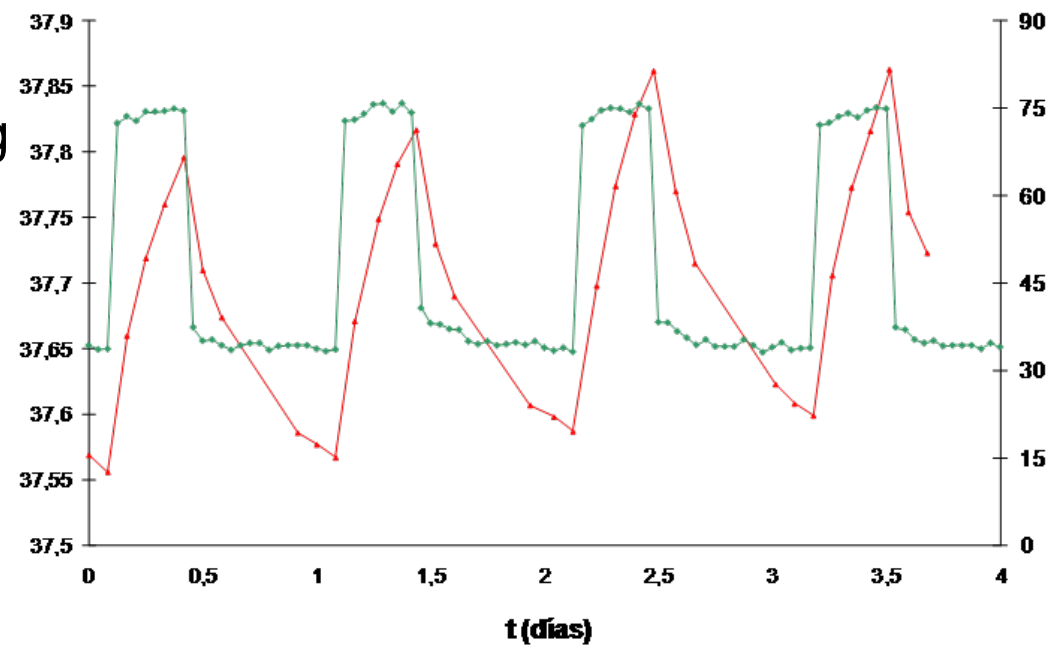
Termino transitorio (régimen dinámico)

Capacidad de amortiguamiento de humedad



Capacidad de amortiguamiento de humedad (Moisture Buffer Value)

- LA SOLUCION PASIVA
 - El Moisture Buffering

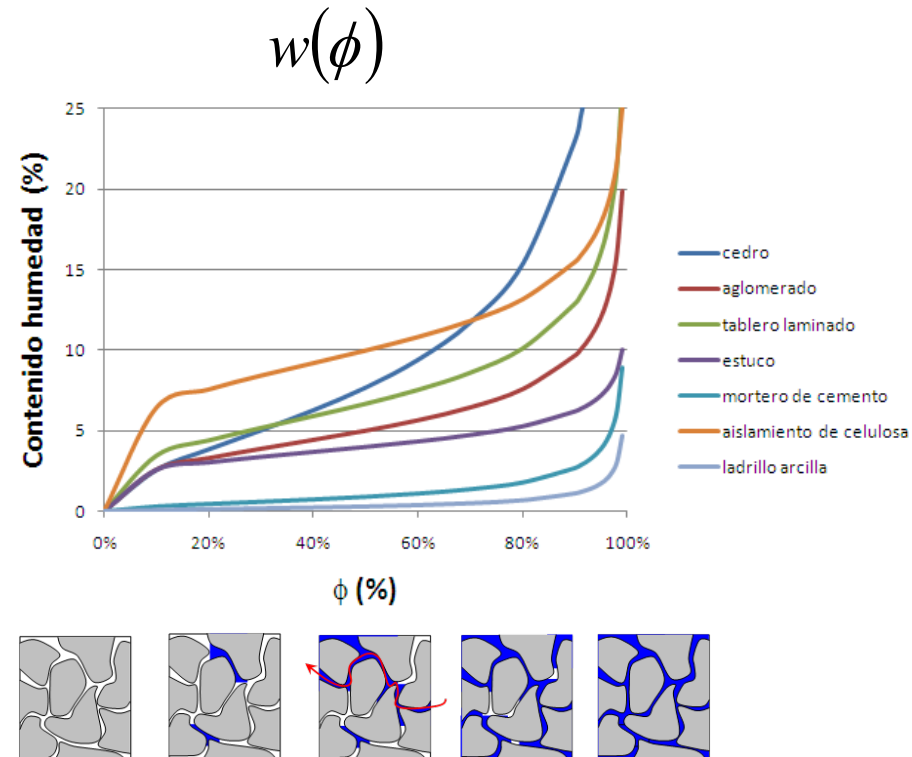




Capacidad de amortiguamiento de humedad (Moisture Buffer Value)

La **capacidad de almacenamiento** de humedad:

- se refleja mediante **la isoterma de sorción** y la curva de retención de agua
- depende de la **estructura porosa** (tamaño y distribución de poros).

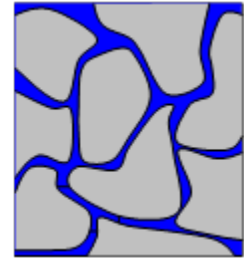
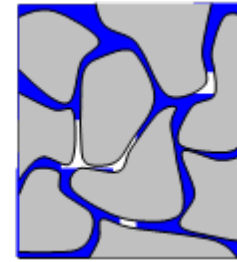
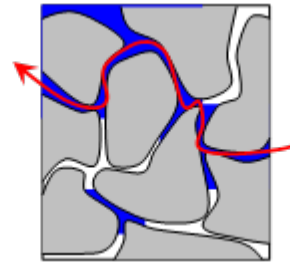
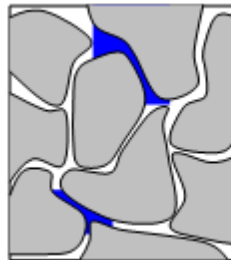
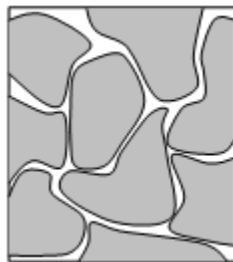
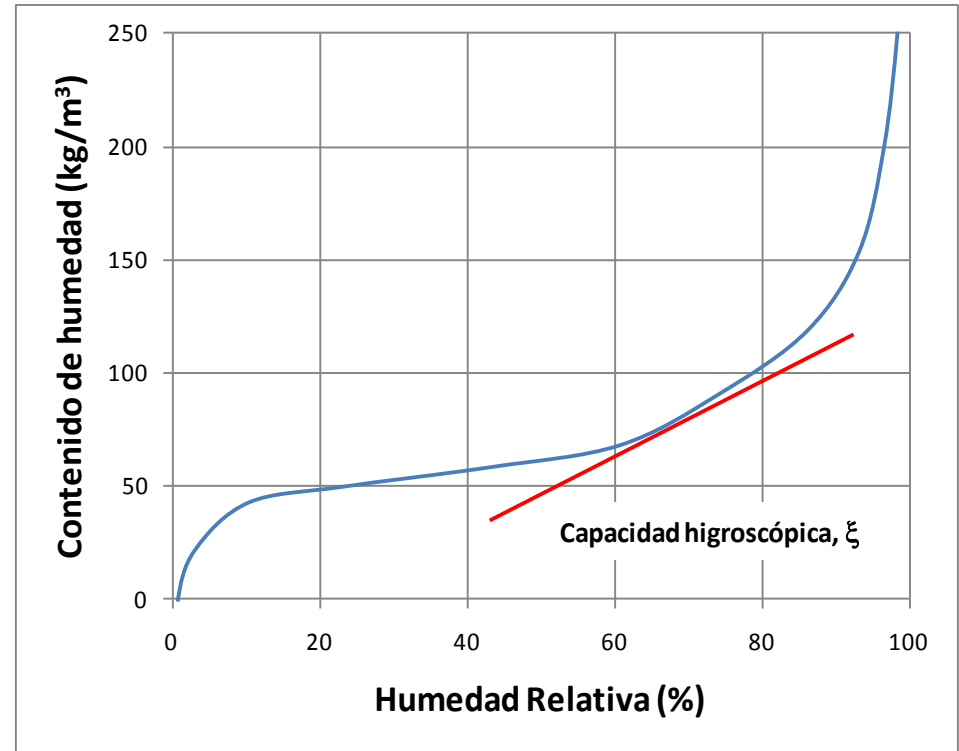




- La capacidad de humedad:

$$\xi = \frac{\partial w(\phi)}{\partial \phi}$$

representa la cantidad de humedad que adsorbe/desorbe el material tras un cambio de humedad relativa del ambiente





Capacidad de amortiguamiento de humedad (Moisture Buffer Value)

- **Interacción Almacenamiento + Transporte en régimen dinámico**

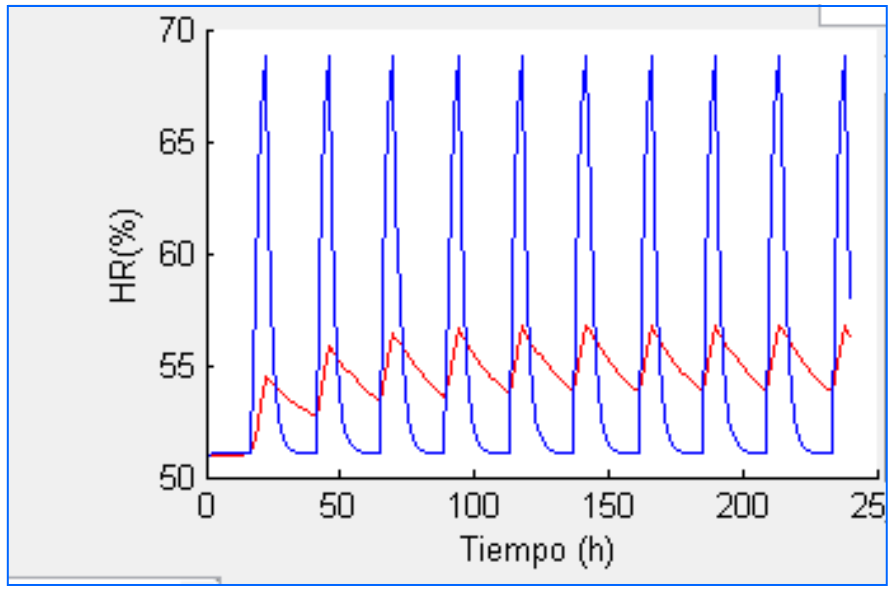
La profundidad de penetración de humedad, d_p [m]

Representa el espesor de la **capa de material activa** que interactuará ante las variaciones del contenido de humedad del aire interior



Todas estas propiedades confieren una **inercia higroscópica** al material en contacto con el ambiente interior, que **permite amortiguar las oscilaciones** de HR.

El **MBV** es la propiedad que determina el potencial de un material para **amortiguar las variaciones bruscas de humedad relativa del ambiente** al que está expuesto.





- **Cálculo del MBV teórico:** a partir de propiedades higroscópicas

MATERIAL: Arcilla 04

Basic properties

Sorption isotherm

Adjustment model: Roels & Janssen

Fitting parameters:

wsat = 367 m = -54845 n = 1.53

$$w = w_{lim} \frac{(b-1) \cdot \varphi}{(b-\varphi)}$$

RH (%) =

Moisture content [kg/m³] =

Water vapour permeability - μ factor

Fitting parameters:

a = 4.88E-03 b = 2.94E-04 c = 5.08

$$\mu = \frac{1}{a + b \cdot e^{c \cdot \varphi}}$$

RH (%) =

Water vapour permeability [kg/(s·m·Pa)] =

μ (-) =

Moisture Buffer Value

Theoretical

Ideal MBV (8/16h)

Ideal MBV = HR (-) [g/(m²·RH%)]

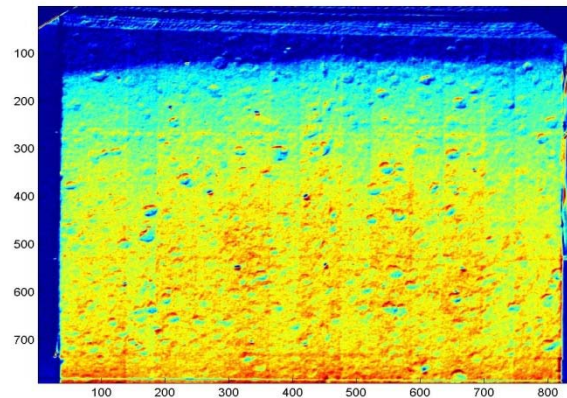
Sorption isotherm

Water vapor diffusion resistance factor

Reference: Gómez-Arriaran, I. 2006. Caracterización higroscópica de materiales de construcción: Arcilla aligerada y picón (Doctoral dissertation, ETS de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones de Bilbao)

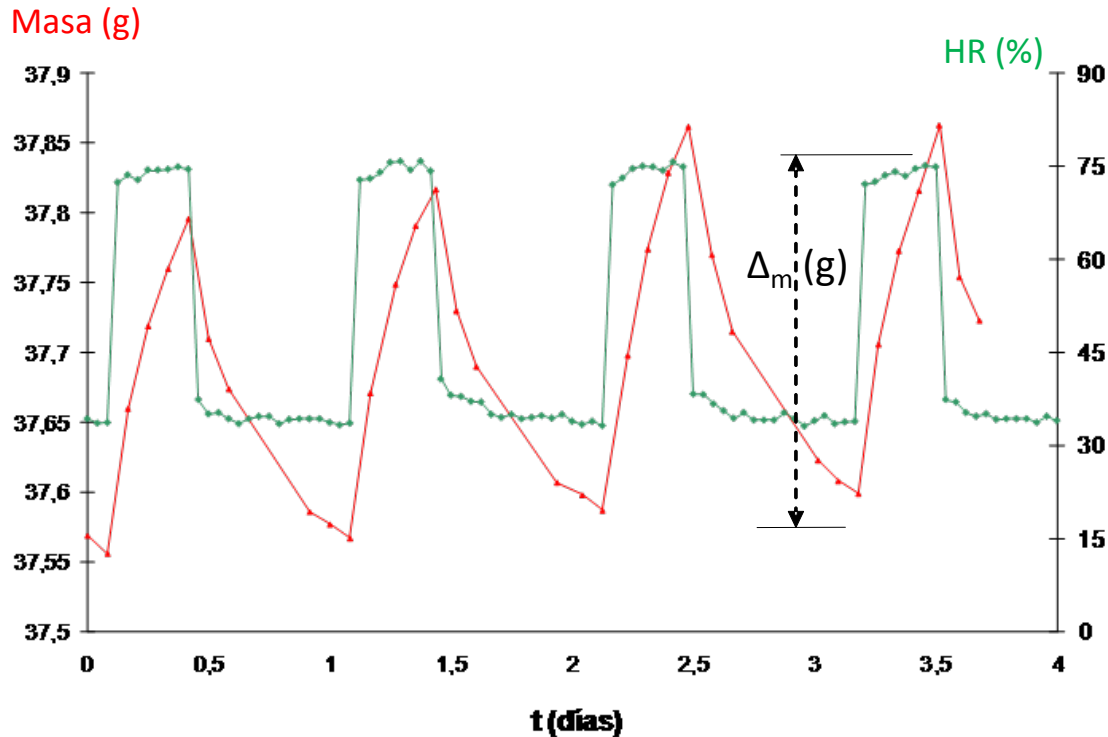


- **Cálculo del MBV teórico:** a partir de propiedades higroscópicas
 - Requiere caracterización higroscópica:





- **Medición del MBV real: a partir de ensayos dinámicos**





Clasificación de materiales según su potencial de amortiguamiento de humedad.

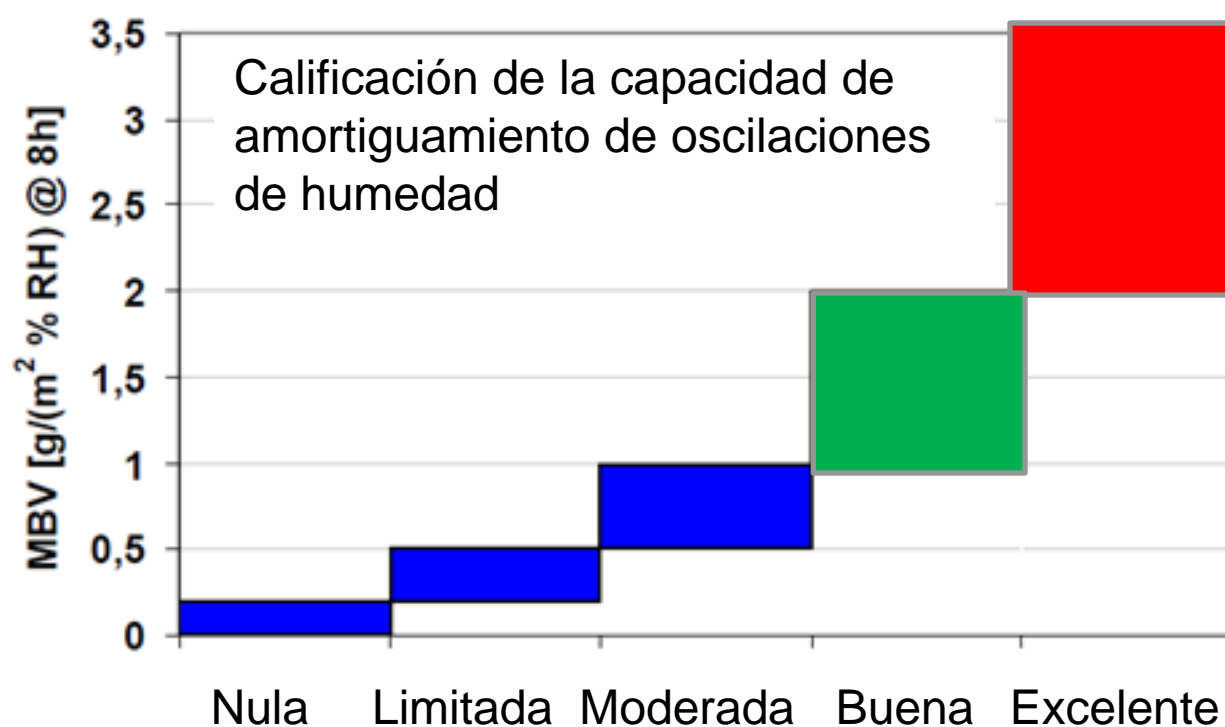




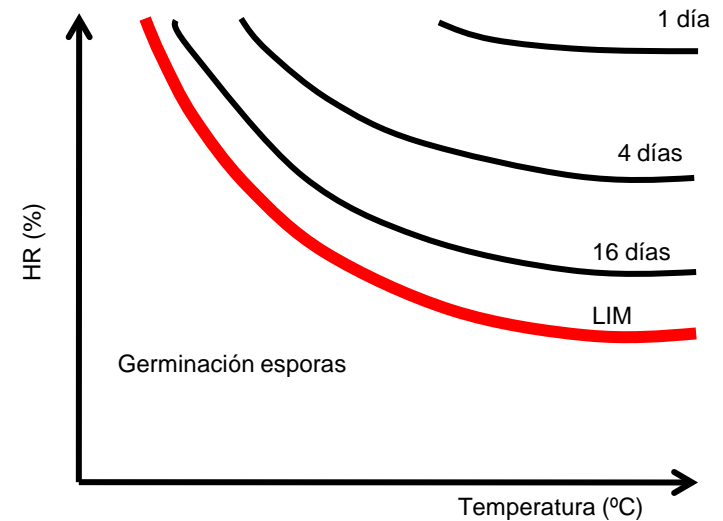
Tabla 1: Valores de MBV de diversos materiales

MATERIAL	ΔHR (%)	Ciclos	MBV [g/(m ² ·%RH)]
Poliacrilato de sodio	33-75	8-16h	8,97
Celulosa	33-75	8-16h	3,07
Enlucido de yeso (sin pintar)	65-75	12-12h	2,7
Enlucido de cemento (sin pintar)	65-75	12-12h	1,61
Cerámica puzolánica autoclavada	33-75	8-16h	1,34
Enlucido de yeso	65-75	12-12h	1,30
Placa de yeso laminado	65-85	12-12h	1,25
Tablero de abeto	33-75	8-16h	1,16
Enlucido de yeso	65-85	12-12h	1,13
Yeso	33-75	8-16h	1,06
Hormigón celular	33-75	8-16h	1,04
Madera de abedul	33-75	8-16h	0,85
Enlucido de cemento (pintura común 1)	65-85	12-12h	0,815
Enlucido de cemento (pintura común 2)	65-85	12-12h	0,765
Hormigón de áridos ligeros estucado	33-75	8-16h	0,75
Madera contrachapada	33-75	8-16h	0,73
Ladrillo	33-75	8-16h	0,48
Madera laminada barnizada	33-75	8-16h	0,46
Hormigón	33-75	8-16h	0,38
Perlita	33-75	8-16h	0,08



LAS ISOPLETAS

- Caracterización del riesgo

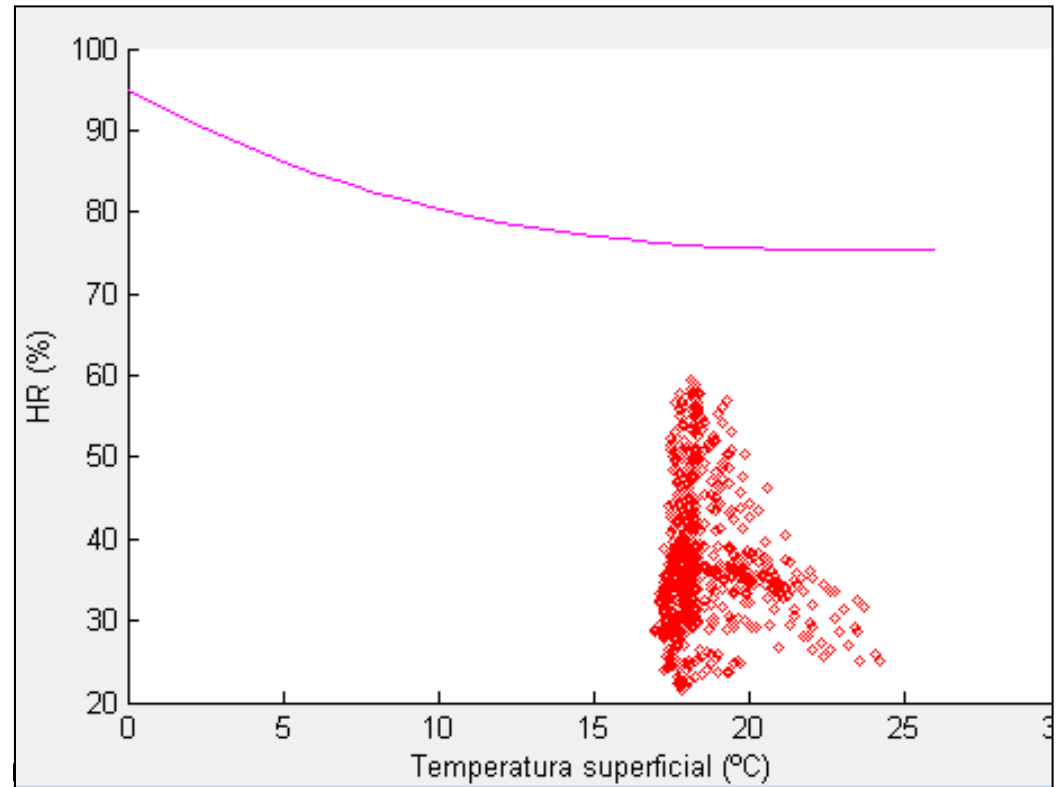


ISOPLETAS: representación de las condiciones de humedad y temperatura para la germinación de esporas y el crecimiento del micelio

LIM: representa el **límite más bajo de la combinación de todas las isopletas de todas las especies de hongos**. Por debajo de estas condiciones no germina/florece ninguna especie de hongo

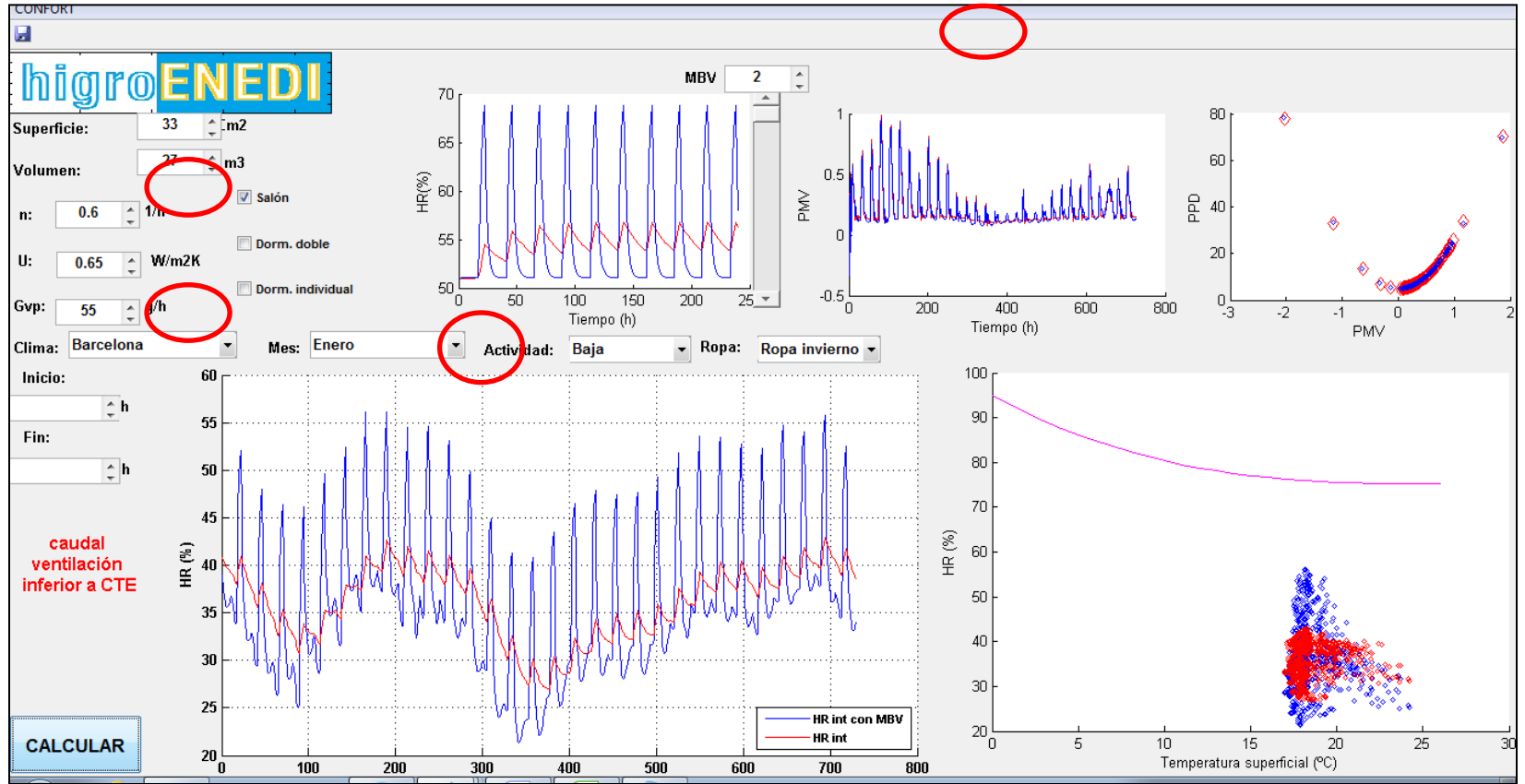


- LA PREDICCIÓN
 - Simulaciones en régimen dinámico



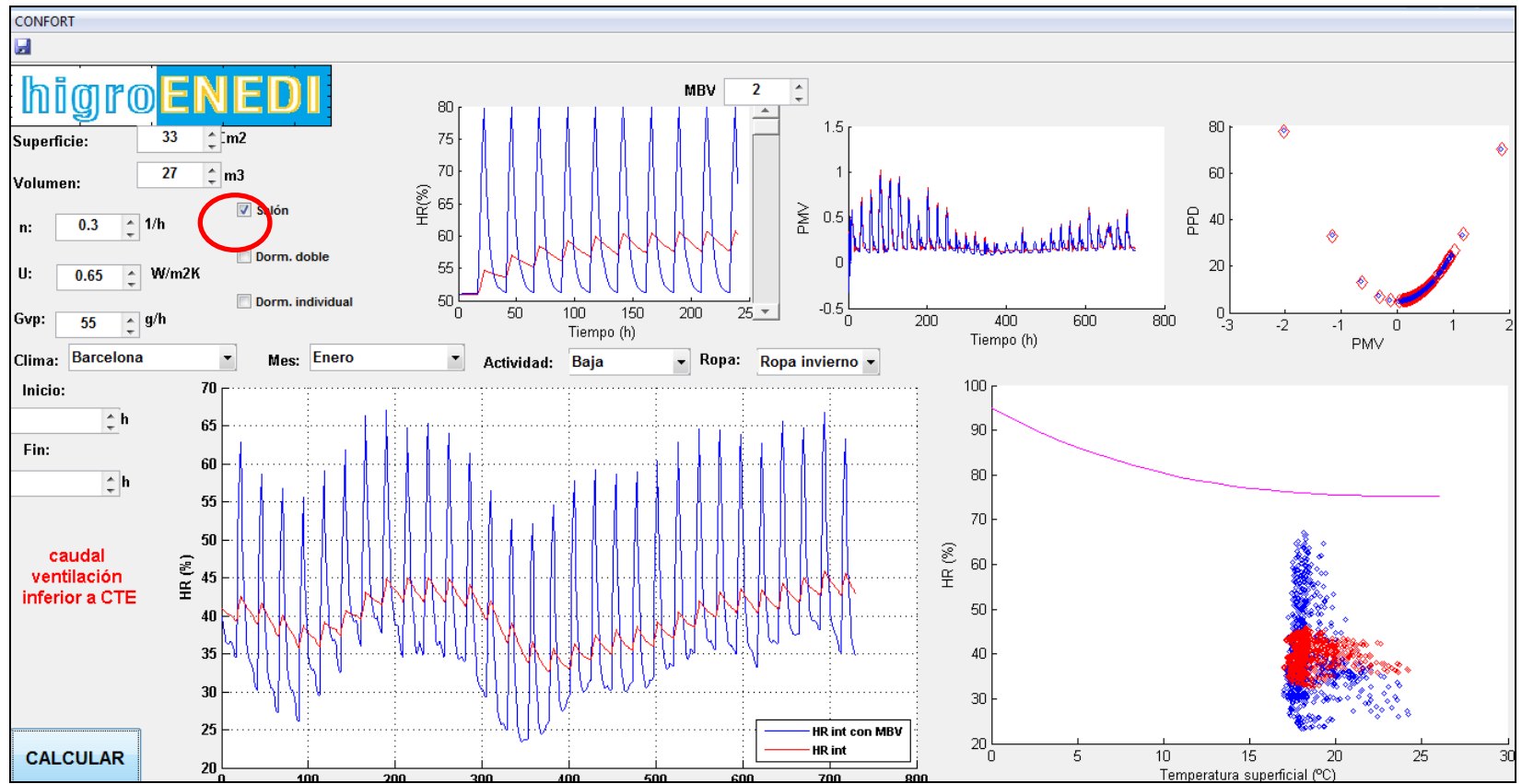


Barcelona, Enero, 0.6 h^{-1} , 55 g/h , $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



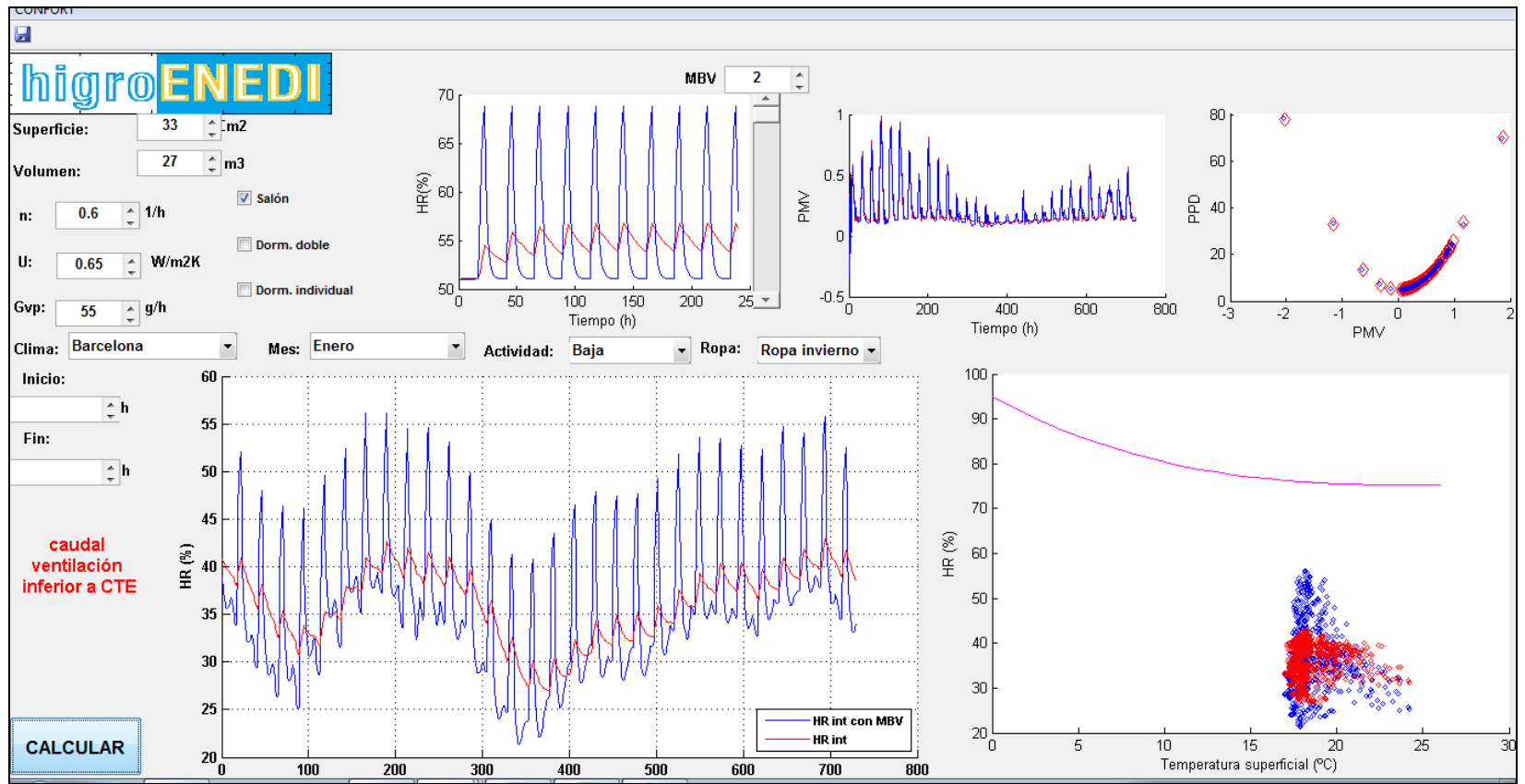


Barcelona, Enero, 0.3 h^{-1} , 55 g/h , $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



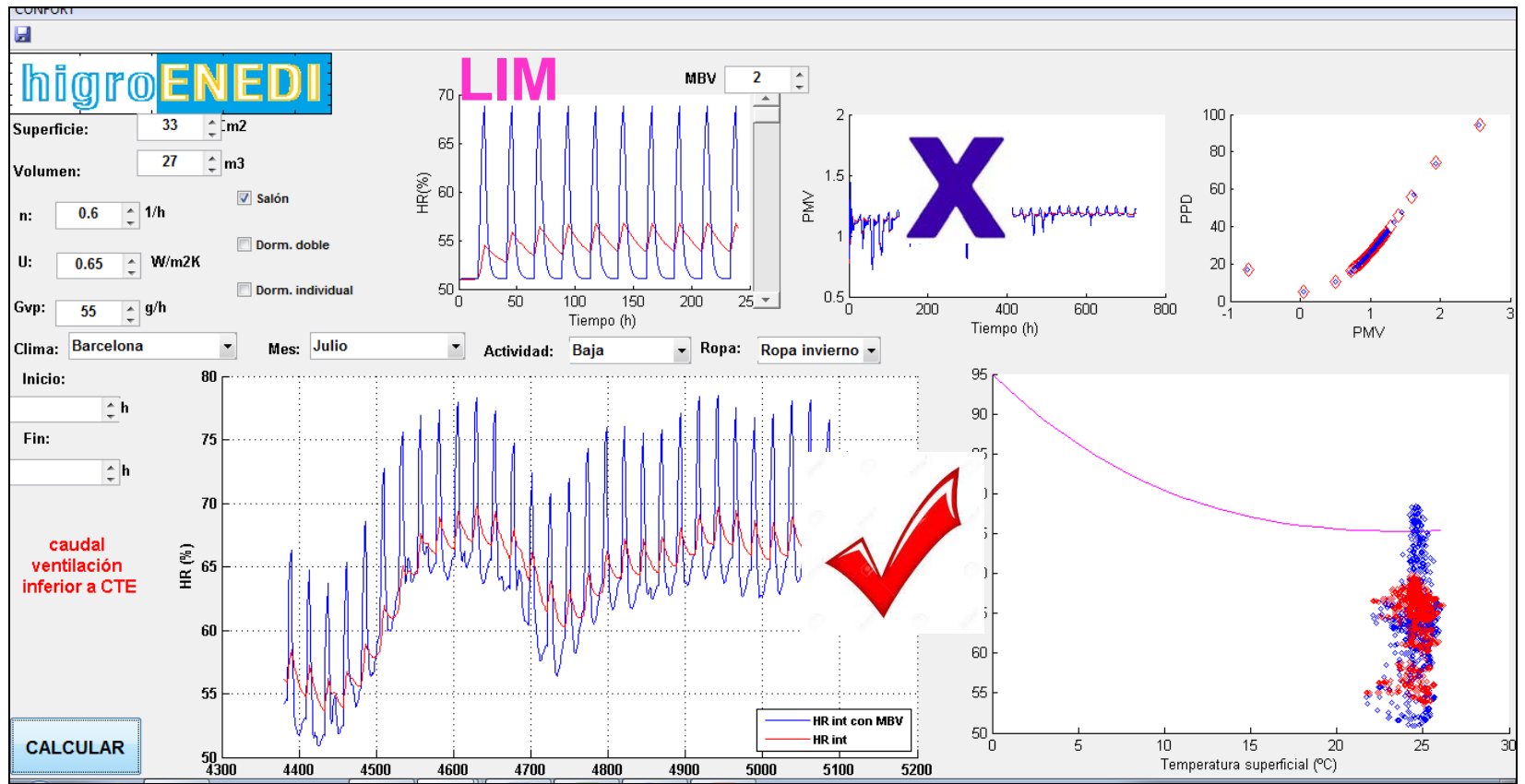


Barcelona, Enero, **0.6 h⁻¹**, 55 g/h, MBV=2 g/m²%



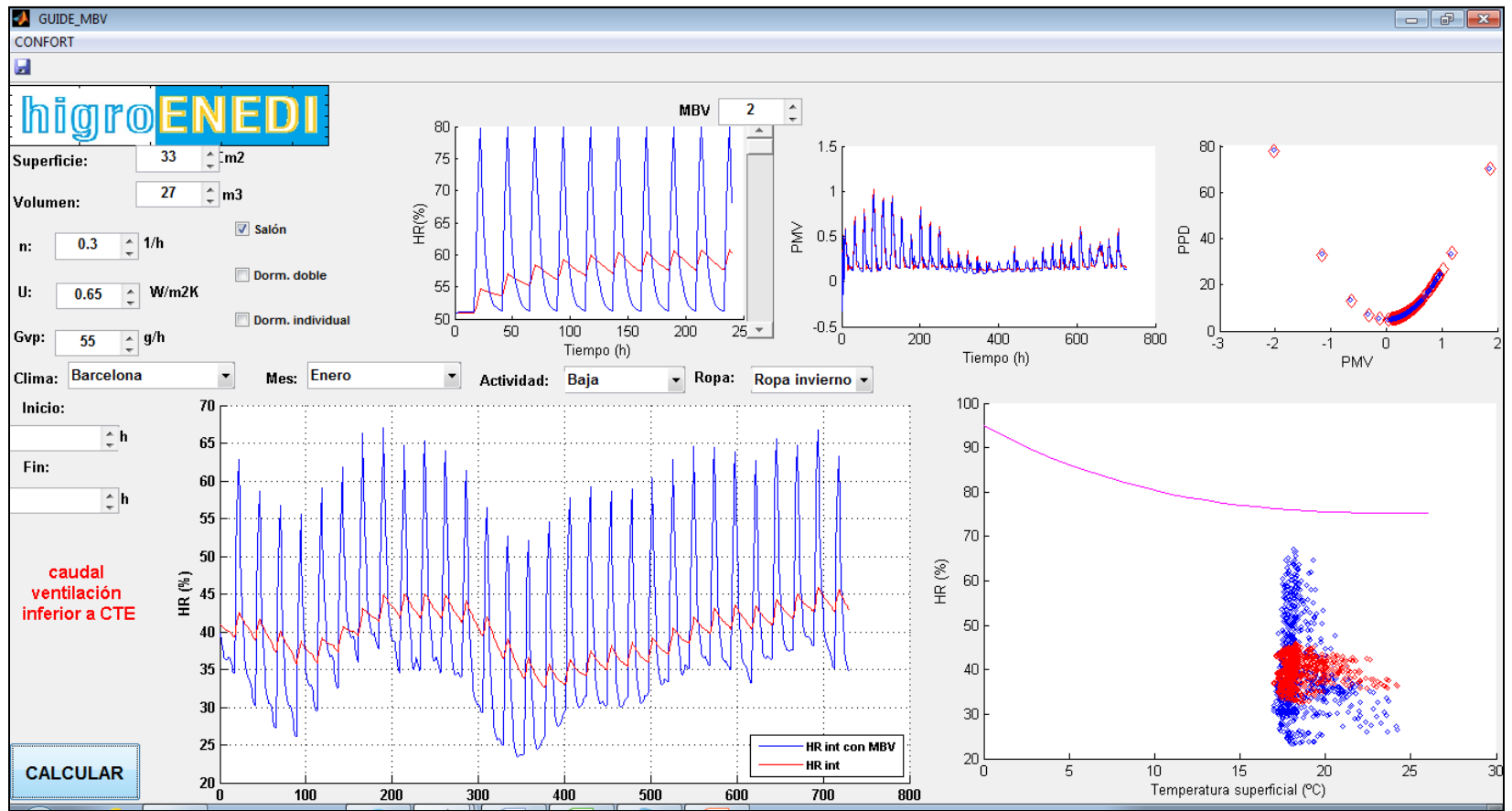


Barcelona, Julio, 0.6 h^{-1} , 55 g/h , $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



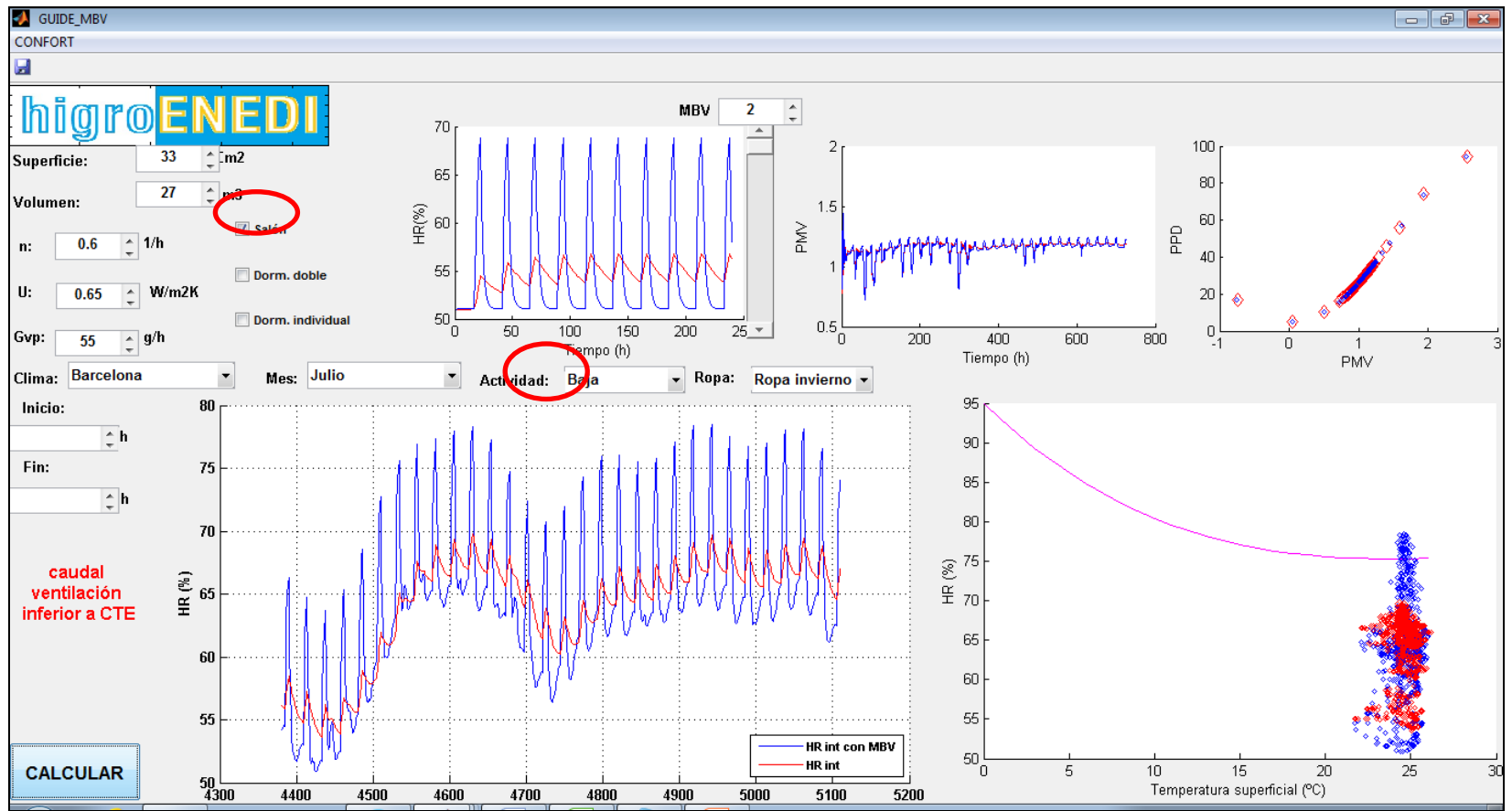


Barcelona, Enero, 0.3 h^{-1} , 55 g/h , $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



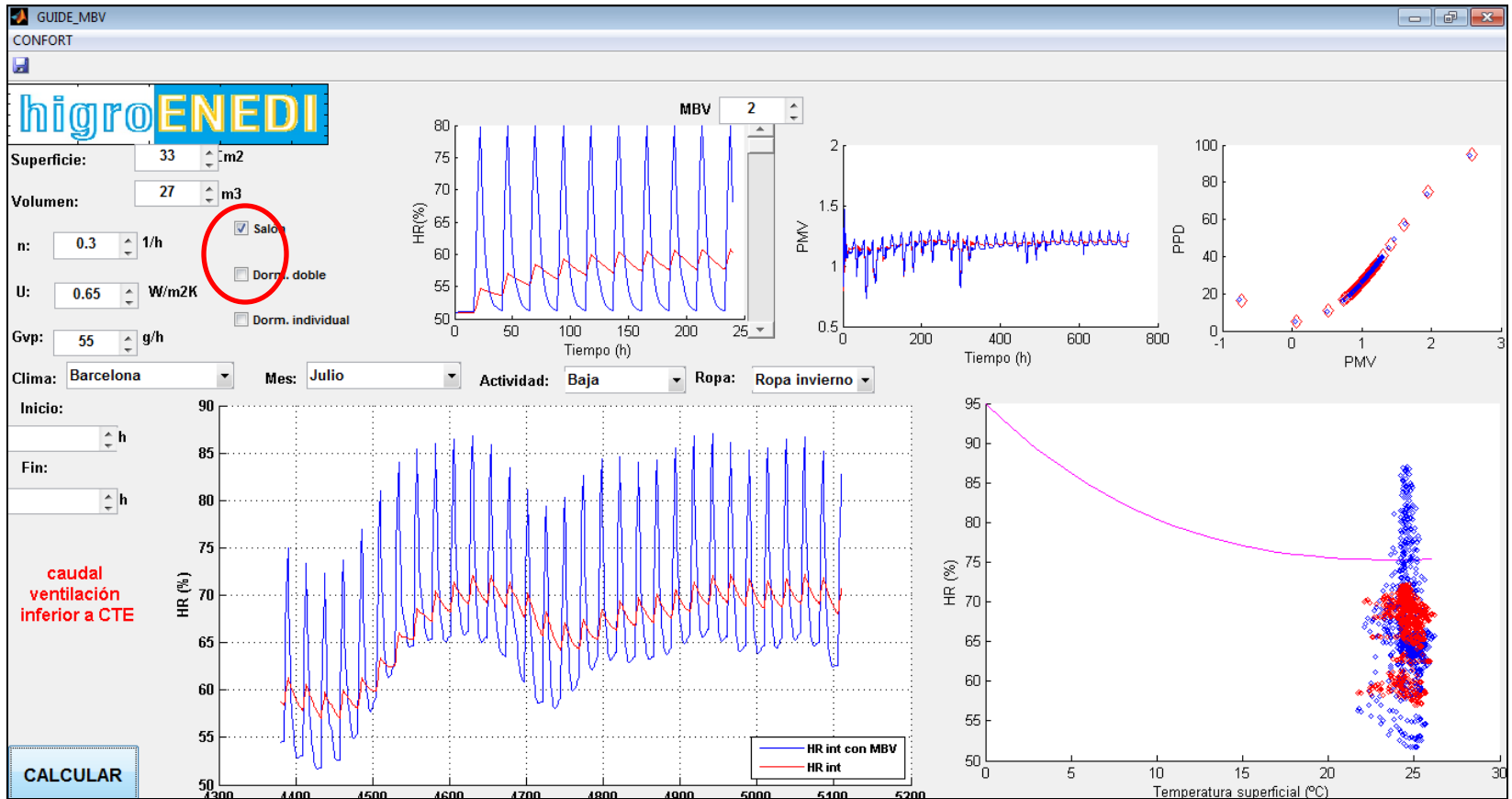


Barcelona, Julio, 0.6 h^{-1} , 55 g/h , $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



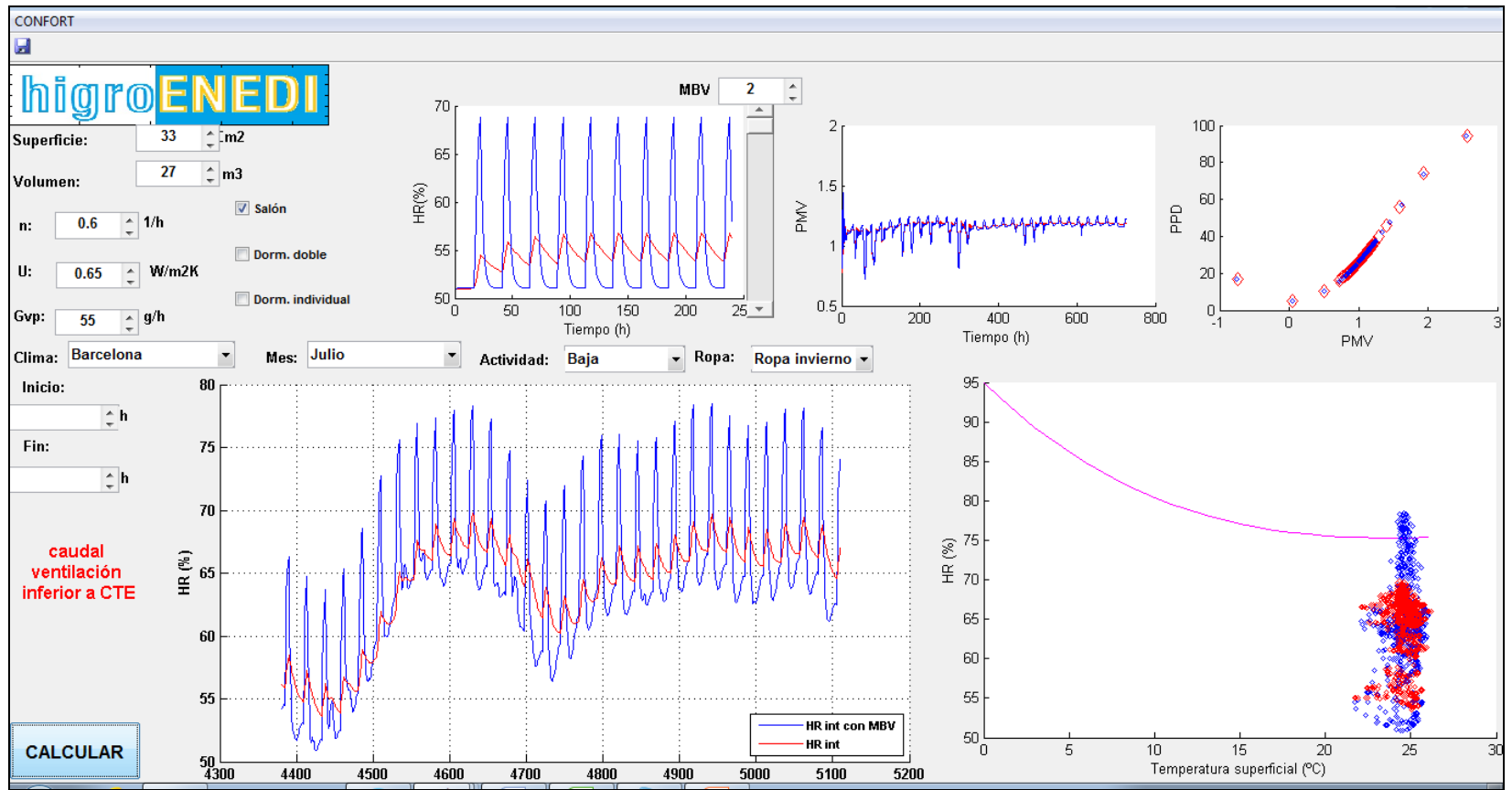


Barcelona, Julio, 0.3 h^{-1} , 55 g/h , $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



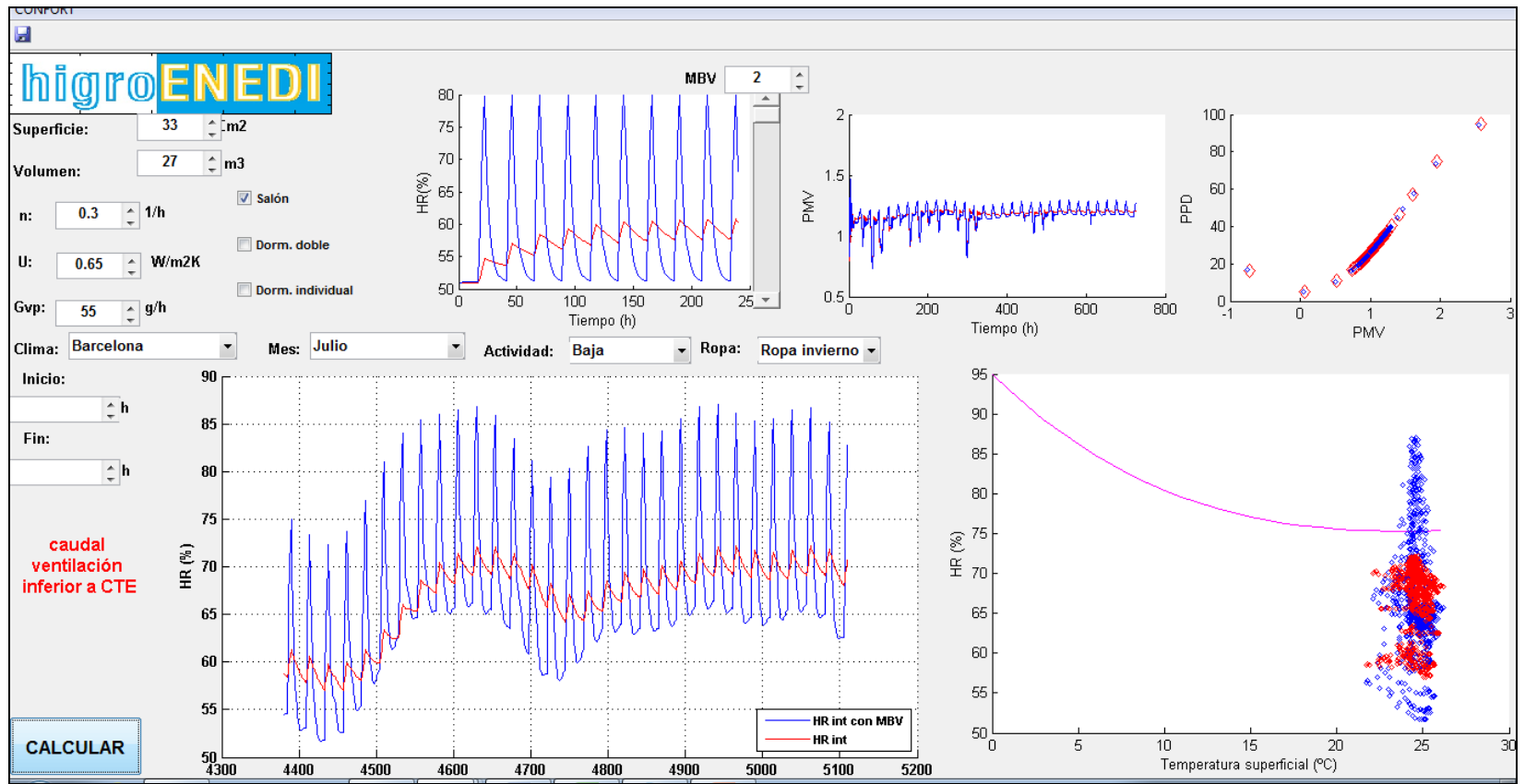


Barcelona, Julio, 0.6 h^{-1} , 55 g/h , $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



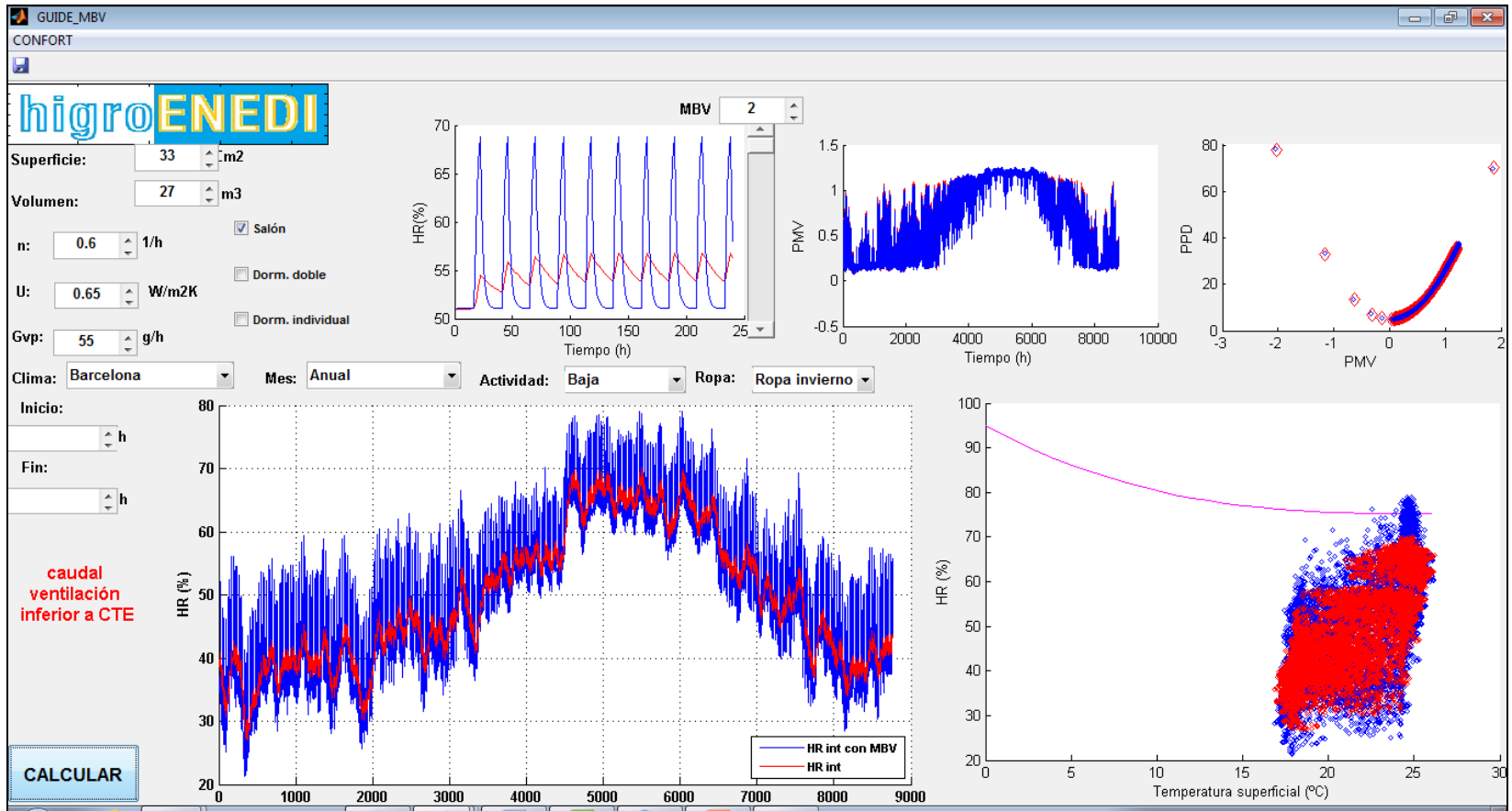


Barcelona, Julio, 0.3 h^{-1} , 55 g/h , $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



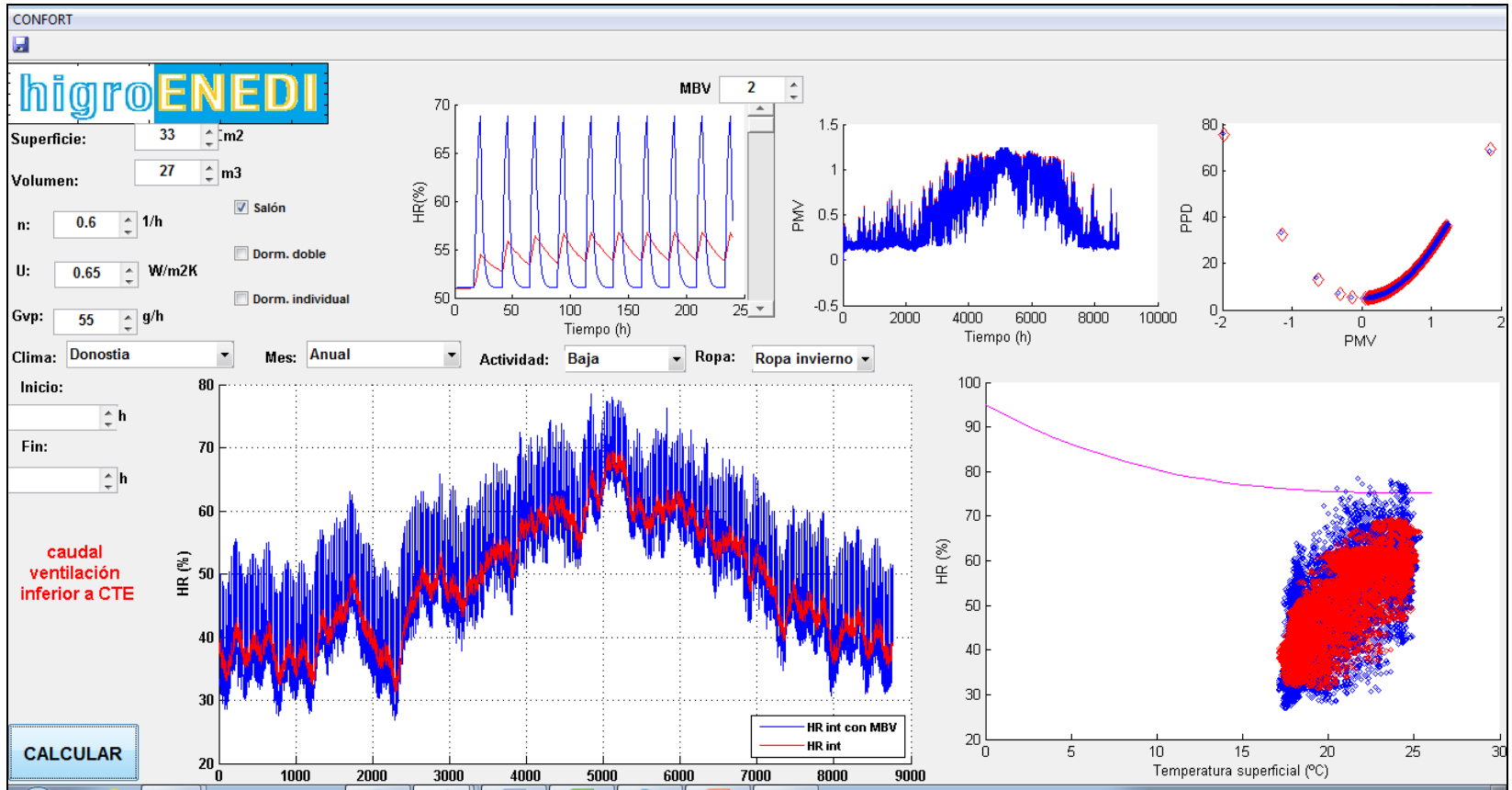


Barcelona, **ANUAL**, 0.6 h^{-1} , 55 g/h , $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



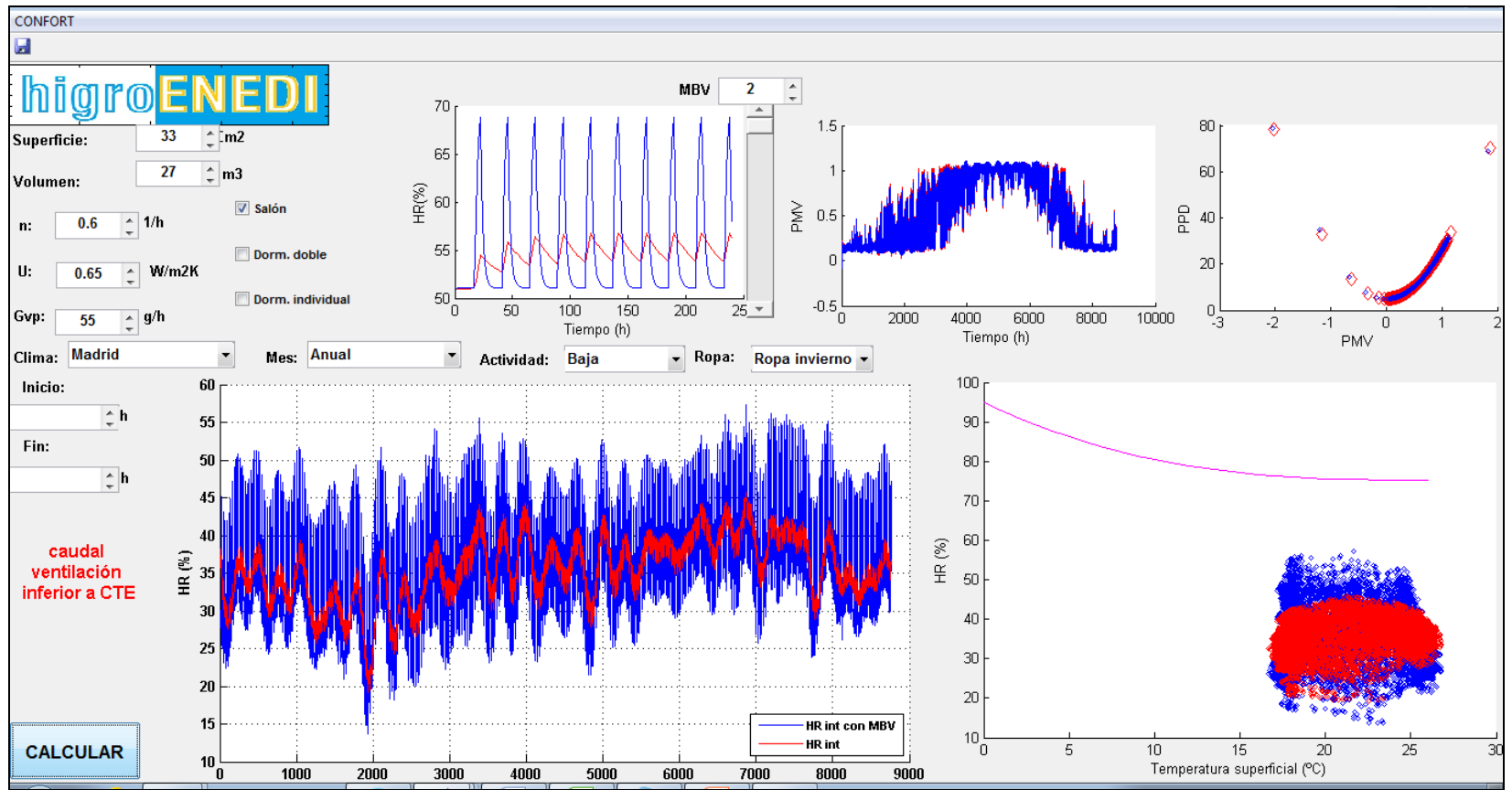


Donostia, ANUAL, 0.6 h^{-1} , 55 g/h , $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



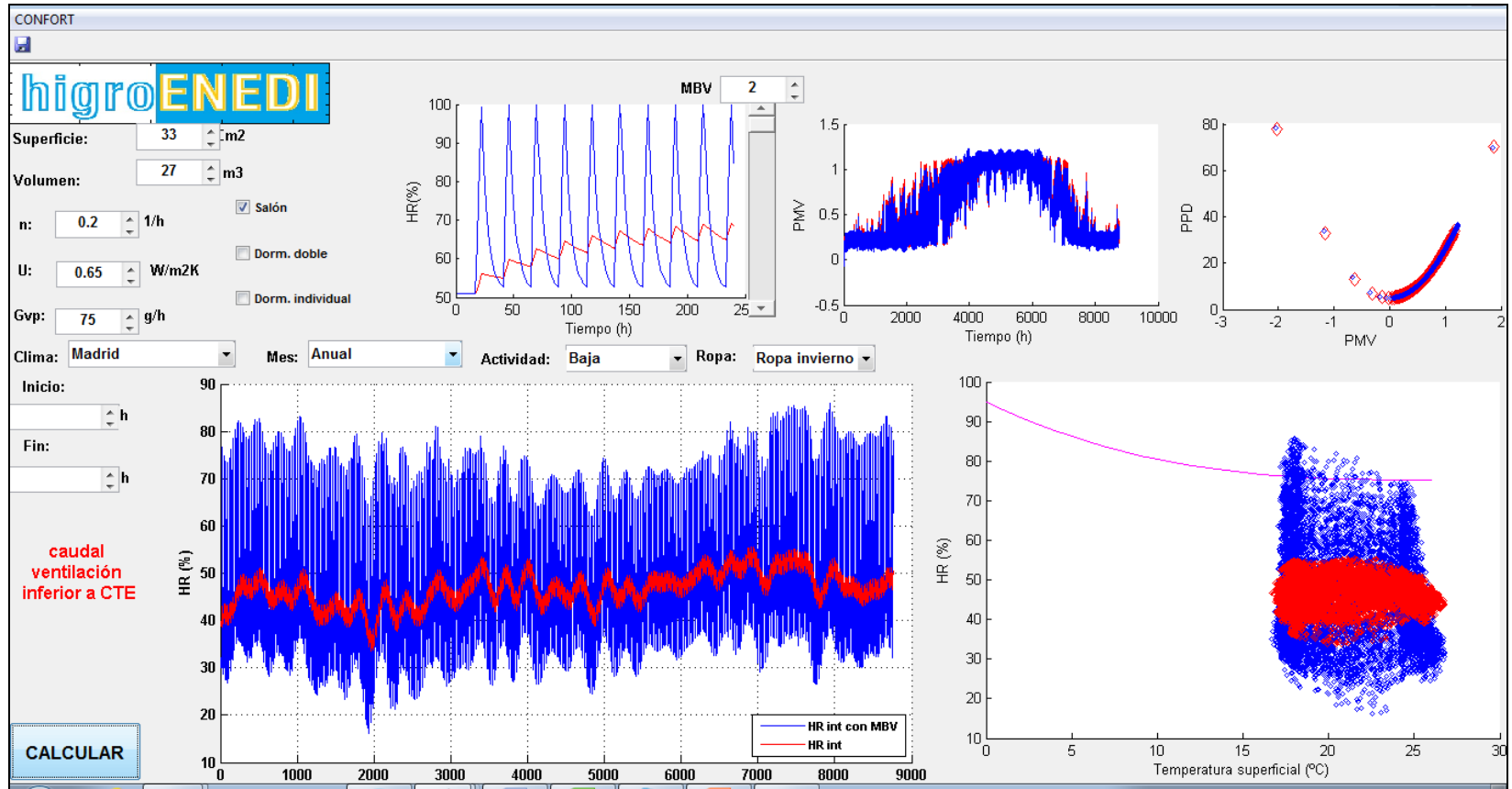


Madrid, ANUAL, 0.6 h^{-1} , 55 g/h , $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$





Madrid, ANUAL, 0.2 h⁻¹, 75 g/h, MBV=2 g/m²%





- Reducción consumo energético



Ahorro energético indirecto en refrigeración/calefacción:

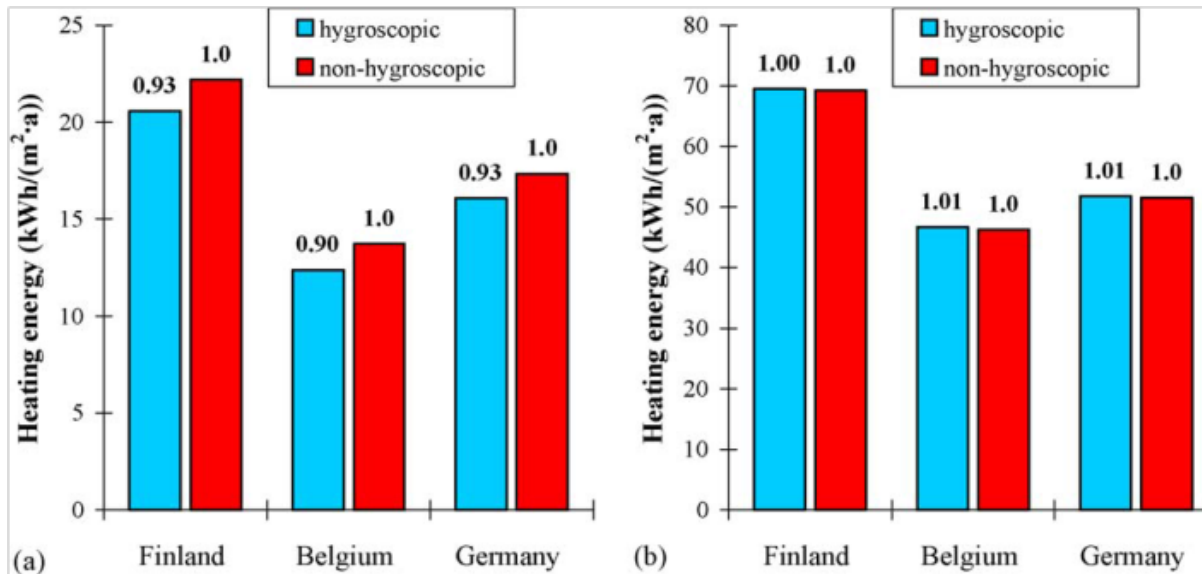
Al mejorar las condiciones de humedad y con ello las condiciones de confort respiratorio y calidad del aire interior, es posible alterar la temperatura y la tasa de ventilación de edificios que utilizan materiales higroscópicos:

- Reducir tasa ventilación (15%)
- Reducir temperatura consignación invierno ($\downarrow 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Aumentar temperatura consigna verano ($\uparrow 2^\circ\text{C}$)



Ahorro energético en calefacción:

El calor generado durante la adsorción de humedad en materiales de construcción higroscópicos disminuye el consumo de energía de calefacción durante la ocupación .



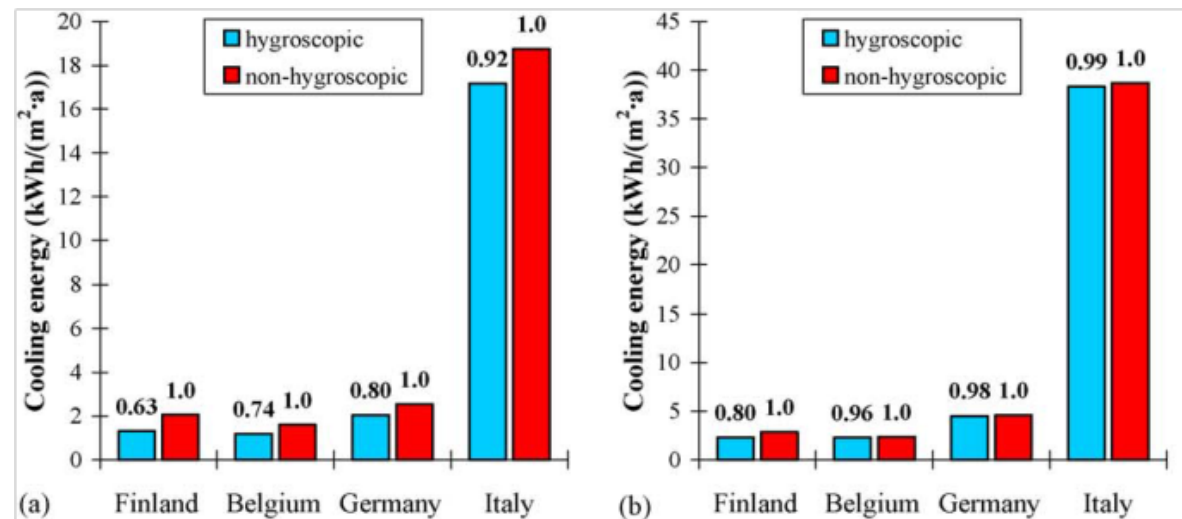
Fuente: Olalekan F. et al. Energy and Buildings 38 (2006) 1270–1282



Ahorro energético en refrigeración:

La **disminución de la entalpía del aire** disminuye la energía necesaria para enfriar el edificio.

(la entalpía media del aire interior es cerca de **2 kJ/kg_a** más baja durante la ocupación con materiales higroscópicos que con no higroscópicos).



Fuente: Olalekan F. et al. Energy and Buildings 38 (2006) 1270–1282



Conclusiones:

- Necesidad de desarrollar materiales higrotérmicos para la regulación pasiva de la humedad relativa interior
 - aplicación en edificios de oficinas con relativamente altas cargas de humedad durante el día
 - en museos, archivos documentales, galerías de arte, bibliotecas, y también para el patrimonio arquitectónico (por ejemplo, edificios históricos que permitan acceso de los visitantes), donde los elementos que se exhiben o almacenan son sensibles a la humedad y pueden estar sometidos a variaciones periódicas en las cargas de humedad.
 - en edificios residenciales para evitar riesgo de condensaciones en condiciones de ventilación defectuosa



Dispones de un video resumen de recapitulación sobre este tema en el canal de youtube, ver el link en la plataforma eCampusOCW

Muchas Gracias