

*Evaluation of moisture buffer value for  
building envelopes materials and analysis  
of their impact on the hygroscopic  
equilibrium of buildings*

**Evaluación del potencial de  
amortiguamiento de humedad en  
recubrimientos interiores de cerramientos  
y análisis de su impacto en el equilibrio  
higroscópico de edificios**

Programa de Doctorado en Eficiencia Energética y  
Sostenibilidad en Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Máquinas y Motores Térmicos

**Isabel SELLENS FERNÁNDEZ**

**2019**

Directores de tesis: **Iñaki GÓMEZ ARRIARAN**  
**Aitor ERKOREKA GONZÁLEZ**



## AGRADECIMIENTOS

Esta tesis doctoral, requisito para obtener el reconocimiento de Doctor en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Ingeniería y Arquitectura otorgado por la Universidad del País Vasco, no habría sido posible sin la oportunidad y ayuda que me ha brindado el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Quiero agradecer este trabajo a mis directores de tesis, Iñaki y Aitor, por vuestra profesionalidad y atención. Aitor gracias por prestarnos tu ayuda en el final de esta tesis, por tus sugerencias y aportaciones, pero sobre todo por proporcionarnos una visión diferente, a veces tan necesaria. Y en especial a Iñaki que me ha acompañado durante todo este largo proceso, gracias por la gran dedicación que me has brindado y por no perder tu confianza en mí, especialmente en los momentos más difíciles. Gracias por compartir tu conocimiento conmigo y transmitirme toda tu experiencia. Estoy enormemente agradecida, mila esker.

Al grupo de investigación ENEDI, por permitirme el uso de sus instalaciones en la Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa y en el Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación, lugar donde se han desarrollado los ensayos de esta tesis doctoral. Quiero dar las gracias a José María Sala, director del grupo de investigación ENEDI, por su gran labor y profesionalidad, por su disposición y gentileza. De entre los integrantes del grupo ENEDI, quiero destacar la ayuda de Moises Odriozola, no sólo por ayudarnos en los temas relacionadas con la ventilación, sino por su amabilidad durante el tiempo que he trabajado en la Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa. A Irati, por sus contribuciones en las tareas de ajuste, mila esker por dedicarme tu tiempo. A las compañeras y compañeros del Área Térmica del LCCE, por mantener un ambiente de trabajo tan alegre, donde el compañerismo es una realidad. El LCCE ha sido el lugar idóneo para terminar con el último suspiro de la tesis. Dani, Carlos, Imanol y Juan Mari, gracias por hacer las cosas más fáciles de lo que son, estoy en deuda con vosotros. A César Escudero, por su ayuda y sus consejos, en especial por acercarnos a las empresas suministradoras de los materiales de construcción, y a Pablo Maroto, por el interés en colaborar en este trabajo y ofrecernos todo lo que hemos necesitado.

I am very thankful to the *Building Physics* section team from *KU Leuven* in Belgium for their warm welcome during my doctoral stays. I would like to thank Prof. Staf Roels for sharing his knowledge, for supervising my work and for the contribution of new ideas. I would also like to acknowledge Evy Vereecken, for his kindness and availability during the execution of the tests carried out at the *KU Leuven* facilities.

Agradecer a aquellos organismos que han financiado este proyecto: al Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, al grupo de investigación ENEDI y al Departamento de Educación de Gobierno Vasco.

I a tota la gent que m'estime, que encara que esteu lluny, se vos sent a prop. Al meu company Asier, per construir un espai de respecte i suport mutu, per la teua ajuda incondicional, però sobretot per la teua estima. A la meua família, que és el més bonic que tinc. Pel vostre recolzament i, sobretot, per voler-me, encara que lluny, feliç. A Juanma, per plenar-me de somriures. I a elles: Núria (avant!), Patri i Paula, seguim creixent juntes; Jone i Leire, què bonic ha sigut trobar-vos. Sou amor.



# RESUMEN

Las Directivas Europeas de Eficiencia Energética establecen nuevos desafíos en el sector de la construcción donde los ejes de actuación se centran en la reducción de la demanda energética y de los gases de efecto invernadero. Para llevar a cabo una gestión eficiente de la energía logrando, a su vez, espacios habitables y saludables, se deberán tener en cuenta las demandas de confort ocupacional.

Algunas de las soluciones que se practican con frecuencia implican un aumento de la hermeticidad de la envolvente, así como proveer al edificio de equipos cada vez más eficientes. En menor medida, pero no menos importante, se empiezan a introducir soluciones pasivas para el control de las condiciones interiores. En referencia al control de la higrometría interior, una forma de ayudar a minimizar la dependencia de los sistemas activos HVAC empleando métodos pasivos, es el desarrollo y empleo de materiales higroscópicos. Éstos tienen la capacidad de amortiguar las oscilaciones bruscas de humedad relativa en los espacios acondicionados, por tanto, los sistemas activos trabajan en menor proporción y la dependencia a éstos se reduce.

La capacidad de los materiales para regular la humedad relativa se denomina *Moisture Buffer Value* (MBV) y desempeña un papel importante en el equilibrio higroscópico de los espacios interiores. El control de la humedad relativa interior es muy importante, ya que tiene un gran efecto sobre el confort, la calidad de aire interior, la salud de los ocupantes, la durabilidad de los edificios y el consumo energético. Además, la consecución de edificios de consumo casi nulo (nZEB) va a requerir en un futuro inmediato el desarrollo de esta línea de investigación para su aplicación en la edificación, además de la creación de nuevos materiales de construcción con altos potenciales de amortiguación de las oscilaciones bruscas de la humedad relativa.

Para evaluar la efectividad de la aplicación de algunos materiales higroscópicos sobre el balance higroscópico, en esta tesis se han estudiado cuatro materiales diferentes. Tres de ellos (perlita expandida y dos tipos de yesos con diferentes prestaciones) forman parte de un sistema de aislamiento; el cuarto material, las planchas de fibra de madera, se ha escogido sabiendo que tiene un alto potencial amortiguador de la humedad relativa con el objetivo de poder compararlo con los otros materiales.

Para alcanzar cada uno de los objetivos propuestos en esta tesis, se han realizado diferentes tareas que comprenden el análisis de la propiedad del *Moisture Buffer Value* y, por tanto, del potencial de amortiguación de las oscilaciones bruscas de la humedad relativa y su implementación y efecto en el balance higroscópico de las estancias.

En el **primer capítulo** se ha hecho un recorrido por los antecedentes que nos llevan al estudio de los materiales higroscópicos como estrategia para el control pasivo de las condiciones higroscópicas interiores. Se han descrito los objetivos de la tesis, además de su interés de estudio.

Para realizar una caracterización higroscópica completa de los materiales de construcción, se han llevado a cabo diferentes ensayos, necesarios para definir la estructura porosa y las propiedades higroscópicas de los materiales higroscópicos. La caracterización higroscópica se describe en el **segundo capítulo**, que además de presentar una pequeña introducción de las propiedades obtenidas, se han detallado los métodos de ensayo realizados y se han analizado los resultados obtenidos. La caracterización higroscópica de los cuatro materiales ha determinado que los materiales estudiados pertenecen a diferentes tipologías en lo que referencia a la combinación de propiedades capilares e higroscópicas.

En el **capítulo tres**, se ha introducido la propiedad de estudio central de la tesis: el *Moisture Buffer Value* (MBV). En este capítulo se han identificado aquellas propiedades que se relacionan con el fenómeno de amortiguación provocado por los materiales higroscópicos sobre las oscilaciones bruscas en la humedad relativa del aire. Debido a que el MBV tiene varias definiciones, se han especificado cada una de ellas y, además, se han identificado aquellos parámetros que pueden tener un impacto en su cálculo o determinación (en dependencia de si se calcula el MBV ideal o se obtiene el MBV práctico). Para cada material, se ha obtenido el MBV teórico y práctico haciendo, finalmente, una comparativa entre los resultados obtenidos, identificando los factores de discrepancia. Los resultados obtenidos y la comparativa de los diferentes materiales investigados han mostrado que el material que tiene mejores prestaciones amortiguadoras de la humedad relativa es la fibra de madera.

Para la evaluación del impacto que el MBV tiene sobre las condiciones higroscópicas en los espacios interiores, en el **capítulo cuatro**, se ha introducido el concepto de inercia higroscópica y se han descrito aquellos modelos de predicción de la humedad relativa más usados que tienen en cuenta la capacidad amortiguadora de la humedad relativa de los materiales higroscópicos. Los modelos han sido validados a través de ensayos a gran escala en prototipos de estancias, ensayando varias condiciones de ventilación, diferentes horarios y cargas de producción de vapor de agua y diferentes materiales de acabado. Una vez realizados los ajustes mediante diferentes herramientas de análisis, se ha realizado un análisis de sensibilidad. Finalmente, se ha desarrollado una herramienta de cálculo del MBV de los materiales de construcción y de predicción de la humedad relativa interior, en la que se contemplan todas las zonas climáticas del Código Técnico de la Edificación. En el final del capítulo se realiza una comparativa de algunos casos de estudio para ver la efectividad de los materiales de acabado en interiores sobre las condiciones higroscópicas.

En el **capítulo cinco** se han recogido las conclusiones más relevantes obtenidas en cada apartado y, además, se ha hecho una reflexión sobre las futuras investigaciones que se creen convenientes para seguir con esta línea de investigación.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	5
<b>ÍNDICE</b> .....	7
<b>NOMENCLATURA</b> .....	10
<b>CAPÍTULO 1:</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	13
1.1. ANTECEDENTES .....	13
1.2. ESTADO DEL ARTE .....	15
1.3. OBJETIVOS DE LA TESIS.....	27
<b>CAPÍTULO 2:</b>	
<b>CARACTERIZACIÓN HIGROSCÓPICA</b> .....	29
2.1. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN INVESTIGADOS .....	31
2.1.1. Sistema de aislamiento .....	31
2.1.2. Perlita.....	32
2.1.3. Yeso de agarre .....	34
2.1.4. Yeso de acabado .....	35
2.1.5. Fibra de madera .....	35
2.2. ESTRUCTURA POROSA Y PROPIEDADES HIGROSCÓPICAS.....	36
2.2.1. Definición de la estructura porosa.....	36
2.2.2. Propiedades higroscópicas .....	38
2.2.2.1. Propiedades básicas .....	38
2.2.2.2. Propiedades de almacenamiento de humedad .....	41
2.2.2.3. Propiedades de transporte de humedad .....	44
2.3. MÉTODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA LA DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA POROSA Y LA CARACTERIZACIÓN HIGROSCÓPICA DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN .....	45
2.3.1. Ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio .....	45
2.3.2. Ensayo de saturación de agua al vacío.....	47

2.3.3.	Ensayo de absorción capilar.....	49
2.3.4.	Ensayo de sorción higroscópica.....	51
2.3.5.	Ensayo de difusión al vapor de agua .....	54
2.4.	DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA POROSA Y DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIGROSCÓPICAS .....	59
2.4.1.	Resultados ensayo porosimetría por intrusión de mercurio.....	59
2.4.2.	Resultados ensayo saturación de agua al vacío .....	60
2.4.3.	Resultados absorción capilar .....	62
2.4.4.	Resultados sorción higroscópica .....	68
2.4.5.	Resultados difusión de vapor de agua .....	74
2.5.	CONCLUSIONES .....	82

### **CAPÍTULO 3:**

<b>MOISTURE BUFFERING .....</b>	<b>85</b>
3.1. MOISTURE BUFFER VALUE IDEAL. DEFINICIÓN TEÓRICA .....	86
3.1.1. Factores influyentes en el mbv ideal.....	88
3.2. MOISTURE BUFFER VALUE PRÁCTICO. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	89
3.2.1. Factores influyentes en el mbv práctico.....	91
3.3. MOISTURE BUFFER VALUE REAL .....	93
3.4. RESULTADOS.....	94
3.4.1. Cálculo MBV ideal.....	94
3.4.2. Obtención MBV práctico .....	98
3.4.3. Comparativa MBV ideal y práctico .....	105
3.5. CONCLUSIONES .....	108

### **CAPÍTULO 4:**

<b>MODELO DE PREDICCIÓN DE HUMEDAD RELATIVA EN INTERIORES ....</b>	<b>1111</b>
4.1. CONCEPTO DE INERCIA HIGOROSCÓPICA.....	1122
4.2. MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA HUMEDAD RELATIVA INTERIOR ....	1144
4.2.1. Modelo <i>Effective Capacitance</i> (EC) .....	1166
4.2.2. Modelo <i>Effective Moisture Penetration Depth</i> (EMPD).....	1177
4.2.3. La inercia hogroscópica en modelos de predicción de humedad relativa interior.....	12020



4.3. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DE HUMEDAD RELATIVA INTERIOR .....	1233
4.3.1. Casetas LCCE.....	1233
4.3.2. Ajustes y validación de los modelos de predicción de la humedad relativa interior.....	1277
4.3.3. Análisis de sensibilidad.....	17070
4.4. HERRAMIENTA DE CÁLCULO: higoENEDI .....	1722
4.4.1. Descripción general de la herramienta .....	1744
4.4.2. Comparativa casos de estudio.....	1866
4.5. CONCLUSIONES .....	1911
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES .....	1955
5.1. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN.....	1988
BIBLIOGRAFÍA.....	201
ANEXOS.....	2077
ANEXO A: Propiedades higroscópicas de los materiales.....	2099
ANEXO B: <i>Moisture Buffer Value</i> práctico.....	2567

# NOMENCLATURA

## SÍMBOLOS ROMANOS

A	Área [m <sup>2</sup> ]
A	Coefficiente de ajuste [-]
ACH	Renovaciones por hora ( <i>Air Changes per Hour</i> ) [1/h]
A <sub>TOT</sub>	Área total de exposición de los materiales higroscópicos en contacto con el aire interior del recinto de evaluación [m <sup>2</sup> ]
A <sub>w</sub>	Coefficiente de absorción capilar [kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> )]
a	Coefficiente de ajuste [-]
a <sub>eq</sub>	Factor de corrección del espesor de la capa equivalente de amortiguación de la humedad relativa para un recinto [-]
B	Coefficiente de ajuste [-]
b	Coefficiente de ajuste [-]
b <sub>eq</sub>	Efusividad a la humedad equivalente para un recinto [kg/(m <sup>2</sup> ·Pa·s <sup>1/2</sup> )]
b <sub>m</sub>	Efusividad a la humedad [kg/(m <sup>2</sup> ·Pa·s <sup>1/2</sup> )]
CV	Coefficiente de variación [%]
c	Coefficiente de ajuste [-]
D <sub>w</sub>	Difusividad a la humedad [m <sup>2</sup> /s]
d <sub>a</sub>	Espesor capa de aire [m]
d <sub>b</sub>	Espesor capa amortiguadora de la humedad relativa [m]
d <sub>p,1%</sub>	<i>Moisture Penetration Depth</i> , definición del 1% [m]
d <sub>p,1/e</sub>	<i>Moisture Penetration Depth</i> , definición del 1/e [m]
EC	<i>Effective Capacitance</i>
EMPD	<i>Effective Moisture Penetration Depth</i>
G <sub>buf</sub>	Intercambio de vapor de agua de los materiales higroscópicos y el aire en contacto sobre ellos [kg/s]
G <sub>vp</sub>	Tasa de producción de vapor de agua [kg/s]
g <sub>v</sub>	Densidad de flujo de vapor de agua [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]
HAM	<i>Heat, Air and Moisture transfer</i>
HIR	Inercia higroscópica de una habitación ( <i>Hygric Inertia of a Room</i> ) [kg/m <sup>3</sup> ]
HIR <sub>1h/8h</sub>	Inercia higroscópica para un recinto a corto o largo plazo (en la primera u octava hora de humectación del aire interior) [kg/m <sup>3</sup> ]
HR	Humedad relativa [°/1], [%]
LIM	Isopleta límite para la evaluación del crecimiento de moho ( <i>Lowest Isoplet for Mould</i> )
M	Coefficiente de mayoración [-]
MAE	Error medio absoluto ( <i>Mean Absolute Error</i> ) [%]
MBV	<i>Moisture Buffer Value</i>
MBV <sub>eq,8h/1h</sub>	<i>Moisture Buffer Value</i> de la capa ficticia equivalente para un recinto en la primera u octava hora de humectación del aire [kg/m <sup>2</sup> ]
MBV <sub>ideal</sub>	<i>Moisture Buffer Value</i> ideal [kg/m <sup>2</sup> ]

$MBV_{ideal-ad}$	<i>Moisture Buffer Value</i> ideal a 54% de humedad relativa calculado a partir de los datos de la isoterma de adsorción [ $kg/(m^2 \cdot \%HR)$ ]
$MBV_{ideal-de}$	<i>Moisture Buffer Value</i> ideal a 54% de humedad relativa calculado a partir de los datos de la isoterma de desorción [ $kg/(m^2 \cdot \%HR)$ ]
$MBV_{ideal,54\%}$	<i>Moisture Buffer Value</i> ideal a 54% de humedad relativa [ $kg/(m^2 \cdot \%HR)$ ]
$MBV_{practico}$	<i>Moisture Buffer Value</i> práctico [ $kg/(m^2 \cdot \%HR)$ ]
$MBV_{8h/1h}$	<i>Moisture Buffer Value</i> del material correspondiente a la primera u octava hora de ensayo, según protocolo NORDTEST [ $kg/m^2$ ]
MPD	<i>Moisture Penetration Depth</i> [m]
m	Coefficiente de ajuste [-]
m	Masa [kg]
$m_a$	Masa Arquímedes [kg]
$m_d$	Masa seca [kg]
$m_w$	Masa saturada [kg]
$N_a$	Constante de la resistividad del aire [ $m \cdot Pa \cdot s/kg$ ]
n	Coefficiente de ajuste [-]
n	Tasa de ventilación [1/h]
$P_a$	Presión ambiental [Pa]
$P_{sat}$	Presión de saturación [Pa]
$P_0$	Presión atmosférica estándar [Pa]
p	Presión [Pa]
$p_v$	Presión parcial de vapor [Pa]
$p_{v,e}$	Presión parcial de vapor del aire exterior [Pa]
$p_{v,i}$	Presión parcial de vapor del aire interior [Pa]
$p_{v,e sat}$	Presión de saturación de vapor de agua del aire exterior [Pa]
$p_{v,i sat}$	Presión de saturación de vapor de agua del aire interior [Pa]
$p_{v,sat}$	Presión de saturación [Pa]
$R'_v$	Constante de los gases para el vapor de agua [ $J/(kg \cdot K)$ ]
r	Radio de poro [m]
$Scap$	Grado de saturación capilar [-]
s	Espesor [m]
$s_d$	Espesor de la capa de aire equivalente a la difusión de vapor de agua [m]
T	Temperatura [ $^{\circ}C$ , K]
$T_b$	Temperatura en el centro de la capa amortiguadora de la humedad relativa [ $^{\circ}C$ , K]
$T_e$	Temperatura interior [ $^{\circ}C$ , K]
$T_i$	Temperatura interior [ $^{\circ}C$ , K]
t	Tiempo transcurrido [s]
$t_p$	Periodo de tiempo [s]
U	Transmitancia térmica del cerramiento [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]
u	Contenido de humedad másico [kg/kg], [%]
V	Volumen [ $m^3$ ]
$V_a$	Volumen aparente [ $m^3$ ]
$V_m$	Volumen de matriz [ $m^3$ ]
v	Velocidad aire [m/s]

$W_p$	Permeancia al vapor de agua [ $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa})$ ]
$w$	Contenido de humedad volumétrico [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] La humedad por volumen es la misma que la densidad de masa parcial del vapor de agua pv
$w_{\text{cap}}$	Contenido de humedad por capilaridad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$w_{\text{sat}}$	Contenido de humedad de saturación [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$Z_b$	Resistencia de la difusión del vapor de agua de los materiales [ $\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ]
$Z_p$	Resistencia de película superficial para la difusión de vapor [ $\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ]

## SÍMBOLOS GRIEGOS

$\beta_p$	Coefficiente superficial de transferencia de masa por convección [ $\text{kg}/(\text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]
$\Delta$	Operador de diferencia
$\delta_p$	Permeabilidad al vapor de agua del material [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ]
$\delta_{p,a}$	Permeabilidad al vapor del agua del aire [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ]
$\theta$	Ángulo de contacto entre el sólido-líquido [grados]
$\lambda$	Conductividad térmica [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]
$\mu$	Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua [-]
$\xi$	Capacidad de humedad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_b$	Densidad aparente o bruta [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_l$	Densidad del líquido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_p$	Densidad de partícula o de matriz [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_{v,\text{sat}}(T_i)$	Densidad del vapor saturado interior [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\sigma$	Desviación estándar
$\sigma$	Tensión superficial del mercurio [ $\text{N}/\text{m}$ ]
$\phi$	Humedad relativa [°/1], [%]
$\phi_{\text{crítica}}$	Humedad relativa crítica [%]
$\chi^2$	Chi cuadrado
$\Psi$	Relación de humedad por volumen [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ], [%]
$\Psi_0$	Porosidad abierta [-], [%], [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

## OTROS SÍMBOLOS

$\partial$	Operador de diferencial parcial
$\bar{X}$	Media, valor promedio

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1. ANTECEDENTES

Con anterioridad a la crisis del petróleo, en ningún país europeo existían políticas destinadas al ahorro energético en edificación debido al bajo coste de la energía y su fácil disposición. El desencadenamiento de la crisis económica del 73 obligó al desarrollo de las primeras medidas orientadas a la eficiencia energética [1,2], cuyo objetivo se basaba en la reducción del consumo de calefacción y aire acondicionado, además de minimizar las infiltraciones de aire. Para cumplir con las nuevas directrices se empezó a incorporar aislamiento térmico en las envolventes e instalaciones de los edificios, además de disminuir el grado de permeabilidad de las carpinterías. A medida que se construía en base a las nuevas políticas, los edificios eran cada vez más herméticos, reduciendo de forma drástica las infiltraciones y provocando una disminución significativa de las pérdidas de calor. Los beneficios sobre el ahorro energético conllevaron, a su vez, problemas asociados al confort y la salubridad en los edificios, por lo que el nuevo diseño de los edificios desencadenaba en humedades relativas altas y elevadas concentraciones de contaminantes y, en consecuencia, en una disminución de la calidad del aire, que derivaba en problemas asociados a la salud y el confort de los ocupantes.

Al inicio de la década de los 80, la Organización Mundial de la Salud definió el “Síndrome del Edificio Enfermo”. Este concepto se asignó a los edificios que presentaban un conjunto de “enfermedades” originadas por los contaminantes presentes en el aire interior de éstos. La mala calidad del aire y los problemas de salud de los ocupantes sólo se atribuían a las altas concentraciones de contaminantes interiores, siendo la humedad relativa un parámetro que únicamente se asociaba al confort. Con posterioridad, varias investigaciones [3-5] concluyeron que la humedad relativa también tenía un impacto significativo tanto en la percepción de la calidad del aire como en los problemas de salud que padecían los usuarios.

Inicialmente, se creía que la incomodidad o el malestar de los ocupantes estaba provocado únicamente cuando los valores de humedad relativa eran altos, pero investigaciones posteriores mostraron que los espacios secos también tenían una influencia negativa sobre el confort de los ocupantes [4,6]. Además, se pudo constatar que los efectos negativos sobre la salud de los ocupantes aumentaban cuando los usuarios estaban expuestos a estas condiciones durante periodos de tiempo prolongados. Se identificó que la mayoría de los problemas asociados a la salud aumentaban en gravedad cuando los valores de la humedad relativa interior estaban fuera del intervalo comprendido entre el 40-60% [3].

Los valores de humedad en un edificio también tienen un efecto en el deterioro y la durabilidad de los materiales de construcción que lo componen. La presencia de agua en el interior de los poros de los materiales aislantes aumenta la conductividad térmica perdiendo sus propiedades aislantes. Esto puede ocurrir por el hecho de estar en contacto con el agua o simplemente por la migración de la humedad a través de la envolvente. En

otros casos, la presencia de agua ayuda al transporte de sales a través de los poros de los materiales de construcción. La migración de sales en materiales porosos como el ladrillo cerámico puede derivar en eflorescencias y criptoflorescencias, estas últimas pudiendo provocar desconches por la degradación del material. En general, cuando las humedades relativas son altas la probabilidad de que se produzcan daños físicos es más baja, siendo el problema principal la aceleración de la actividad biológica en la superficie de los materiales. Contrariamente, en los espacios con valores de humedad relativa baja existe riesgo de que materiales de madera, puedan sufrir contracciones, llegando a deformarse, incluso a romperse. Hay que añadir que, las fluctuaciones de humedad relativa también pueden ser perjudiciales para objetos formados por materiales con distinta naturaleza o por diferentes piezas colocadas con orientaciones diferentes según sus fibras. La razón es que, cada una de las piezas que forman el objeto tiene una respuesta diferente frente a los cambios de humedad, lo que puede derivar en daños mecánicos irreversibles [7-9].

La sensibilidad de algunos materiales frente a la humedad relativa es tan alta que objetos valiosos de colecciones de museos o documentos almacenados en archivos y repositorios deben permanecer en ambientes con controles ambientales muy exhaustivos. Este hecho hizo que la preocupación por acondicionar museos y espacios de la misma índole aumentara de forma significativa, especialmente a partir de la publicación de *The Museum Environment* [7]. Thomson hizo un análisis de aquellos factores ambientales que contribuyen al deterioro de las colecciones: la luz, la humedad relativa y la contaminación del aire, proporcionando, además, las especificaciones para la conservación de bienes culturales en museos. La obra era tan completa que Thomson se convirtió en el autor de referencia en cuanto a la conservación de obras en museos.

El acondicionamiento de estos espacios es tan complejo y tan costoso que ha despertado un gran interés en desarrollar nuevas soluciones pasivas, además de establecer nuevos parámetros de diseño para el control ambiental de estos espacios. El tema ha tomado tanto importancia en los últimos años, que asociaciones como ASHRAE incluyen en su manual desde 1999 un apartado específicamente destinado al control de las condiciones interiores de museos, galerías, archivos y bibliotecas. Además, ASHRAE [8], señala que la humedad relativa es el factor más dañino después de la luz y ésta se debe limitar a un valor estándar de  $50 \text{ o } 55\% \pm 5\%$  [7].

En lo que refiere al control de los valores de humedad relativa en edificios, la norma UNE-EN ISO 13788:2016, que establece que la humedad relativa superficial promedio mensual no debe superar los valores del 80% con el fin de evitar condensaciones superficiales y crecimiento de moho. Es por ello, que el Código Técnico de la Edificación en su Documento Básico de Ahorro de Energía, DB-HE/2, se ha basado en el método de evaluación de la norma UNE-EN ISO 13788 para desarrollar las exigencias que impidan que se produzcan condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos. A pesar de que la literatura señala que valores bajos de humedad relativa pueden causar problemas asociados a la salud y al confort de los ocupantes, la actual normativa de edificación no establece ningún límite inferior.

Cumplir con todas las especificaciones referidas al confort y salud de los ocupantes además de a la conservación de bienes culturales llevaría a un control muy riguroso de todos los

parámetros influyentes, lo que a su vez supondría un gran sobre coste energético y de mantenimiento al que muchos propietarios o instituciones no podrían hacer frente. Además, las nuevas Directivas Europeas sobre la eficiencia energética limitan el consumo energético de los edificios, lo que dificulta poder garantizar las condiciones especificadas a través de medios puramente mecánico lo que, a su vez, obliga a adoptar medidas alternativas que permitan reducir la dependencia de los combustibles fósiles en el consumo energético.

En la última década y barajando alternativas para afrontar soluciones a este problema, la comunidad científica internacional ha prestado especial atención al estudio de la inercia higroscópica de los materiales de construcción. Esto es, porque la presencia de materiales higroscópicos en interiores ayuda a regular la humedad relativa interior, lo que implica que los espacios estén mejor acondicionados sin que ello implique un mayor consumo energético, y por tanto, podría ser la clave para lograr unas condiciones interiores estables de una forma sostenible y energéticamente más eficiente.

## **1.2. ESTADO DEL ARTE**

A lo largo de la historia de la arquitectura se pueden encontrar claros ejemplos de construcciones basadas en los principios de la arquitectura bioclimática. Este tipo de arquitectura se basa en utilizar los materiales que componen el edificio para crear un microclima interior sin necesidad de realizar un aporte energético. A pesar de su conocimiento, existen otros muchos edificios con envolventes diseñadas exclusivamente para proteger a los usuarios de la climatología exterior, sin aprovechar las capacidades que los materiales tienen para contribuir en el control de las condiciones interiores.

Uno de los recursos de la arquitectura bioclimática es la inercia térmica. El beneficio de la inercia térmica permite al edificio mantener una temperatura interior estable a lo largo del día, por lo que casas cueva, caseríos o iglesias, podían alcanzar el confort térmico a pesar de no disponer de sistemas activos adicionales.

Además de la inercia térmica, la inercia higroscópica también puede tener un impacto en la demanda energética de los edificios. La inercia higroscópica reduce las oscilaciones diarias de la humedad relativa en interiores, ya que, materiales de construcción porosos, muebles y otros enseres, intercambian humedad con el aire circundante a medida que se producen cambios bruscos en los valores de la humedad relativa interior. El problema recae en que, en general, son pocos los edificios que parten de un diseño pensado para regular las condiciones interiores de forma natural. Esto implica que el usuario adquiera la responsabilidad del control de las condiciones interiores y que, de forma inevitable, se haga a través de medios mecánicos. Las mejoras en los sistemas HVAC hacen que éstos sean cada vez más complejos, lo que a su vez implica que los equipos sean más costosos, no sólo por la necesidad de una actividad continua, sino también porque requieren de un mantenimiento que garantice su buen funcionamiento.

La inercia térmica e higroscópica, por tanto, tienen una gran importancia tanto en edificios residenciales, como en aquellos edificios que requieran de unas condiciones interiores muy estables: archivos, repositorios bibliotecarios, museos y edificios históricos, entre otros.

El fenómeno que describe el efecto amortiguador que los materiales higroscópicos tienen sobre los cambios bruscos en la humedad relativa se denomina *Moisture Buffering*. El aprovechamiento de esta habilidad confiere a un edificio la posibilidad de controlar de forma pasiva las condiciones higroscópicas a través de los materiales de construcción. Un buen uso de los materiales higroscópicos en viviendas supondría la reducción de los valores de la humedad interior en viviendas, lo que podría solucionar los problemas más comunes y más preocupantes en el sector de la edificación: las condensaciones superficiales (especialmente en puentes térmicos y en aquellos lugares donde la ventilación es escasa) y la aparición de moho. Hay que añadir que, tener un mayor control de los valores de humedad relativa en interiores, contribuiría a crear un clima más saludable, donde el riesgo de los problemas de salud asociados a valores inadecuados de humedad se vería disminuido. Además de la salubridad, la calidad del aire, el confort y la salud de los ocupantes, hay otros factores intervinientes de interés como son la durabilidad de los materiales y el consumo energético asociado a la humedad relativa, por tanto, su estudio abre una línea de investigación muy interesante para el sector de la edificación.

Para estudiar el impacto de los materiales de construcción sobre el balance higroscópico de un edificio es esencial conocer sus propiedades higroscópicas. La mayoría de las propiedades higroscópicas de los materiales se determinan a partir de procedimientos estandarizados realizados bajo condiciones isotérmicas y estáticas. Algunos casos son la norma UNE-EN ISO 12571:2013 [10], la cual describe el ensayo para determinar la curva de sorción higroscópica, y la norma UNE-EN ISO 12572:2016 [11] para la obtención de la permeabilidad al vapor de agua.

Contrariamente, las condiciones a las que están expuestos los materiales en edificación son cambiantes debido a la climatología exterior y a la actividad en el interior de las estancias. Por tanto, existe una controversia al obtener las propiedades higroscópicas de forma estacionaria si la realidad es que éstos están en un ambiente donde la temperatura y humedad relativa no son valores constantes. Hay que añadir que, actualmente es habitual hacer simulaciones dinámicas para predecir el comportamiento de un edificio según los cambios climatológicos y el uso de las viviendas. Por tanto, introducir como datos de entrada las propiedades de los materiales obtenidas en régimen estacionario, puede alejar los resultados estimados de la realidad, especialmente cuando los intervalos de tiempo simulados sean cortos.

La necesidad de realizar simulaciones sobre el transporte de humedad en los componentes de las construcciones ha obligado a adoptar simplificaciones de cálculo, dando lugar a varios modelos de predicción de humedad en edificación. Los dos modelos que se presentan de forma más habitual en las herramientas de simulación convencionales son el modelo *Effective Capacitance* (EC) y el modelo *Effective Moisture Penetration Depth* (EMPD). Una comparativa de los modelos mencionados y otros no menos importantes se puede encontrar en [12].



El modelo *Effective Capacitance* (EC) combina la capacidad de humedad de los materiales, muebles y otros enseres junto a la capacidad de humedad del aire de la habitación en un solo parámetro. Esta asunción implica que no se tenga en cuenta la resistencia superficial entre el aire y el material, por tanto, en el momento en que la humedad relativa del aire se ve alterada, se asume que la humedad de cada uno de los materiales intervinientes en el proceso de transferencia de humedad cambia en el mismo instante que la humedad del aire. Esta aproximación se aleja de la realidad, ya que, en un proceso de intercambio de humedad real, cuando se producen cambios en la humedad relativa del aire, los materiales en contacto con este no cambian su contenido de humedad de forma instantánea, ya que existe un proceso de transferencia que precisa de un tiempo que depende de la naturaleza y características de cada material, además de las condiciones de contorno. Aunque no sea un método exacto, se puede ver implementado en herramientas como IHAT (*Indoor Humidity Assessment Tool*) de la EPA (*United States Environmental Protection Agency*), una herramienta incorporada en el paquete SAVES, la cual permite evaluar diferentes medidas con el fin de garantizar unas condiciones higroscópicas adecuadas en edificios educativos.

El modelo *Effective Moisture Penetration Depth* (EMPD), en cambio, no modifica la capacidad de humedad del aire y se considera independiente de la de los materiales y muebles presentes en la habitación. En este modelo, se asume que los materiales están sujetos a condiciones cíclicas transitorias. Cuando un material está sujeto a estas condiciones, la humedad relativa penetra en el interior de un material hasta un punto en el cual, la amplitud de la humedad relativa en dicho punto es muy pequeña y, por tanto, se puede decir que, la parte del material a partir de este espesor no interviene en el proceso de transferencia de humedad entre el material y el aire. El espesor que representa este punto se define como *Moisture Penetration Depth*, nombre por el cual el modelo adopta su denominación e inicialmente se definió como el punto en el cual la variación de humedad relativa en el interior del material representa el 1% de la variación de la humedad relativa en el aire circundante. Este hecho hace que, en este modelo, la capacidad de absorber humedad de los materiales venga definida por una fina capa superficial, la única que toma parte en el proceso de intercambio de humedad. En este modelo, y al contrario que el modelo EC, sí se tiene en cuenta la resistencia de la capa límite del aire y la resistencia a la difusión del vapor de agua del material. El modelo EMPD fue introducido por Kerestecioglu [13] y Cunningham [14,15] y puede verse implementado en herramientas como EnergyPlus y TRNSYS. En el caso de TRNSYS y contrariamente al modelo de EnergyPlus, se asume un proceso isotérmico, y, además, se añade una capa de material (más profunda) la cual sólo se toma en cuenta cuando las fluctuaciones de humedad relativa se producen en intervalos de tiempo más largos, como por ejemplo estacionales. Por tanto, a diferencia de EnergyPlus, en este modelo se diferencian dos zonas en el espesor de los materiales intervinientes en el proceso de transferencia de humedad.

En referencia a la profundidad de penetración efectiva (*Moisture Penetration Depth*), Arfvidsson [16] presentó un algoritmo para su cálculo. Para ello, demostró que existían diferencias entre la humedad relativa media del aire circundante y la humedad relativa media dentro del material que estaba en contacto con éste (conocida como humedad relativa sin perturbaciones). Por tanto, quedó demostrado que no se podía establecer un

cambio instantáneo y simultáneo de la humedad relativa del aire y de los materiales, siendo los modelos que adoptan dicha asunción, aproximaciones.

Time [17] y Padfield [18] fueron pioneros en proponer algunos métodos experimentales dinámicos para evaluar el efecto amortiguador de los materiales de construcción. A través de sus tesis doctorales, realizaron ensayos cuyo objetivo era evaluar el efecto amortiguador de algunos materiales de construcción sobre los cambios bruscos de la humedad relativa. El objetivo de Time era estudiar el comportamiento de varios tipos de madera. Ejecutó una serie de mediciones en los que modificaba el rango de la humedad relativa según diferentes intervalos de tiempo. En este caso, la humedad relativa se logró a través de soluciones salinas y el cambio de masa se registró durante todo el proceso de ensayo para cada una de las probetas. Padfield, en cambio, desarrolló otro procedimiento para evaluar el comportamiento de los materiales. Éste construyó una cámara climática en la cual inyectaba y extraía agua del aire interior reproduciendo un ciclo sinusoidal de humedad relativa. Las variaciones de humedad relativa se registraban para cada uno de los materiales ensayados y se comparaban con las variaciones que tenía la cámara climática vacía. Puesto que los resultados señalaban que los materiales higroscópicos disminuían de forma notable las variaciones de humedad relativa, se concluyó que estos materiales se podían usar como herramienta para moderar los cambios diarios de humedad relativa interior.

Peuhkuri, a través de su tesis doctoral [19], investigó el impacto que suponía el ejecutar un ensayo en estado estático o dinámico sobre el resultado de las propiedades higroscópicas a determinar de los materiales. Hay que señalar que muchas de las propiedades higroscópicas son requisito fundamental para la realización de cualquier simulación, ya que se requieren como datos de entrada, y en algunos casos, son necesarias para la obtención de otras, como es el caso de la profundidad de penetración de humedad o la capacidad de humedad del material, que requieren de la isoterma de sorción para ser calculadas. De entre las conclusiones, se destacó que la capacidad de humedad se vio alterada en dependencia de si los parámetros para su cálculo se habían calculado de forma teórica o habían sido obtenidos a través de ensayos. La diferencia en los resultados también mostró una clara dependencia a las condiciones de los ensayos, estáticas o dinámicas. Un ejemplo de ello fue que el valor de la capacidad de humedad de los materiales fue mayor cuando se tomaron las propiedades obtenidas a través de ensayos estáticos en vez de los valores de las propiedades obtenidas a través de ensayos dinámicos.

La necesidad de cuantificar la capacidad de los materiales para amortiguar los cambios repentinos de humedad relativa llevó a iniciar en 2004, un proyecto conocido como NORDTEST. El objetivo del proyecto era establecer una definición sólida de esta capacidad y, además, desarrollar un método experimental para cuantificarla. En el proyecto colaboraron varias universidades, empresas y organizaciones relacionadas con la industria. A través de este proyecto, se creó el concepto de *Moisture Buffer Value*, que define la propiedad que cuantifica la cantidad de humedad que un material puede absorber o expulsar al aire en contacto con éste cuando se expone a un cambio brusco de humedad relativa.

Dentro del protocolo NORDTEST [20] se establecen varias definiciones dentro del concepto del *Moisture Buffer Value*. Cada definición depende de los parámetros que se tengan en cuenta para obtenerlo. El *Moisture Buffer Value ideal*, es la definición teórica de la propiedad. La propiedad se calcula a través de las propiedades higroscópicas del material, concretamente a través de la derivada de la isoterma de sorción, conocida como la capacidad de almacenamiento de humedad y de la permeabilidad al vapor de agua. Como estas propiedades son exclusivas de cada material, sólo se podrá calcular el MBV ideal de un único material. En este caso, la influencia del clima circundante no se tiene en cuenta. En el caso de querer obtener la capacidad de amortiguación de humedad de un material heterogéneo o de un sistema de materiales, se tendría que recurrir a la definición del *Moisture Buffer Value práctico*. El protocolo NORDTEST describe un procedimiento de ensayo que permite obtener la capacidad de amortiguación de forma fácil y rápida, tanto para materiales simples como compuestos. El ensayo se realiza a pequeña escala, y factores como la velocidad del aire, el tamaño o el espesor de la muestra tienen un impacto en el resultado de la propiedad. Hay que añadir que, cuando se estudia el comportamiento de los materiales a gran escala, por ejemplo, en una estancia, el concepto que se evalúa es el *Moisture Buffer Performance*. En él se incluyen todos los materiales y objetos, y, parámetros como la ventilación, las cargas internas de producción de humedad o el clima exterior, son relevantes para la determinación de la capacidad de amortiguación de humedad de la estancia completa. Dicho esto, se pueden diferenciar tres niveles espaciales, tomados según los parámetros intervinientes en el fenómeno de *Moisture Buffering*, respectivamente a los descrito con anterioridad: nivel material, nivel sistema y nivel habitación.

Para definir la capacidad de amortiguación de una estancia completa, se creó otro concepto conocido como inercia higroscópica. Este concepto se analiza en el Annex 14: Condensación y Energía [21] y después ha sido desarrollado en más profundidad, principalmente, por los investigadores Ramos y de Freitas a través de sus publicaciones. La inercia higroscópica describe la capacidad de amortiguación de una estancia completa y puede ser deducida a través del *Moisture Buffer Value* de todos los componentes presentes en ella. Ramos y de Freitas pretendían crear un concepto que describiera la variación de humedad relativa del aire interior de un espacio. A través de su investigación [22] decidieron proponer clasificar la inercia higroscópica en diferentes clases, enumeradas de 1 a 3 (de menor a mayor inercia) estableciendo un baremo de amortiguación de humedad relativa de la estancia en referencia a un caso no higroscópico.

En el protocolo NORDTEST, además, se presentó una herramienta de cálculo conocida como *MoistBuff* la cual simulaba numéricamente el procedimiento de ensayo establecido por el protocolo NORDTEST para la obtención del *Moisture Buffer Value*. Para hacer el cálculo se necesitaban como datos de entrada las propiedades higroscópicas del material y las condiciones de contorno. La comparativa entre las simulaciones y los resultados de las pruebas experimentales demostraron que, si las curvas de sorción presentaban histéresis, el *Moisture Buffer Value* podía verse alterado, por lo que, si los materiales a evaluar presentan histéresis, hay que tener precaución al interpretar los resultados. Además, el autor de la herramienta señala en una publicación asociada al programa de cálculo, que

éste no está testado para todo tipo de materiales [23] y que se necesitan más ensayos que para verificar completamente la herramienta.

El fenómeno *Moisture Buffering* no sólo fue estudiado por el protocolo NORDTEST, sino que, además formó parte de un programa de la *International Energy Agency* sobre la conservación de energía en edificios y sistemas comunitarios. El proyecto formaba parte del Annex 41 iniciado en el año 2003 y se designó como “*Whole Building Heat, Air and Moisture Response*”. El objetivo era lograr una comprensión más avanzada del comportamiento higrotérmico de los edificios con el fin de conseguir mejores rendimientos energéticos en edificación.

Además del protocolo NORDTEST existen otras normativas que describen procedimientos de ensayo para cuantificar la capacidad de adsorción y desorción de los materiales. Estas son la normativa japonesa JIS [24] y la norma ISO 24353 de la Organización Internacional de Normalización [25]. Todos estos procedimientos son métodos de ensayo dinámicos los cuales contemplan dos fases de humedad relativa, alta y baja. Aunque todos los métodos tienen el mismo objetivo, sus procedimientos difieren significativamente.

Debido a la existencia diversos métodos de ensayo y a sus diferencias en las condiciones de ejecución, Roels y Janssen [26] realizaron una comparativa entre el método NORDTEST y la normativa JIS. Se realizó una comparativa teniendo en cuenta varios factores: espesor, resistencia superficial y esquema de producción. A continuación, se detallan las conclusiones más relevantes del estudio.

En referencia al espesor del material a ensayar, el procedimiento NORDTEST especifica que el espesor mínimo de las probetas a ensayar debe ser mayor o igual al *Moisture Penetration Depth* (definición del 1%). Cabe recordar que este concepto define el espesor efectivo capaz de adsorber humedad cuando se produce un cambio brusco en el ambiente y corresponde al punto donde la amplitud de la humedad relativa dentro del material es el 1% de la amplitud de las variaciones de humedad relativa del ambiente. Se define como el mínimo espesor necesario para aprovechar la capacidad máxima de amortiguación de humedad relativa del material y es característico para cada material. Aunque la definición originaria corresponde a la del 1%, con posterioridad, se ha planteado otra definición, en la que se establece dicho punto donde la amplitud de humedad relativa en el interior del material corresponde al 1/e de la variación del ambiente [19,27]. La normativa japonesa, en cambio, especifica que el producto tenga el espesor habitual del producto.

Debido a esta diferencia, Roels y Janssen simularon para cada material, diferentes espesores de muestras con el fin de determinar cuál es la definición más acertada para determinar el *Moisture Buffer Value*. La conclusión fue que el valor del *Moisture Buffer Value* se vio alterado una vez se contemplaban espesores por debajo del *Moisture Penetration Depth*, definición del 1/e. El *Moisture Penetration Depth*, definición del 1/e, es menor que la definición del 1%, esto implica que el protocolo NORTDEST ha fijado un espesor mínimo de ensayo excesivo, pudiendo ensayar muestras con espesores correspondientes al *Moisture Penetration Depth* (1/e) sin que el valor del MBV obtenido en el ensayo desprece parte de la capacidad de amortiguación del material. Cabe añadir que, la obtención del valor del *Moisture Penetration Depth* requiere de la caracterización

higroscópica del material. Debido a que la caracterización higroscópica es un proceso largo y costoso, es habitual que el valor se desconozca y, por tanto, que muchos ensayos del MBV se realicen sin asegurar que se cumple con el espesor mínimo. Realizando ensayos a través de la norma japonesa con espesores acordes al producto suministrado, podría no obtenerse el valor de la propiedad característica (y máximo) para el material ensayado. Además, debido a que existen varios productos disponibles con diferentes espesores según aplicabilidad, como por ejemplo las placas de yeso laminado, dependiendo de si el espesor logra o no el *Moisture Penetration Depth* (definición del 1/e), se obtendrían valores diferentes para cada probeta. En definitiva, si se quiere obtener el valor del *Moisture Buffer Value* propio de un material, se deberá comprobar que las probetas a ensayar superan el *Moisture Penetration Depth*, 1/e.

Otra diferencia entre los métodos contemplados es el valor de la resistencia superficial que se tiene que garantizar en los ensayos. Mientras que la normativa japonesa define un valor fijo de  $2 \cdot 10^8$  [Pa m<sup>2</sup> s/kg], el NORDTEST establece que, para velocidades de aire habituales en estancias (0,1 m/s), la resistencia superficial correspondería a un valor de  $5 \cdot 10^7$  [Pa m<sup>2</sup> s/kg]. El problema de esta asunción recae en que la resistencia superficial no es sólo dependiente de la velocidad de aire, sino que el tamaño de la muestra también es determinante. Por tanto, hay que tener en cuenta que, al realizar el ensayo según el NORDTEST, el valor de la resistencia superficial puede no ser el esperado en el procedimiento. Las simulaciones llevadas a cabo por Roels y Janssen concluyeron que, cuando la resistencia superficial era muy alta, los valores de MBV se veían disminuidos en gran medida, sobre todo en los materiales más permeables, por tanto, es recomendable que cuando se realice un ensayo de MBV la resistencia superficial sea lo más baja posible [26].

A través de otros trabajos se ha evaluado de forma experimental la influencia de la resistencia superficial sobre el valor del *Moisture Buffer Value*. En la investigación de Gómez [27] el procedimiento de ensayo se realizó según el método NORDTEST, pero se realizaron varias pruebas con diferentes velocidades de aire. En este caso, el máximo *Moisture Buffer Value* se obtuvo para velocidades mayores a 0,2 m/s, correspondientes a resistencias superficiales inferiores a  $3 \cdot 10^7$  [Pa m<sup>2</sup> s/kg]. Dicho esto, y para este caso en concreto, se llega a la conclusión de que el NORDTEST estaría fijando unas condiciones de ensayo las cuales no garantizarían obtener el máximo MBV para este tipo de materiales y, por tanto, convendría ensayar las muestras con resistencias superficiales menores a las fijadas por el protocolo NORDTEST. Desde el punto de vista de confort, si algunos materiales requieren de velocidades muy altas para alcanzar su mayor aprovechamiento, podría entrar en conflicto con el bienestar de los ocupantes, ya que las corrientes de aire pueden causar malestar térmico local.

Otra diferencia entre los métodos NORDTEST y JIS es que cada procedimiento de ensayo tiene un esquema de producción de humedad relativa diferente. Mientras que la normativa japonesa impone ciclos simétricos de producción de vapor de 48 horas, los ciclos del protocolo NORDTEST son de 24h y asimétricos. En [26], Roels y Janssen simularon diversos materiales con diferentes espesores con el fin de evaluar en qué medida el esquema de producción influía en los resultados del MBV. Los valores del MBV obtenidos

a partir de la normativa JIS fueron superiores a los obtenidos mediante el protocolo NORDTEST, cuando los espesores eran superiores al *Moisture Penetration Depth, 1/e*. Para muestras con espesores menores al *Moisture Penetration Depth, 1/e*, el valor del MBV obtenido para cada uno de los métodos de ensayo fue más aproximado.

Cuando se habla de la producción de humedad de una estancia, se obtendrán picos de producción de humedad, principalmente, en función de su uso. En viviendas, es habitual encontrar varios espacios con una producción de vapor similar al esquema de producción impuesto por el protocolo NORDTEST, como es el caso de los dormitorios. Pero en otras estancias como baños o cocinas, las producciones de vapor se producen en intervalos de tiempo más cortos. A través de la investigación de Roels y Janssen [26], se comprobó si los métodos de ensayo propuestos en el proyecto NORDTEST y en la norma japonesa JIS eran útiles y aplicables para cuantificar la capacidad de absorción de los materiales en estancias donde las producciones de vapor son ocasionadas en intervalos de tiempo más cortos. La conclusión fue que tanto el NORDTEST como la norma JIS no son apropiados para cuantificar la capacidad de amortiguación de los materiales presentes en este tipo de espacios. En el caso de producciones de vapor de mayor duración, los métodos de ensayo son coherentes y, por tanto, los resultados obtenidos a través de estos métodos se pueden tomar con fiabilidad.

La problemática sobre la imposibilidad de usar los métodos descritos para evaluar correctamente la amortiguación en espacios donde la producción de vapor se producía en espacios de tiempo cortos, hizo que surgieran nuevas investigaciones que la resolvieran. Desarrollar un procedimiento de ensayo para cada caso de producción de vapor no sería práctico, por tanto, Janssen y Roels [28,29] propusieron una caracterización ponderada que corrigiera el valor del MBV en función del tiempo de producción de vapor de la estancia. Esta solución permite que, con un mismo ensayo basado en el protocolo NORDTEST, se pueda cuantificar la capacidad de amortiguación de humedad, no sólo de materiales, sino también de objetos, en dependencia de la exposición de humedad a la que esté expuesto. Además, se constató que, la inercia higroscópica de una habitación calculada a través del MBV ponderado, es un concepto totalmente válido para evaluar la capacidad amortiguadora de una estancia de forma cualitativa y cuantitativa, ya que existe una correspondencia entre valor de la inercia higroscópica de la habitación (*HIR, hygric inertia of a room*) y las variaciones de humedad relativa interior.

Aunque el estudio del efecto amortiguador de humedad de los materiales de construcción aún no es muy extenso, la bibliografía de referencia permite encontrar datos de materiales de distinta naturaleza. La madera, ya sea por diferencia de especie o de producto, es uno de los materiales que más se ha estudiado con profundidad. El hormigón celular y el yeso también han sido materiales estudiados por varios autores, al igual que existen trabajos dedicados exclusivamente al estudio del comportamiento de varios aislantes térmicos. En los últimos años, son varios los autores que apuestan por estudiar nuevos materiales u otros menos convencionales, lo que está permitiendo encontrar materiales que destacan por su excelente potencial amortiguador de humedad relativa. Visto que son varios los materiales de construcción estudiados, se puede constatar que la mayor carencia de

estudio recae en el conocimiento del impacto que muebles, textiles, objetos decorativos u otros enseres de una vivienda, ejercen en el balance higroscópico de ésta. Siendo estos objetos materiales presentes en gran medida en viviendas y debido a la escasez de investigación sobre éstos, Svennberg hizo un estudio sobre aquellos muebles y otros enseres presentes de forma habitual en viviendas escandinavas [30]. El estudio señaló la importancia de incluirlos en las simulaciones higrótérmicas ya que su inclusión en el balance higroscópico generaba un gran impacto en los resultados.

Aunque los materiales de construcción, muebles y otros objetos tienen la capacidad de amortiguar la humedad relativa interior, la mayoría de ellos son tratados superficialmente o revestidos. El pintado o el empapelado de las paredes es muy habitual en edificación, hecho que hace que se desaproveche la capacidad de amortiguación de los materiales recubiertos. Las superficies no sólo son tratadas por motivos estéticos, sino que, en otras ocasiones se hace por facilitar la limpieza del elemento o para garantizar la protección y la durabilidad de algunos objetos y materiales. El impacto que estos generan sobre el intercambio de vapor de agua entre el aire y los elementos dependerá del material de revestimiento y de la forma de su aplicación.

Encontrar de forma habitual revestimientos superficiales sobre los cerramientos y mobiliario condujo a que una serie de investigadores se propusieran estudiar de qué manera interferían estos acabados en el proceso de intercambio de humedad entre los materiales y el aire en contacto con ellos. Salonvaara junto a otros investigadores, realizaron ensayos para estudiar el efecto de los revestimientos sobre los materiales de acabado. En este caso, se realizaron ensayos a pequeña y gran escala, y se confirmó que la aplicación de revestimientos superficiales tenía un efecto perjudicial sobre la capacidad de absorción de los materiales [31]. En los ensayos a pequeña escala, se aplicaron dos capas de pintura acrílica sobre las muestras de yeso y los resultados señalaron que la pintura tenía efecto similar a una barrera de vapor, ya que el intercambio de humedad entre el aire y el material pintado fue prácticamente nulo. Los resultados de los ensayos a gran escala mostraron que la aplicación de la pintura, a pesar de que este tipo se catalogara como una pintura permeable, multiplicaba por dos la amplitud de las variaciones de la humedad relativa con respecto al caso de un revestimiento de yeso sin ningún acabado superficial.

Mortensen junto a otros investigadores, también realizaron ensayos con el fin de evaluar cómo afectaba el aplicar pintura sobre superficies de hormigón celular y placas de yeso laminado [32]. En este caso los ensayos se realizaron a gran escala y los resultados mostraron que las pinturas de acabado superficial usadas sobre los materiales redujeron de forma significativa la capacidad de aminorar las variaciones de humedad de los materiales ensayados. A pesar de que se usaron diferentes tipos de pinturas, incluyendo casos con pintura altamente permeable al vapor, los resultados fueron en todos los casos muy negativos.

Para la elaboración del Annex 41: *Whole Building Heat, Air and Moisture Response* iniciado en el 2003, se realizaron ensayos *Round Robin* para determinar propiedades higroscópicas de los materiales y poder hacer una comparativa de varios modelos

numéricos HAM (*Heat, Air and Moisture*). Entre algunas pruebas encontramos ensayos de placas de yeso laminado, con y sin revestimiento. De entre las muestras revestidas, se ensayó el efecto de dos tipos de pintura, pintura acrílica y pintura de látex, ambos casos con una capa previa de imprimación. Las propiedades determinadas fueron la isoterma de sorción y la permeabilidad al vapor de agua, propiedades necesarias para el cálculo de propiedades como el *Moisture Buffer Value*, entre otras. Una vez más, quedó constancia de que la aplicación de pinturas como material de acabado tuvo un efecto no favorable a la capacidad de amortiguamiento de los materiales porosos, disminuyendo las propiedades higroscópicas del material, especialmente con la aplicación de una pintura de látex [33]. A través de esta investigación, también se analizó si a través de los ensayos estandarizados de las propiedades higroscópicas era posible obtener resultados fiables y precisos, garantizando desviaciones aceptables. El resultado no fue satisfactorio, especialmente en la determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua de materiales poco permeables, por lo que se reclamó una revisión de las normas estandarizadas con el objetivo de lograr resultados con una desviación menor.

Investigaciones más recientes se han centrado en modificar las propiedades de las pinturas para aumentar su capacidad de amortiguación. La investigación realizada por Giosuè y otros investigadores, han logrado mejorar el MBV de una pintura acrílica libre de compuestos volátiles a través de dos procesos, el primero, añadiendo varios rellenos no convencionales a la pintura, y el segundo, por medio de la sustitución de los rellenos silíceos por rellenos no convencionales [34]. La aplicación de la pintura original sobre un soporte de mortero disminuía la capacidad de amortiguar la humedad relativa de la composición de mortero. La solución que ofreció la incorporación de algunos rellenos en la pintura mejoró de tal forma que la capacidad de amortiguación de la nueva solución igualó a la solución de mortero sin recubrimiento, por lo que, en estos casos, la aplicación de pintura no sería un inconveniente. En otros casos, la capacidad de amortiguación llegó a superar la del mortero sin recubrimiento, por lo que la aplicación de la pintura supondría una mejora para el cerramiento.

La escala de los ensayos también puede desencadenar en diferencias sobre los resultados. La realización de ensayos a pequeña escala ha sido la más habitual, debido a la facilidad para controlar las condiciones de ensayo, especialmente en cámara climática. Los ensayos a gran escala son menos frecuentes, probablemente por la dificultad de disponer, en primer lugar, del equipamiento y del espacio de prueba. Otra razón se puede atribuir a la dificultad de garantizar unas condiciones de ensayo estables en todo el recinto, al tratarse de espacios más grandes, es difícil garantizar, por ejemplo, una velocidad de aire constante en todo el recinto. En torno a este tema, varios investigadores ya han apuntado a que este parámetro interfiere en la transferencia de humedad entre los materiales y el aire que les circunda y, por tanto, el hecho de no conseguir unos valores uniformes en todo el espacio de prueba complica su ejecución y, a su vez, implica una dificultad en la interpretación de los resultados, ya que, en dependencia de la zona del habitáculo, se pueden encontrar condiciones diferentes.

A pesar de la problemática que supone realizar ensayos a gran escala, son varios los investigadores que han realizado este tipo de actuaciones. Los primeros ensayos a gran



escala se realizaron en cámaras climáticas altamente estancas compuestas por cerramientos con aislamientos de gran espesor. El gran espesor de las paredes y su aislamiento, permitían controlar las condiciones interiores de forma más sencilla, y aspectos como el clima exterior o la ventilación, no interferían en los ensayos. El trabajo realizado por Mortensen y otros investigadores sobre el impacto de los revestimientos superficiales [32], es un ejemplo de ello. Las mismas celdas de ensayo empleadas en este trabajo fueron aprovechadas para realizar otro trabajo de investigación. En este caso, Rode (coautor del trabajo anterior) junto con Grau [35], realizaron ensayos a gran escala con el fin de validar un modelo de simulación higrotérmico para edificación, conocido como BSim. Este modelo fue creado para la simulación térmica, y con posterioridad, se le añadió la capacidad de simular las condiciones de humedad relativa teniendo en cuenta la capacidad de amortiguación de humedad de los materiales. Los ensayos consistieron en disponer muestras de varios materiales para evaluar su capacidad de amortiguar la humedad relativa ante unas producciones de vapor impuestas. De los materiales ensayados los que mostraron mejor comportamiento fueron las muestras de madera y de hormigón celular. La comparativa entre los resultados simulados y experimentales resultó satisfactoria.

Salonvaara junto a otros investigadores también realizaron ensayos a pequeña y gran escala para validar un modelo de simulación conocido como LATENITE-VTT [31]. Las estancias de simulación se encontraban dentro de un espacio acondicionado, por lo que el ambiente exterior no tuvo interferencia en los resultados. La comparativa entre los resultados de los ensayos y las simulaciones también fue satisfactoria. Cabe añadir que el modelo fue validado previamente por Salonvaara y Simonson en [36], pero como los casos de ensayo fueron pocos, se decidieron realizar más mediciones para garantizar la correcta validación del modelo, dando fruto al trabajo publicado en 2004 [31].

Debido a que existían pocos estudios en referencia a muebles y otros enseres, Svennberg evaluó el impacto de varios de ellos a través de ensayos en cámaras climáticas a gran escala [37]. El material interior de revestimiento interior era acero, lo que conllevaba que la transferencia de humedad entre el cerramiento y el aire fuera nula. De esta forma se conseguía evaluar únicamente el impacto higroscópico de los muebles u objetos presentes en el interior de la cámara. Con una tasa de ventilación prácticamente nula y el gran aislamiento del cerramiento se garantizaba que el clima exterior y la renovación de aire no tuvieran influencia en los resultados. Se realizaron varios casos de estudio, todos ellos con las condiciones interiores controladas. Se partió de la estancia completamente vacía, y posteriormente se fueron añadiendo muebles u objetos, hasta llenar la sala con todos los elementos que se querían evaluar. La conclusión fue que los muebles y objetos tenían una capacidad amortiguadora de la humedad relativa destacable, especialmente los materiales orgánicos como papeles y textiles. En esta investigación también se hicieron ensayos para estudiar el impacto de diferentes materiales de aislamiento. Aunque los materiales de aislamiento tuvieran una capacidad de amortiguación buena, al revestir las paredes con otros materiales de menos capacidad, en este caso, placas de yeso laminado, la capacidad amortiguadora de los aislamientos se desperdiciaba, ya que el único material que actuaba en el proceso de intercambio de humedad era el material en contacto con el aire interior de la cámara climática.

Otra investigación realizada a través de ensayos a gran escala es la investigación realizada por Kim, junto a otros investigadores en Corea [38]. Su trabajo se definió con el fin de estudiar el comportamiento de una placa de fibra mineral modificada con arcilla activada china. Este aditivo aumentó la capacidad de adsorber y liberar humedad de forma muy significativa con respecto a placas de fibra mineral original y placas de yeso laminado. Los ensayos a gran escala se realizaron en maquetas de vivienda y en viviendas reales. Las condiciones exteriores y la ventilación de las estancias se tuvieron en cuenta, ya que, en este caso no se limitaron, como era el patrón habitual que habían seguido las investigaciones anteriores. Este aporte fue muy innovador, ya que, hasta el momento, estos parámetros no se habían tomado en cuenta en las pruebas. La conclusión obtenida sobre los resultados fue que el nuevo material era capaz de controlar las condiciones de humedad relativa en condiciones reales, aunque advierten que no podrían ser efectivos cuando existan unas condiciones extremas de baja o alta humedad relativa durante un tiempo prolongado.

Hay que destacar que, dentro de los ensayos realizados a gran escala, son pocas las actuaciones llevadas a cabo en viviendas reales. El trabajo coreano, fue una de las primeras investigaciones científicas en las que se desarrollaron este tipo de actuaciones. Aunque estas pruebas han sido menos predominantes, existen otros ejemplos, los cuales se pueden ver a continuación.

El siguiente trabajo realizado en viviendas reales a destacar es el elaborado por Zhang junto a otros investigadores [39]. Hay que señalar que esta investigación surge de otra previa realizada en el año 2012, en la cual los ensayos se llevaron a cabo en una cámara climática de gran tamaño [40]. Las diferentes pruebas incluían diferentes casos de estudio variando las tasas de ventilación, cargas de humedad y áreas de exposición de los materiales higroscópicos. En este trabajo, además, se presentó un nuevo índice que permitía evaluar de forma cuantitativa el efecto amortiguador de humedad de los materiales. Con el fin de evaluar cómo se comportaban los materiales frente a condiciones reales, los investigadores, decidieron realizar ensayos que tenían una configuración muy similar a los realizados en la cámara climática, esta vez en estancias reales y bajo condiciones reales. De los resultados de los ensayos se destacó la efectividad de la aplicación de los materiales higroscópicos en viviendas, reduciendo las fluctuaciones de humedad relativa de forma destacable. En ambas investigaciones se concluyó que existía una correlación entre el nuevo índice y la tasa de ventilación y las relaciones de carga de los materiales higroscópicos (área expuesta por unidad de volumen).

Como se ha visto, la inmensa mayoría de los ensayos han consistido en estudiar el potencial de amortiguación de humedad de un único material. Sin embargo, la realidad es que en las estancias se pueden encontrar multitud de materiales y objetos que intervienen en su balance higroscópico. Hay que añadir que, actualmente, los programas de simulación sólo consideran materiales de construcción homogéneos, por lo que evaluar el potencial de amortiguación de una única estancia a través de un programa de simulación, incluyendo todos los materiales intervinientes en el proceso de intercambio de humedad, es todavía impracticable. Para dar solución a este problema, Vereecken, Roels y Janssen, llevaron a cabo una investigación en una estancia real, concretamente en una habitación de

estudiantes, y consiguieron desarrollar un método para la determinación del potencial de amortiguación de estancias, considerando todo elemento interviniente en el proceso de transferencia de humedad [41]. Este método resuelve la dificultad de caracterizar la multitud de materiales presentes en una habitación debido al gran número de elementos presentes. El ensayo resulta muy ventajoso, ya que se puede obtener el *Moisture Buffer Potential* de una habitación, a través de un único experimento, que a su vez es sencillo y rápido.

Después de que numerosos estudios de investigación hayan demostrado la capacidad que algunos materiales y objetos tienen para mejorar la calidad del aire disminuyendo los picos de humedad relativa, surgen nuevos indicios de que éstos materiales pueden traer consigo prestaciones adicionales.

Investigaciones más recientes [42], apuntan a que algunos materiales pueden contribuir a la mejora de la calidad del aire, no sólo con la reducción de las oscilaciones de humedad, sino que, además disminuyen el nivel de los compuestos orgánicos volátiles (VOCs). En el estudio se hizo una comparativa entre dos tableros de fibra de madera de densidad media (MDF), uno de ellos modificado con cáscara de nuez. La conclusión fue que la incorporación de la cáscara de nuez contribuyó a mejora de la calidad del aire a través de la amortiguación de la humedad relativa del ambiente y la eliminación de algunos VOCs, como el formaldehído.

### **1.3. OBJETIVOS DE LA TESIS**

Durante el diseño de un edificio y, por tanto, en el proceso selectivo de los materiales de construcción, en la mayoría de los casos no se tienen en cuenta las propiedades higroscópicas a la hora de elegir los materiales. La razón principal es la falta de información, incluso el desconocimiento, de las propiedades de los materiales de construcción.

En vista de que, en el ámbito de la edificación, el desarrollo del conocimiento sobre las propiedades higroscópicas sigue siendo una necesidad, uno de los principales objetivos de esta tesis doctoral ha sido caracterizar higroscópicamente de forma completa cuatro materiales de construcción, lo que proporciona información suficiente para predecir su comportamiento en un edificio. Los materiales incluidos son la perlita expandida, un yeso de agarre, un yeso de acabado y la fibra de madera. El hecho de que los materiales de estudio sean de distinta naturaleza y cumplan diferentes funciones en un edificio, ha permitido analizar las diferencias entre las propiedades obtenidas para cada material, viendo cuáles son más destacables según las prestaciones que cada uno de ellos ofrece.

La obtención de las propiedades higroscópicas de cada material, además de caracterizar los materiales higroscópicamente, ha permitido calcular la propiedad *Moisture Buffer Value* teórico. El fin de obtener esta propiedad para cada material ha tenido dos objetivos definidos; el primero, comprar el potencial de amortiguación de la humedad relativa de los distintos materiales estudiados y, el segundo, evaluar las diferencias al obtener la

propiedad de forma teórica y práctica, esta última, de forma experimental mediante un ensayo dinámico, siguiendo el protocolo NORDTEST.

Para lograr los objetivos descritos en los párrafos anteriores, los ensayos de caracterización higroscópica y de obtención del *Moisture Buffer Value* se han llevado a cabo en el Laboratorio de Propiedades Higroscópicas de la Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa en Donostia-San Sebastián.

Otro de los objetivos de la presente tesis ha sido desarrollar una herramienta de apoyo que permita predecir las condiciones higroscópicas interiores teniendo en cuenta la *Moisture Buffer Value* de los materiales de construcción usados como revestimiento interior. La aplicación permite analizar la influencia del *Moisture Buffer Value* en el balance higroscópico de estancias para diferentes condiciones de contorno: tasa de ventilación, uso y climatología exterior, considerando las diferentes zonas climáticas de España contempladas en el Código Técnico de la Edificación. La herramienta, además, ofrece al usuario la posibilidad de obtener el *Moisture Buffer Value* ideal de los materiales a través de la introducción de sus propiedades higroscópicas.

La validación del modelo se ha efectuado a través de ensayos en régimen dinámico, realizados en unas casetas prototipo del Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación (LCCE) de Gobierno Vasco en Vitoria-Gasteiz. A diferencia de los ensayos que se realizan habitualmente bajo condiciones muy controladas y en edificios muy estancos, estos ensayos son casos más próximos a las condiciones que se dan en estancias, proporcionando una visión más cercana a la realidad.

Las metas descritas en este apartado, por tanto, han servido para estudiar la viabilidad de estos materiales como sistema pasivo regulador de la humedad relativa en espacios interiores en los que se produzcan cambios bruscos de humedad relativa. Además, se ha dotado a la UPV/EHU y al Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación de Gobierno Vasco de un procedimiento de ensayo y caracterización, así como de una unidad de laboratorio para caracterizar el *Moisture Buffer Value* de los materiales de construcción, que amplíe la capacidad del LCCE del Gobierno Vasco.



## CAPÍTULO 4:

# MODELO DE PREDICCIÓN DE HUMEDAD RELATIVA EN INTERIORES

Los objetivos europeos en referencia a la eficiencia energética y sostenibilidad y a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en edificación apuntan a la construcción de edificios nZEB (*Nearly Zero Energy Buildings*), edificios con una demanda de energía casi nula. Esto significa que no basta únicamente en desarrollar sistemas activos cada vez más eficientes, sino que será necesario lograr la construcción de edificios con sistemas de climatización pasivos.

Para superar este reto, el desarrollo de las estrategias pasivas es un factor clave, ya que pueden sustituir parte o la totalidad de los sistemas activos. Los métodos pasivos son una solución favorable, especialmente para aquellos edificios en los que el consumo energético es muy alto, tal como oficinas, hospitales, centros comerciales, deportivos o educativos. En el caso de edificios históricos o edificios con un grado de protección que no les permita instalar sistemas HVAC, los métodos pasivos también pueden ser una alternativa interesante para mejorar las condiciones interiores, así como en recintos destinados a un uso que requiera un control preciso de las condiciones higrotérmicas interiores.

La mayoría de los sistemas pasivos necesitan ser considerados en la fase inicial y de diseño de un edificio, siendo difícilmente aplicables en edificios construidos, pero en el caso de considerar la incorporación de elementos higroscópicos en los espacios habitables como medida pasiva para el control de las condiciones interiores de humedad relativa, es una solución totalmente viable incluso para edificios ya construidos o en uso. Para desarrollar esta estrategia será necesario introducir el concepto de la inercia higroscópica, que describe la capacidad amortiguadora de un espacio completo, basándose en la propiedad del MBV de los materiales presentes en él.

La inercia higroscópica, además, despierta especial interés en el desarrollo de estrategias para aquellos edificios que, aparte de tener un consumo energético alto, requieren de un control muy exhaustivo de las condiciones higroscópicas interiores. Este podría ser el caso de repositorios, archivos o museos que contengan objetos o colecciones las cuales requieran de unas condiciones especiales de conservación. La diferencia del gasto energético entre este tipo de edificios y un edificio residencial recae en que en este tipo de edificios las condiciones higrotérmicas se ajustan en base a la conservación de los bienes, siendo estas condiciones más exigentes que las que se definen en los espacios residenciales. Por tanto, el gran hándicap en este ámbito es la sustitución de los sistemas activos por materiales de revestimiento, mobiliario u otros objetos higroscópicos que logren controlar las condiciones higroscópicas sin necesidad de ningún aporte energético adicional. Y esta es la razón por la que, el estudio de estos materiales está ganando cada vez más importancia.

Hay que añadir que el aprovechamiento de la inercia higroscópica de un edificio no supone un gasto económico adicional ya que en una vivienda estarán presentes tanto los materiales de construcción formando cerramientos y particiones como otros elementos higroscópicos, ya sean muebles u otros objetos domésticos y textiles como cortinas, ropa de cama, etc. Lo que será esencial es considerar la incorporación de este tipo de materiales a la hora de diseñar los espacios, seleccionando aquellos más idóneos para cada caso, para aprovechar todo su potencial de intervenir favorablemente en el balance higroscópico.

Para aplicar y emplear métodos pasivos como la inercia higroscópica, será necesario desarrollar su conocimiento. El problema recae en que la consideración de esta estrategia aún es un tema descuidado en el diseño de los edificios y, al contrario que la inercia térmica, su concepto, funcionabilidad o en qué casos es de aplicabilidad, son temas desconocidos para la mayoría de los agentes de la construcción. Al igual que la inercia térmica es un recurso de la arquitectura bioclimática usado para reducir el consumo energético de un edificio, implementar la inercia higroscópica como estrategia pasiva para controlar los niveles de humedad relativa interior podría suponer, a parte de un ahorro energético al reducir el consumo de los sistemas de HVAC, otros beneficios relacionados con la salud y el confort de los ocupantes o la durabilidad de los materiales de construcción. Esto es porque el contenido de humedad en un espacio interior está íntimamente relacionado con la calidad del aire interior y, por tanto, con el confort y la salubridad ocupacional y la presencia de humedad en muchos casos, supone un efecto negativo sobre los materiales.

El objetivo principal de este capítulo, por tanto, es acercar la idea de la inercia higroscópica para que pueda ser aplicada en los nuevos modelos de construcción sostenible y pasiva. El capítulo inicia con la introducción de los principios básicos de la inercia higroscópica y su relación con el *Moisture Buffer Value* de los materiales. A continuación, se presentan los modelos de predicción de humedad relativa interior de estancias más utilizados que se han considerado relevantes para esta tesis. El capítulo se extiende con la presentación y validación de una herramienta de cálculo basada en los métodos desarrollados en las secciones anteriores. Ésta ha sido desarrollada con dos objetivos principales: el cálculo del *Moisture Buffer Value* de los materiales de construcción y la predicción de los niveles de humedad relativa interior de una estancia. Se realiza un análisis de sensibilidad de la herramienta presentada, determinando qué factores tienen un mayor impacto sobre las condiciones interiores. Finalmente, mediante la herramienta validada, se estudian y comparan algunos casos de estudio para determinar en qué condiciones la inercia higroscópica juega un papel importante sobre el ambiente interior.

## **4.1. CONCEPTO DE INERCIA HIGOROSCÓPICA**

El Annex 14: *Condensation and Energy* de la IEA [21], es uno de los primeros documentos donde aparece el concepto de inercia higroscópica y, aunque no se desarrolla de forma detallada, se deja constancia de que, si ésta se considera en el balance higroscópico, tendrá un impacto significativo en los resultados y, por tanto, es importante incluirla en los modelos de predicción de humedad relativa interior.

Como se explica en el capítulo anterior, el concepto del *Moisture Buffer Value* surge por la necesidad de definir una propiedad que cuantifique la capacidad de amortiguar la humedad relativa de los materiales frente a cambios bruscos de ésta, permitiendo a su vez, la comparativa entre materiales, además de su clasificación según su potencial de amortiguación.

Por lo general, en una estancia, el número de elementos que intercambian humedad con el aire interior es muy elevado, por lo que es difícil comparar espacios si no existe un parámetro que defina su capacidad de amortiguación de la humedad relativa. Así, de la misma forma que el MBV se refiere a un material, cuando se habla de espacios, el concepto de inercia higroscópica surge por la necesidad de caracterizar dicho espacio. Esto permite la comparativa de diferentes espacios con la finalidad de evaluar qué espacios pueden tener menos fluctuaciones de humedad relativa o qué espacios tendrán menos riesgo de condensaciones superficiales, entre otros aspectos.

Para definir la inercia higroscópica y lograr un mejor entendimiento, se puede hacer un símil con el concepto de la inercia térmica. Así pues, la inercia térmica es la capacidad de la envolvente de un edificio para almacenar calor del aire interior o cedérselo con el objetivo de calentar o enfriar el aire interior, convirtiendo las ganancias en cargas cuando sean favorables dependiendo de la estación y de las condiciones ambientales. Este proceso de intercambio de calor entre los materiales y el aire interior significa en una amortiguación de las variaciones de temperatura interior, suavizando el perfil de temperatura resultante. Cabe señalar que, a pesar de las ventajas que el sistema pasivo ofrece, en general, las soluciones que más se utilizan en edificación para reducir la demanda energética se basan en aislar térmicamente la envolvente y reducir las infiltraciones de aire.

La inercia higroscópica, por tanto, puede definirse como la habilidad de los materiales, muebles y otros enseres (y en este caso no sólo interviene la envolvente del edificio) para reducir los picos de la humedad relativa interior, atenuando las cargas higroscópicas del recinto y restituyéndolas o aportándolas cuando sean más favorables. Los materiales higroscópicos adsorben humedad y la liberan con el fin de amortiguar las fluctuaciones de la humedad relativa del aire interior. Esto significa que, al reducir los picos de humedad relativa, habrá menos riesgo de condensación y de aparición de moho, mejorando la calidad del aire interior y proporcionando ambientes interiores más saludables y respetuosos con los ocupantes sin necesidad de aportes energéticos adicionales.

Ramos y Freitas [65,66], propusieron definir la inercia higroscópica de una estancia (*Hygric Inertia Room*), HIR [kg/(m<sup>3</sup>·%RH)], como la superposición de la capacidad de amortiguar la humedad relativa de todos los materiales y elementos higroscópicos presentes en la estancia. Esto significa que, la inercia higroscópica se puede calcular a través del *Moisture Buffer Value* de todos los elementos, tal y como se describe en la ecuación 4.1.

$$HIR = \frac{\sum A_i \cdot MBV_i + \sum MBV_j}{V} \quad (4.1.)$$



donde  $A_i$  [ $m^2$ ] y  $MBV_i$  [ $kg/(m^2 \cdot \%RH)$ ] son el área de exposición y el *Moisture Buffer Value* de cada material de recubrimiento interior (i) respectivamente,  $MBV_j$  [ $kg/(m^2 \cdot \%RH)$ ] es el *Moisture Buffer Value* de cada mueble u objeto (j) y  $V$  [ $m^3$ ] es el volumen de la estancia.

Ramos y Freitas son los autores de referencia en el desarrollo del concepto de la inercia higroscópica y, aparte de su definición, presentan una propuesta para su clasificación en función de la variación de la humedad relativa en una estancia [22]. Para clasificar la inercia higroscópica por clases, Ramos y Freitas consideran un caso no higroscópico como caso de referencia y a medida que se reduce la variación de la humedad relativa, al espacio se le otorga un valor numérico, correspondiente a la clase. Para otorgar la clase al espacio se debe calcular el percentil 90% para cada caso y, comparando los resultados con el caso de referencia, se otorga la clase según la reducción de humedad relativa obtenida. Las clases propuestas por los autores y su reducción se presentan en la tabla 4-1 [22], por lo que, a mayor clase de inercia higroscópica, mayor reducción de las variaciones de la humedad relativa interior.

Clases	Reducción HR [%]	Clasificación
1	$R \leq 5$	Inercia baja
2	$5 < R \leq 15$	Inercia media
3	$R < 15$	Inercia alta

Tabla 4-1: Clases inercia higroscópica y reducción de la HR [22].

Para estimar las variaciones de humedad relativa y poder clasificar un espacio, se deberán hacer simulaciones de los diferentes casos de ensayo. Una simulación realista que permita obtener el trascurso en el tiempo de la humedad relativa en un espacio es una tarea muy complicada, ya que implica la reproducción de los fenómenos de almacenamiento y de transporte de calor, aire y humedad de todos los elementos intervinientes en el proceso. Esto, además, implica conocer todas las propiedades de los materiales intervinientes, por lo que finalmente, para hacer las simulaciones siempre se usan modelos simplificados que faciliten este cálculo.

## 4.2. MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA HUMEDAD RELATIVA INTERIOR

Definir la transferencia de humedad a través de un medio poroso, como se ha comentado, es una tarea complicada. La presencia de aire y agua (muchas veces combinada en diferentes fases) implica la combinación de diferentes mecanismos en el proceso de transferencia de humedad.

Los modelos de predicción de humedad que se presentan a continuación se simplifican estableciendo una serie de asunciones, que hace de su resolución, una tarea más sencilla. En los modelos que se presentan en esta sección, se establece que el aire interior del recinto está mezclado de forma homogénea, que no existe condensación superficial y que el único intercambio del aire interior se hace con el aire exterior mediante la ventilación del recinto.

Si se aplica la ley de conservación de masa en un recinto, en este caso de vapor de agua, la ecuación de conservación se describe como:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_e - \dot{m}_s + \dot{m}_p - \dot{m}_c \quad (4.2.)$$

donde  $\dot{m}_v$  es la variación de masa a través del tiempo en el recinto,  $\dot{m}_{e/s}$  es flujo de masa entrante/saliente en el recinto,  $\dot{m}_p$  es la producción de masa en el recinto y  $\dot{m}_c$  es el consumo de masa en el recinto. En este caso no existe consumo de masa, por lo que este parámetro se descarta en la ecuación.

La variación de masa en el recinto a través del tiempo y para este caso en particular, corresponde al cambio en la presión parcial de vapor en el interior de la estancia. Las entradas y salidas de masa corresponden al intercambio de humedad entre el aire interior y el aire exterior (por ventilación) y entre el aire interior y los materiales higroscópicos, mientras que la producción de masa corresponderá a las fuentes de humedad presentes en el recinto como, por ejemplo, el aporte de humedad por ocupación.

$$\dot{m}_v = \frac{\partial m_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{P_{vi} \cdot V}{R'_v \cdot T_i} \right) = \frac{V}{R'_v \cdot T_i} \cdot \frac{\partial p_{vi}}{\partial t} \quad (4.3.)$$

$$\dot{m}_{e/s} = \frac{\partial m_{e/s}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{P_{ve/i} \cdot V}{R'_v \cdot T_i} \right) = \frac{P_{ve/i} \cdot V \cdot n}{R'_v \cdot T_i \cdot 3600} \quad (4.4.)$$

$$\dot{m}_{e/s} = \frac{\partial m_{e/s}}{\partial t} = \frac{\partial M_{buff}}{\partial t} = G_{buf} \quad (4.5.)$$

$$\dot{m}_g = \frac{\partial m_g}{\partial t} = G_{vp} \quad (4.6.)$$

Por lo que la ecuación del balance de humedad en un recinto se define como:

$$\frac{V}{R'_v \cdot T_i} \cdot \frac{\partial p_{vi}}{\partial t} = (p_{ve} - p_{vi}) \cdot \frac{n \cdot V}{3600 \cdot R'_v \cdot T_i} + G_{vp} - G_{buf} \quad (4.7.)$$

donde  $V$  [m<sup>3</sup>] es el volumen del recinto,  $R'_v$  [461,89 J/kg·K] es la constante de los gases para el vapor de agua,  $T_i$  [K] es la temperatura interior de la estancia,  $t$  [s] es el intervalo de tiempo considerado,  $p_{vi}$  [Pa] es la presión parcial de vapor del aire interior de la estancia,  $p_{ve}$  [Pa] es la presión parcial de vapor del aire exterior,  $n$  [1/h] es la tasa de ventilación,  $G_{vp}$  [kg/s] es la tasa de producción de vapor en el interior del recinto y  $G_{buf}$  [kg/s] es el intercambio de humedad del aire con los materiales en contacto con este.

En general, son muchos los modelos de simulación que no tienen en cuenta la capacidad de amortiguar la humedad relativa de los materiales de construcción. De entre los modelos de transporte de humedad en edificación más usados que la consideran, podemos encontrar el modelo *Effective Capacitance* (EC), el modelo *Effective Moisture Penetration Depth* (EMPD) y aquellos que combinan el transporte de calor, aire y humedad, *Heat, Air and Moisture transfer* (HAM). A continuación, se desarrollan los modelos que se han evaluado y utilizado en esta tesis, los modelos EC y EMPD, modelos más sencillos que los HAM.

### 4.2.1. MODELO *EFFECTIVE CAPACITANCE* (EC)

Como ya se ha explicado, la transferencia de humedad en una estancia se produce entre el aire interior y aquellos elementos que estén en contacto con éste, incluyendo materiales de construcción, muebles y otros enseres presentes en espacio a estudiar. El modelo *Effective Capacitance* (EC), también conocido como *Lumped Capacity*, agrupa todos los elementos intervinientes en el proceso de intercambio en un único parámetro. Este modelo asume un equilibrio entre la humedad relativa del aire y los elementos involucrados en el proceso, por tanto, la capacidad de almacenar y transferir humedad de cada uno de los materiales y objetos higroscópicos se combina con la del aire. Esto significa que el componente algebraico que describe el intercambio de humedad entre los materiales higroscópicos y el aire interior,  $G_{buf}$ , se elimina de la ecuación 4.6. y se añade un coeficiente de mayoración,  $M$ , que modifica la capacidad de amortiguar la humedad relativa del aire del recinto,  $V/(R'_v \cdot T_i)$ , incrementando su capacidad hasta obtener una equivalente a la combinada del aire y de todos los elementos intervinientes, dando lugar a la ecuación 4.8.:

$$M \cdot \frac{V}{R'_v \cdot T_i} \cdot \frac{\partial p_{vi}}{\partial t} = (p_{ve} - p_{vi}) \cdot \frac{n \cdot V}{3600 \cdot R'_v \cdot T_i} + G_{vp} \quad (4.8.)$$

Algunos de los softwares que incluyen el modelo EC son la IHAT (*Indoor Humidity Assessment Tool*) de la EPA (*United States Environmental Protection Agency*) y TRNSYS, que presenta el modelo EC como una opción (entre otras posibilidades) en el cálculo de la transferencia de humedad. Para poder predecir la humedad relativa en el interior de una estancia se debe estimar el factor de corrección  $M$ , lo que supone un problema a la hora de implementar el modelo. La IHAT permite evaluar el impacto de diferentes estrategias de diseño sobre la calidad del aire interior en centros educativos y, aunque en su manual se han catalogado diferentes espacios con su correspondiente valor de  $M$ , es muy difícil que el espacio a analizar tenga unas características iguales a las de los espacios clasificados en el manual, por tanto, sólo puede servir como una guía para estimar sus valores. Además, hay que añadir que el modelo es muy sensible a los cambios en el valor de  $M$ , por lo que elegir un valor incorrecto, puede llevar a predecir la humedad relativa de forma errónea y muy alejada de la realidad. Por estas razones, estimar el factor  $M$  se convierte en una tarea difícil.

En este modelo, el único elemento que se considera capaz de amortiguar la humedad relativa es el aire y, aunque su capacidad de amortiguación se corrige mediante el factor  $M$ , se obvia la capa límite entre el aire y los elementos, por lo que la resistencia superficial no se tiene en cuenta. El hecho de combinar todos los elementos en un único parámetro y despreciar la capa límite hace que este modelo sea incapaz de predecir los cambios dinámicos que se producen en el interior de los materiales higroscópicos. Esta asunción implica que la evolución de la humedad relativa se represente de forma más lineal y que la evolución de los cambios de humedad relativa se reproduzcan de forma menos precisa, pudiendo llevar a errores significantes cuando el tiempo de simulación sea corto, de horas o días. Cuando se realizan simulaciones para periodos de tiempo más largos, estacionales o anuales, los errores se ven disminuidos y se consideran insignificantes, por lo que muchos softwares reconocidos aún lo incluyen.

Que el modelo sea tan simple implica que su resolución matemática también lo sea, por lo que no requiere de mucha carga computacional. Esto permite que el tiempo de cálculo de las simulaciones sea más corto que el requerido al implementar otros modelos más complejos. El modelo es capaz de hacer simulaciones de forma rápida y aunque no describe correctamente el transcurso de la humedad relativa en una estancia, varios autores señalan que el modelo tiene una aproximación bastante buena para estimar los valores máximos y mínimos, siempre y cuando el factor M sea elegido correctamente.

#### 4.2.2. MODELO *EFFECTIVE MOISTURE PENETRATION DEPTH* (EMPD)

El modelo *Effective Moisture Penetration Depth* (EMPD), al contrario que el modelo EC, considera por separado la capacidad amortiguadora de la humedad relativa del aire interior y la de los materiales y objetos en contacto con él. El modelo también es conocido como el modelo de dos nodos, por el hecho de distinguir las dos capacidades en unidades independientes (ver figura 4-1). El modelo está basado en la teoría del *Effective Moisture Penetration Depth* (EMPD), por la que el modelo recibe su nombre y está desarrollada por Kerestecioglu [13] y Cunningham [14,15].

El modelo es capaz de calcular la humedad adsorbida y liberada por los materiales en contacto con el aire interior y calcular el efecto que tiene sobre la humedad relativa del aire. El modelo asume variaciones cíclicas en la humedad relativa interior, lo que reproduce las cargas latentes producidas por ocupación y uso que ocurren diariamente en el interior de los edificios. Se considera que el proceso de intercambio de humedad se produce entre el aire interior y una fina capa superficial del material, conocida como *Moisture Penetration Depth*,  $d_p$ , definida en el Capítulo 3: Moisture Buffering.

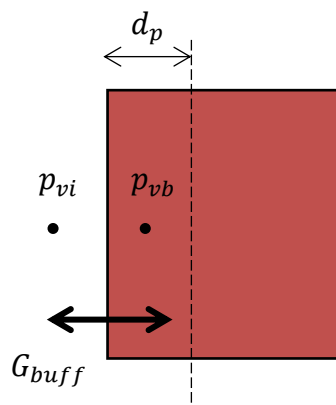


Figura 4-1: Intercambio de humedad entre el cerramiento y el aire interior

El hecho de separar los materiales y el aire en parámetros diferentes permite tener en cuenta la resistencia total a la transferencia de masa, que en este caso es la suma de la resistencia de la capa límite del aire,  $Z_p$  (ver ecuación 4.11), y la resistencia de la difusión del vapor de agua de los materiales,  $Z_b$  (ver ecuación 4.12). Según el modelo EMPD, el término  $G_{buf}$ , cuantifica la humedad adsorbida o liberada entre el material y el aire interior

y se describe según la ecuación 4.10, la cual se debe resolver para cada material involucrado en el proceso de intercambio de humedad con el aire.

$$Z_p = \frac{1}{\beta_p} \quad (4.9.)$$

$$Z_b = \frac{d_b}{2 \cdot \delta_v} \quad (4.10.)$$

$$G_{buf} = A \cdot \frac{p_{vi} - p_{vb}}{\frac{1}{\beta_p} + \frac{d_b}{2 \cdot \delta_v}} = A \cdot \xi \cdot d_b \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{p_{vb}}{p_{v,sat}(T_b)} \right) \quad (4.11.)$$

$$d_b = a \cdot d_p = a \cdot \sqrt{\frac{\delta_v \cdot p_{sat} \cdot t_p}{\xi \cdot \pi}}; \quad a = \min\left(\frac{d}{d_p}, 1\right) \quad (4.12.)$$

donde  $\beta_p$  [kg/(Pa m<sup>2</sup> s)] es el coeficiente de transferencia de masa por convección,  $\delta_v$  [kg/(m s Pa)] es la permeabilidad al vapor de agua del material.  $A$  [m<sup>2</sup>] es el área de exposición del material,  $p_{vi}$  [Pa] es la presión parcial de vapor del aire interior de la estancia,  $p_{vb}$  [Pa] es la presión parcial de vapor en el centro de la capa interviniente en el proceso de intercambio de humedad con el aire que corresponde a  $d_b$  [m]. La capa amortiguadora de humedad  $d_b$ , conforme a la ecuación 4.11, guarda una relación con el MPD y podrá corresponder al valor del MPD,  $d_p$  [m], o al espesor real de la capa,  $d$  [m], dependiendo de si supera o no el MPD.  $\xi$  [kg/m<sup>3</sup>] es la capacidad de humedad del material y  $p_{v,sat}(T_b)$  la presión de saturación calculada a través de temperatura en el centro del espesor efectivo del material,  $T_b$  [K].

Aplicar el modelo EMPD para resolver la ecuación del balance higroscópico (ecuación 4.6.), implica conocer previamente algunos parámetros como el coeficiente de transferencia de masa por convección o el *Moisture Penetration Depth*, que requiere de las propiedades higroscópicas; por tanto, será necesario un proceso previo de experimentación, dificultando y haciendo de su resolución un proceso más costoso.

En el capítulo 3 (sección 3.1.) se ha definido el concepto del MPD, que corresponde a aquel espesor donde la variación cíclica de humedad relativa representa el 1% (definición del MPD del 1%) o el 1/e (definición del MPD del 1/e) de la amplitud de la señal producida en la superficie del material. Aunque el contenido de humedad en el interior del material es variable y dependiente de la profundidad, el modelo EMPD asume que el material es semi infinito y que la presión parcial de vapor en todo el espesor efectivo definido como  $d_b$ , es constante, y se define como  $p_{vb}$  (ver figura 4-2).

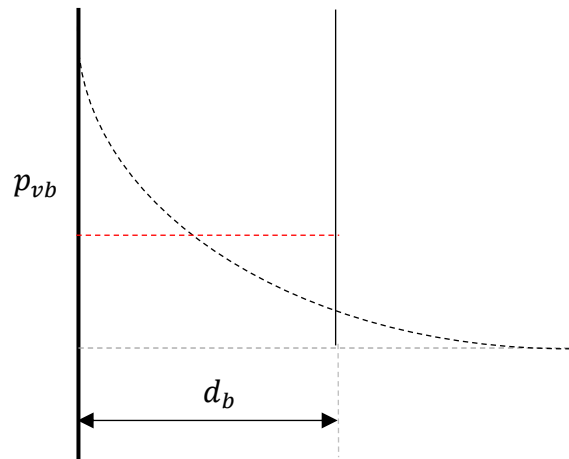


Figura 4-2: Presión parcial de vapor real variable en el espesor del material frente al valor constante que toma el modelo EMPD. La línea de puntos negra es un esquema de la disminución de la presión parcial de vapor a medida que se adentra en el material. La línea de puntos roja ejemplifica la asunción del modelo EMPD, considerando constante la presión parcial de vapor en todo el espesor efectivo del material ( $d_b$ ).

Al considerarse el material semi infinito, se asume que la capa interviniente en el proceso de intercambio de humedad con el aire supera el MPD, por lo que, en el caso de aplicarse materiales de revestimiento con un espesor menor, como es el caso del yeso de acabado estudiado en esta tesis, el modelo no sería aplicable. En caso de utilizar el modelo, incluso sabiendo que el MPD es mayor al espesor de aplicación, se debe tener en cuenta que el potencial de amortiguación de los materiales intervinientes puede haberse sobrestimado o subestimado (en dependencia del MBV de las capas adyacentes), pudiéndose obtener errores significantes en la predicción de la humedad relativa interior.

Otra limitación del modelo es que, la capa efectiva, sólo actúa en periodos de tiempo a corto plazo, por lo que hacer simulaciones a largo plazo puede implicar inexactitud en los resultados, por lo que se debe tener en cuenta a la hora de implementarlo.

Este modelo ofrece mayor aproximación que el modelo EC y aunque requiere de una carga computacional mayor, al compararlo con los modelos HAM, el modelo EMPD realiza las simulaciones de forma más rápida. El hecho de tener una precisión bastante buena y adecuada a la rapidez de su resolución hace que este modelo sea ampliamente utilizado y que algunas herramientas de simulación conocidas como EnergyPlus o TRNSYS lo implementen, aunque con alguna modificación al modelo explicado. Por ejemplo, en el caso de TRNSYS, que también presenta la opción de elegir el modelo EC, se presenta un modelo EMPD modificado, que definen como *Buffer Storage Humidity Model*. La herramienta incluye, además de la capa superficial considerada en el modelo EMPD, una capa más profunda que sólo actúa al calcular las fluctuaciones de humedad relativa durante periodos largos de tiempo, estacionales o anuales. La capa superficial, por tanto, es la capa amortiguadora que sólo es considerada en periodos cortos de tiempo. Este nuevo enfoque que se presenta en TRNSYS ayuda a corregir los problemas de inexactitud comentados con anterioridad, cuando las simulaciones se realizan a largo plazo.

### 4.2.3. LA INERCIA HIGROSCÓPICA EN MODELOS DE PREDICCIÓN DE HUMEDAD RELATIVA INTERIOR

Simular el comportamiento higroscópico de una estancia, implica conocer la capacidad de amortiguación de todos los materiales presentes en espacio (materiales de revestimiento, muebles, libros, textiles...). Por tanto, el cálculo del HIR requiere de mucho tiempo de experimentación y, en dependencia de la cantidad de elementos presentes en ésta, puede convertirse, en algunas ocasiones, en una tarea prácticamente imposible.

Evaluando los modelos mencionados, el modelo EC permite de forma más sencilla incluir todos los elementos de una estancia a través del valor M, aunque ya se ha apuntado al problema que supone elegir este factor de forma correcta. El modelo EMPD, en cambio, requiere de experimentación previa para obtener el MPD, lo que significa de una carga de trabajo y de tiempo experimental excesivo. Esto significa que ambos modelos presentan el mismo problema al incluir todos los elementos intervinientes en una estancia, principalmente porque aún no existe una base de datos extensa sobre el MBV, especialmente cuando se pretende considerar elementos tridimensionales como el mobiliario, en la que la información disponible es mucho más escasa.

Para abordar este problema y con el fin de reducir el número de ensayos, Vereecken junto a otros investigadores, proponen una metodología que permite calcular la inercia higroscópica de una estancia a través de un único ensayo realizado en la misma [41]. De esta forma, en vez de trabajar con todos los parámetros asociados a cada material interviniente en el proceso, se trabaja con un único parámetro, el HIR. Además del ensayo propuesto, el valor de HIR obtenido por experimentación, se puede utilizar para obtener los parámetros de cálculo necesarios en los modelos de predicción de humedad EC y EMPD [29], lo que solventaría muchos de los inconvenientes de cálculo presentados en la descripción de cada modelo.

#### IMPLEMENTACIÓN DEL HIR EN EL MODELO EC

El modelo EC asume que existe un equilibrio entre la humedad relativa del aire y la de los elementos involucrados en el proceso de transferencia de humedad con ésta y que la cantidad de humedad amortiguada es proporcional al HIR de la estancia, por tanto, al implementar el concepto del HIR sobre  $G_{buf}$ , la expresión adquiere la siguiente forma [29]:

$$G_{buf} = \frac{HIR \cdot V}{p_{v,sat}(T_i)} \cdot \frac{\partial p_{vi}}{\partial t} \quad (4.13)$$

donde HIR [kg/m<sup>3</sup>] es la inercia higroscópica de la estancia, V [m<sup>3</sup>] es el volumen de la estancia y  $p_{v,sat}(T_i)$  [Pa] la presión de saturación en el interior de la estancia.

Adoptando el valor de  $G_{buf}$  descrito en la ecuación 4.12. sobre la ecuación del balance higroscópico 4.6., se obtiene una ecuación donde la predicción de la humedad relativa interior se basa en el HIR y no en el factor de mayoración M:

$$\left( \frac{V}{R'_v \cdot T_i} + \frac{HIR \cdot V}{p_{v,sat}} \right) \cdot \frac{\partial p_{vi}}{\partial t} = (p_{ve} - p_{vi}) \cdot \frac{n \cdot V}{3600 \cdot R_v \cdot T_i} + G_{vp} \quad (4.14.)$$

La relación entre el HIR y el MBV se ha presentado en la ecuación 4.1., por tanto,  $G_{buf}$  y la ecuación del balance higroscópico también se pueden expresar en función del MBV:

$$G_{buf} = \frac{\sum A \cdot MBV}{p_{v,sat}(T_i)} \cdot \frac{\partial p_{vi}}{\partial t} \quad (4.15.)$$

$$\left( \frac{V}{R'_v \cdot T_i} + \frac{\sum A \cdot MBV}{p_{v,sat}} \right) \cdot \frac{\partial p_{vi}}{\partial t} = (p_{ve} - p_{vi}) \cdot \frac{n \cdot V}{3600 \cdot R_v \cdot T_i} + G_{vp} \quad (4.16.)$$

Si son pocos los elementos o se conocen los valores del MBV de los materiales intervinientes en el proceso de intercambio de humedad con el aire interior se puede adoptar esta medida en vez de realizar el ensayo propuesto en [41].

Haciendo una comparativa entre la ecuación del balance higroscópico 4.7. y la ecuación 4.12., también se puede obtener el valor de M en función del HIR (ver ecuación 4.16.) y, por tanto, en función del MBV de los materiales (ver ecuación 4.17.). El valor de M, al igual que el HIR, se pueden usar para comparar de forma directa la capacidad de amortiguación de la humedad relativa de diferentes espacios cuando son muchos los elementos intervinientes en el proceso.

$$M = 1 + \frac{HIR}{\rho_{v,sat}(T_i)} \quad (4.17.)$$

$$M = 1 + \frac{A \cdot MBV}{\rho_{v,sat}(T_i) \cdot V} \quad (4.18.)$$

donde  $\rho_{v,sat}(T_i)$  [kg/m<sup>3</sup>] es la densidad del vapor saturado interior.

Actualmente, la bibliografía referente al MBV los materiales de construcción todavía es escasa y cuando se trata de encontrar datos de muebles u otros enseres presentes en una vivienda, como se ha dicho con anterioridad, la información es muy limitada. Hay que añadir que, encontrar datos de muebles u objetos de unas mismas características (materia prima de fabricación, material de acabado superficial, tamaño...) es muy complicado, por lo que cuando se pretenda obtener su capacidad de amortiguación de la humedad relativa para su posterior cálculo del HIR, la propuesta presentada en [41] es la menos costosa.



## IMPLEMENTACIÓN DEL HIR EN EL MODELO EMPD

Para trabajar con la inercia higroscópica sobre el modelo EMPD, Janssen y Roels [29], proponen crear una capa amortiguadora ficticia con un potencial amortiguador equivalente al de todos los materiales presentes en la estancia. Esto implica que, para que la HIR sea la misma en ambos casos, las propiedades de la capa amortiguadora equivalente se deberán combinar de manera que resulten en un mismo comportamiento amortiguador de humedad relativa que el conjunto de materiales (ver ecuación 4.18).

$$HIR = \frac{\sum A_i \cdot MBV_i + \sum MBV_j}{V} = \frac{A_{TOT} \cdot MBV_{eq}}{V} \quad (4.19)$$

donde  $A_i$  [ $m^2$ ] y  $MBV_i$  [ $kg/(m^2 \cdot \%RH)$ ] son el área de exposición y el *Moisture Buffer Value* de cada material presente en la estancia,  $MBV_j$  [ $kg/(m^2 \cdot \%RH)$ ] es el *Moisture Buffer Value* de cada mueble u objeto,  $V$  [ $m^3$ ] es el volumen de la estancia y  $A_{TOT}$  [ $m^2$ ] y  $MBV_{eq}$  [ $kg/(m^2 \cdot \%RH)$ ] son el área de exposición y el *Moisture Buffer Value* de la capa ficticia equivalente.

Una vez obtenidos los valores de  $HIR_{8h/1h}$  por experimentación acorde al ensayo propuesto en [41], se resuelven las ecuaciones 4.19-4.22. y se obtienen los coeficientes  $a_{eq}$  y  $b_{eq}$ , que corresponden al factor de corrección del espesor de la capa de amortiguación,  $a$ , de la capa equivalente (ver ecuación 4.11.) y a la efusividad del material,  $b_m$ , respectivamente.

$$HIR_{8h/1h} = \frac{\sum A_i \cdot MBV_{i,8h/1h} + \sum MBV_{j,8h/1h}}{V} = \frac{A_{TOT} \cdot MBV_{eq,8h/1h}}{V} \quad (4.20)$$

$$MBV_{eq,8h/1h} = a_{eq} \cdot \sqrt{\frac{t_p}{\pi}} \cdot b_{eq} \cdot \Delta p_{vi} \left( 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \left( \frac{2\omega^2}{\gamma_i^2 (\omega(\omega+1) + \gamma_i^2)} \exp(-\gamma_i^2 \tau) \right) \right) \quad (4.21)$$

$$\omega = \frac{a_{eq} \cdot \beta}{b_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{t_p}{\pi}} \quad (4.22)$$

$$\tau = \frac{\pi \cdot t}{a_{eq}^2 \cdot t_p} \quad (4.23)$$

$$\gamma_i \text{ raíces de la ecuación } \gamma \cdot \tan(\gamma) = \omega \quad (4.24)$$

Para expresar el parámetro  $G_{buf}$  en función de los coeficientes  $a$  y  $b$  y poder resolver la ecuación del balance higroscópico (ver ecuación 4.6.), se sustituye  $d_b$  (ecuación 4.11.) en la ecuación 4.10., obteniendo la siguiente expresión matemática:

$$G_{buf} = A \cdot \frac{p_{vi} - p_{vb}}{\frac{1}{\beta_p} + a \cdot \sqrt{\frac{t_p}{\pi}} \cdot b} = A \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{\frac{t_p}{\pi}} \cdot \frac{\partial p_{vb}}{\partial t} \quad (4.25)$$

### 4.3. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DE HUMEDAD RELATIVA INTERIOR

En la actualidad, la mayoría de los ensayos de validación de los modelos desarrollados en la sección 4.2., se han realizado bajo condiciones controladas y limitando la tasa de ventilación al mínimo para minimizar el impacto de las condiciones exteriores sobre el ambiente interior.

El objetivo de los ensayos a gran escala realizados que se presentan a continuación es, a parte de la validación de la herramienta presentada, evaluar el potencial de amortiguación de la humedad relativa interior de diversos materiales de acabado y la efectividad de la inercia higroscópica bajo condiciones reales, lo que implica hacer ensayos con diferentes tasas de ventilación y tener en cuenta el impacto de la climatología exterior sobre las condiciones ambientales interiores.

La validación de la herramienta se realiza mediante la comparativa de los resultados obtenidos por simulación a través de la herramienta de cálculo y los valores obtenidos a través de ensayos experimentales en prototipos de estancias reales.

#### 4.3.1. CASETAS LCCE

Una aproximación a un caso más real son los experimentos realizados en dos casetas de ensayo del Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación de Gobierno Vasco (ver figura 4-3), situadas en la localidad de Vitoria-Gasteiz.



Figura 4-3: Exterior casetas de ensayo del LCCE

Las casetas de tienen unas dimensiones aproximadas de 2,5 x 2,5 x 2,4 metros (L x B x A), con un volumen interior de aproximadamente 15 m<sup>3</sup>. La configuración de ambas casetas

es prácticamente igual, la composición de los cerramientos es la misma, diferenciándose en el material de acabado interior. Las soluciones ensayadas, por tanto, han sido un revestimiento de pintura impermeable, un enlucido de yeso convencional, la solución del sistema de aislamiento estudiado en la presente tesis doctoral y un acabado con planchas de fibra de madera.

Los diferentes casos de estudio contemplan variaciones en la tasa de ventilación y en la producción de humedad interior, simulando diferentes ocupaciones y/o usos de la estancia, tal y como se describe en la tabla 4-2. Los usos de estancia ensayados simulan un caso de dormitorio y una oficina. El horario establecido y la producción de vapor correspondiente para cada caso se ha fijado teniendo en cuenta los habituales horarios de uso y la producción de vapor producida por un adulto, teniendo en cuenta los datos de producción de valor del Annex 41 de la IEA. Los ensayos se realizaron de forma simultánea en ambas casetas, teniendo cada una de ellas un material de acabado diferente.

Caseta/Material		Tasa de ventilación [1/h]	Producción de vapor [g/h] Horario [h]
Norte	Sur		
Pintura impermeable	Yeso convencional	0,2	81
		0,5	9:00-13:00+14:00-18:00
		0,2	34
		0,5	23:00-7:00
Fibra de madera	Sistema aislamiento	0,2	81
		0,5	9:00-13:00+14:00-18:00
		0,2	34
		0,5	23:00-7:00

Tabla 4-2: Ensayos realizados en las casetas del LCCE

Para garantizar una temperatura interior constante, cada caseta cuenta con una bomba de calor. La temperatura de consigna fue de 23 °C, en los casos de invierno y 21 °C para los ensayos realizados en verano. La generación de vapor de agua en el interior de ambas casetas se realizó a través de un humidificador de agua, que, conectado a un programador eléctrico, permitió la producción de vapor según el horario de producción establecido para cada caso. El humidificador se dispuso sobre una balanza que, conectada a un ordenador, obtuvo su peso durante todo el ensayo, lo que permitió calcular la tasa de evaporación en el intervalo de tiempo establecido.

En cada caseta se dispuso un extractor de aire conectado a un potenciómetro y, con la ayuda de un cono de caudal (ver figura 4-4), se realizaron mediciones discretas fijando la velocidad del ventilador hasta lograr las tasas de ventilación deseadas de 0,2 [1/h] y 0,5 [1/h].



Figura 4-4: Cono de caudal utilizado para fijar las tasas de ventilación deseadas acorde a los casos de estudio

Para garantizar que la tasa de ventilación no se iba a ver alterada por el efecto del viento, se realizaron unas simulaciones con CONTAM, un programa diseñado por el *National Institute of Standards and Technology* (NIST), destinado al análisis de la ventilación y la calidad de aire en edificación. Previo a las simulaciones, se hicieron ensayos de puerta ventilador (*Blower Door*) (ver figura 4-5), para obtener la estanqueidad al aire de la envolvente de cada caseta, necesario como dato de entrada para hacer las simulaciones. Los resultados del ensayo de puerta ventilador fueron de  $n_{50} = 3,5$  [1/h] (caseta norte) y  $n_{50} = 2,8$  [1/h] (caseta sur). Las simulaciones con CONTAM establecieron que las condiciones de viento no eran de una magnitud tal como para alterar la tasa de ventilación de las estancias, siendo esta última la gobernante.



Figura 4-5: Ensayos de *Blower Door* realizados en las casetas de ensayo

Las condiciones interiores se realizaron mediante cinco sensores de temperatura y humedad relativa en cada estancia (5 sensores OM-EL-WIFI-TH con una precisión de  $\pm 0,3$

°C y  $\pm 2,5\%$  y 5 sensores ALMEMO FHAD 46x con una precisión de  $\pm 0,3$  °C y  $\pm 1,8\%$ ), dispuestos tal y como se muestra en la figura 4-6 y 4-7.

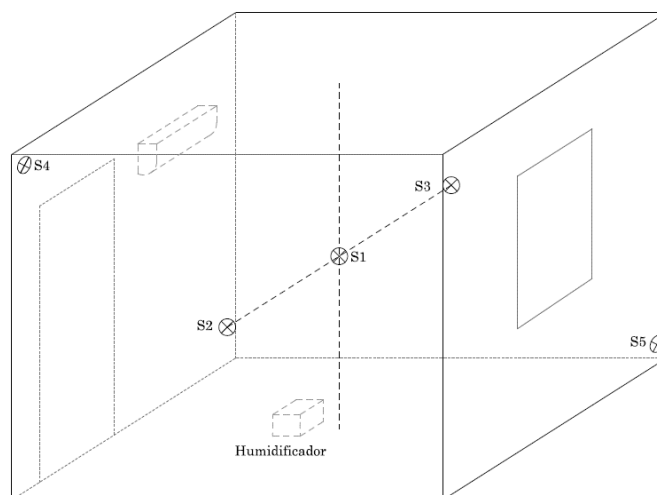


Figura 4-6: Distribución sensores de temperatura y humedad en la sala de ensayo

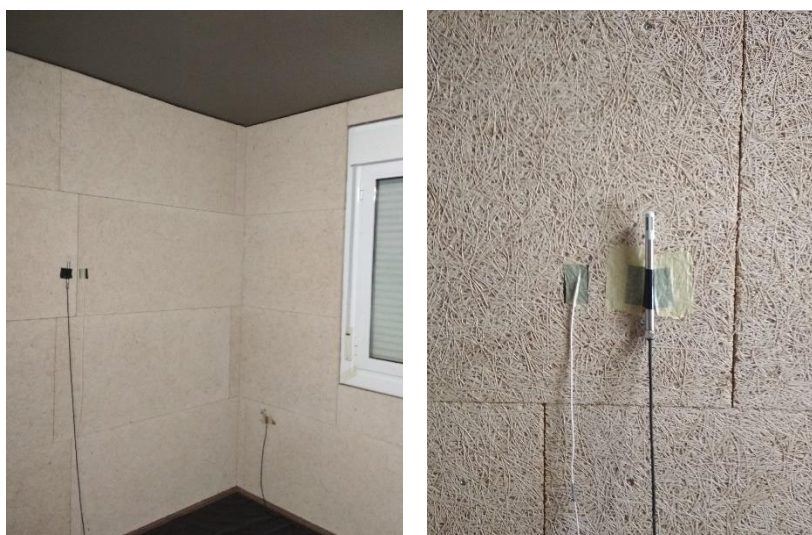


Figura 4-7: Disposición de algunos de los sensores en la caseta revestida con fibra de madera

El MBV de los materiales ensayados contempla varias de las etiquetas de clasificación establecidas por el NORDTEST [20].

Material	MBV [g/(m <sup>2</sup> ·%RH)]	Nivel amortiguación
Pintura impermeable	0,09	Despreciable
Yeso convencional	0,70	Moderado
Sistema aislamiento	0,72	Moderado
Fibra de madera	2,12	Excelente

Tabla 4-3: Clasificación de los materiales ensayados en las casetas del LCCE



El área de exposición de los materiales ensayados es de aproximadamente 27,7 m<sup>2</sup>, para el caso de pintura y yeso convencional, cubriendo todas las superficies excepto el suelo, que fue sellado con una lámina plástica, para evitar la transferencia de humedad entre el aire interior y esa superficie. Eso supone que la superficie que intercambia humedad con el aire representa el casi el 75% del área total disponible de la estancia. En el caso de la fibra de madera y el sistema de aislamiento, el área de exposición se reduce a un valor ligeramente superior a 21 m<sup>2</sup>, en este caso, un poco menos del 60% del área total disponible, ya que la disposición de las planchas de madera y perlita sobre el techo era una tarea difícil, por tanto, también se evitó la transferencia de humedad a través del techo en los casos de ensayo en los que se emplearon estos recubrimientos (ver figura 4-7, izquierda).

Las condiciones climatológicas se han registrado mediante un sensor de temperatura y humedad relativa (OM-EL-USB-2-LCD con una precisión de  $\pm 3\%$  RH,  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ), dispuesto a escasos metros de las instalaciones, con el fin de poder introducir en el modelo las condiciones exteriores reales.

#### **4.3.2. AJUSTES Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA HUMEDAD RELATIVA INTERIOR**

En esta sección se validan los modelos de predicción de humedad relativa desarrollados en el apartado 4.2., que corresponden al modelo EC y modelo EMPD. Estos modelos ya han sido validados a través de otros trabajos, aunque siempre realizando ensayos bajo condiciones controladas y en recintos muy herméticos, sin tener en cuenta diferentes tasas de ventilación. Realizar ensayos de prueba en prototipos de vivienda real, considerando diferentes tasas de ventilación para su posterior validación, era una opción interesante e innovadora, ya que el análisis de los resultados podría revelar si la discrepancia entre estos modelos simplificados y la realidad se podía considerar aceptable en la predicción de la humedad relativa para interiores.

Los ajustes y la validación de los modelos se han realizado mediante dos programas informáticos: Excel, la conocida herramienta de análisis y cálculo de Microsoft y RStudio, un software libre para el análisis estadístico diseñado para trabajar utilizando el lenguaje de programación en R. Mediante Excel se realizó el análisis de ambos modelos, el EC y el EMPD, mientras que con RStudio, sólo se ha realizado el análisis del modelo EC, ya que la implementación del modelo EMPD requería de un tiempo de dedicación añadido al que no se ha podido hacer frente en esta investigación.

Cuando se quiere realizar una validación de un modelo, es necesario que los datos de entrada sean lo más fiables y precisos. Para los casos ensayados, la variable a estimar es la presión parcial de vapor de agua en el interior de recinto (ver ecuación del balance higroscópico 4.25.). En este caso, los datos de entrada referentes a los materiales de construcción dispuestos sobre los acabados de los cerramientos, se toman a partir de las propiedades higroscópicas obtenidas a través de los ensayos realizados en el capítulo 2: Caracterización higroscópica y capítulo 3: Moisture buffering. Los datos de entrada

referentes a los datos climatológicos y a las condiciones interiores de temperatura y humedad relativa se han realizado mediante mediciones continuas en la ubicación de ensayo, medidas tal y como se ha explicado en la sección 4.3.1. de este capítulo, donde se detalla la configuración experimental, los equipos de ensayo utilizados, así como el procedimiento de ensayo seguido para cada caso. De entre todas las variables implícitas en la ecuación del balance higroscópico (ver ecuación 4.25.), la tasa de ventilación es el único parámetro que no se ha podido registrar en continuo durante la ejecución de cada ensayo en los ensayos realizados en las casetas del LCCE en Vitoria-Gasteiz, pero sí en el edificio VLIET de la KU Leuven.

$$\frac{V}{R'_v \cdot T_i} \cdot \frac{\partial p_{vi}}{\partial t} = (p_{ve} - p_{vi}) \cdot \frac{n \cdot V}{3600 \cdot R'_v \cdot T_i} + G_{vp} - G_{buf} \quad (4.26.)$$

Después de realizar mediciones discretas con el cono de caudal y de realizar las simulaciones con CONTAM, se esperaba que este valor se mantuviera más o menos estable en el tiempo. Posteriormente, se ha comprobado que la tasa de ventilación no se ha podido mantener dentro de unos valores estables y esto ha sido fruto de varios motivos. Las causas de la alteración de este parámetro han podido ser varias, de entre las cuales se puede destacar, en primer lugar, la calidad y fiabilidad de los archivos meteorológicos incluidos en el software de simulación CONTAM. Algunos investigadores ya han demostrado el impacto que estos tienen sobre los resultados de simulación, por ejemplo, en simulaciones energéticas [67], por lo que puede que las simulaciones con CONTAM, donde los datos meteorológicos de entrada se toman con un intervalo de tiempo de hora a hora, no sean del todo fiables y el efecto del viento haya podido alterar la tasa de ventilación en algún momento durante el ensayo. Otra fuente de error podría ser la imprecisión de los potenciómetros y de los equipos de extracción utilizados. Siendo el tiempo de ensayo de varios días, puede haberse visto alterado su funcionamiento en algún momento durante la ejecución de los ensayos, reflejándose en cambios en la tasa de ventilación de las casetas.

Posterior a los ensayos, se ha podido verificar mediante ensayos en otros recintos, que la velocidad del aire dentro de un conducto de ventilación puede tener unas desviaciones significantes, por lo que considerar en los modelos que la tasa de ventilación ha sido constante, es erróneo.

Las mediciones de comprobación se realizaron en una habitación de ensayo del edificio VLIET, situado en Lovaina, Bélgica, perteneciente al Departamento de Física de los Edificios de la KU Leuven. Se dispuso un anemómetro en un conducto de ventilación (ver figura 4-8) que, conectado a un registrador de datos (modelo Grant Squirrel SQ2020), se obtuvo la evolución de la velocidad del aire en el tiempo en el interior del conducto (ver figura 4-9).



Figura 4-8: Anemómetro dentro de un conducto de ventilación con ventilador conectado a un potenciómetro para regular el caudal de ventilación

La figura 4-9 muestra que, aunque el potenciómetro se fije a una potencia determinada, la velocidad en el interior del conducto se ve alterada, llegando a tener desviaciones considerables (ver tabla 4-4).

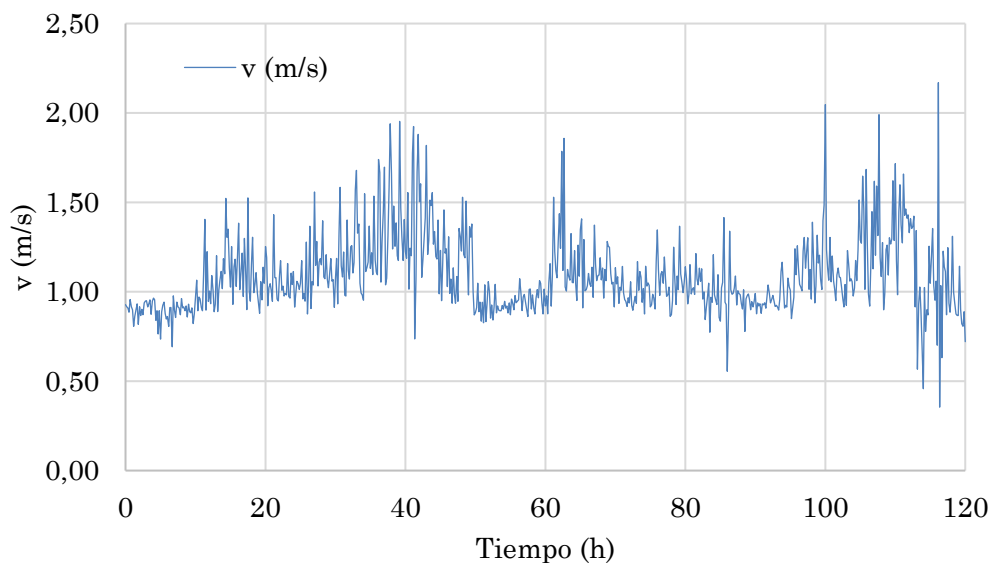


Figura 4-9: Ejemplo de variabilidad de la velocidad en el conducto de extracción correspondiente al ensayo 1 (tabla 4-4).

Ensayo	Velocidad media [m/s]	Tasa de ventilación media [1/h]
1	1,09±0,22	0,88±0,14
2	1,08±0,37	0,88±0,24

Tabla 4-4: Velocidad media registrada en el conducto y tasa de ventilación asociada junto a sus desviaciones en ensayos de comprobación durante 5 días de ensayo



Debido a la inexactitud por conocer los caudales de ventilación a través de los conductos de ventilación en tiempo real durante los ensayos realizados en las casetas del LCCE, el ajuste para cada modelo se realiza tomando la tasa de ventilación,  $n$  [1/h], como un valor variable.

El ajuste con Excel para cada modelo se ha realizado mediante la herramienta *solver*, que ha permitido estimar la tasa de ventilación por ciclos, para ajustar la predicción de la humedad relativa tomando como referencia las mediciones tomadas en los ensayos. Mediante *solver*, se aplica la técnica de mínimo error cuadrático para conseguir que la humedad relativa predicha se ajuste a la humedad relativa medida, haciendo de la tasa de ventilación un parámetro variable cada 24 horas. Los valores presentados en las figuras de ajuste corresponden al valor promedio obtenido a partir de las diferentes tasas de ventilación para cada ciclo de ensayo. Junto a estos valores, se presenta la desviación obtenida a través de estos valores. Este proceso se repite para ambos modelos analizados.

En el caso del ajuste mediante RStudio, se ha implementado un proceso de Wiener. En el proceso se aplican modelos de estado estocástico de tiempo continuo para identificar la tasa de ventilación en base a la presión parcial de vapor de agua de referencia en el interior de la estancia medida. Los procesos de Wiener son de gran interés para realizar este tipo de ajustes ya que son muy útiles para analizar el nivel de confianza de los valores estimados mediante el análisis de residuales que debiera parecerse al ruido blanco. Además, este tipo de métodos de calibración de modelos permite modelizar el ruido de, por ejemplo, errores instrumentales y obtener mejores ajustes entre las predicciones del modelo y los datos medidos.

La herramienta implementada en RStudio para el ajuste del modelo y la estimación de la tasa de ventilación se conoce como CTSM-R (*Continuous Time Stochastic Modelling for R*). CTSM-R es una herramienta desarrollada en la *DTU Compute* de Dinamarca (anterior *DTU Informatics*) y aunque CTSM-R se puede utilizar para cualquier tipo de modelado, en el sector de la edificación, se está aplicando para la identificación de parámetros en el modelado de simulaciones dinámicas de calor en edificación [68,69] y para la identificación de los modelos que proporcionan simulaciones con una mayor exactitud y describen mejor el fenómeno de transferencia de calor en estado dinámico [70].

En el ajuste del modelo se ha empleado el método conocido como caja gris, que resuelve ecuaciones diferenciales estocásticas de tiempo continuo a través de valores tomados de forma discreta. Este método ya se ha definido como un modelo de precisión en el estudio de las propiedades térmicas de los edificios [67,68], pero aún no se han encontrado ejemplos implementados en la transferencia de humedad en edificios, lo que implica que, en este trabajo se introduce una nueva técnica de modelado para la transferencia de humedad en edificación.

En este caso, se aplica el modelo EC a través de la siguiente ecuación diferencial (ver ecuación 4.26.) que incluye un nuevo sumando,  $\sigma \partial \omega$ , con respecto a la ecuación del modelo EC presentada en la sección 4.2.1. (ecuación 4.15.), necesario para aplicar el modelo estocástico de tiempo continuo.

$$\partial p_{vi} = \frac{(p_{ve} - p_{vi}) \cdot \frac{n \cdot V}{3600 \cdot R'_v \cdot T_i} + G_{vp}}{\frac{V}{R'_v \cdot T_i} + \frac{\sum A \cdot MBV}{p_{v,sat}}} \cdot \partial t + \sigma \cdot \partial \omega \quad (4.27.)$$

donde  $p_{ve}$  [Pa] es la presión parcial de vapor del aire exterior,  $p_{vi}$  [Pa] es la presión parcial de vapor del aire interior de la estancia,  $n$  [1/h] es la tasa de ventilación, que se considerará fija para todo el periodo de ensayo,  $V$  [m<sup>3</sup>] es el volumen del recinto,  $R'_v$  [461,89 J/kg · K] es la constante de los gases para el vapor de agua,  $T_i$  [K] es la temperatura interior de la estancia,  $G_{vp}$  [kg/s] es la tasa de producción de vapor en el interior del recinto,  $A$  [m<sup>2</sup>] es el área de exposición de los materiales en contacto con el aire,  $MBV$  [kg/(m<sup>2</sup> · %RH)] el *Moisture Buffer Value* de cada material y, finalmente,  $\{\omega_t\}$  y  $\sigma^2$  son el proceso estándar de Wiener y la varianza del error de medición, respectivamente.

A continuación, se presentan las mediciones y ajustes para cada ensayo ejecutado. Para el caso de la pintura impermeable no se ha podido realizar el ajuste del modelo EMPD, ya que no se tienen datos de la capacidad de humedad y la permeabilidad al vapor de agua del acabado superficial, pero si se han podido hacer ensayos de MBV y, por tanto, implementar el modelo EC.

En cada gráfico se presenta la humedad relativa medida y la humedad relativa predicha para cada modelo evaluado. Los valores presentados en la figura corresponden a la tasa de ventilación (el valor promedio para los ajustes con Excel y el valor estimado para el ajuste con RStudio), junto con la desviación obtenida para cada modelo.

Para cada simulación se ha calculado la bondad de ajuste a través de la prueba del chi-cuadrado,  $\chi^2$ , acorde a la ecuación 4.27.

$$\chi^2 = \sum \frac{(y_i - x_i)^2}{y_i} \quad (4.28.)$$

donde  $y_i$  es el valor observado,  $x_i$  es el valor estimado. Cuando menor sea el valor de chi-cuadrado, mejor será el ajuste realizado.

Para cada caso de ensayo se presenta un gráfico donde se representa la humedad relativa medida y los ajustes realizados. Para el caso de CTSM-R, además, se presenta el periodograma del acumulado de los residuales, que aporta información acerca de si el modelado de ajuste representa el fenómeno de transferencia de humedad. En este caso, el ajuste realizado mediante CTSM-R se considerará bueno, cuando el resultado quede dentro de las dos bandas azules de trazos, lo que indicará que los valores estimados representan el 95% de probabilidad.

### 4.3.2.1. RESULTADOS DE LOS AJUSTES DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA HUMEDAD RELATIVA INTERIOR

ESTACIÓN: invierno  
CASO: oficina

MATERIAL: pintura impermeable  
TASA DE VENTILACIÓN: 0,2 1/h

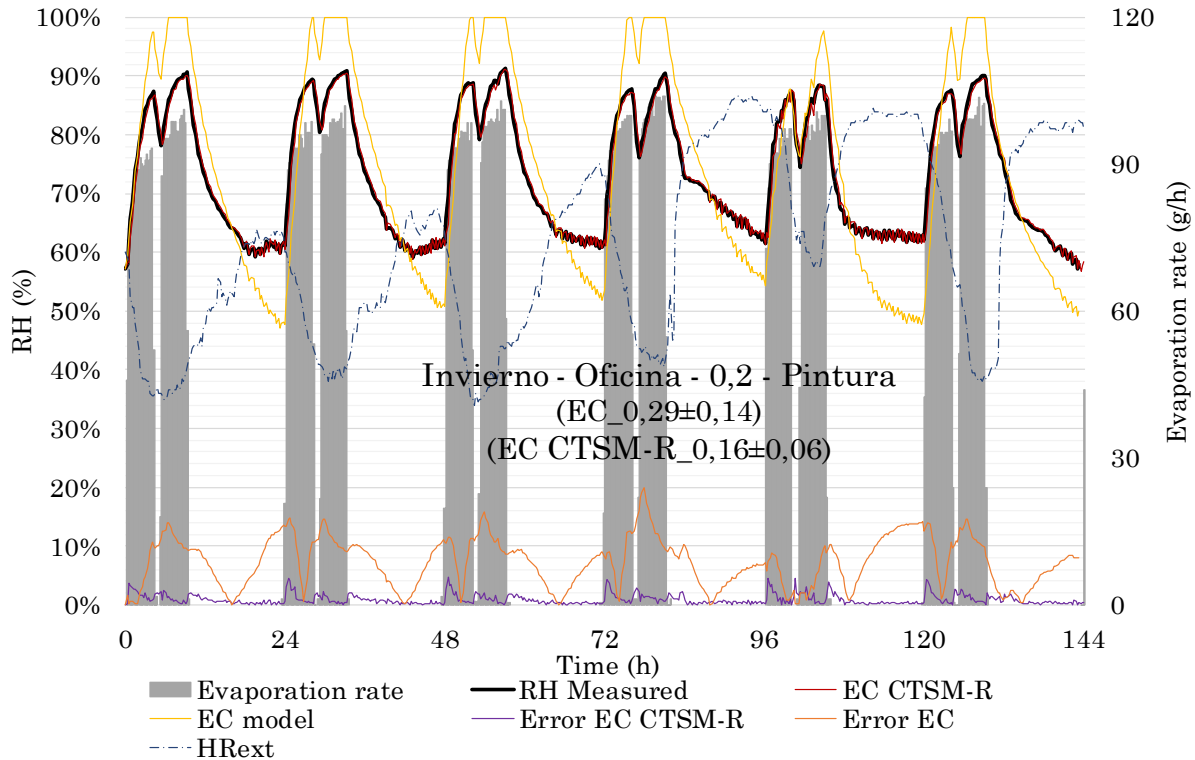


Figura 4-10: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	5,73
Modelo EC (CTSM-R)	1,16E-01

Tabla 4-5: Bondad de ajuste para el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,29±0,14
EC (CTSM-R)	0,16±0,06

Tabla 4-6: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

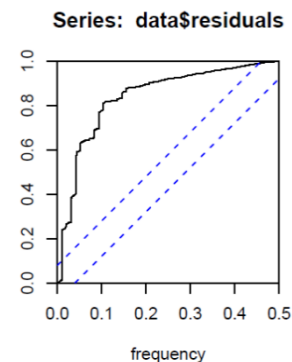


Figura 4-11: Periodograma acumulado de los residuos del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN: invierno**  
**CASO: oficina**

**MATERIAL: pintura impermeable**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,5 1/h**

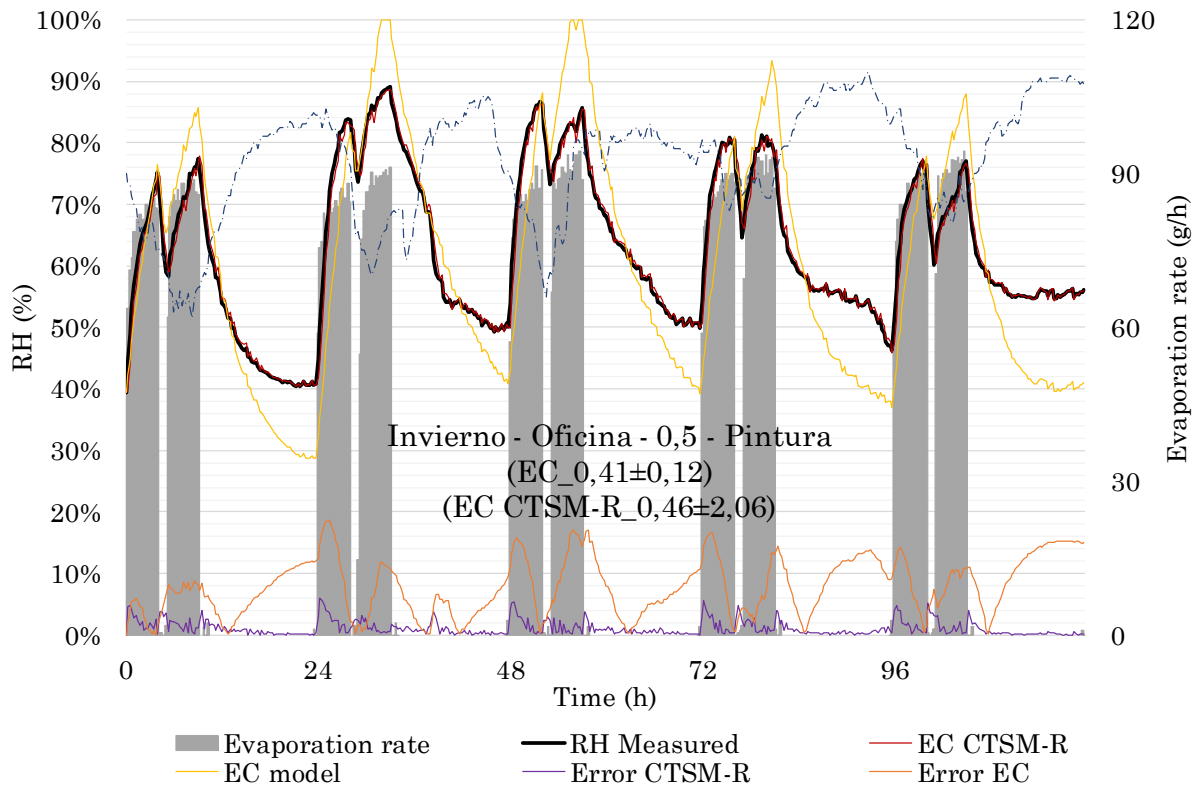


Figura 4-12: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	7,97
Modelo EC (CTSM-R)	2,00E-01

Tabla 4-7: Bondad de ajuste para el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,41±0,12
EC (CTSM-R)	0,46±2,06

Tabla 4-8: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

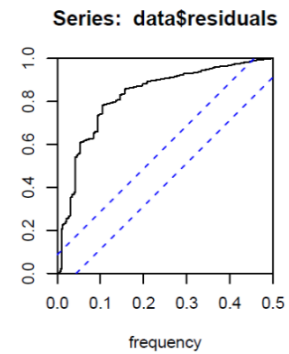


Figura 4-13: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN: invierno**  
**CASO: dormitorio**

**MATERIAL: pintura impermeable**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,2 1/h**

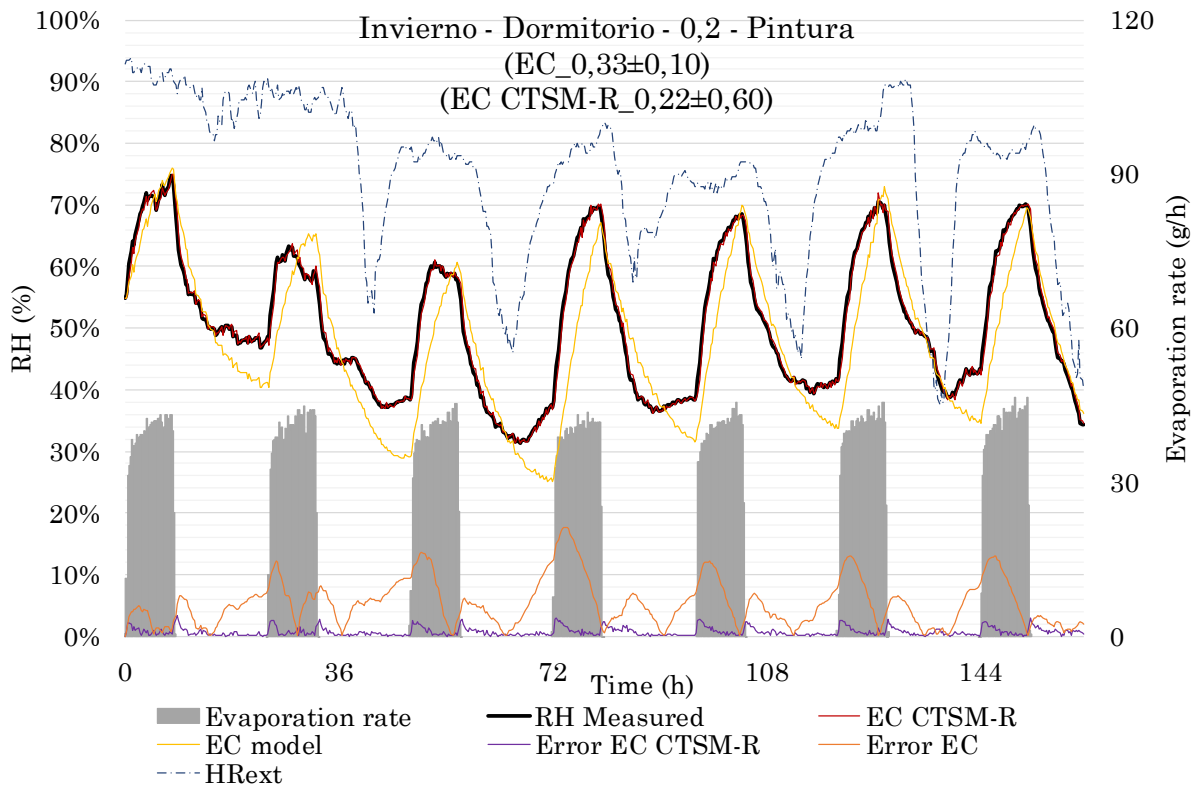


Figura 4-14: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	6,76
Modelo EC (CTSM-R)	1,05E-01

Tabla 4-9: Bondad de ajuste para el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,33±0,10
EC (CTSM-R)	0,22±0,60

Tabla 4-10: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

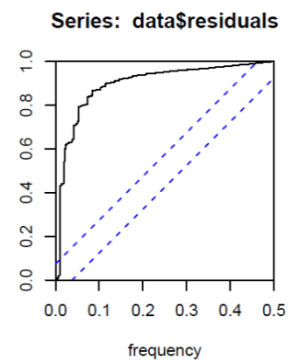


Figura 4-15: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN: invierno**  
**CASO: dormitorio**

**MATERIAL: pintura impermeable**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,5 1/h**

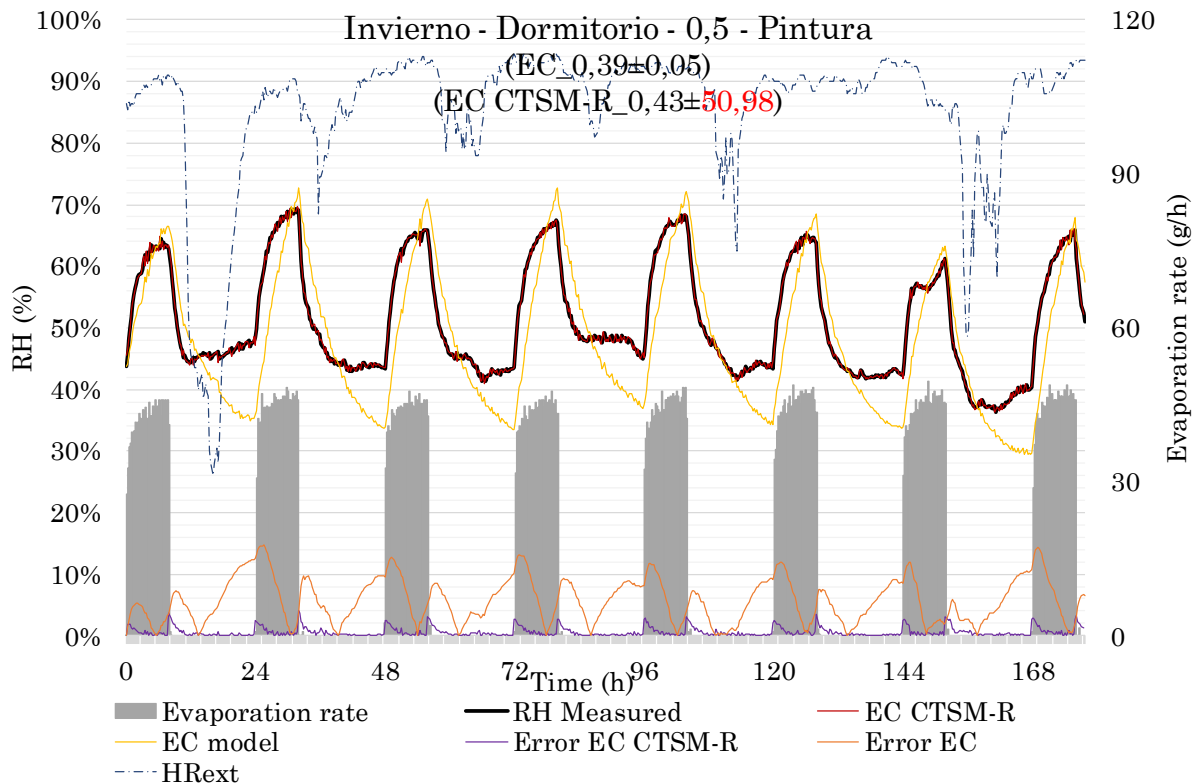


Figura 4-16: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	7,85
Modelo EC (CTSM-R)	1,10E-01

Tabla 4-11: Bondad de ajuste para el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,39±0,05
EC (CTSM-R)	0,43±50,98

Tabla 4-12: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

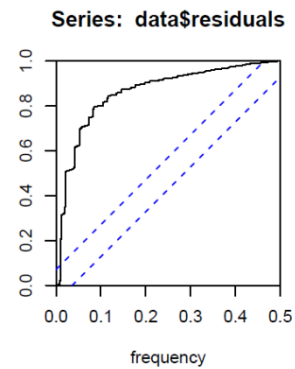


Figura 4-17: Periodograma acumulado de los residuos del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN: invierno**  
**CASO: oficina**

**MATERIAL: yeso**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,2 1/h**

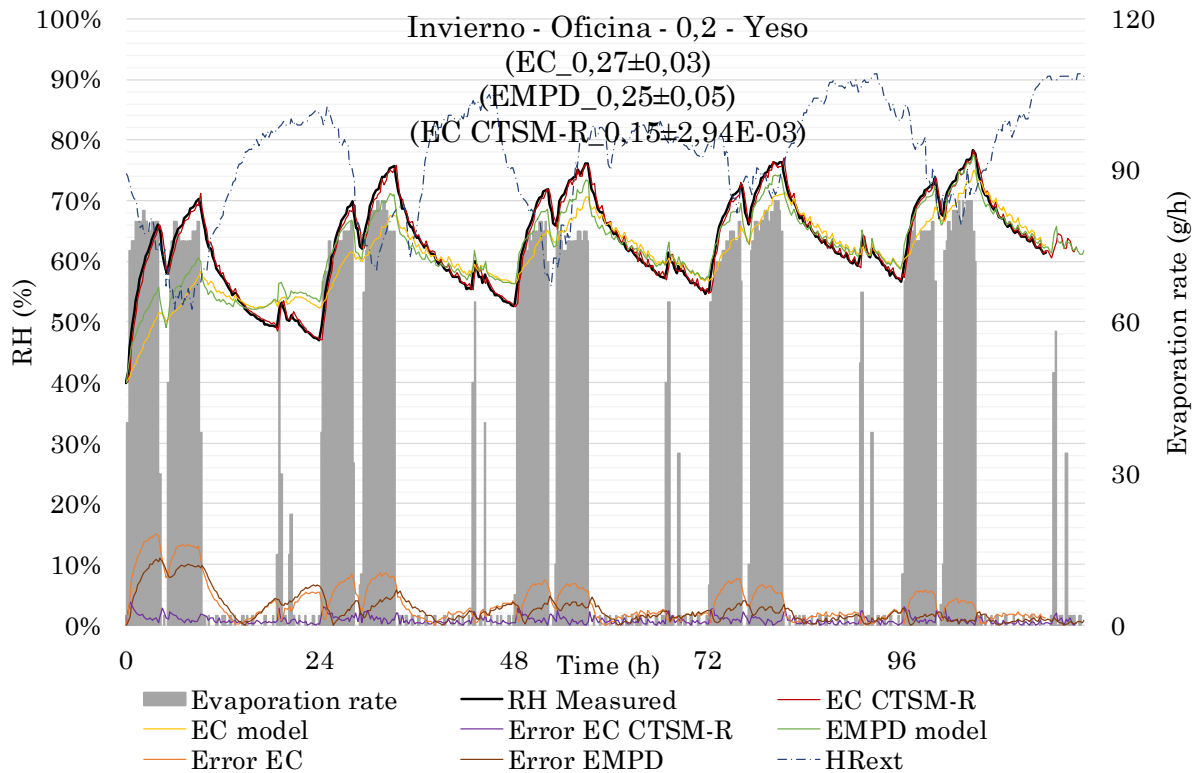


Figura 4-18: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	2,05
Modelo EMPD	1,03
Modelo EC (CTSM-R)	8,33E-02

Tabla 4-13: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,27±0,03
EMPD	0,25±0,05
EC (CTSM-R)	0,15±2,94E-03

Tabla 4-14: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

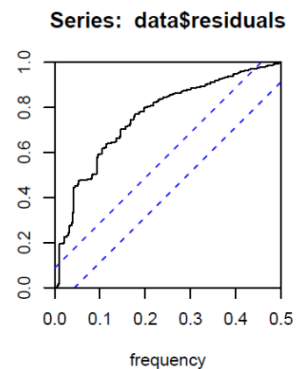


Figura 4-19: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN: invierno**  
**CASO: oficina**

**MATERIAL: yeso**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,5 1/h**

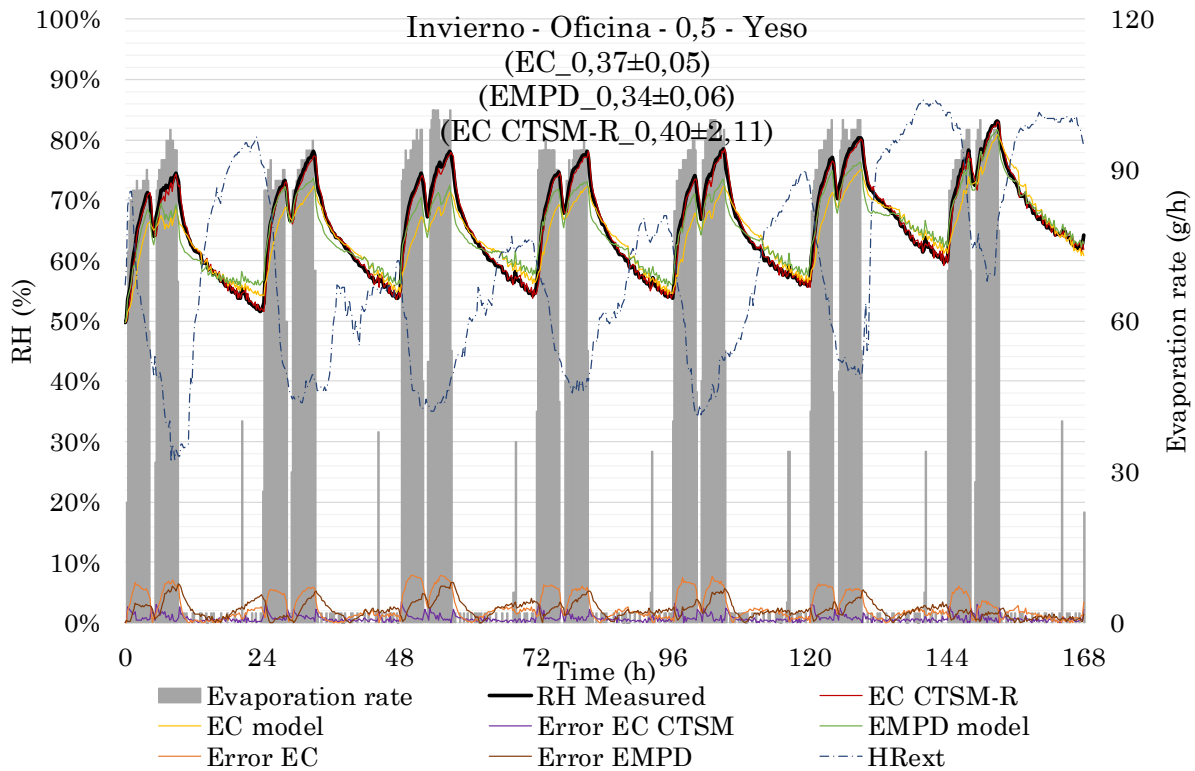


Figura 4-20: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	1,19
Modelo EMPD	6,86E-01
Modelo EC (CTSM-R)	9,06E-02

Tabla 4-15: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,37±0,05
EMPD	0,34±0,06
EC (CTSM-R)	0,40±2,11

Tabla 4-16: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

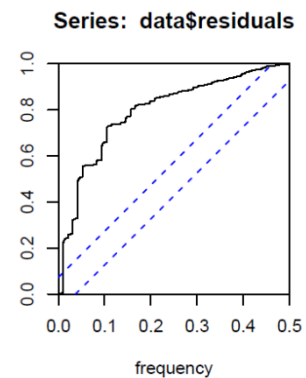


Figura 4-21: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R



**ESTACIÓN: invierno**  
**CASO: dormitorio**

**MATERIAL: yeso**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,2 1/h**

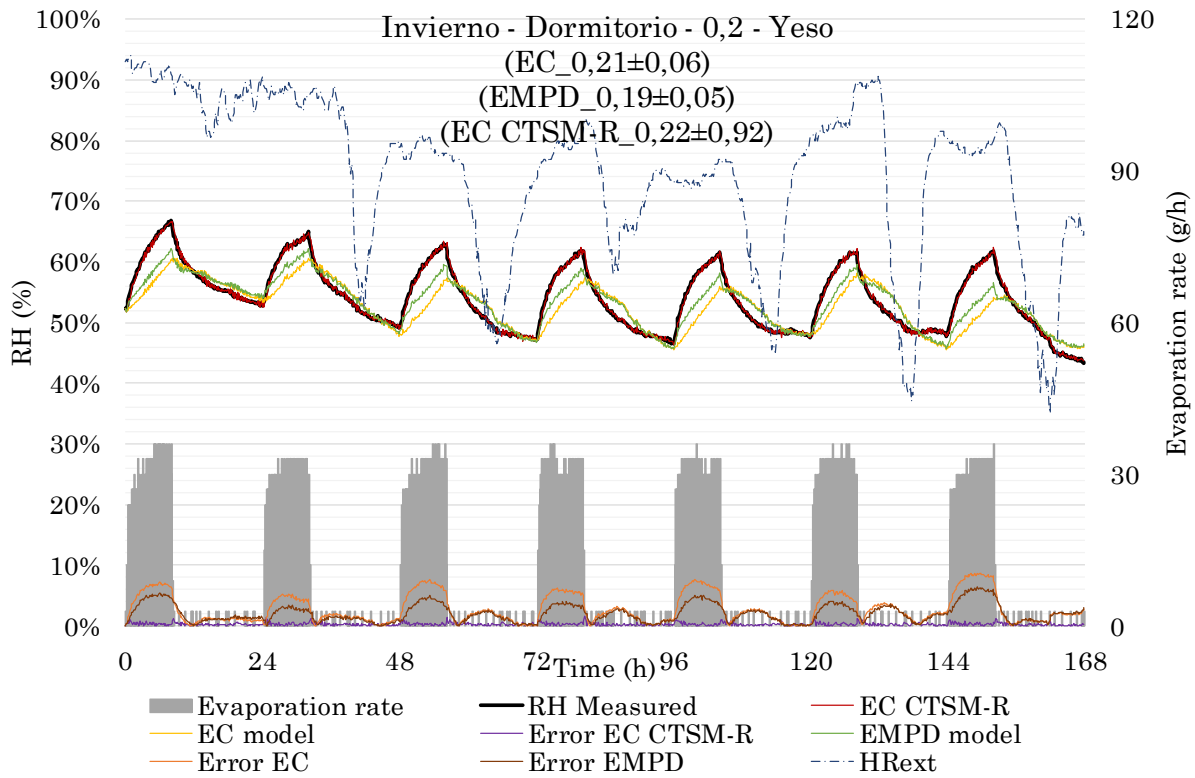


Figura 4-22: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	2,61
Modelo EMPD	1,22
Modelo EC (CTSM-R)	2,50E-02

Tabla 4-17: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,21±0,06
EMPD	0,19±0,05
EC (CTSM-R)	0,22±0,92

Tabla 4-18: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

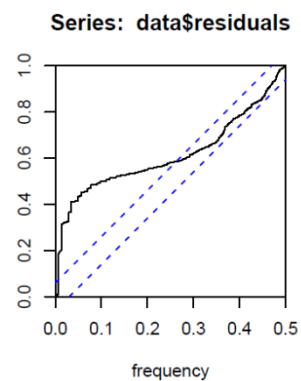


Figura 4-23: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN:** invierno  
**CASO:** dormitorio

**MATERIAL:** yeso  
**TASA DE VENTILACIÓN:** 0,5 1/h

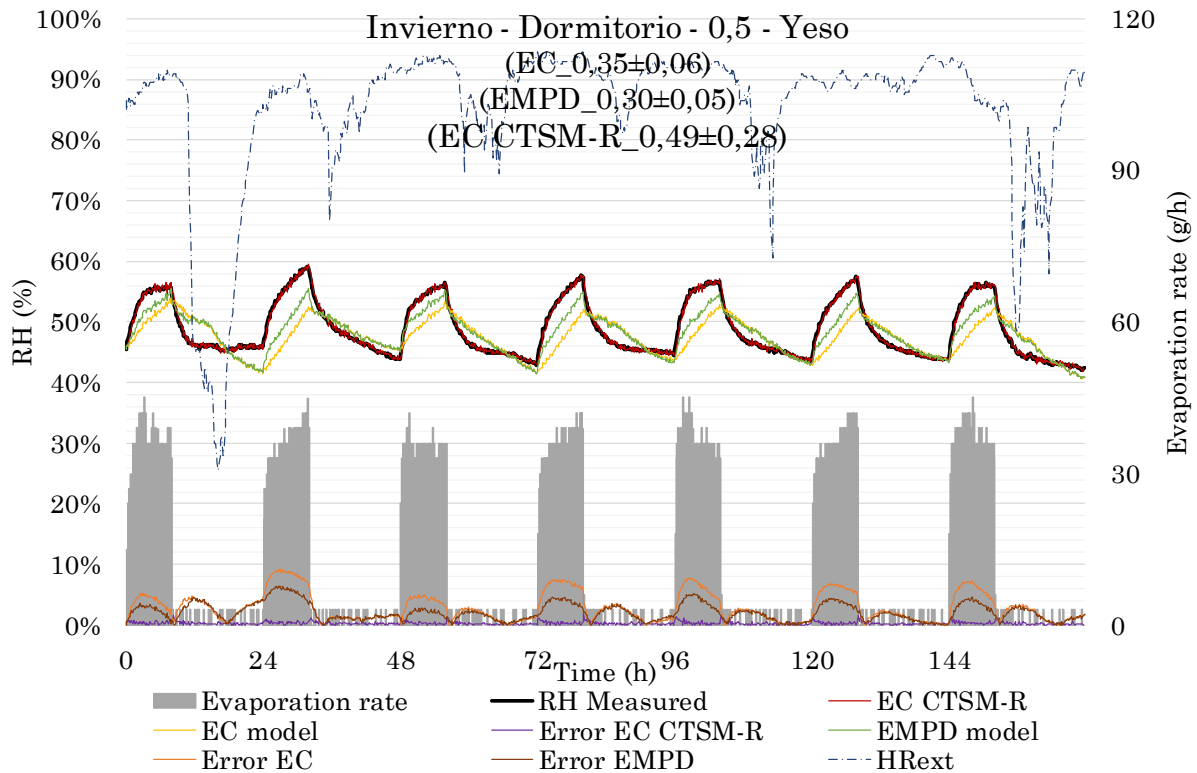


Figura 4-24: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	2,98
Modelo EMPD	1,31
Modelo EC (CTSM-R)	2,85E-02

Tabla 4-19: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,35±0,06
EMPD	0,30±0,05
EC (CTSM-R)	0,49±0,28

Tabla 4-20: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

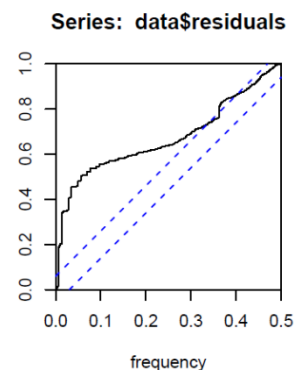


Figura 4-25: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN: invierno**  
**CASO: oficina**

**MATERIAL: fibra de madera**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,2 1/h**

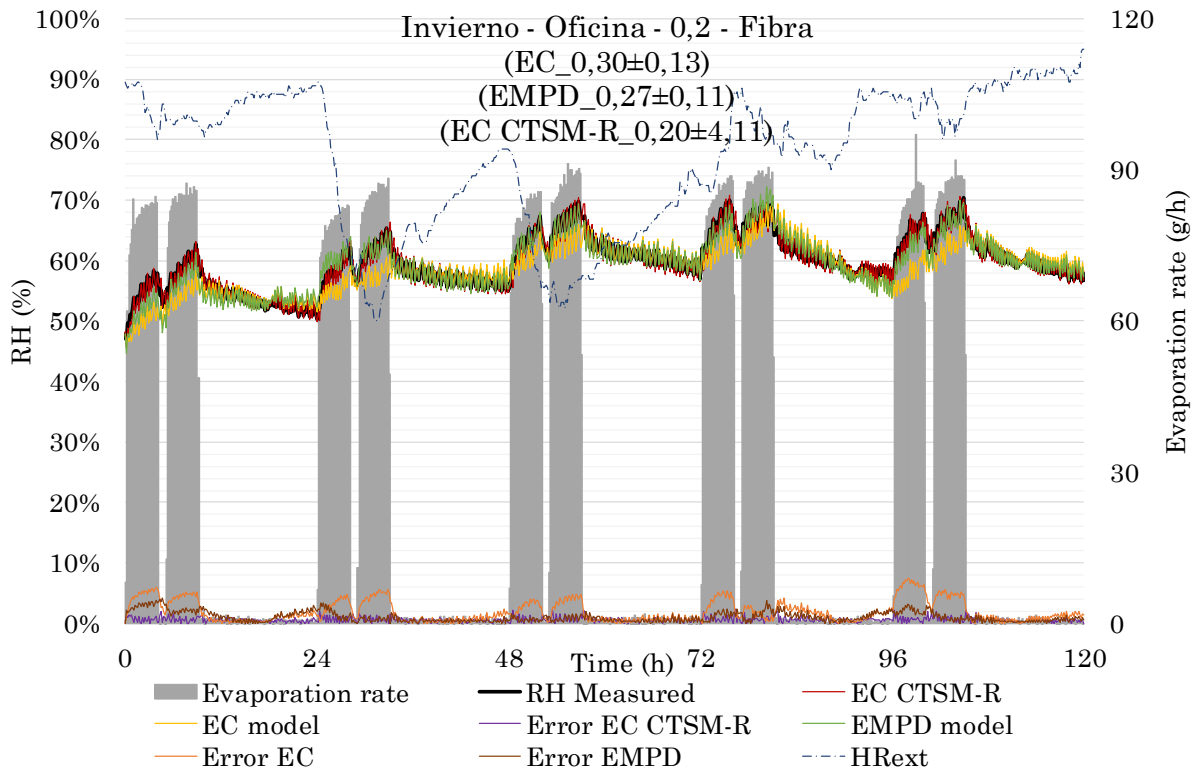


Figura 4-26: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	8,88E-01
Modelo EMPD	2,30E-01
Modelo EC (CTSM-R)	6,84E-02

Tabla 4-21: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,30±0,13
EMPD	0,27±0,11
EC (CTSM-R)	0,20±4,11

Tabla 4-22: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

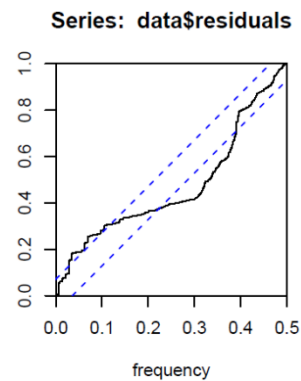


Figura 4-27: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN:** invierno  
**CASO:** oficina

**MATERIAL:** fibra de madera  
**TASA DE VENTILACIÓN:** 0,5 1/h

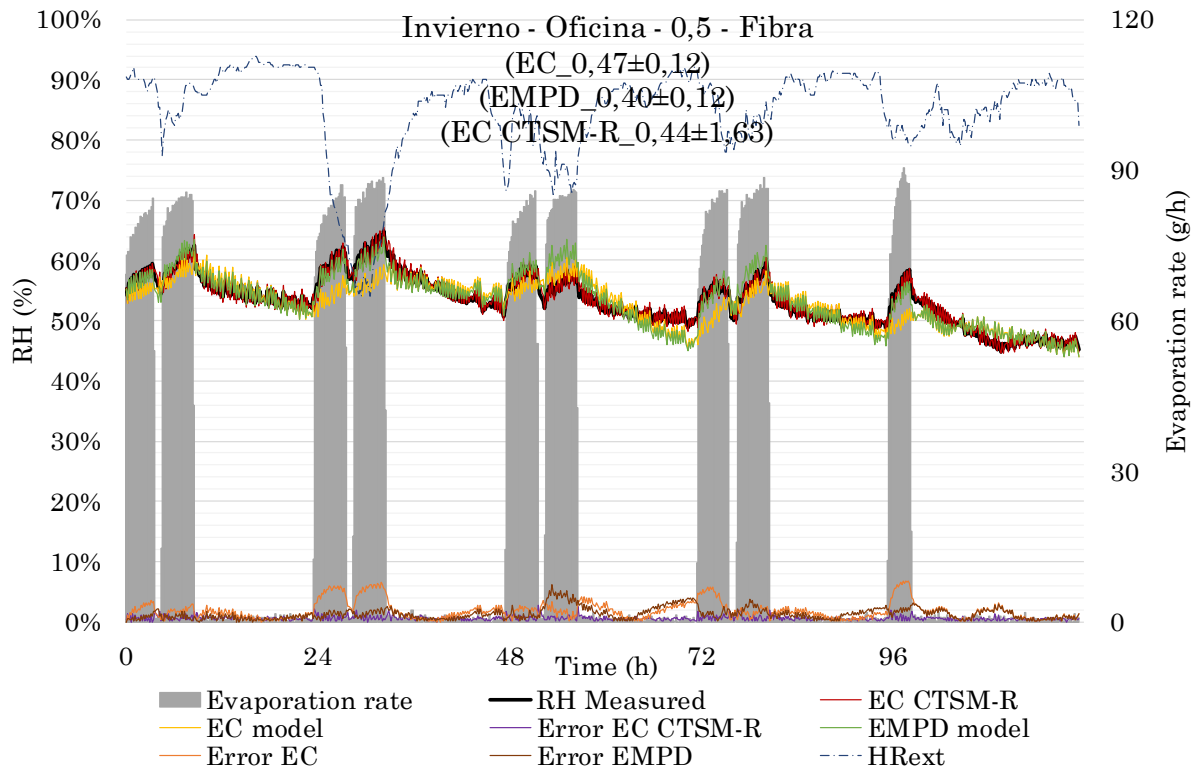


Figura 4-28: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	7,84E-01
Modelo EMPD	3,69E-01
Modelo EC (CTSM-R)	6,23E-02

Tabla 4-23: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,47±0,12
EMPD	0,40±0,12
EC (CTSM-R)	0,44±1,63

Tabla 4-24: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

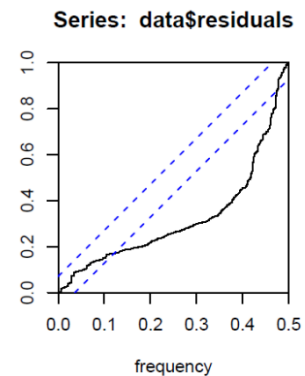


Figura 4-29: Periodograma acumulado de los residuos del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN:** invierno  
**CASO:** dormitorio

**MATERIAL:** fibra de madera  
**TASA DE VENTILACIÓN:** 0,2 1/h

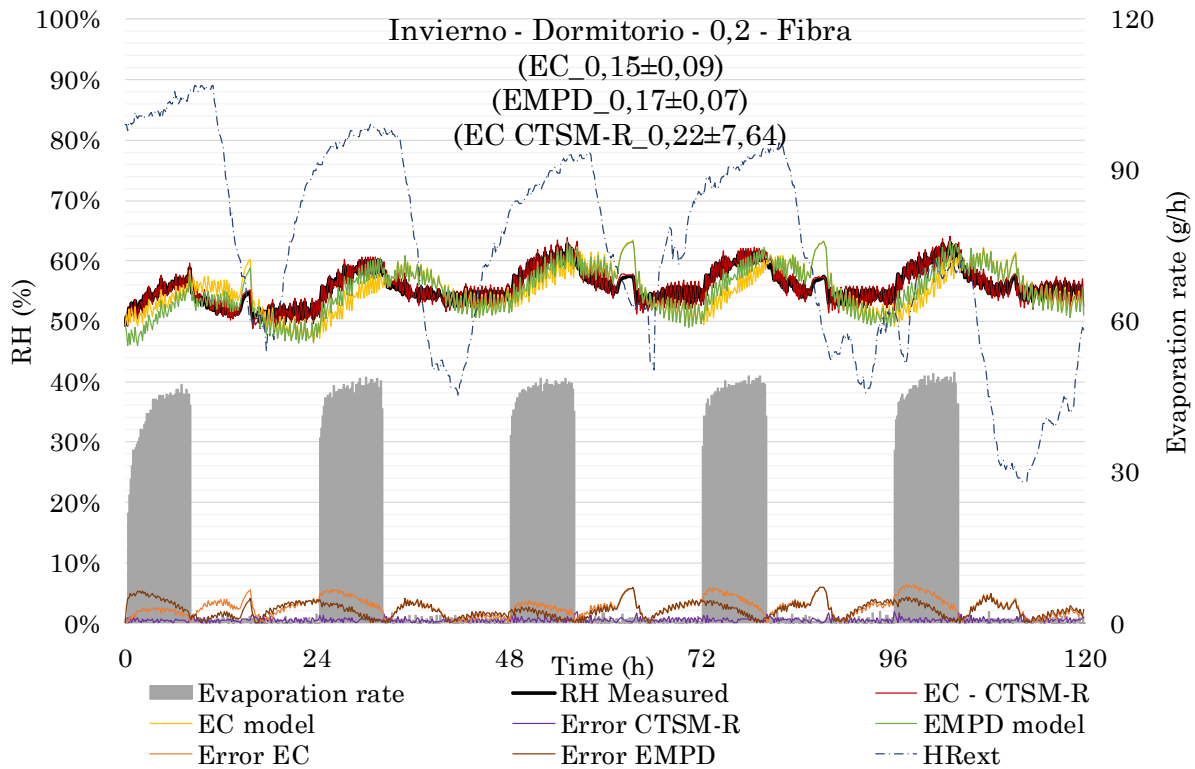


Figura 4-30: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	1,24
Modelo EMPD	8,96E-01
Modelo EC (CTSM-R)	4,58E-02

Tabla 4-25: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,15±0,09
EMPD	0,17±0,07
EC (CTSM-R)	0,22±7,64

Tabla 4-26: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

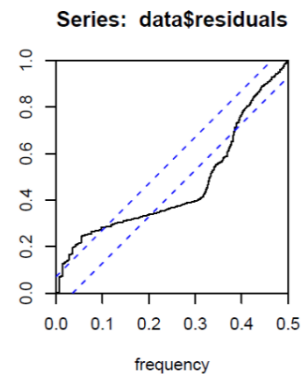


Figura 4-31: Periodograma acumulado de los residuos del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN:** invierno  
**CASO:** dormitorio

**MATERIAL:** fibra de madera  
**TASA DE VENTILACIÓN:** 0,5 1/h

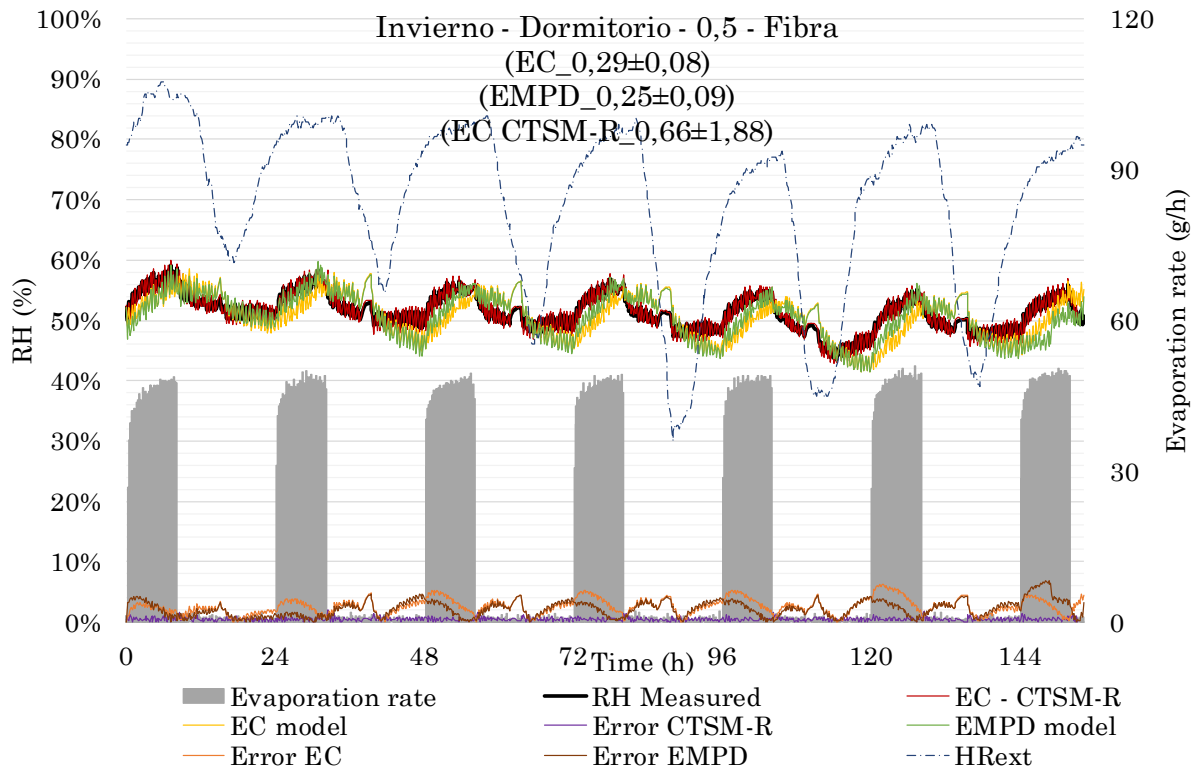


Figura 4-32: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	1,60
Modelo EMPD	1,27
Modelo EC (CTSM-R)	5,40E-02

Tabla 4-27: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,29±0,08
EMPD	0,25±0,09
EC (CTSM-R)	0,66±1,88

Tabla 4-28: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

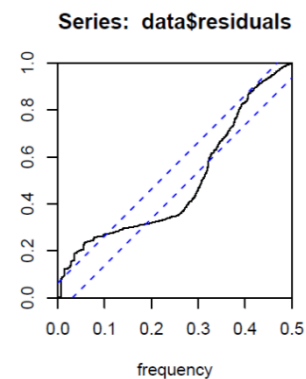


Figura 4-33: Periodograma acumulado de los residuos del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN: invierno**  
**CASO: oficina**

**MATERIAL: sistema aislamiento**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,2 1/h**

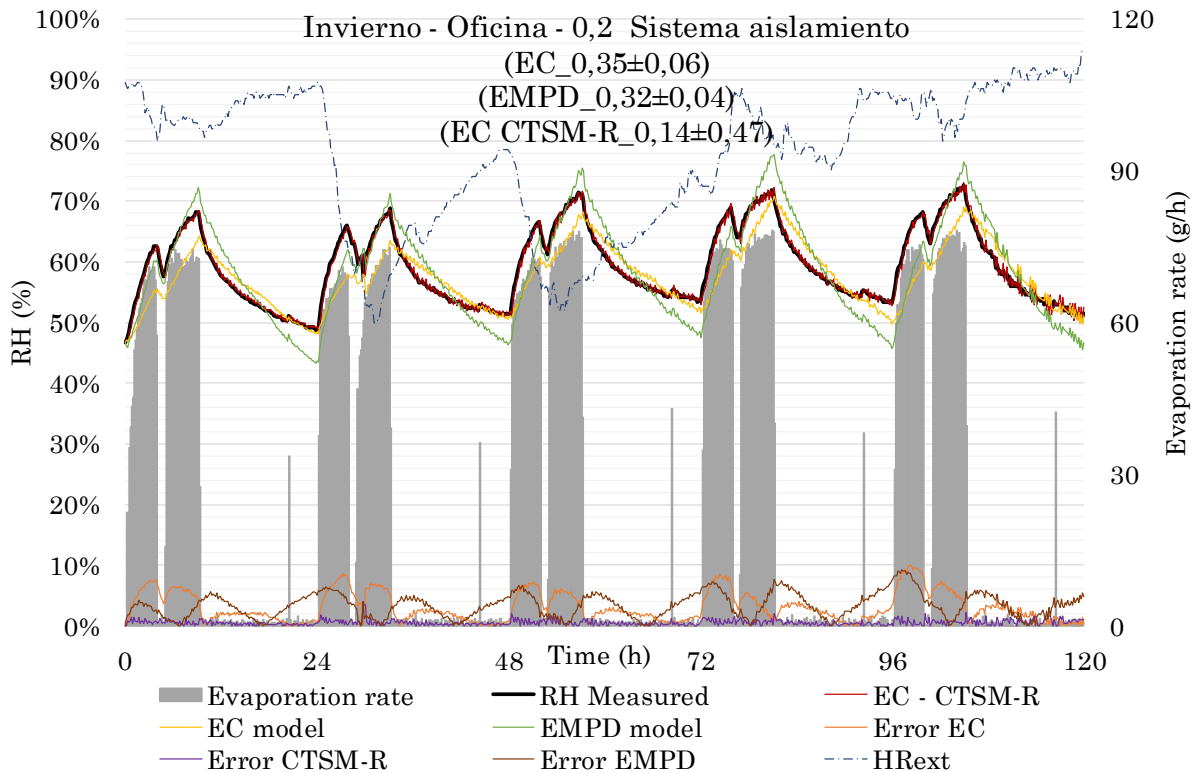


Figura 4-34: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	1,95
Modelo EMPD	1,98
Modelo EC (CTSM-R)	6,10E-02

Tabla 4-29: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,35±0,06
EMPD	0,32±0,04
EC (CTSM-R)	0,14±0,47

Tabla 4-30: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

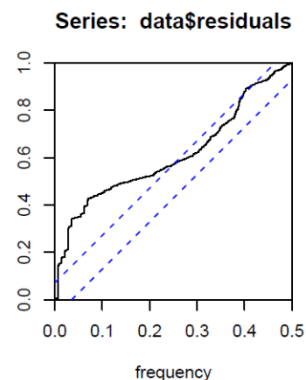


Figura 4-35: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN:** invierno  
**CASO:** oficina

**MATERIAL:** sistema aislamiento  
**TASA DE VENTILACIÓN:** 0,5 1/h

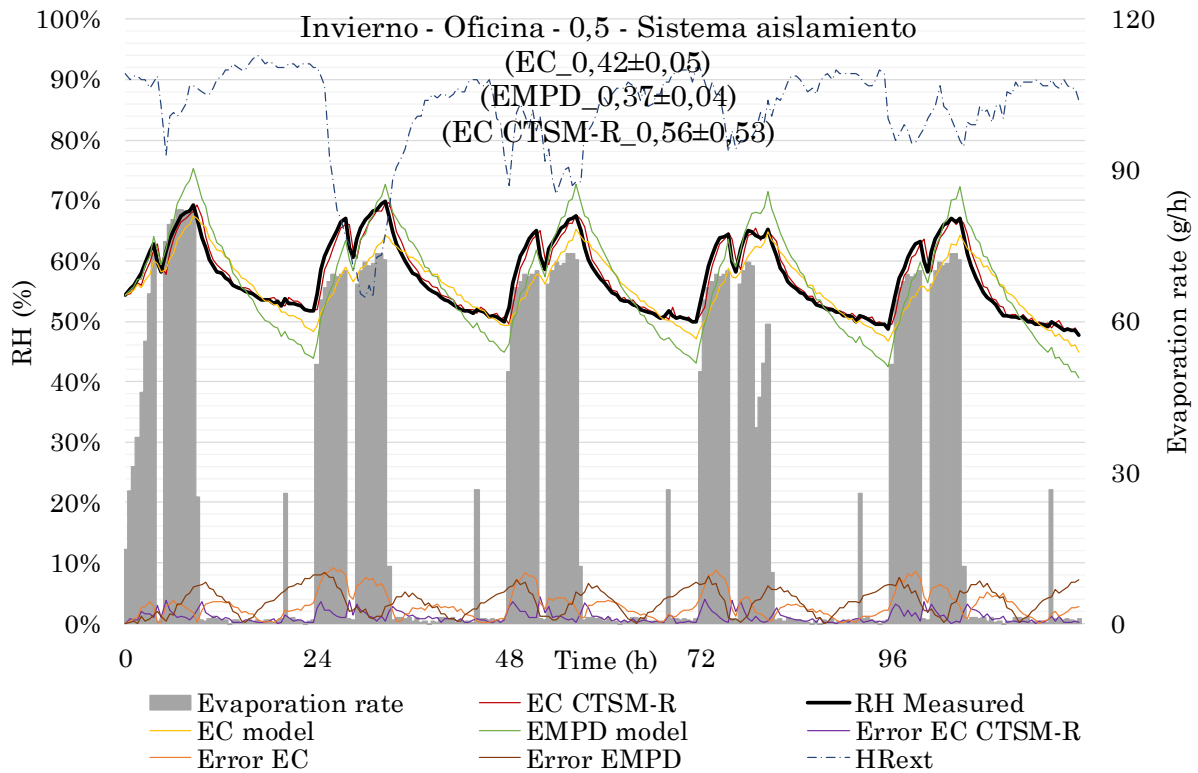


Figura 4-36: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	6,20E-01
Modelo EMPD	8,30E-01
Modelo EC (CTSM-R)	8,21E-02

Tabla 4-31: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,42±0,05
EMPD	0,37±0,04
EC (CTSM-R)	0,56±0,53

Tabla 4-32: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

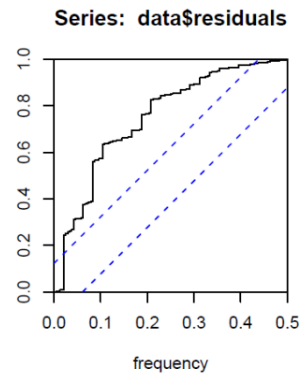


Figura 4-37: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R



**ESTACIÓN: invierno**  
**CASO: dormitorio**

**MATERIAL: sistema aislamiento**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,2 1/h**

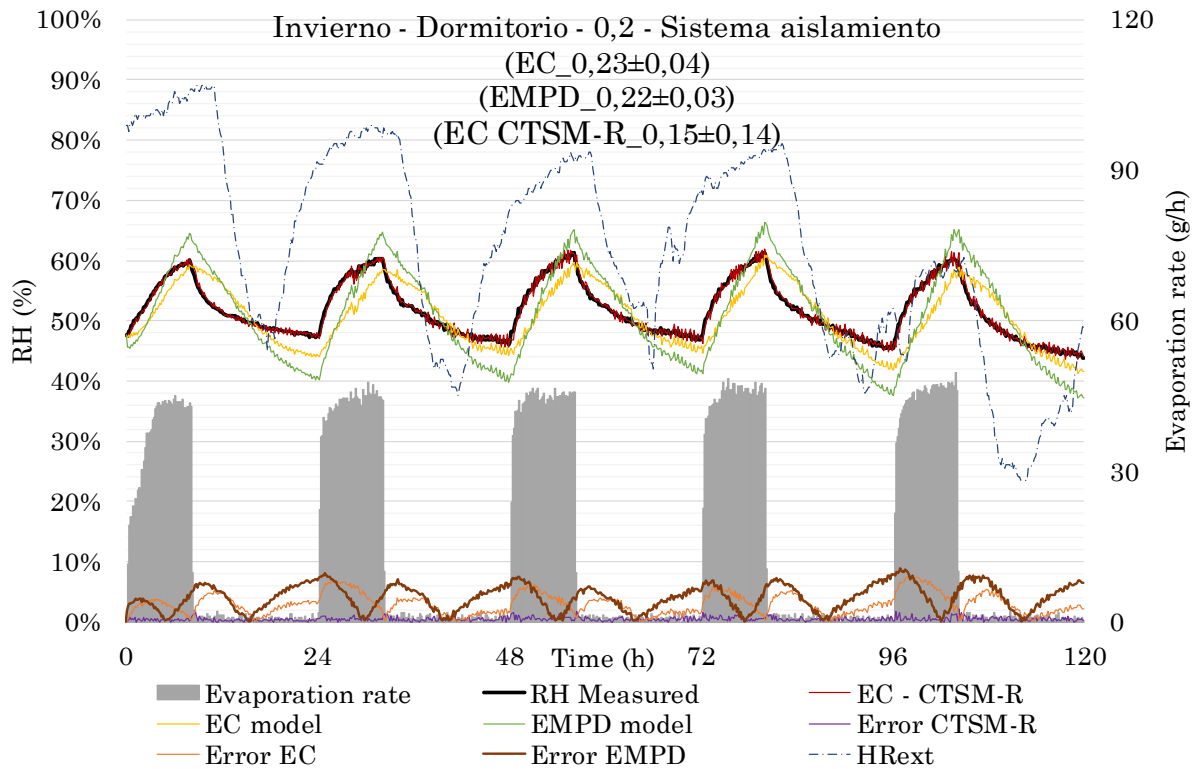


Figura 4-38: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	1,70
Modelo EMPD	3,21
Modelo EC (CTSM-R)	4,03E-02

Tabla 4-33: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,23±0,04
EMPD	0,22±0,03
EC (CTSM-R)	0,15±0,14

Tabla 4-34: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

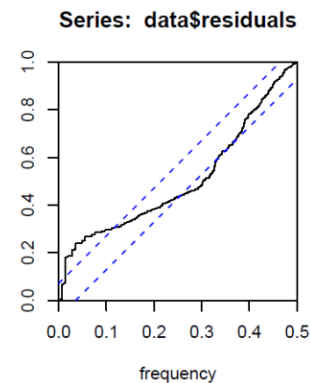


Figura 4-39: Periodograma acumulado de los residuos del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN:** invierno  
**CASO:** dormitorio

**MATERIAL:** sistema aislamiento  
**TASA DE VENTILACIÓN:** 0,5 1/h

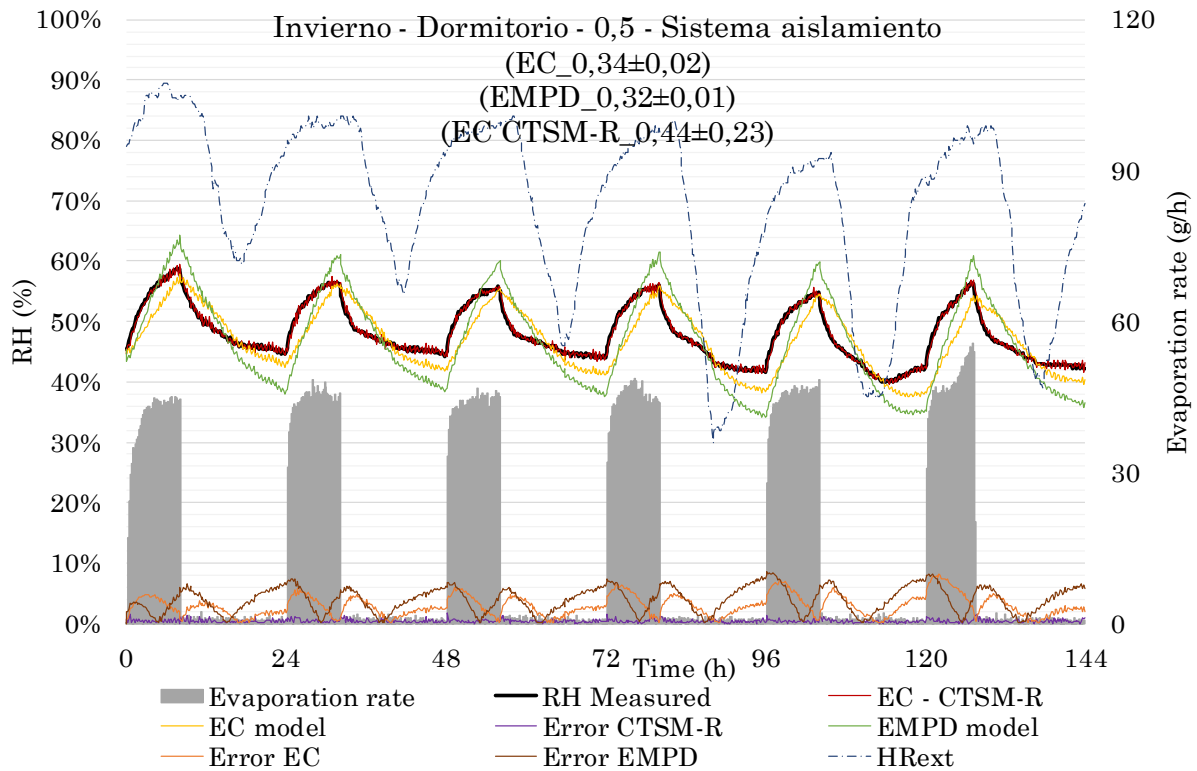


Figura 4-40: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	2,17
Modelo EMPD	3,97
Modelo EC (CTSM-R)	3,75E-02

Tabla 4-35: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,34±0,02
EMPD	0,32±0,01
EC (CTSM-R)	0,44±0,23

Tabla 4-36: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

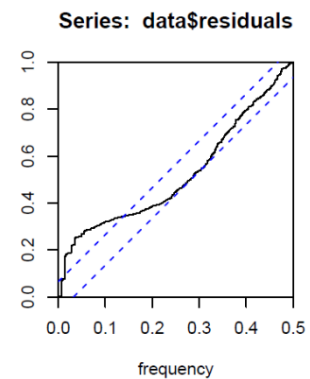


Figura 4-41: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN: verano**  
**CASO: oficina**

**MATERIAL: pintura**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,2 1/h**

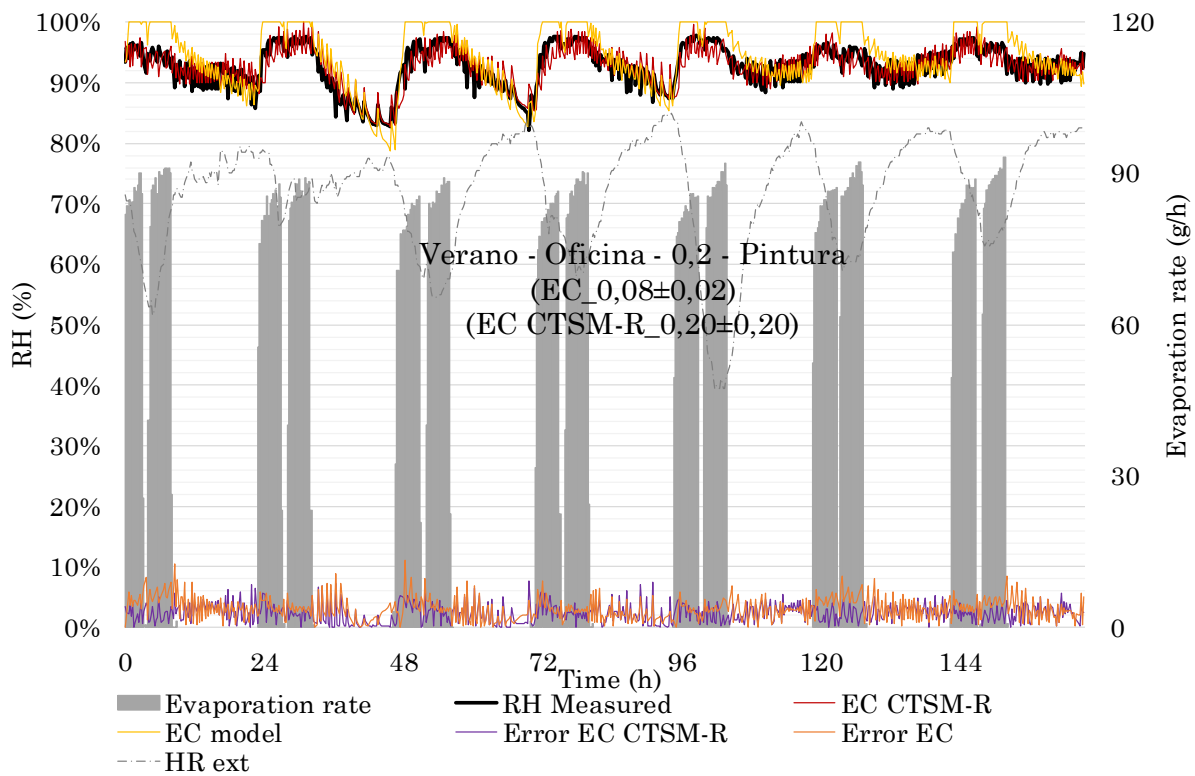


Figura 4-42: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	8,92E-01
Modelo EC (CTSM-R)	5,70E-01

Tabla 4-37: Bondad de ajuste para el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,08±0,02
EC (CTSM-R)	0,20±0,20

Tabla 4-38: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

Series: data\$residuals

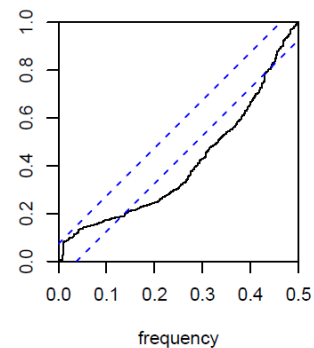


Figura 4-43: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN: verano**  
**CASO: oficina**

**MATERIAL: pintura**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,5 1/h**

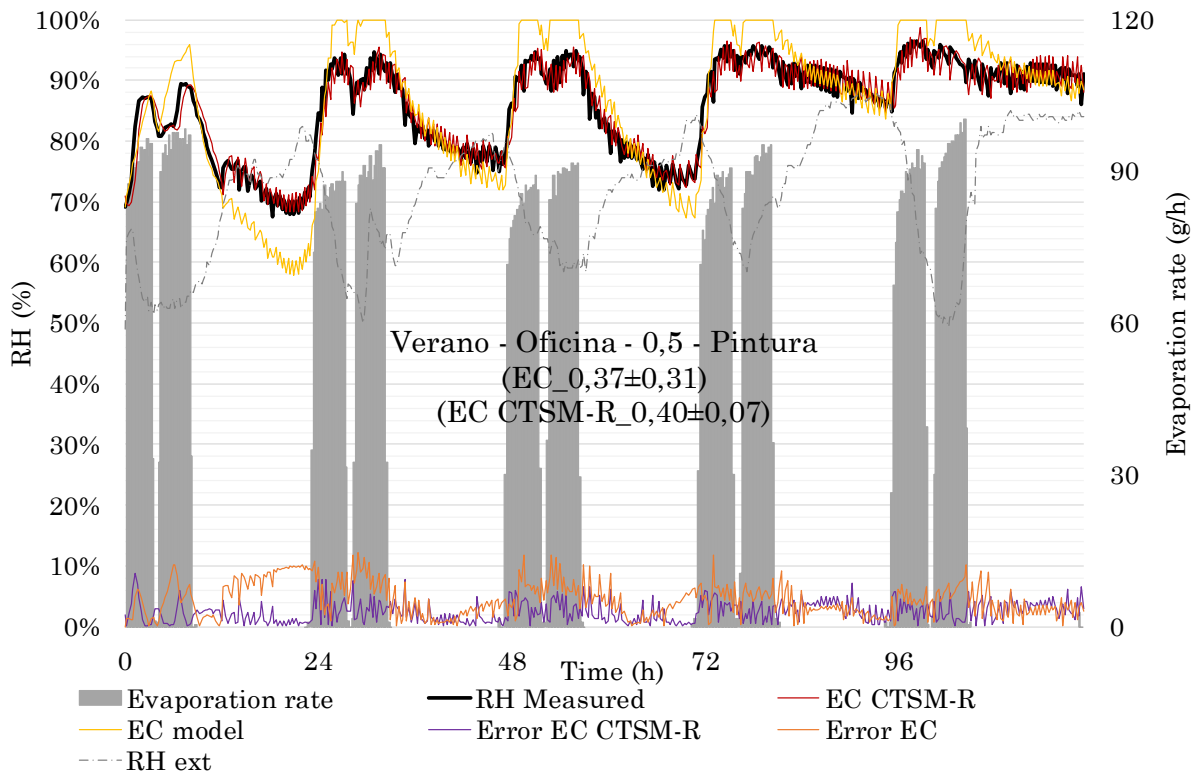


Figura 4-44: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	1,61
Modelo EC (CTSM-R)	4,90E-01

Tabla 4-39: Bondad de ajuste para el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,37±0,31
EC (CTSM-R)	0,40±0,07

Tabla 4-40: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

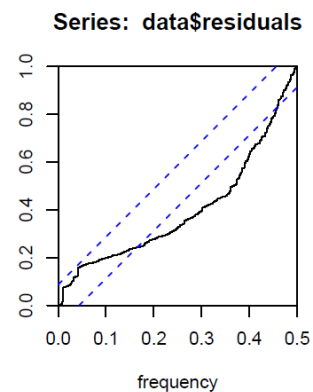


Figura 4-45: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN: verano**  
**CASO: dormitorio**

**MATERIAL: pintura**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,2 1/h**

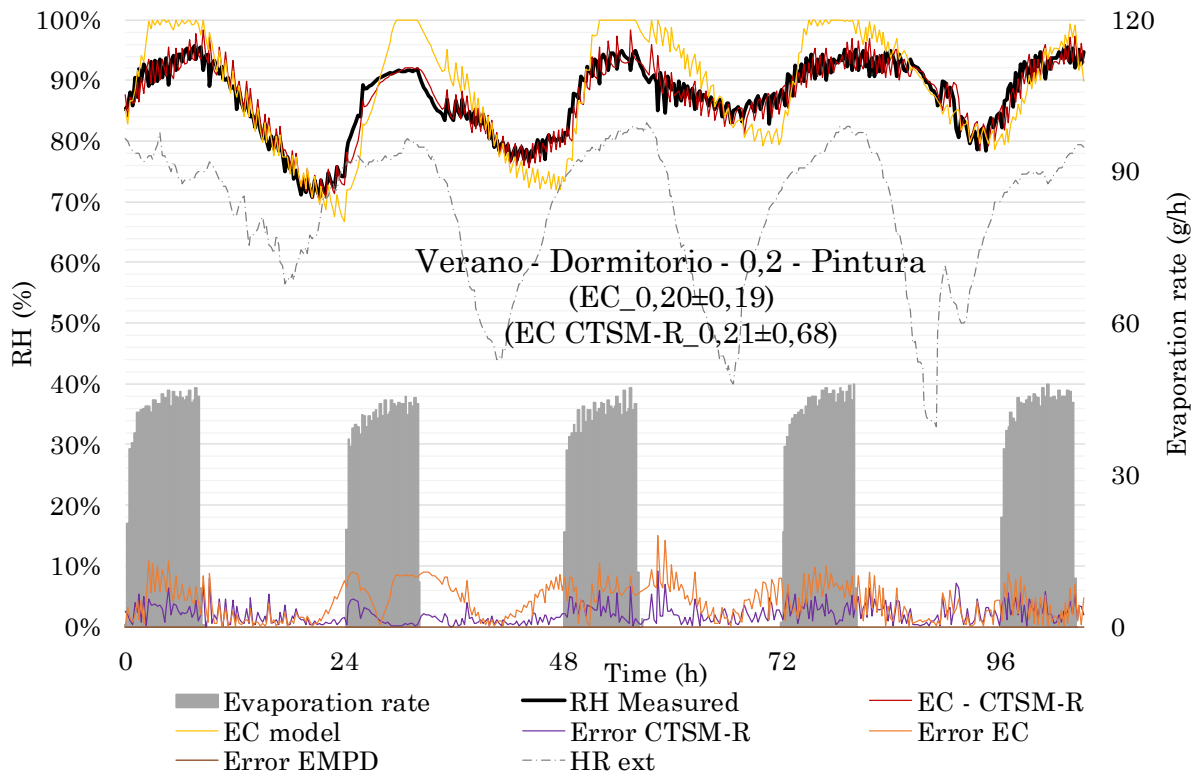


Figura 4-46: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	1,22
Modelo EC (CTSM-R)	3,09E-01

Tabla 4-41: Bondad de ajuste para el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,20±0,19
EC (CTSM-R)	0,21±0,68

Tabla 4-42: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

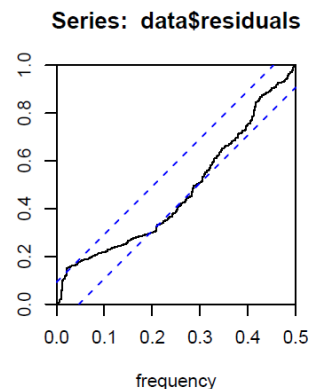


Figura 4-47: Periodograma acumulado de los residuos del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN: verano**  
**CASO: dormitorio**

**MATERIAL: pintura**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,5 1/h**

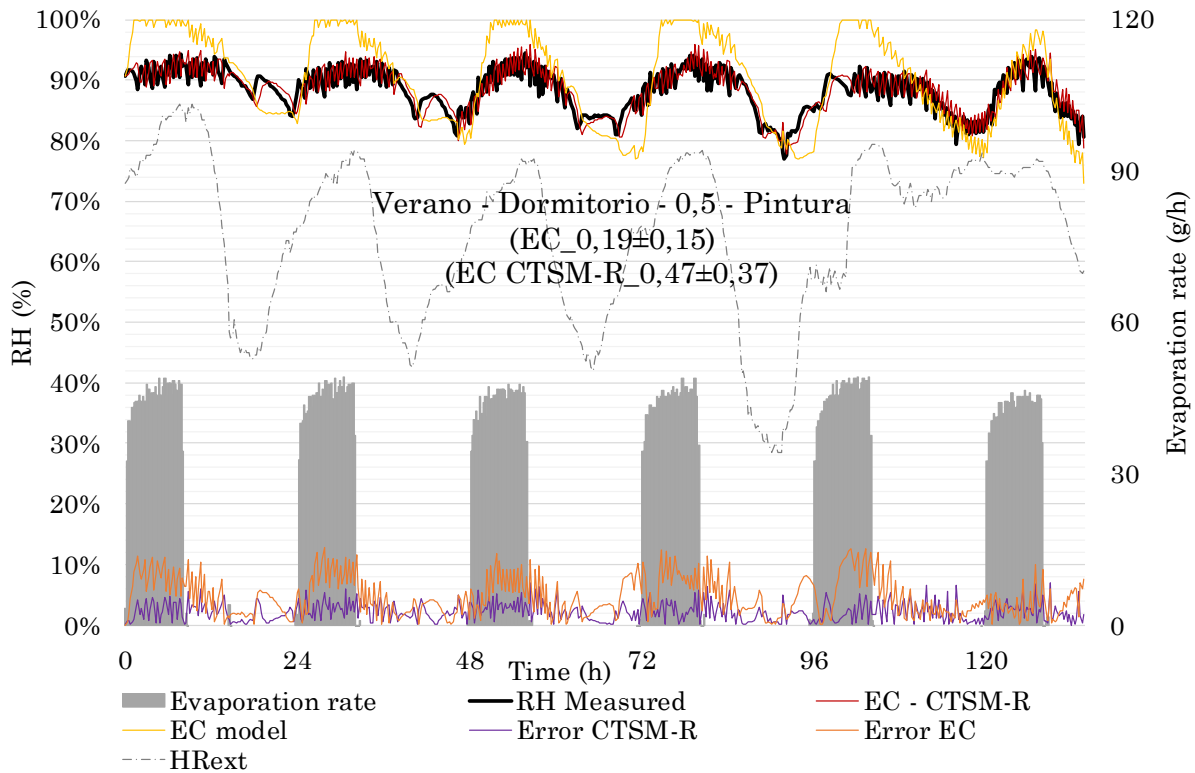


Figura 4-48: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	1,87
Modelo EC (CTSM-R)	4,22E-01

Tabla 4-43: Bondad de ajuste para el modelo EC y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,19±0,15
EC (CTSM-R)	0,47±0,37

Tabla 4-44: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

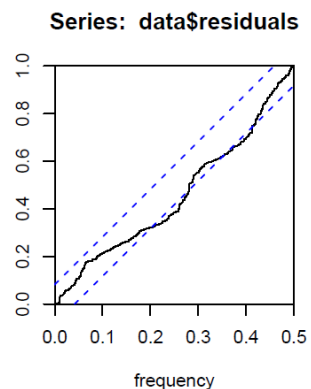


Figura 4-49: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

ESTACIÓN: verano  
CASO: oficina

MATERIAL: yeso  
TASA DE VENTILACIÓN: 0,2 1/h

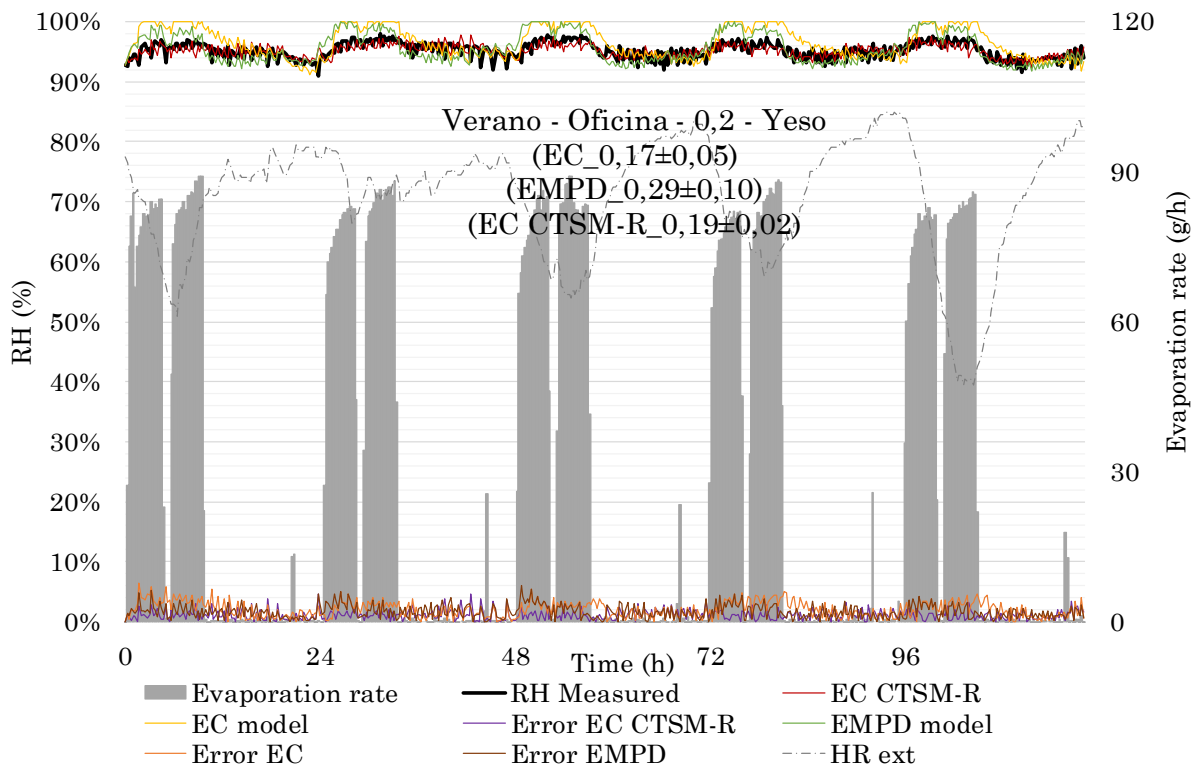


Figura 4-50: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	2,92E-01
Modelo EMPD	2,00E-01
Modelo EC (CTSM-R)	1,00E-01

Tabla 4-45: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,17±0,05
EMPD	0,29±0,10
EC (CTSM-R)	0,19±0,02

Tabla 4-46: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

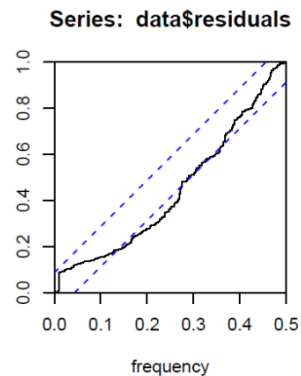


Figura 4-51: Periodograma acumulado de los residuos del modelado en CTSM-R

ESTACIÓN: verano  
CASO: oficina

MATERIAL: yeso  
TASA DE VENTILACIÓN: 0,5 1/h

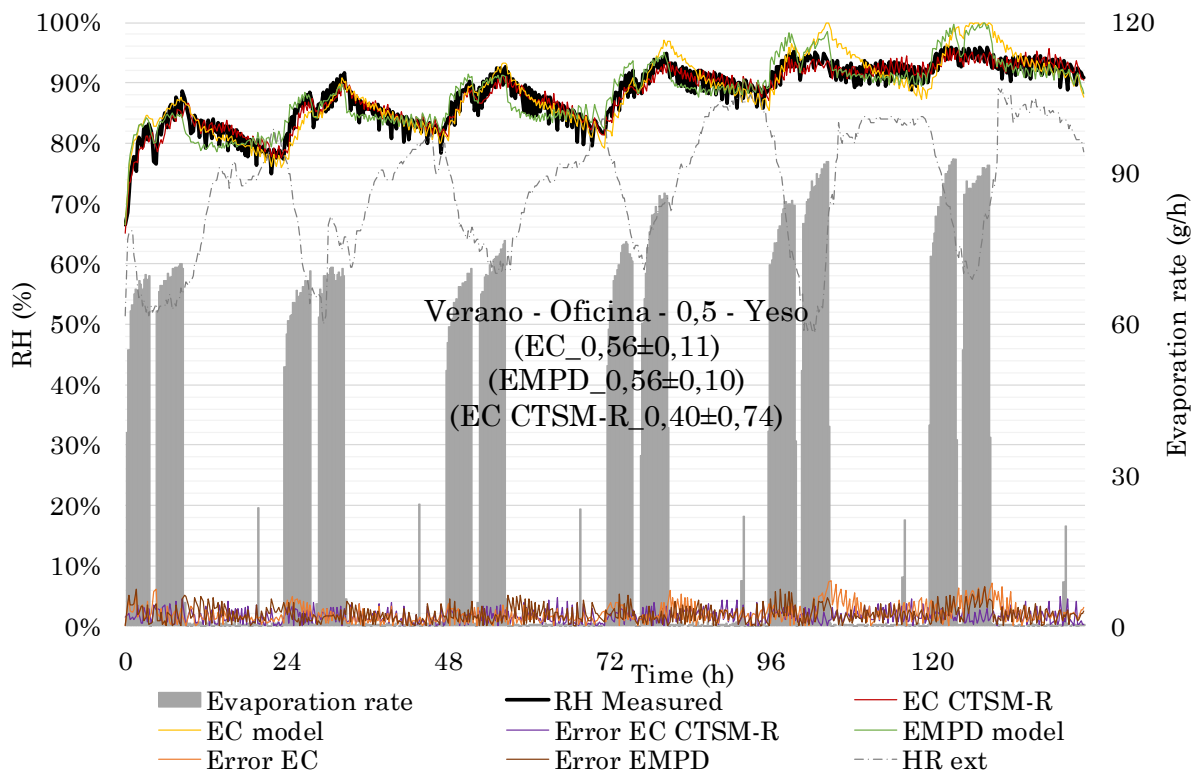


Figura 4-52: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	4,11E-01
Modelo EMPD	3,79E-01
Modelo EC (CTSM-R)	2,55E-01

Tabla 4-47: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,56±0,11
EMPD	0,56±0,10
EC (CTSM-R)	0,40±0,74

Tabla 4-48: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

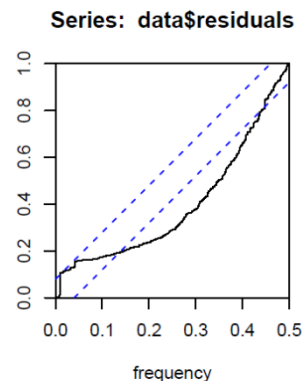


Figura 4-53: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R



**ESTACIÓN: verano**  
**CASO: dormitorio**

**MATERIAL: yeso**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,2 1/h**

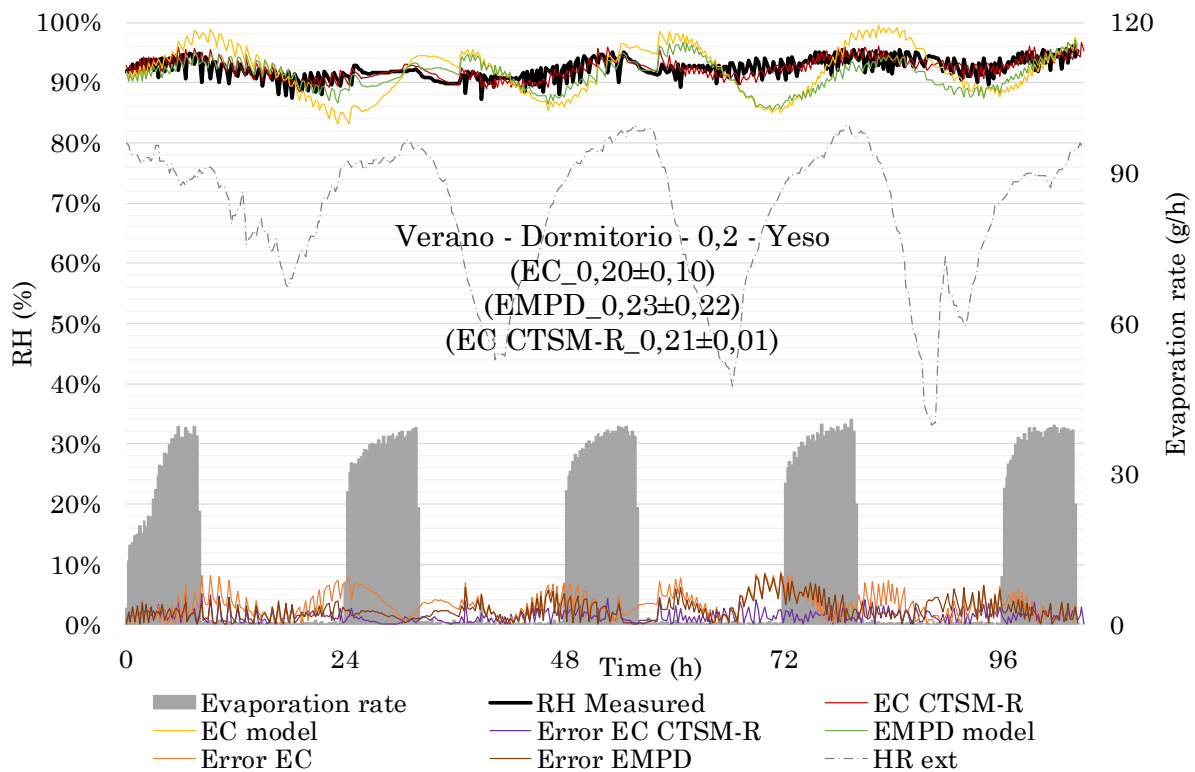


Figura 4-54: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	7,05E-01
Modelo EMPD	4,05E-01
Modelo EC (CTSM-R)	1,34E-01

Tabla 4-49: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,20±0,10
EMPD	0,23±0,22
EC (CTSM-R)	0,21±0,01

Tabla 4-50: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

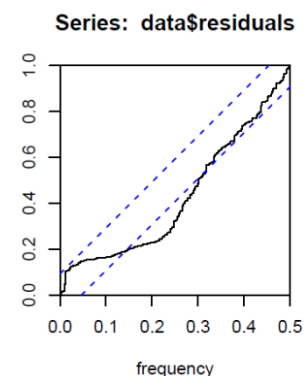


Figura 4-55: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

ESTACIÓN: verano  
CASO: dormitorio

MATERIAL: yeso  
TASA DE VENTILACIÓN: 0,5 1/h

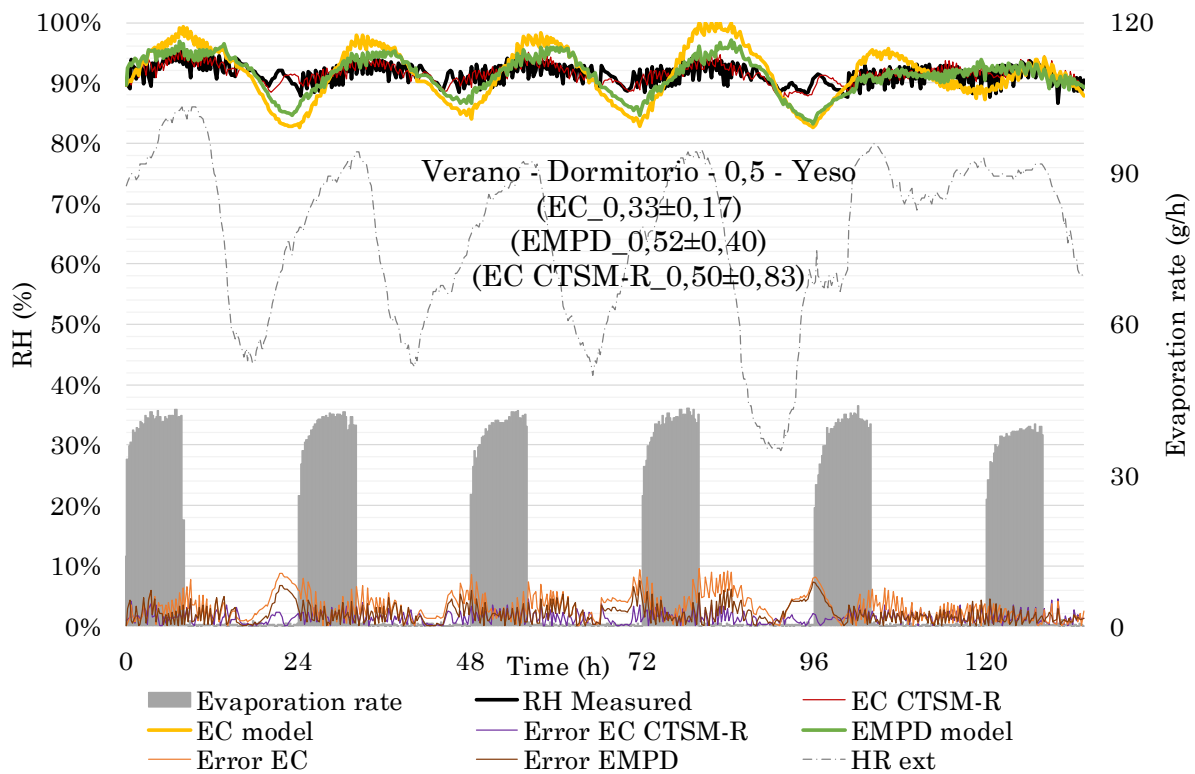


Figura 4-56: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	8,83E-01
Modelo EMPD	4,11E-01
Modelo EC (CTSM-R)	1,77E-01

Tabla 4-51: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,33±0,17
EMPD	0,52±0,40
EC (CTSM-R)	0,50±0,83

Tabla 4-52: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

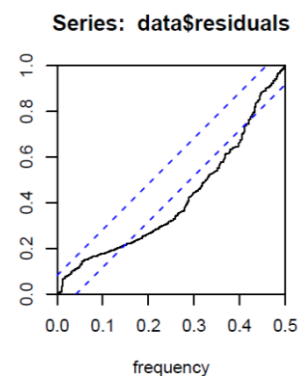


Figura 4-57: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

ESTACIÓN: verano  
CASO: oficina

MATERIAL: fibra de madera  
TASA DE VENTILACIÓN: 0,2 1/h

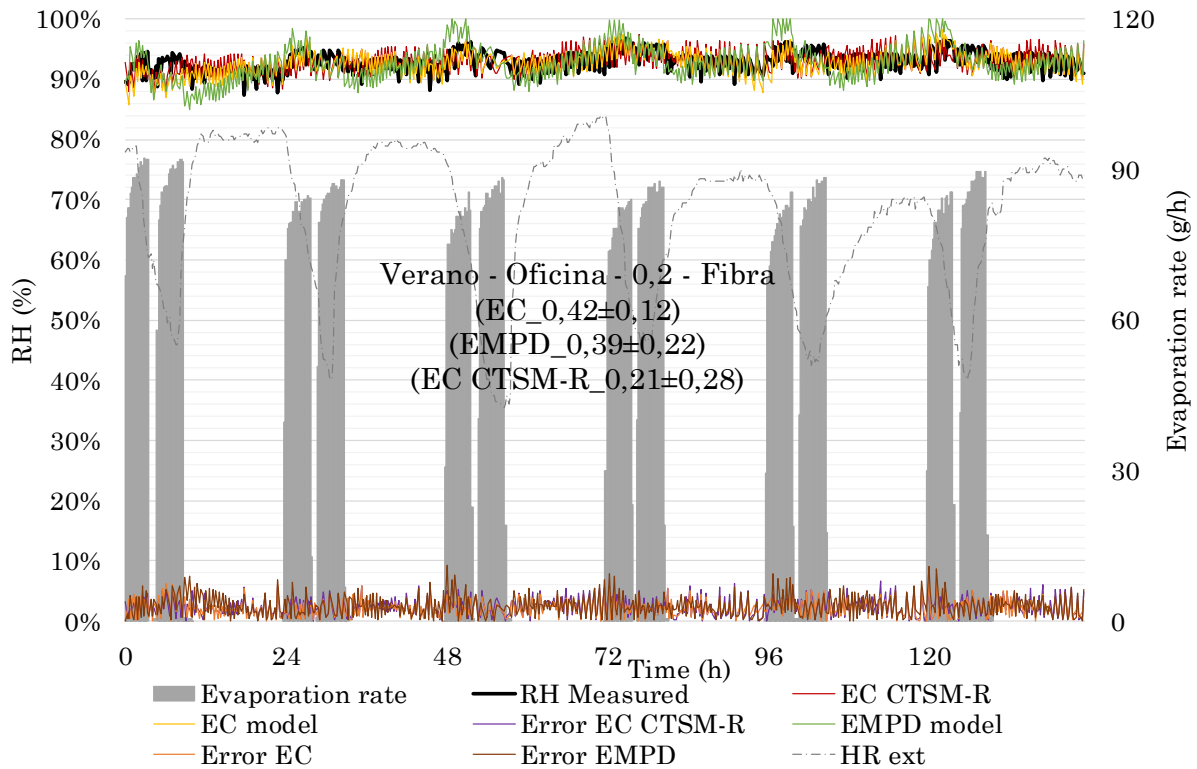


Figura 4-58: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	4,13E-01
Modelo EMPD	5,83E-01
Modelo EC (CTSM-R)	4,74E-01

Tabla 4-53: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,42±0,12
EMPD	0,39±0,22
EC (CTSM-R)	0,21±0,28

Tabla 4-54: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

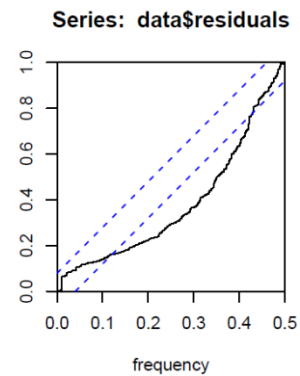


Figura 4-59: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

ESTACIÓN: verano  
CASO: oficina

MATERIAL: fibra de madera  
TASA DE VENTILACIÓN: 0,5 1/h

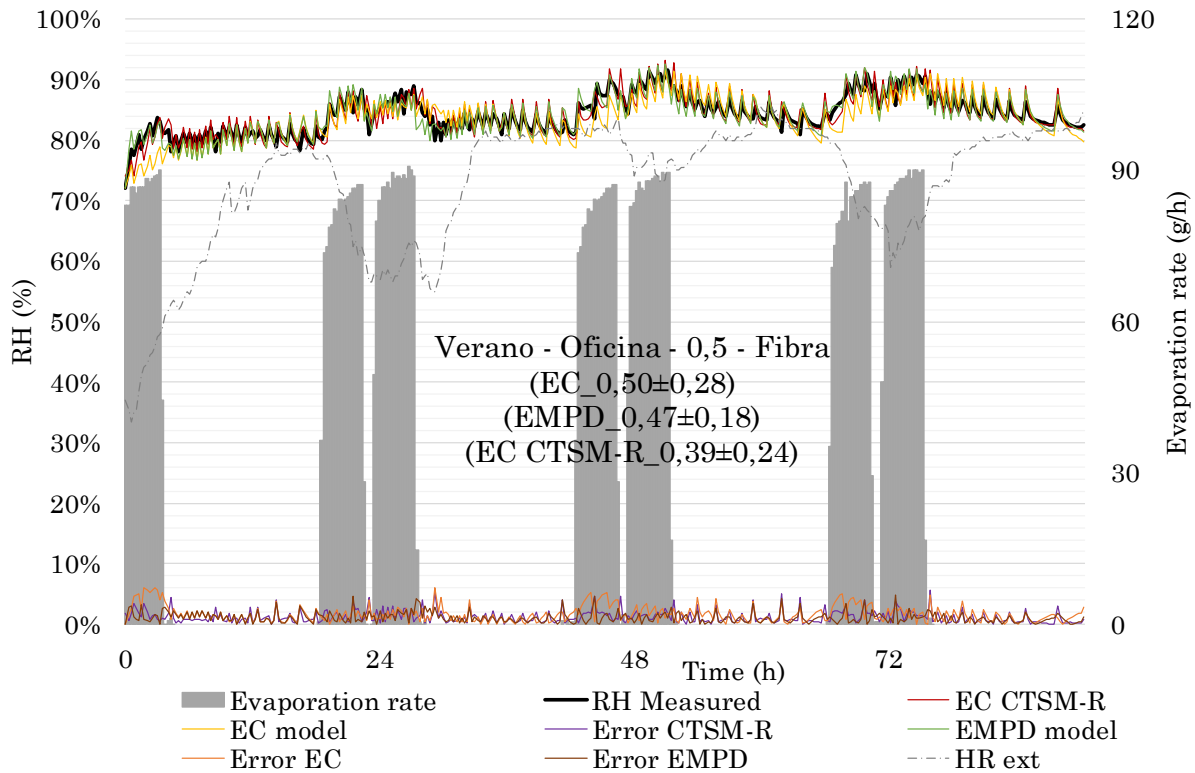


Figura 4-60: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	2,06E-01
Modelo EMPD	8,62E-02
Modelo EC (CTSM-R)	1,09E-01

Tabla 4-55: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,50±0,28
EMPD	0,47±0,18
EC (CTSM-R)	0,39±0,24

Tabla 4-56: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

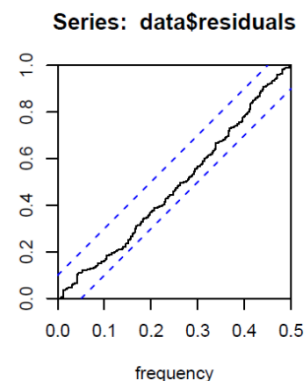


Figura 4-61: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

**ESTACIÓN: verano**  
**CASO: dormitorio**

**MATERIAL: fibra de madera**  
**TASA DE VENTILACIÓN: 0,5 1/h**

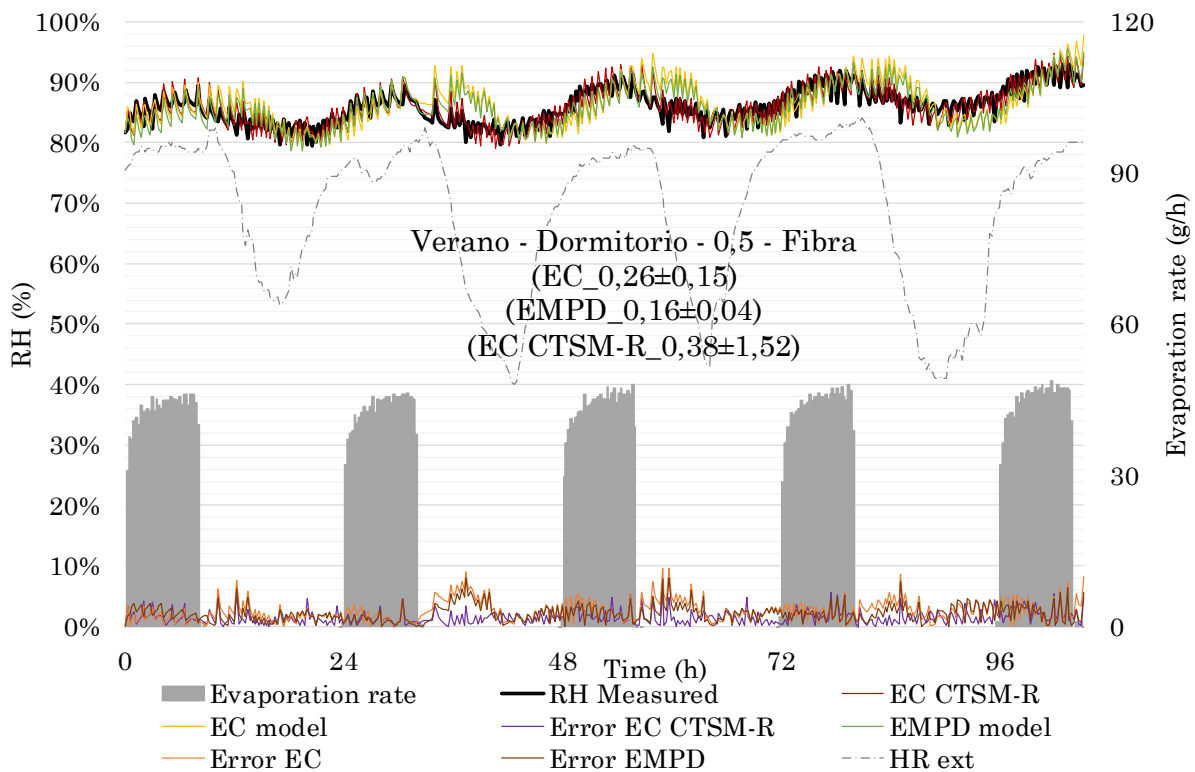


Figura 4-62: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	4,67E-01
Modelo EMPD	3,25E-01
Modelo EC (CTSM-R)	1,74E-01

Tabla 4-57: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,26±0,15
EMPD	0,16±0,04
EC (CTSM-R)	0,38±1,52

Tabla 4-58: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

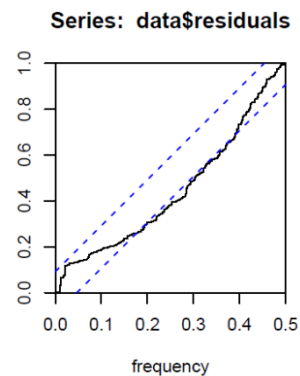


Figura 4-63: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

ESTACIÓN: verano  
CASO: oficina

MATERIAL: sistema de aislamiento  
TASA DE VENTILACIÓN: 0,2 1/h

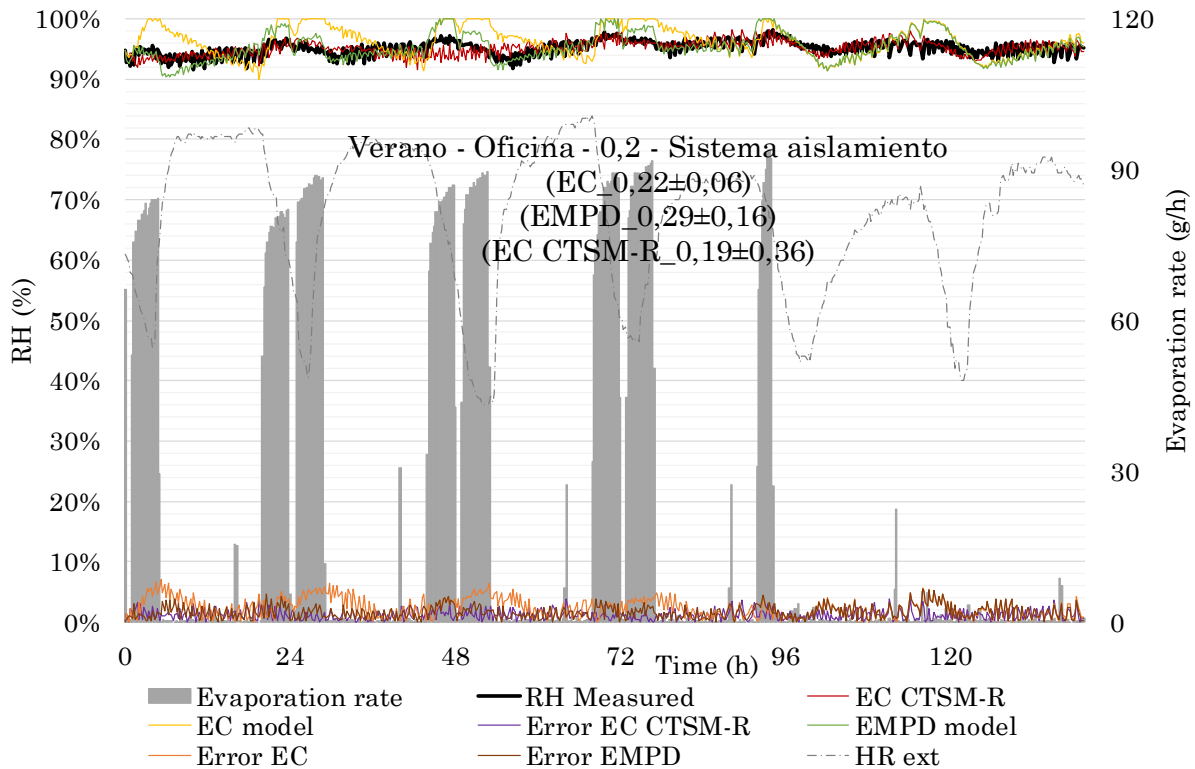


Figura 4-64: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	4,61E-01
Modelo EMPD	2,15E-01
Modelo EC (CTSM-R)	1,18E-01

Tabla 4-59: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,22±0,06
EMPD	0,29±0,16
EC (CTSM-R)	0,19±0,36

Tabla 4-60: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

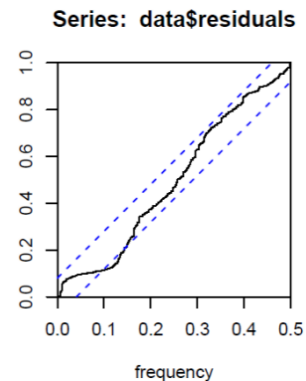


Figura 4-65: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R

ESTACIÓN: verano  
CASO: oficina

MATERIAL: sistema de aislamiento  
TASA DE VENTILACIÓN: 0,5 1/h

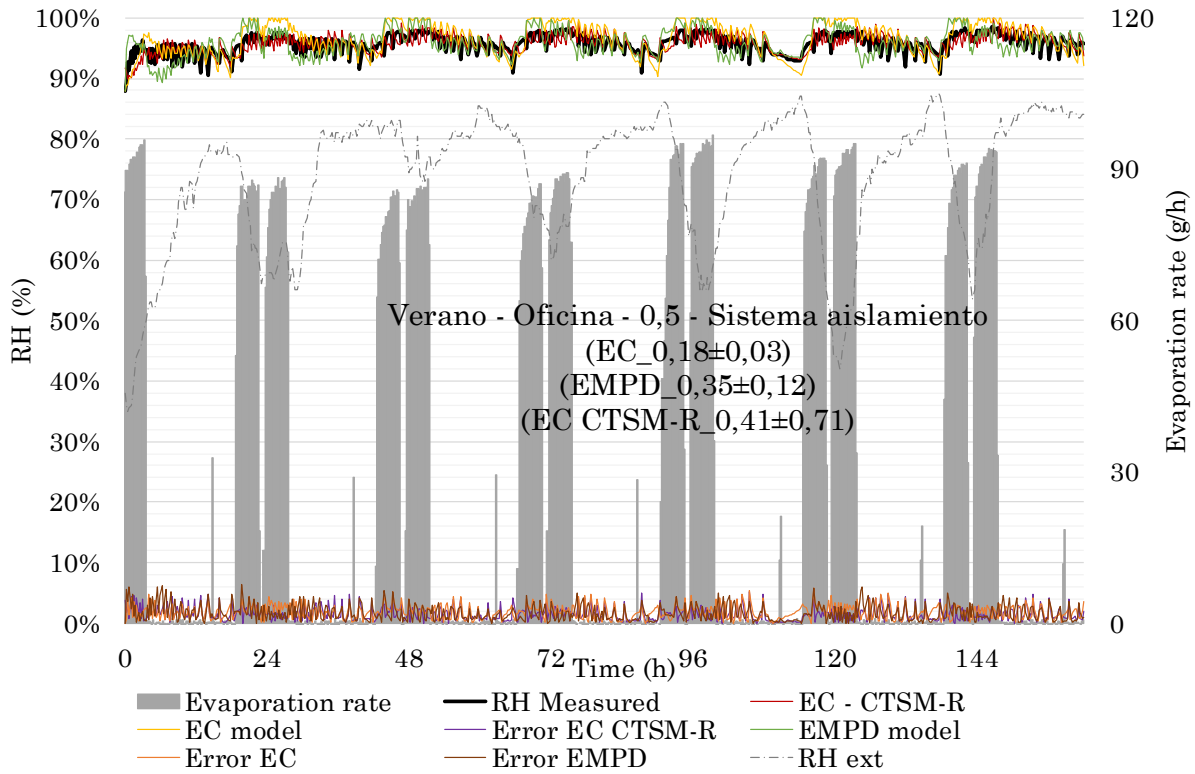


Figura 4-66: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	3,13E-01
Modelo EMPD	3,01E-01
Modelo EC (CTSM-R)	2,26E-01

Tabla 4-61: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,18±0,03
EMPD	0,35±0,12
EC (CTSM-R)	0,41±0,71

Tabla 4-62: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

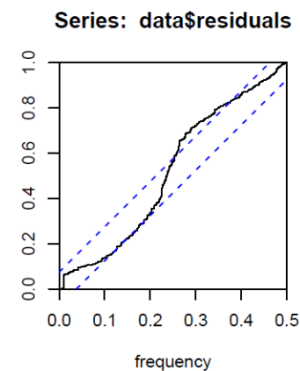


Figura 4-67: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R



ESTACIÓN: verano  
CASO: dormitorio

MATERIAL: sistema de aislamiento  
TASA DE VENTILACIÓN: 0,5 1/h

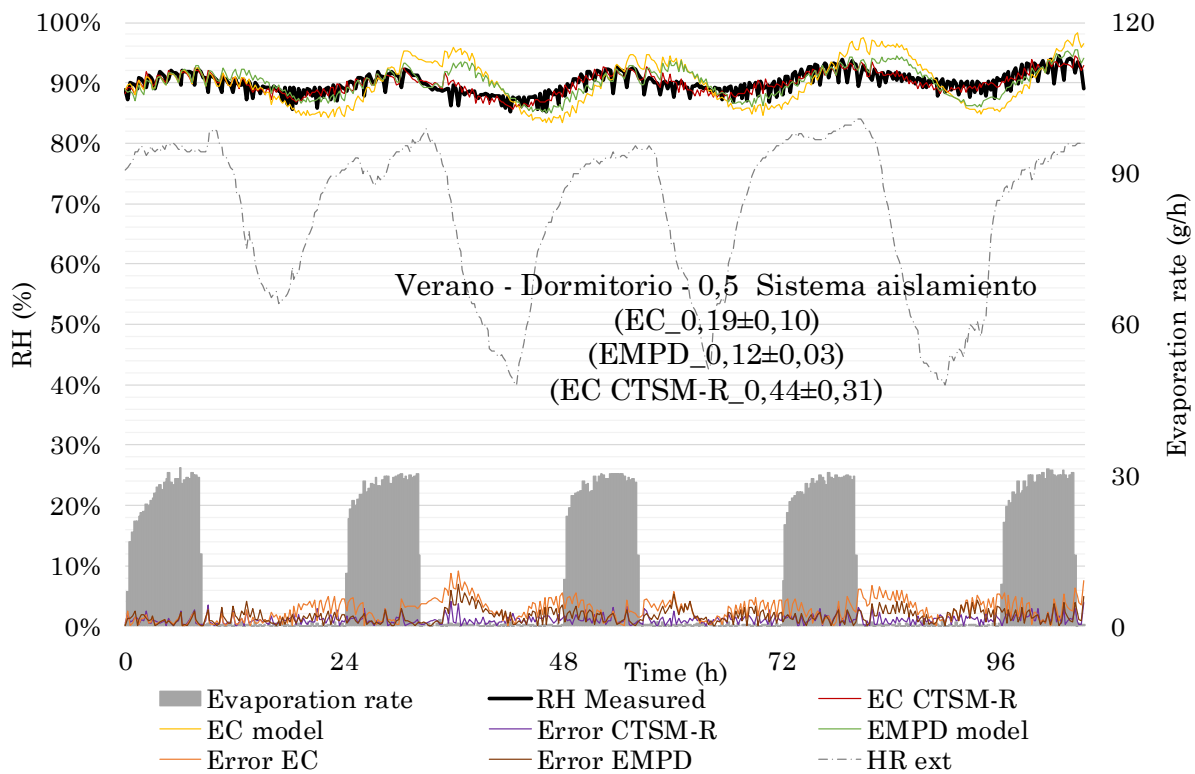


Figura 4-68: Representación de los datos observados de humedad relativa durante el ensayo y su comparativa con la predicción de la humedad relativa en la caseta de ensayo utilizando el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Bondad de ajuste - $\chi^2$
Modelo EC	4,77E-01
Modelo EMPD	1,87E-01
Modelo EC (CTSM-R)	8,18E-02

Tabla 4-63: Bondad de ajuste para el modelo EC, modelo EMPD y modelo EC implementado en CTSM-R

Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]
EC	0,19±0,10
EMPD	0,12±0,03
EC (CTSM-R)	0,44±0,31

Tabla 4-64: Tasa de ventilación obtenida y desviación para cada modelo implementado

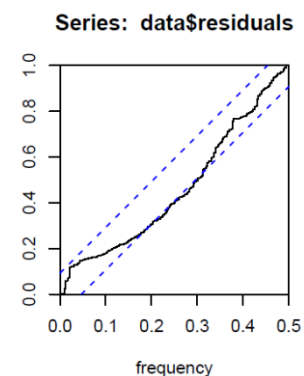


Figura 4-69: Periodograma acumulado de los residuales del modelado en CTSM-R



### 4.3.2.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

#### PINTURA IMPERMEABLE – INVIERNO

La comparativa de la humedad relativa predicha frente a la humedad relativa medida muestra que, para los casos de ensayo de oficina, el modelo presenta mayores errores que para los casos de dormitorio. Los errores oscilan, por lo general, entre el 10-15% de la humedad relativa. La predicción del modelo de humedad relativa del modelo EC implementado en Excel, muestra que los procesos de secado del aire no se describen correctamente, sea cual sea el caso de evaluación. Los procesos de humectación del aire, en cambio, se representan con mayor aproximación, especialmente para los casos de dormitorio.

Para todos los casos evaluados en la estación de invierno, la mejor bondad de ajuste se logra al implementar el modelo EC mediante CTSM-R. Al analizar los periodogramas, se revela que, para este caso, el modelo no es capaz de describir correctamente todos los fenómenos que ocurren y las discrepancias entre el modelo y las mediciones no sólo se pueden asociar a ruido blanco o a la imprecisión de los equipos de medida, por lo que se deberían implementar modelos más complejos que puedan describir correctamente este fenómeno.

Las tasas de ventilación obtenidas (ver tabla 4-65) se aproximan en cierta manera a las tasas de ventilación que se habían fijado para hacer el ensayo, siendo sus desviaciones aceptables, a excepción del caso de dormitorio para una tasa de ventilación de 0,5 1/h ajustado mediante CTSM-R, donde el valor obtenido en la desviación es irreal; aunque en este último caso, los resultados obtenidos no se deben considerar, ya que el periodograma indica que el valor estimado no es probable.

Caso	Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]	X <sup>2</sup>
Oficina 0,2	EC	0,29±0,14	5,73
	EC (CTSM-R)	0,16±0,06	1,16E-01
Oficina 0,5	EC	0,41±0,12	7,97
	EC (CTSM-R)	0,46±2,06	2,00E-01
Dormitorio 0,2	EC	0,33±0,10	6,76
	EC (CTSM-R)	0,22±0,60	1,05E-01
Dormitorio 0,5	EC	0,39±0,05	7,85
	EC (CTSM-R)	0,43±50,98	1,10E-01

Tabla 4-65: Resumen tasa de ventilación obtenida y desviación para la pintura impermeable en la estación de invierno

Para los casos de ventilación alta, el ajuste EC implementado en Excel, estima tasas de ventilación superiores que el ajuste EC implementado en CTSM-R, mientras que, en los casos de ventilación baja, sucede lo contrario.

## YESO – INVIERNO

Los ensayos de invierno realizados con yeso como acabado de revestimiento muestran unos ajustes bastante aproximados para todos los modelos, con errores inferiores al 8% (a excepción del primer ciclo del caso oficina 0,2 1/h, que presenta un estado transitorio inicial que los modelos ajustados con Excel no son capaces de predecir).

Al realizar ajustes de los modelos EC y EMPD, se puede realizar una comparativa para estos casos y se comprueba, que el modelo EMPD reproduce con una mejor aproximación las fluctuaciones de humedad relativa, ya que es un método más sofisticado y, tal y como se demuestra, más preciso.

Al analizar la bondad de ajuste para cada caso, se observa que para todos los ensayos existe la misma tendencia. El caso implementado en CTSM-R siempre presenta un mejor ajuste, siendo el modelo que presenta la peor bondad de ajuste el modelo más simple e implementado en Excel (modelo EC).

Al analizar los resultados obtenidos para las tasas de ventilación presentados en la tabla 4-66, se observa que los valores son bastante próximos al valor objetivo, siendo para este caso las desviaciones más bajas que para el caso de pintura impermeable analizado anteriormente.

Caso	Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]	X <sup>2</sup>
Oficina 0,2	EC	0,27±0,03	2,05
	EMPD	0,25±0,05	1,03
	EC (CTSM-R)	0,15±2,94E-03	8,33E-02
Oficina 0,5	EC	0,37±0,05	1,19
	EMPD	0,34±0,06	6,86E-01
	EC (CTSM-R)	0,40±2,11	9,06E-02
Dormitorio 0,2	EC	0,21±0,06	2,61
	EMPD	0,19±0,05	1,22
	EC (CTSM-R)	0,22±0,92	2,50E-02
Dormitorio 0,5	EC	0,35±0,06	2,98
	EMPD	0,30±0,05	1,31
	EC (CTSM-R)	0,49±0,28	2,85E-02

Tabla 4-66: Resumen tasa de ventilación obtenida y desviación para el yeso en la estación de invierno

Los periodogramas obtenidos a través del ajuste del modelo EC realizado mediante CTSM-R son mejores que en el caso anterior y, aunque se revela que el modelo no describe correctamente el fenómeno para estos casos, para los casos de dormitorio se obtienen mejores resultados que para los casos de oficina, acercándose a la zona óptima (zona marcada con las franjas azules).

## FIBRA DE MADERA – INVIERNO

La comparativa de los datos medidos y estimados a través de los ajustes realizados presentan errores no superiores al 6% para los casos y modelos más desfavorables, lo que supone que la predicción se ha realizado con una precisión bastante buena.

Al comparar los resultados obtenidos de los modelos EC y EMPD ajustados mediante Excel, se observa que, para los casos de dormitorio, ambos presentan errores de la misma magnitud, por lo que no destaca un modelo frente a otro. Para los casos de oficina, en cambio, el modelo EMPD tiene una mejor aproximación.

El análisis de los periodogramas para el caso de la fibra de madera, muestran mejores resultados para los casos de dormitorio y, en estos casos, se podría constatar que las simulaciones son fiables y las discrepancias entre el modelo y las mediciones se pueden relacionar a ruido blanco y a la imprecisión de los equipos de medida, concluyéndose que el método de CTSM-R se puede emplear para realizar los ajustes para estos casos.

Se repite, como en los casos anteriores, la tendencia de mejora de la bondad de ajuste a medida que se usa un modelo de predicción y ajuste más complejo.

Caso	Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]	X <sup>2</sup>
Oficina 0,2	EC	0,30±0,13	8,88E-01
	EMPD	0,27±0,11	2,30E-01
	EC (CTSM-R)	0,20±4,11	6,84E-02
Oficina 0,5	EC	0,47±0,12	7,84E-01
	EMPD	0,40±0,12	3,69E-01
	EC (CTSM-R)	0,44±1,63	6,23E-02
Dormitorio 0,2	EC	0,15±0,09	1,24
	EMPD	0,17±0,07	8,96E-01
	EC (CTSM-R)	0,22±7,64	4,58E-02
Dormitorio 0,5	EC	0,29±0,08	1,60
	EMPD	0,25±0,09	1,27
	EC (CTSM-R)	0,66±1,88	5,40E-02

Tabla 4-67: Resumen tasa de ventilación obtenida y desviación para la fibra de madera en la estación de invierno

Los valores obtenidos para las tasas de ventilación muestran bastante concordancia entre el valor establecido y para todos los modelos, a excepción del caso dormitorio, con una tasa de ventilación de 0,5 1/h, en el que los ajustes realizados con Excel presentan valores bajos para este caso de estudio.

## SISTEMA DE AISLAMIENTO – INVIERNO

Las discrepancias entre la humedad relativa medida y la humedad relativa simulada muestran errores de entre el 6-10%, no mostrando diferencias destacables entre los ajustes realizados mediante Excel para los modelos EC y EMPD. Por tanto, aunque el modelo EMPD sea un modelo más complejo, en estos casos no muestra ninguna ventaja sobre los resultados obtenidos por simulación empleando el modelo EC. Esto también se refleja al observar la bondad de ajuste, donde presentan valores muy similares para los casos de oficina y, para los casos de dormitorio, el modelo EC presenta una mejor bondad de ajuste, siendo este modelo más representativo. Hay que añadir que, el modelo EC representa con muy buena exactitud los valores máximos y mínimos de humedad relativa para cada periodo, mostrando apenas errores de precisión, lo que confirma que es un buen modelo para establecer la amplitud de las oscilaciones de la humedad relativa.

Como en el caso de la fibra de madera, el análisis de los periodogramas señala mejores resultados para los casos de dormitorio que para los casos de oficina y, además, los resultados para el sistema de aislamiento destacan sobre los de la fibra de madera, consiguiendo que el acumulado de los residuales se enmarquen en la zona óptima de modelado. Los ajustes realizados en CTSM-R, por tanto, son fiables y las discrepancias entre el modelo y las mediciones para los casos de dormitorio se pueden asociar a ruido blanco y a la imprecisión de los equipos utilizados.

Caso	Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]	X <sup>2</sup>
Oficina 0,2	EC	0,35±0,06	1,95
	EMPD	0,32±0,04	1,98
	EC (CTSM-R)	0,14±0,47	6,10E-02
Oficina 0,5	EC	0,42±0,05	6,20E-01
	EMPD	0,37±0,04	8,30E-01
	EC (CTSM-R)	0,56±0,53	8,21E-02
Dormitorio 0,2	EC	0,23±0,04	1,70
	EMPD	0,22±0,03	3,21
	EC (CTSM-R)	0,15±0,14	4,03E-02
Dormitorio 0,5	EC	0,34±0,02	2,17
	EMPD	0,32±0,01	3,97
	EC (CTSM-R)	0,44±0,23	3,75E-02

Tabla 4-68: Resumen tasa de ventilación obtenida y desviación para el sistema de aislamiento en la estación de invierno

## PINTURA IMPERMEABLE – VERANO

La comparativa entre los datos de humedad relativa observados y simulados reflejan que el modelo EC implementado en Excel predice bastante bien los valores mínimos de la humedad relativa, excediéndose en los valores máximos. Hay que señalar que, siendo los valores de humedad relativa tan altos, es muy difícil lograr las condiciones de humedad relativa próximas a 100% bajo condiciones reales, a no ser que el recinto de ensayo sea muy hermético, que en este caso no lo es, según se ha demostrado con los ensayos de *Blower Door*. Los errores obtenidos en la comparativa obtienen valores máximos del 10%, que suelen coincidir para los casos donde la humedad relativa no puede alcanzar las condiciones difícilmente alcanzables de 100% de humedad relativa.

Como en todos los casos de invierno, la bondad de ajuste del modelo EC implementado en CTSM-R obtiene los mejores resultados.

Si se comparan las tasas de ventilación obtenidas mediante las diferentes técnicas de ajuste, sólo hay concordancia para los valores obtenidos en los casos de oficina 0,5 1/h y dormitorio 0,2 1/h, obteniéndose para los otros casos, valores bastante dispares. Las desviaciones, en cambio, son muy bajas para todos los casos simulados.

Caso	Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]	X <sup>2</sup>
Oficina 0,2	EC	0,08±0,02	8,92E-01
	EC (CTSM-R)	0,20±0,20	5,70E-01
Oficina 0,5	EC	0,37±0,31	1,61
	EC (CTSM-R)	0,40±0,07	4,90E-01
Dormitorio 0,2	EC	0,20±0,19	1,22
	EC (CTSM-R)	0,21±0,68	3,09E-01
Dormitorio 0,5	EC	0,19±0,15	1,87
	EC (CTSM-R)	0,47±0,37	4,22E-01

Tabla 4-69: Resumen tasa de ventilación obtenida y desviación para la pintura impermeable en la estación de verano

Para todos los ajustes de los ensayos de verano realizados con pintura impermeable como material de acabado se observa que los resultados de los periodogramas de los residuales del modelado en CTSM-R están dentro de los valores óptimos, por lo que el ajuste mediante esta herramienta se puede considerar como válido y el modelo EC describe correctamente el fenómeno de transferencia de masa entre el aire y los materiales de recubrimiento. La conclusión es que, el análisis mediante CTSM-R revela que las discrepancias entre el modelo EC y las mediciones son ruido blanco y utilizando esta técnica se pueden eliminar los errores de los equipos de medición.

## YESO – VERANO

Para los casos de oficina simulados con el material de acabado yeso, existe una buena concordancia con los datos medidos y estimados, con errores máximos del 5% de humedad relativa.

La bondad de ajuste, aunque sigue presentando la tendencia general mostrada en los casos anteriores donde se obtienen mejores ajustes a medida que se utiliza un modelo más complejo o una técnica de ajuste más sofisticada, se observa que los valores para los tres casos muestran valores muy cercanos.

Las tasas de ventilación obtenidas por simulación muestran una buena concordancia, tanto con las tasas de ventilación objetivo como para los diferentes métodos de ajuste aplicados, estando las desviaciones, además, comprendidas dentro de unos valores aceptables.

Caso	Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]	X <sup>2</sup>
Oficina 0,2	EC	0,17±0,05	2,92E-01
	EMPD	0,29±0,10	2,00E-01
	EC (CTSM-R)	0,19±0,02	1,00E-01
Oficina 0,5	EC	0,56±0,11	4,11E-01
	EMPD	0,56±0,10	3,79E-01
	EC (CTSM-R)	0,40±0,74	2,55E-01
Dormitorio 0,2	EC	0,20±0,10	7,05E-01
	EMPD	0,23±0,22	4,05E-01
	EC (CTSM-R)	0,21±0,01	1,34E-01
Dormitorio 0,5	EC	0,33±0,17	8,83E-01
	EMPD	0,52±0,40	4,11E-01
	EC (CTSM-R)	0,50±0,83	1,77E-01

Tabla 4-70: Resumen tasa de ventilación obtenida y desviación para yeso en la estación de verano

Los periodogramas de los residuales muestran que la aplicación de CTSM-R es buena para el modelado, ligeramente mejor para los casos de ensayo de baja ventilación (objetivo de 0,2 1/h), aunque se recomendaría usar un modelo un poco más complejo si se quieren mejorar los resultados.

## FIBRA DE MADERA – VERANO

De entre los casos ensayados para la estación de verano con planchas de madera como material de acabado, cabe destacar los resultados obtenidos para el caso de oficina con una tasa de ventilación de 0,5 1/h (ver figura 4-60). No sólo todos los modelos y métodos de ajuste muestran una excelente concordancia con los datos medidos de humedad relativa interior, sino que el periodograma de los residuales acumulados obtenidos en CTSM-R, es el mejor resultado para todos los casos de ensayo realizados y para todos los materiales de revestimiento ensayados (ver figura 4-61). Además, al observar las tasas de ventilación obtenidas para cada modelo y técnica de ajuste, es el caso en el que se obtiene mayor concordancia entre los resultados y, además, desviaciones aceptables. Para los otros casos de estudio, las tasas de ventilación obtenidas se alejan del valor objetivo, siendo altas para los casos de baja ventilación y bajas para los casos de alta ventilación.

En el caso de oficina con una tasa de ventilación de 0,2 1/h, el modelo EMPD no es capaz de describir correctamente los periodos de secado, mostrando una tendencia contraria de humectación del aire, cuando en realidad, es un proceso de secado. Este hecho, además, se ve reflejado en la bondad de ajuste que, aunque en general se obtienen valores de una magnitud similar, para este caso en concreto, se obtiene un valor superior, lo que significa que el método aplicado es el menos favorable.

Analizando los valores de humedad relativa del aire y del material de acabado obtenidos durante la simulación realizada mediante el modelo EMPD, se ha detectado que la causa por la que no se describa correctamente el proceso de humectación y secado del aire es debido a que, en los momentos donde no hay producción de vapor, la presión parcial de vapor en el material es superior a la del aire interior. Por tanto y, aunque no haya una producción de vapor por parte del humidificador, el material es el que cede esta humedad al aire con el objetivo de alcanzar unas condiciones de equilibrio. Según los resultados obtenidos en las mediciones, puede que el material de recubrimiento no tenga este exceso de humedad y, por tanto, no la ceda al aire, o que la tasa de ventilación en el ensayo haya sido mayor a la obtenida mediante el ajuste y el secado del aire se haya producido por ventilación.

Caso	Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]	X <sup>2</sup>
Oficina 0,2	EC	0,42±0,12	4,13E-01
	EMPD	0,39±0,22	5,83E-01
	EC (CTSM-R)	0,21±0,28	4,74E-01
Oficina 0,5	EC	0,50±0,28	2,06E-01
	EMPD	0,47±0,18	8,62E-02
	EC (CTSM-R)	0,39±0,24	1,09E-01
Dormitorio 0,5	EC	0,26±0,15	4,67E-01
	EMPD	0,16±0,04	3,25E-01
	EC (CTSM-R)	0,38±1,52	1,74E-01

Tabla 4-71: Resumen tasa de ventilación obtenida y desviación para la fibra de madera en la estación de verano

## SISTEMA DE AISLAMIENTO – VERANO

El análisis de la comparativa de la humedad relativa medida y simulada muestra unos resultados bastante similares, pero las tasas de ventilación obtenidas mediante el ajuste son valores muy bajos con respecto a los valores objetivos. Para estos casos se trabaja con humedades relativas muy altas y existe una variación de la humedad relativa muy baja, aunque haya una producción alta de humedad relativa en el interior (en los casos de oficina).

Se identifica, como ha pasado en dos casos analizados para la fibra de madera en verano, que las tasas de ventilación obtenidas mediante el ajuste empleando Excel, se alejan del valor objetivo, obteniéndose para todos los casos, tasas de ventilación más bajas a las esperadas.

Caso	Modelo	Tasa de ventilación por ajuste [1/h]	X <sup>2</sup>
Oficina 0,2	EC	0,22±0,06	4,61E-01
	EMPD	0,29±0,16	2,15E-01
	EC (CTSM-R)	0,19±0,36	1,18E-01
Oficina 0,5	EC	0,18±0,03	3,13E-01
	EMPD	0,35±0,12	3,01E-01
	EC (CTSM-R)	0,41±0,71	2,26E-01
Dormitorio 0,5	EC	0,19±0,10	4,77E-01
	EMPD	0,12±0,03	1,87E-01
	EC (CTSM-R)	0,44±0,31	8,18E-02

Tabla 4-72: Resumen tasa de ventilación obtenida y desviación para el sistema de aislamiento en la estación de verano

Los periodogramas obtenidos aplicando CTSM-R para el modelado muestran resultados bastante buenos, consiguiendo, además, resultados para las tasas de ventilación acordes a los valores establecidos. Para estos casos de estudio, emplear el proceso de Wiener es una técnica de modelado adecuada, que permite la eliminación del ruido blanco y de las imprecisiones de los equipos de medida, por lo que los resultados obtenidos a través de RStudio se pueden considerar como buenos.



### 4.3.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En esta sección del capítulo se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros de entrada de los modelos estudiados. De entre ellos, se evaluará la tasa de ventilación,  $n$  [1/h], la tasa de generación de humedad ( $G_{vp}$ ) y el MBV de los materiales de recubrimiento [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \%RH)$ ] (o las propiedades higroscópicas de capacidad de humedad y permeabilidad al vapor de agua, en el caso del modelo EMPD).

Debido a que el modelado mediante CTSM-R no es capaz de predecir el equilibrio higroscópico de la estancia para todos los casos, no se van a considerar estos resultados para hacer el análisis de sensibilidad.

Para comparar los resultados obtenidos a través de los ajustes realizados utilizando Excel para los modelos EC y EMPD, se ha obtenido el error medio absoluto (MAE, *Mean Absolute Error*) para cada uno de los ensayos de acuerdo con la ecuación (4.28). El error medio absoluto es una métrica utilizada para medir la precisión de una serie de variables continuas, que mide el promedio de los errores de un conjunto de predicciones.

$$MAE = \frac{\sum |y_i - x_i|}{n} \quad (4.29)$$

donde  $y_i$  es el valor observado,  $x_i$  es el valor estimado y  $n$  es el número de datos evaluados. En la figura 4-70 se muestra el error medio absoluto obtenido al implementar los modelos EC y EMPD para los cuatro materiales investigados.

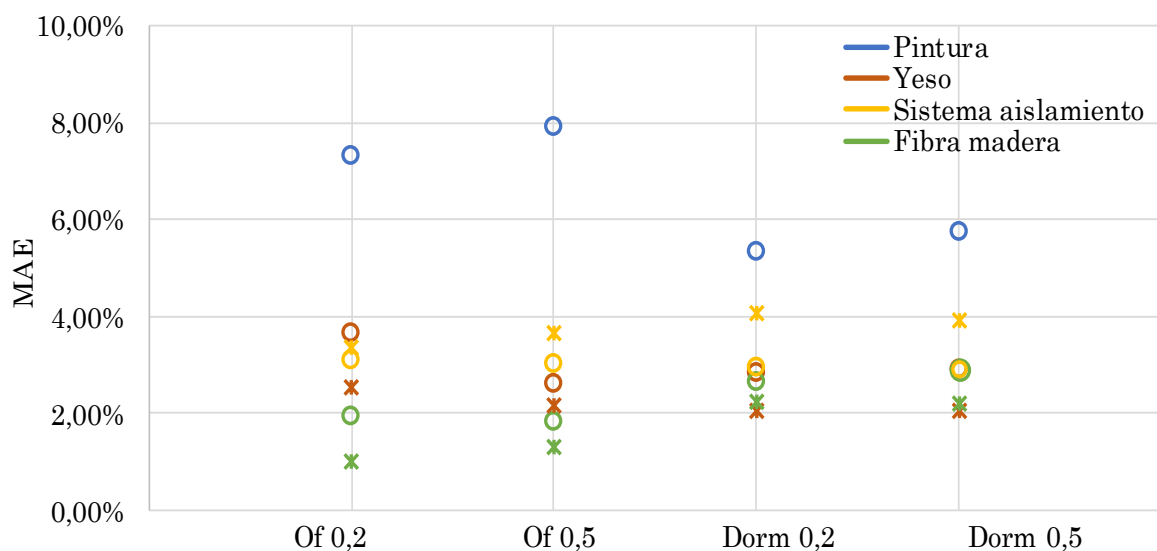


Figura 4-70: Análisis de sensibilidad de los parámetros a través del error medio absoluto (MAE) para los resultados de invierno. Los resultados mostrados con el marcador en forma de círculo corresponden al modelo EC, mientras que los resultados representados mediante una cruz corresponden al modelo EMPD.

Al analizar las figuras 4-70 y 4-71 se observa que a medida que el material de acabado tiene un MBV mayor, las discrepancias entre las mediciones y las simulaciones se ven

disminuidas. La fibra de madera tiene un MBV práctico (2,12 [g/(m<sup>2</sup>·RH)]) que triplica el del yeso común y del sistema de aislamiento (0,72 [g/(m<sup>2</sup>·RH)]), siendo los errores medios absolutos obtenidos para los tres casos muy similar. Esto significa que el modelo es más sensible a errores para los casos donde el MBV sea relativamente bajo, pero para valores superiores de MBV para un material con un potencial de amortiguación de la humedad relativa moderado-bueno, los errores no son tan relevantes. Se observa que los errores, además, son mayores para los casos de invierno que para los de verano, especialmente para los casos de pintura.

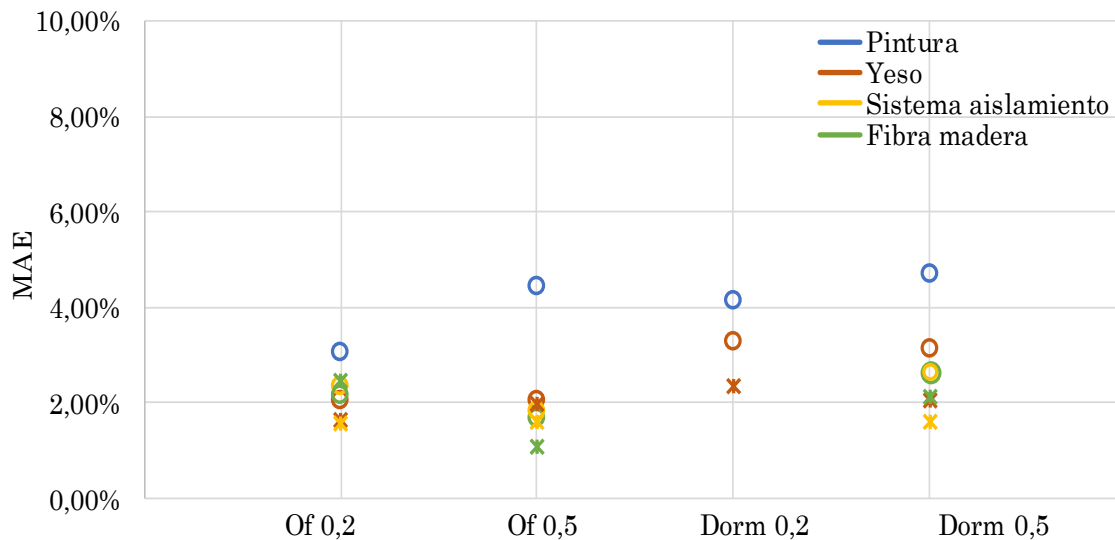


Figura 4-71: Análisis de sensibilidad de los parámetros a través del error medio absoluto (MAE) para los resultados de verano. Los resultados mostrados con el marcador en forma de círculo corresponden al modelo EC, mientras que los resultados representados mediante una cruz corresponden al modelo EMPD.

En los casos donde el MBV es alto, la tasa de producción de vapor parece tener una implicación en los errores de simulación para la estación invernal. Para producciones de vapor elevadas, cuando el material tiene un MBV destacable, los errores de simulación se ven disminuidos, como pasa para el caso de la fibra de madera. Contrariamente y para los casos donde se ha incorporado un material de acabado con nula capacidad amortiguadora de la humedad relativa, a mayor producción de humedad, mayores son los errores obtenidos. Para los casos de verano, cabe señalar que estas diferencias no son destacables, probablemente porque los materiales pueden estar en un estado próximo a la saturación (debido a las condiciones de humedad relativa tan altas que se lograron) y, por tanto, el fenómeno de transferencia de humedad entre el aire y los materiales de acabado no tiene una efectividad sobre las condiciones interiores.

La tasa de ventilación parece que no tiene una implicación en los resultados, observándose errores de la misma magnitud para todos los casos.

Debido a la definición de cada modelo y, como ya habían concluido otros autores, el modelo EC es menos preciso que el EMPD y, en general y a excepción del sistema de aislamiento, supone una desviación de los datos observados y simulados mayor. Si se desea estimar los

valores máximos y mínimos de la humedad relativa interior, se puede utilizar el modelo EC obteniendo buenos resultados. Pero se tendría que tener en cuenta que este modelo no reproduce con fidelidad la evolución de la humedad relativa entre los picos máximos y mínimos. Debido a la simplicidad de cálculo y que las diferencias en los errores porcentuales con respecto al uso del modelo EMPD no son tan significantes, el modelo EC también se puede considerar un modelo aceptable a la hora de hacer simulaciones.

#### **4.4. HERRAMIENTA DE CÁLCULO: higoENEDI**

Las herramientas comerciales de simulación higrotérmica de edificación suelen ser herramientas complejas y precisas, diseñadas y desarrolladas para usuarios con conocimientos avanzados. Para poder utilizar estos softwares se necesita un conocimiento desarrollado sobre las funciones que presentan, además de la adquisición de una licencia, lo que hace que se limite su uso hacia grupos más limitados, generalmente profesionales e investigadores especializados en el sector. Hay que añadir que, debido a estas limitaciones, algunos conceptos, como es en este caso el de la inercia higroscópica, son difíciles de introducir en el sector.

No hay que olvidar que, en el proceso de construcción, de rehabilitación o reforma de una vivienda, no siempre se puede acceder a la contratación de estudios especializados, por lo que usuarios y algunos agentes y profesionales de la construcción, eligen soluciones estándar sin previamente evaluar si existe una solución más adecuada para cada caso en concreto.

Esta herramienta se desarrolla con el fin de crear una difusión y acercar el conocimiento básico de la inercia higroscópica y de la propiedad del MBV de los materiales de construcción hacia agentes, profesionales de la construcción, propietarios y usuarios. La herramienta está basada en la desarrollada por Gómez-Arriaran; especialmente en la parte dedicada a la predicción de la evolución de la humedad relativa interior y en la predicción del riesgo de crecimientos biológicos. Se cree que, proporcionando herramientas sencillas, se divulga el conocimiento y esta es la razón por la que probablemente el interés en aplicar estas técnicas crezca entre el gremio de la construcción. El objetivo principal es permitir conocer sus beneficios y prestaciones con la intención de que se cree una demanda en futuras intervenciones para utilizarlo como una medida pasiva en futuros diseños y construcciones.

La herramienta higoENEDI, de libre acceso, evita la desventaja de las licencias. El hecho de que la herramienta se desarrolle para permitir su uso a un grupo más amplio de usuarios obliga a adoptar una serie de simplificaciones que hacen que la herramienta sea más básica, sencilla y de fácil entendimiento que los softwares comerciales, lo que a su vez implica que la herramienta sea no tan precisa como aquellas especializadas.

La herramienta tiene dos funciones generales, la primera y original de esta tesis, es el cálculo del *Moisture Buffer Value* de los materiales de construcción a través de las propiedades higroscópicas (ver figura 4-72), y la segunda, tomada de la herramienta creada anteriormente por Gómez-Arriaran, en la predicción de la humedad relativa en

espacios interiores teniendo en cuenta el MBV de los materiales de recubrimiento (ver figura 4-73) y la evaluación del riesgo de condensaciones superficiales y crecimientos biológicos.

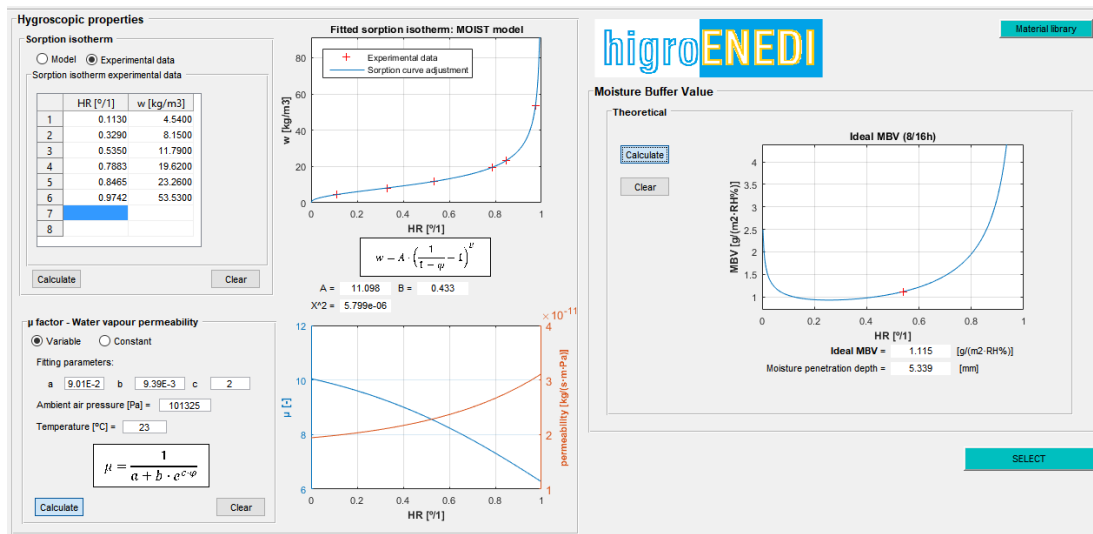


Figura 4-72: Visualización general de la herramienta de cálculo del MBV a través de las propiedades higroscópicas

La herramienta, por tanto, ofrece la posibilidad de evaluar diferentes situaciones para establecer en qué climas y bajo qué circunstancias (ventilación, carga ocupacional...) la inercia higroscópica juega un papel fundamental y tiene mayor efectividad o impacto sobre las condiciones interiores. Además, la herramienta evalúa el riesgo de condensaciones superficiales, permitiendo al usuario elegir qué material de revestimiento puede ser más adecuado para cada caso concreto.

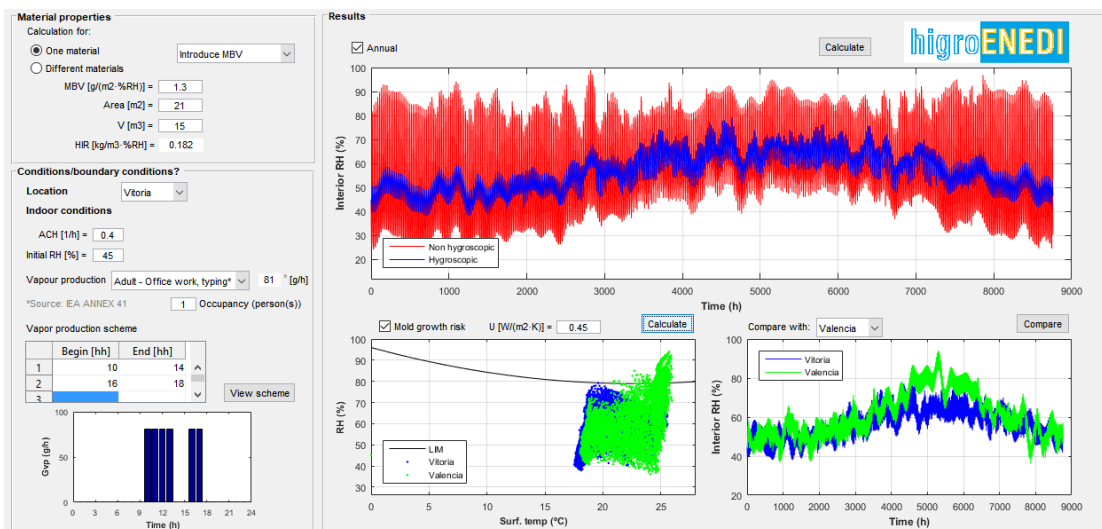


Figura 4-73: Visualización general de la herramienta de cálculo de las fluctuaciones de humedad relativa en espacios interiores

La aplicación se ha desarrollado a través de MATLAB utilizando el editor de diseño GUIDE. Se ha elegido trabajar con una GUI (*Graphical User Interface*) o UI (*User Interface*) porque posibilita la construcción de una interfaz amigable e intuitiva, permitiendo que el usuario pueda trabajar con ella sin necesidad de aprender comandos, tener conocimientos de programación o conocer el lenguaje informático para realizar las simulaciones. La aplicación, además, permite hacer simulaciones sin que el usuario precise de conocimientos especializados en el tema, lo que permite su uso, como se ha dicho con anterioridad, a un mayor grupo de usuarios.

## 4.4.1.DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA HERRAMIENTA

### 4.4.1.1. HERRAMIENTA MOISTURE BUFFER VALUE

#### DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada necesarios para el cálculo del *Moisture Buffer Value* son dos propiedades higroscópicas que describen el almacenamiento y el transporte de la humedad en el medio poroso, la isoterma de sorción,  $w/\varphi$ , y el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua, también conocido como factor  $\mu$  [-]. La relación entre la definición teórica del MBV y estas propiedades higroscópicas, se puede consultar el Capítulo 3: Moisture Buffering (apartado 3.1).

Descripción, símbolo	Unidades
<b>Isoterma de sorción, <math>w/\varphi</math></b> (2 opciones)	[kg/m <sup>3</sup> ]
(1) Coeficientes de ajuste función isoterma de sorción	[-]
(2) Humedad relativa, HR	[°/1]
(2) Contenido de humedad, w	[kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Factor de resistencia al vapor de agua, <math>\mu</math></b> (2 opciones)	[-]
(1) Coeficientes de ajuste función factor $\mu$	[-]
(2) Factor $\mu$ / Permeabilidad al vapor de agua, $\delta_p$	[-] / [kg/(m · s · Pa)]
Temperatura ensayo	[°C]
Presión del aire ambiental	[Pa]

Tabla 4-73: Datos de entrada herramienta cálculo MBV ideal

#### Isoterma sorción $w/\varphi$ (2 opciones)

##### Opción 1: Modelo de ajuste de isoterma de sorción (4 posibilidades)

Se podrá elegir esta opción cuando el usuario haya realizado previamente el ajuste de la isoterma de sorción mediante los datos de experimentación, usando alguno de los modelos propuestos en la literatura científica y contrastados, que vienen incluidos en la

herramienta (ver figura 4-74 y tabla 4-74). Estos modelos han sido descritos en el capítulo 2: Caracterización higroscópica, en la sección 2.3.4. Ensayo de sorción higroscópica.

Para introducir la isoterma de sorción serán necesarios los coeficientes de ajuste de la función de almacenamiento de humedad que corresponda, según el modelo elegido.

Modelo	Ecuación ajuste	Coefficientes ajuste
Künzel [56]	$w = w_{cap} \cdot \frac{(b-1) \cdot \varphi}{b-\varphi}$	$w_{cap}$
		b
Kumaran [57]	$w = \frac{\varphi}{a\varphi^2 + b\varphi + c}$	a
		b
		c
MOIST	$w = A \cdot \left( \frac{1}{1-\varphi} - 1 \right)^B$	A
		B
Roels y Janssen [26]	$w = w_{sat} \cdot \left( 1 + (m \cdot \ln(\varphi))^n \right)^{\frac{1-n}{n}}$	$w_{sat}$
		m
		n

Tabla 4-74: Datos de entrada según modelo de ajuste para la isoterma de sorción

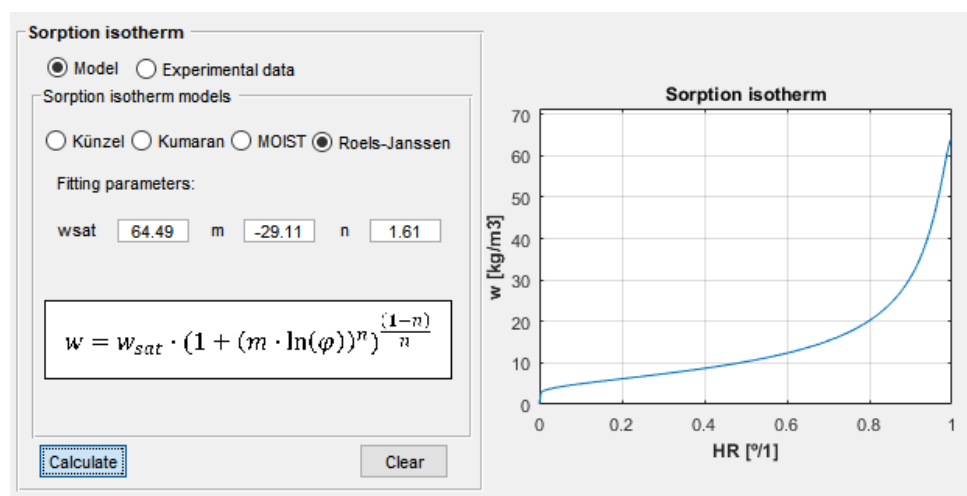


Figura 4-74: Isotherma de sorción introducida a partir de un modelo de ajuste. Modelo de ajuste de isoterma de sorción presentado por Roels y Janssen [26] para el yeso de agarre

Opción 2: Datos de experimentación isoterma de sorción

La segunda posibilidad que ofrece la herramienta es introducir de forma manual los datos de experimentación obtenidos mediante el ensayo de sorción higroscópica.

Como datos de entrada, serán necesarios ambos, el contenido de humedad en equilibrio promedio de la muestra,  $w$  [kg/m<sup>3</sup>], y la correspondiente humedad relativa del ambiente ensayado, HR [%]. Se introducirán tantos valores como diferentes atmósferas ensayadas (ejemplo, ver tabla 4-75 y figura 4-75).

HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]
0	0
0,1130	4,54
0,3290	8,15
0,5350	11,79
0,7883	19,62
0,8465	23,26
0,9742	53,53

Tabla 4-75: Ejemplo introducción datos experimentales para el yeso de agarre

A partir de estos valores, la herramienta calcula qué modelo entre los cuatro incorporados y mencionados en la primera opción, obtiene una mayor aproximación a los datos introducidos. Como resultado se grafican los datos experimentales, la curva de ajuste de la isoterma de sorción, el modelo con mejor ajuste y su correspondiente ecuación, el valor de los coeficientes de ajuste y el coeficiente de determinación obtenido,  $\chi^2$ .

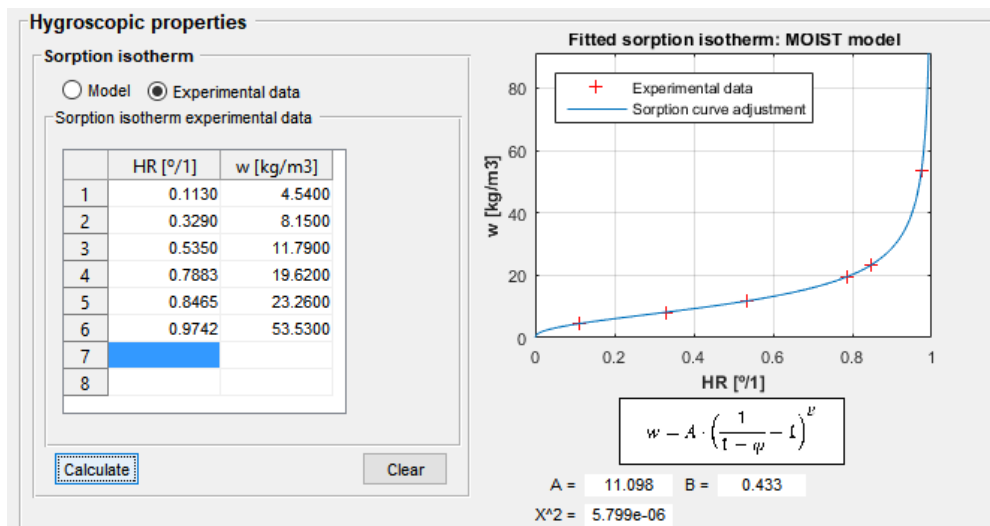


Figura 4-75: Isoterma de sorción introducida a partir de datos experimentales

Esta opción también se puede considerar aun habiendo realizado previamente el ajuste de la curva. En el caso de no haber considerado todos los modelos mencionados en la obtención de la función de almacenamiento de humedad, se puede usar la herramienta para comprobar si hay algún otro modelo que proporcione un mejor ajuste.

## Factor de resistencia al vapor de agua, factor $\mu$ (2 opciones)

### Opción 1: factor $\mu$ , valor variable

Al igual que la isoterma de sorción, el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua es una propiedad dependiente de la humedad relativa, por lo que su cálculo implica un ajuste para obtener la función que la describe.

En este caso, y a diferencia que la isoterma de sorción, sólo se ha incorporado un modelo de ajuste, el definido en [29], por lo tanto, los datos de entrada para esta opción son los coeficientes de ajuste de la función presentada (ver tabla 4-76).

También será necesario introducir las condiciones de ensayo de temperatura y de presión barométrica (ver figura 4-76), ya que son variables necesarias para calcular la permeabilidad al vapor de agua del aire (ecuación 2.23) que, a su vez, es necesaria para el cálculo del factor de resistencia al vapor de agua.

Modelo	Ecuación ajuste	Coefficientes ajuste
Janssen y Roels [29]	$\mu = \frac{1}{a + b \cdot e^{c \cdot \varphi}}$	a
		b
		c

Tabla 4-76: Datos de entrada para factor de resistencia al vapor definido como función.

Una vez la interfaz recoge los datos de entrada, grafica las funciones correspondientes a la permeabilidad al vapor de agua y el factor de resistencia al vapor de agua (ver figura 4-76).

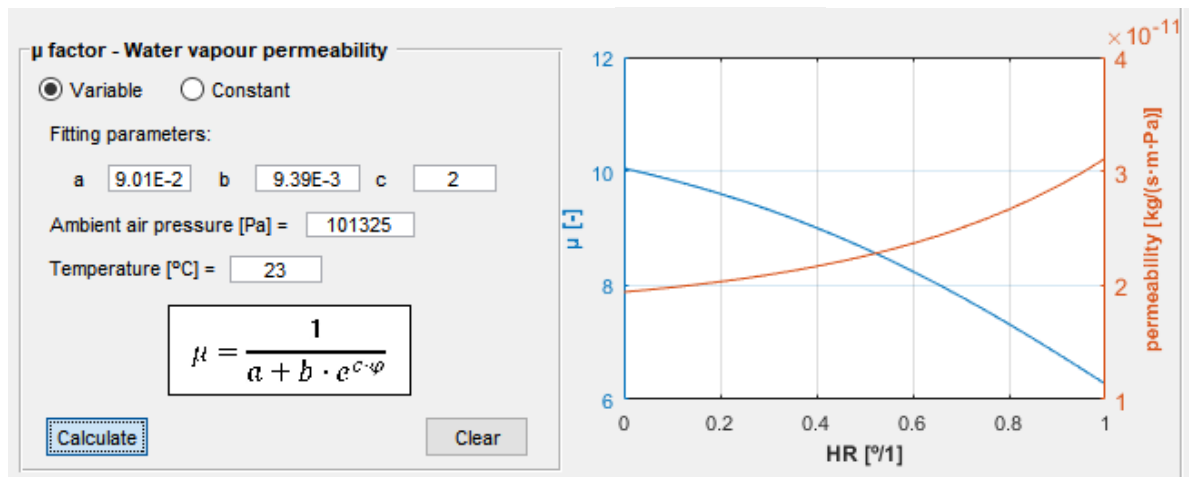


Figura 4-76: Introducción del factor de resistencia al vapor de agua mediante coeficientes del modelo de ajuste



### Opción 2: factor $\mu$ , valor constante

Aunque el factor de resistencia al vapor de agua es una propiedad dependiente de la humedad relativa, en la mayoría de los casos se presenta con un valor único. Cabe recordar que la normativa de aplicación para la determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua, la UNE-EN ISO 12572 [11], establece elegir una atmósfera de ensayo para obtener estas propiedades, por lo que el valor obtenido no es una función dependiente de la humedad relativa, sino un valor constante.

Como en la mayoría de las fichas técnicas que incluyen el factor de resistencia al vapor de agua o la permeabilidad, lo presentan como una propiedad invariable, la herramienta permite introducir esta propiedad como tal, para estos casos.

Al igual que en el caso anterior, será necesario introducir como datos de entrada las condiciones de ensayo de temperatura y presión barométrica. Al aceptar la introducción de los datos de entrada mencionados, la interfaz da como dato de salida la permeabilidad al vapor de agua correspondiente a los parámetros establecidos por el usuario y ambas propiedades se muestran en el gráfico correspondiente (ver figura 4-77).

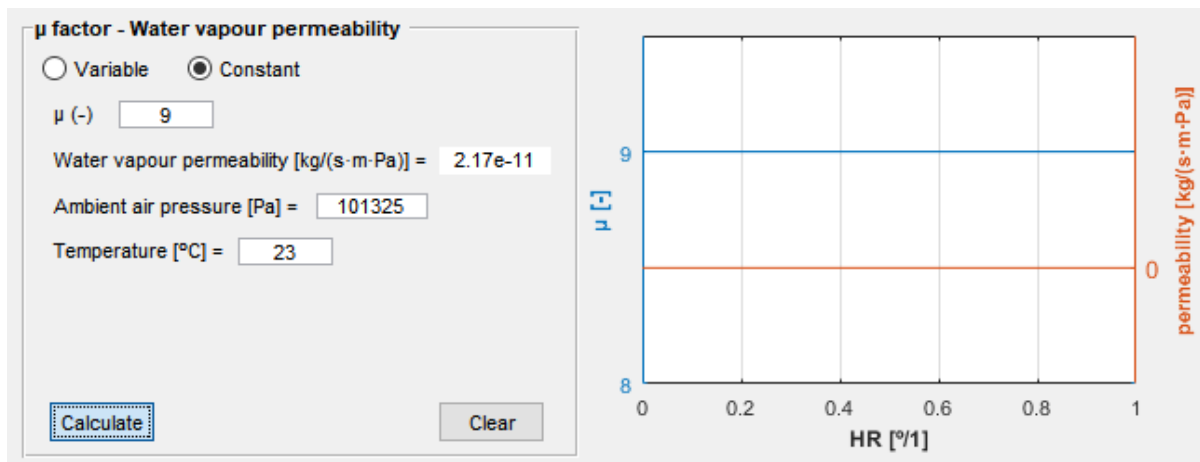


Figura 4-77: Ejemplo de introducción del factor de resistencia al vapor de agua mediante un valor constante

### DATOS DE SALIDA

Introducidas las propiedades de almacenamiento y de transporte mencionadas, se obtiene el *Moisture Buffer Value* y el *Moisture Penetration Depth* del material (ver tabla 4-77 y figura 4-78). El MBV se representa a través de una gráfica en todo el rango de humedad relativa y también se presenta su valor junto al del MPD, ambos calculados según el protocolo NORDTEST (cambio de humedad relativa del 33-75%), que corresponden a una humedad relativa del 54%.

Descripción, símbolo	Unidades
Moisture Buffer Value teórico, ideal MBV	[g/(m <sup>2</sup> ·%RH)]
Moisture Penetration Depth	[mm]

Tabla 4-77: Datos de salida herramienta cálculo MBV

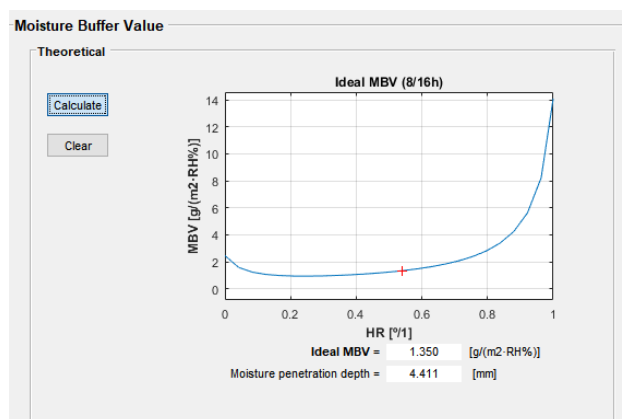


Figura 4-78: Obtención del MBV y el MPD para el yeso de agarre a partir de las propiedades higroscópicas

Conocer el MBV permitirá al usuario tener una referencia del comportamiento del material ante cambios cíclicos de humedad relativa y, además, posibilita al usuario hacer una comparativa de diferentes materiales. Esta última opción es útil cuando se proponen diferentes materiales de revestimiento interior para una solución constructiva, lo que permitirá hacer una valoración teniendo también en cuenta su potencial para controlar las condiciones higroscópicas interiores.

En el caso del MPD, conocer su valor ayudará a elegir el espesor de la capa de revestimiento para alcanzar el máximo potencial de amortiguación de la humedad relativa del material elegido. En el caso de que el revestimiento ya forme parte de una solución constructiva definida, se podrá evaluar si el material de acabado es el único material interviniente en la transferencia de humedad con el aire ante cambios bruscos de la humedad relativa o si pueden estar interviniendo los materiales dispuestos en las siguientes capas. Si los materiales dispuestos en el interior del cerramiento forman parte del fenómeno, en el caso de tener un MBV menor a la capa de revestimiento, no se estará aprovechando el máximo potencial de amortiguación de la capa de acabado, por lo que debería considerarse aplicar un espesor mayor que supere el MPD.

#### 4.4.1.2. HERRAMIENTA PREDICCIÓN DE HUMEDAD EN ESTANCIAS

##### DATOS DE ENTRADA

Para predecir las condiciones higroscópicas del aire interior de una estancia, se necesitarán definir unos datos de entrada que proporcionen información acerca de la geometría del espacio, de sus materiales de revestimiento (propiedades higroscópicas), además de las condiciones de contorno (ver tabla 4-78).

Descripción, símbolo	Unidades
<b>Materiales de revestimiento y propiedades higroscópicas</b>	
Moisture Buffer Value, MBV	[g/(m <sup>2</sup> %RH)]
Área exposición material, A	[m <sup>2</sup> ]
<b>Geometría del espacio</b>	
Volumen estancia, V	[m <sup>3</sup> ]
<b>Localización y climatología exterior</b>	
Ubicación estancia	-
Temperatura ambiente exterior	[°C]
Humedad relativa del aire exterior	[%]
<b>Condiciones interiores</b>	
Tasa de ventilación, ACH	[1/h]
Humedad relativa inicial del aire interior	[%]
<b>Ocupación</b>	
Actividad - Producción de vapor	[g/h]
Número de ocupantes	[personas]
Hora inicio producción vapor	[horas]
Hora fin producción vapor	[horas]
<b>Periodo de simulación</b>	
Fecha inicio simulación	[dd/mm]
Fecha fin simulación	[dd/mm]

Tabla 4-78: Datos de entrada herramienta predicción HR

### **Materiales de revestimiento y propiedades higroscópicas**

Las propiedades de los materiales que forman un edificio son un requisito fundamental para cualquier simulación en edificación. Las propiedades básicas de los materiales son generalmente conocidas y se pueden encontrar en cualquier ficha técnica. El problema recae cuando se busca información acerca de las propiedades higroscópicas de los materiales porosos. No es fácil encontrar una base de datos extensa que en la que se puedan encontrar las diferentes propiedades higroscópicas de los materiales de construcción, ni siquiera cuando se usan softwares más sofisticados. Además, y como ya se ha mencionado en el Capítulo 2: Caracterización higroscópica, caracterizar completamente un material requiere de un tiempo de experimentación elevado y no siempre se consiguen resultados uniformes, siendo muchos datos que se encuentran en algunas bases de datos, poco fiables. Debido a esta dificultad, se ha incorporado una base

de datos de materiales que incluyan las propiedades necesarias para el cálculo del MBV: la isoterma de sorción y el factor de resistencia al vapor de agua. Los materiales de construcción incorporados y sus propiedades se han obtenido a través de bibliografía de referencia especializada en el tema.

La herramienta permite hacer simulaciones para varios casos. El caso más sencillo conforma un espacio con un único material de revestimiento. La segunda opción, permite introducir hasta tres materiales de revestimiento diferentes. La elección de los materiales se ha separado por elemento constructivo: paredes, techo y suelo, ya que, lo más habitual es encontrar diferenciación de materiales para estos componentes, aunque pueden corresponder a otras formas de organización. Lo único que se tendrá que tener en cuenta es elegir correctamente el área de exposición.

En un paramento no existe una distribución uniforme de la velocidad, existen diferencias de temperatura superficial y el coeficiente de transferencia de humedad por convección, por tanto, será variable según la posición de la superficie. Esto indica que la ubicación del material podría alterar el MBV real. Y aunque aún no se ha publicado información acerca de si existe un impacto significativo sobre la ubicación del material y su MBV, esta función podría ser considerada en la herramienta en futuras actualizaciones. Debido a que este estudio aún no se ha realizado, se pueden hacer las combinaciones que se requieran para introducir hasta tres materiales, sin importar a qué componente pertenezcan: suelo, techo o paredes.

Para la introducción de cada material, existe la opción de calcular su MBV a partir de sus propiedades higroscópicas (utilizando la herramienta del cálculo del MBV), introducir de forma manual su MBV o elegir el material de la base de datos que se ha incorporado en la herramienta. Sea cual sea la opción elegida, el usuario necesitará tener conocimiento previo del área de exposición de cada uno de los materiales que se vayan a introducir.

## **Geometría del espacio**

En este caso sólo se necesitará saber el volumen de la estancia. A pesar de que el usuario tenga que hacer un previo cálculo para introducir este parámetro, se ha optado por la introducción manual del volumen y no de las dimensiones de la estancia, para que se puedan simular estancias de varias formas geométricas sin restricciones.

## **Localización y climatología exterior**

Los datos meteorológicos se toman de archivos climáticos al seleccionar la ubicación de la estancia. Los archivos climáticos almacenados en la base de datos de la herramienta de cálculo se han tomado del Código Técnico de la Edificación (CTE). Los archivos comprenden todas las zonas climáticas de referencia del DB-HE Ahorro de energía, por lo que se podrá simular cualquier climatología representativa de cada zona establecida por el CTE. Aunque los archivos climáticos comprenden diferentes parámetros, para las simulaciones sólo se toma la temperatura ambiente y la humedad relativa exterior. En este caso, las condiciones exteriores de temperatura y humedad relativa sólo tienen efecto sobre el clima interior de la estancia por ventilación.

Los archivos climáticos de esta herramienta, al igual que la mayoría de los modelos de simulación higrotérmica, describen los datos del clima exterior hora a hora, por lo que la simulación se realiza para este intervalo de tiempo.

### Condiciones interiores

La temperatura ambiente interior de la estancia es un dato de entrada en el modelo, pero al contrario que los otros parámetros, ésta no se introduce de forma manual por el usuario, sino que los valores que se toman son derivados del clima exterior, basándose en la norma UNE-EN 15026 [71]. Esta norma se usa para evaluar la transferencia de humedad mediante simulación en componentes de edificios y elementos constructivos.

En la figura 4-79 se muestra la relación entre la temperatura exterior y la temperatura interior determinada. La temperatura interior, por tanto, se establece en 20°C cuando la temperatura exterior es menor a 10°C. Para temperaturas exteriores superiores a 20°C, la temperatura interior se fija en 25°C. Para una temperatura exterior comprendida en el rango entre 10-20°C, la temperatura interior se interpola de forma lineal, pudiéndose calcular según la siguiente expresión matemática:

$$T_i = 15 + 0,5 \cdot T_e \quad (4.30.)$$

donde  $T_i$  es la temperatura interior [°C] y  $T_e$  es la temperatura exterior [°C]. La temperatura exterior, a su vez, es introducida mediante la selección de la ubicación, que como se ha explicado con anterioridad, está asociada a su archivo climático.

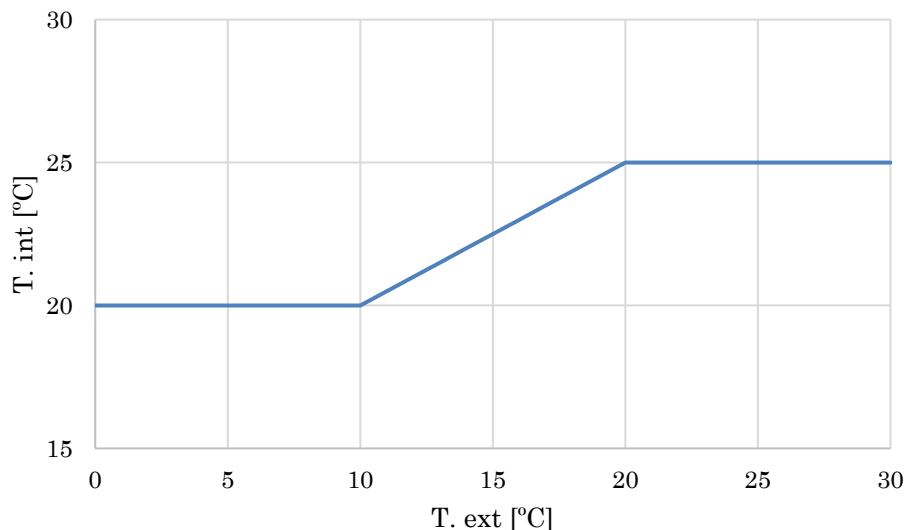


Figura 4-79: Temperatura interior en función de la temperatura exterior

La herramienta será capaz de predecir las condiciones de humedad relativa interior, pero se necesitará saber de qué condiciones iniciales se parte, por lo que la humedad relativa interior en el inicio de la simulación será un requisito de entrada.

La tasa de ventilación, ACH [1/h], también será un dato que el usuario debe introducir de forma manual. El valor de la tasa de ventilación se considera constante durante toda la simulación.

## Ocupación

La ocupación de la estancia se define mediante un perfil diario de producción de vapor. Éste se introduce designando la actividad que se realiza en la estancia, el número de ocupantes y el horario de desarrollo de la actividad. En el caso de que la actividad que se desarrolle en el espacio no esté catalogada en la herramienta, se puede seleccionar la introducción manual de la producción de vapor.

Las actividades incluidas en la herramienta de simulación y la carga de humedad asociada a cada una de ellas se describen en la tabla 4-79. Los valores disponibles en la herramienta se han obtenido del Annex 41 de la IEA.

Actividad para un adulto	Producción de vapor [g/h]
Trabajo oficina, tecleando	81
Trabajo oficina, leyendo sentado	69
Trabajo oficina, escribiendo	69
Descansando, sentado	69
Descansando, durmiendo	34
Cocinando	162
Limpieza del hogar	266

Tabla 4-79: Actividades y producción de vapor asociada

## Periodo de simulación

Se pueden realizar simulaciones anuales seleccionando la casilla correspondiente, o en el caso de querer simular periodos de tiempo más cortos, se debe seleccionar la fecha de inicio y la fecha fin a través del calendario (ver figura 4-80).

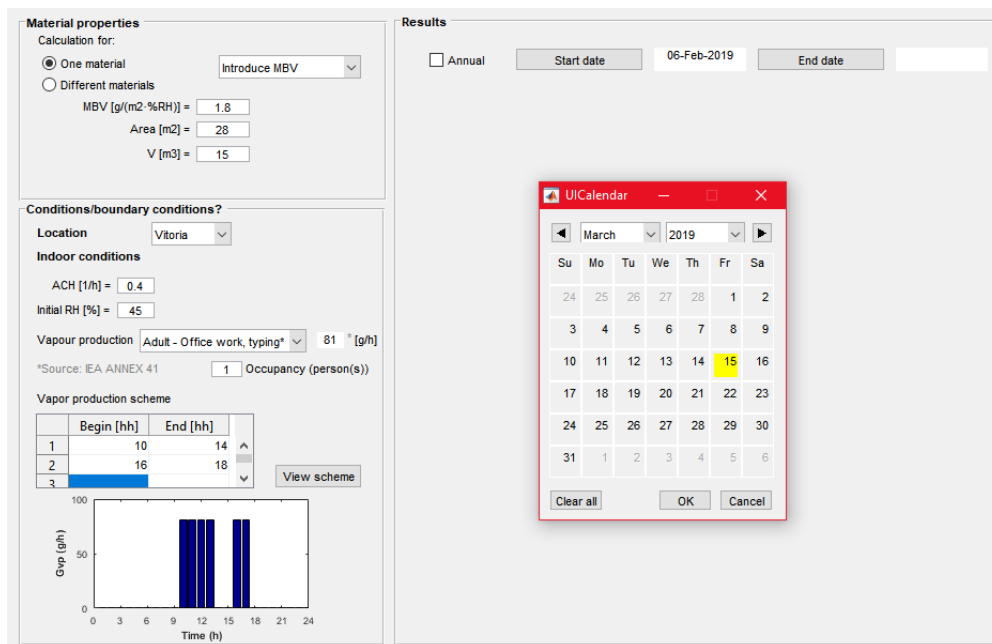


Figura 4-80: Datos de entrada herramienta de predicción HR interior

## DATOS DE SALIDA

Una vez introducidos todos los datos de entrada, la herramienta será capaz de predecir la humedad relativa interior de la estancia, con posibilidad de evaluar el riesgo de condensaciones y crecimiento de moho.

En el gráfico donde se muestra el transcurso de la humedad relativa en el interior de la estancia frente al tiempo, se representa, además del caso definido por el usuario teniendo en cuenta los materiales de acabado de la estancia, el transcurso de la humedad relativa para un caso no higroscópico (MBV = 0) (ver figura 4-81).

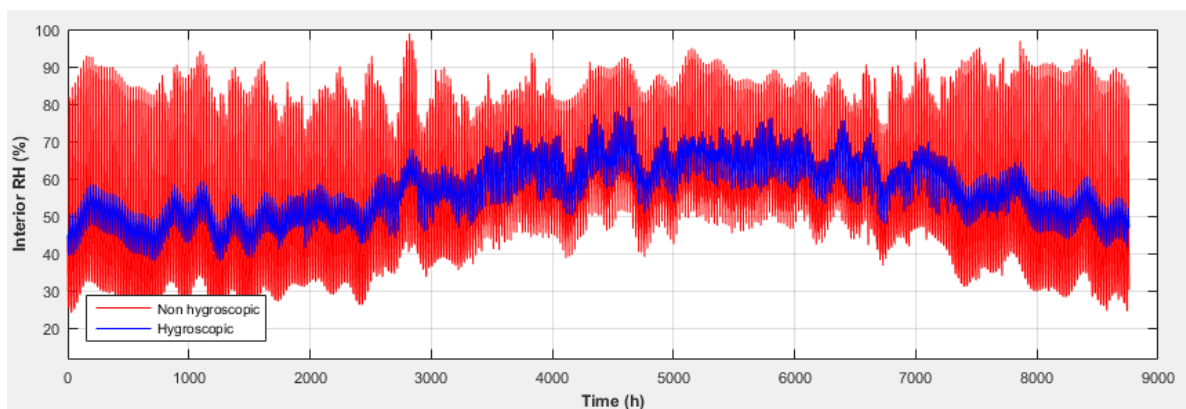


Figura 4-81: Predicción de la humedad relativa de la estancia simulada comparado con su caso no higroscópico correspondiente

Descripción, símbolo	Unidades
Inercia higroscópica de la habitación, HIR	[g/m <sup>3</sup> ]
Gráfico predicción humedad relativa interior	[%]
Gráfico evaluación riesgo crecimiento de moho	-
Gráfico comparativo para zonas climáticas diferentes	-

Tabla 4-80: Datos de salida herramienta predicción HR

Si el usuario introduce la transmitancia térmica del cerramiento,  $U$  [W/(m<sup>2</sup>·K)], la herramienta también será capaz de evaluar el riesgo de crecimiento de moho.

### Evaluación del riesgo de crecimiento de hongos

El análisis del riesgo de crecimiento de mohos se hace a través de las curvas LIM (*Lowest Isoplet for Mould*). Debido a que cada tipo de hongo tiene asociadas unas condiciones ambientales específicas para su germinación y crecimiento y que la evaluación para cada uno de ellos requeriría de mucho tiempo de análisis para cada uno de ellos, se usan las curvas LIM, que comprenden las condiciones límite ambientales de un grupo específico de hongos.

Cuando se quiere evaluar el riesgo de crecimiento de hongos en edificación, se utilizan las curvas LIM que contemplan aquellos hongos que pueden desarrollarse en los espacios interiores y que, además, son perjudiciales para la salud de los ocupantes. En este caso, la curva que se ha elegido es la correspondiente al hongo *Aspergillus Versicolor* (ver ecuación 4.30) [72].

$$\varphi_{crítica} = 0,033 \cdot T^2 - 1.5 \cdot T + 96 \quad (4.31.)$$

donde  $\varphi_{crítica}$  es la humedad relativa crítica [%] y  $T$  es la temperatura superficial del cerramiento [°C]. Se ha implementado en la herramienta la isopleta de este hongo porque es la más baja de entre aquellos que se suelen formarse en superficies interiores y, por tanto, el hongo con mayor riesgo de formación. Esta ecuación se usa para hacer análisis de riesgo de crecimiento de hongos para periodos prolongados en el tiempo y aunque para periodos más cortos (de días), se debería implementar otra función logarítmica, en la aplicación no se ha contemplado. Dicho esto, cabe señalar que, para hacer análisis de periodos de tiempo cortos, se debería de ampliar la información que proporciona la herramienta.

La evaluación del riesgo de formación de hongos se puede estudiar para una localización específica comparada con el caso análogo no higroscópico (ver imagen izquierda de figura 4-82) o se puede hacer una comparativa de los casos teniendo en cuenta el material de acabado interior para dos localidades diferentes (imagen derecha, figura 4-82).



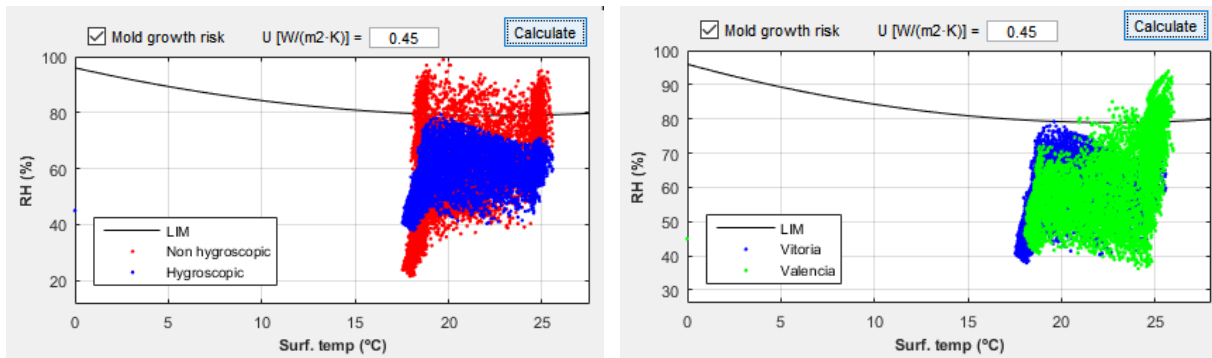


Figura 4-82: Evaluación riesgo de crecimiento de hongos en la superficie del cerramiento. Izquierda: comparativa para una localización de un caso higroscópico frente a su correspondiente no higroscópico. Derecha: comparativa casos higroscópicos para dos localidades diferentes

#### 4.4.2.COMPARATIVA CASOS DE ESTUDIO

Para analizar el efecto que el MBV tiene sobre las condiciones interiores y como puede contribuir a su mejora, a continuación, se analizan algunos casos de estudio y se comparan diferentes climatologías de la península utilizando la herramienta desarrollada.

Se considera una habitación de 2 x 2 x 2,3 metros (L x B x A), en la que hay una persona durmiendo durante 8 horas al día (23-07h), produciendo una producción de vapor correspondiente a 34 g/h. Se considera que las paredes y el techo tienen yeso como material de acabado, con un MBV correspondiente a 0,8 [g/(m<sup>2</sup>·RH)], siendo las condiciones iniciales de humedad relativa del 40%.

Cuando la estancia está ventilada acorde a las exigencias del CTE para dormitorios, correspondiente a 5 l/ocupante, la tasa de ventilación para esta estancia debería ser de 2 l/h. Cuando se cumple con las exigencias de ventilación del CTE, no debería haber riesgo de condensaciones ni de crecimiento de moho, incluso para los casos donde los materiales de acabado de los cerramientos sean no higroscópicos (pinturas o azulejos impermeables). En estos casos donde la ventilación es alta, el efecto del MBV de los materiales de acabado pierde importancia en el control de las condiciones higroscópicas, observándose una predicción de la humedad relativa en estancias con acabados no higroscópicos e higroscópicos muy similar (ver figura 4-83).

Aunque la estancia esté muy bien ventilada, para estancias localizadas en zonas climatológicas más húmedas y, en alguna ocasión puntual durante los días de verano, la humedad relativa interior puede alcanzar valores superiores al 80% de humedad relativa (ejemplo para Valencia en figura 4-83), evitable en zonas climatológicas más secas (ejemplo de Vitoria en figura 4-84). La comparativa de ambas localidades para los casos higroscópicos se puede ver en la figura 4-86.

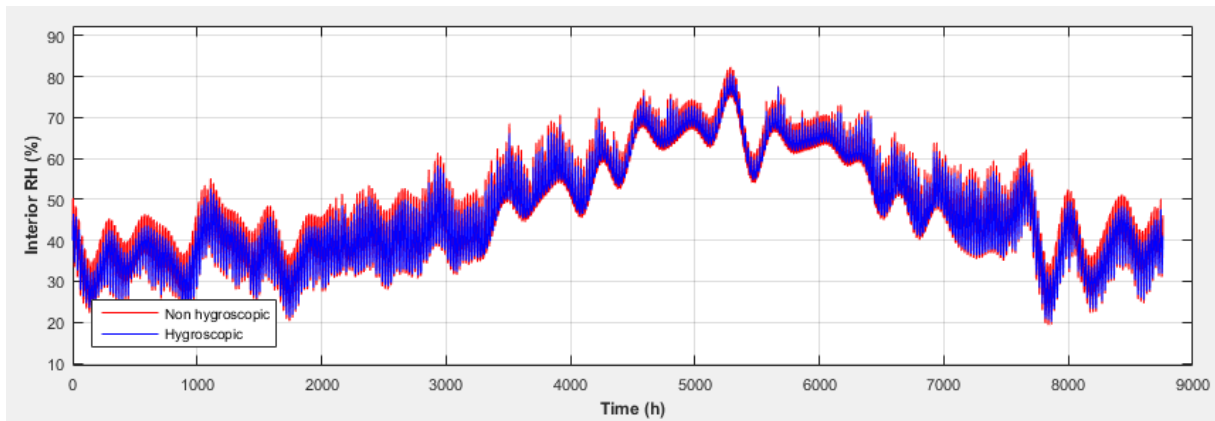


Figura 4-83: Comparativa anual de la evolución de la humedad relativa interior para la localidad de Valencia y una tasa de ventilación de 2 l/h.

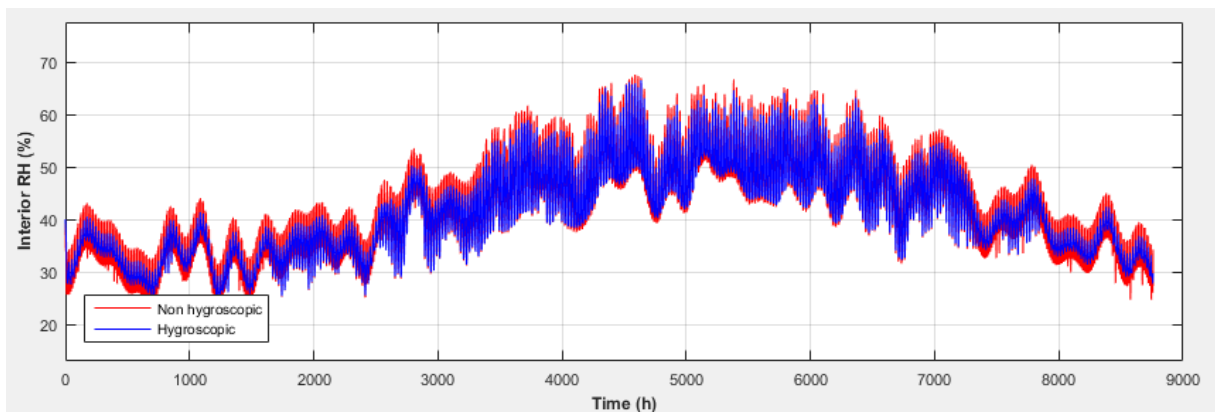


Figura 4-84: Comparativa anual de la evolución de la humedad relativa interior para la localidad de Vitoria y una tasa de ventilación de 2 l/h

Si se considera para estos casos una transmitancia térmica del cerramiento de  $U = 0,45$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ], se observa que, si la estancia está ubicada en Vitoria, no hay riesgo de crecimiento de moho para ambos casos, el no higroscópico y el higroscópico, aunque para el caso de Valencia, podría haber riesgo al sobrepasar las condiciones de la curva LIM considerada en el análisis (ver figura 4-85).

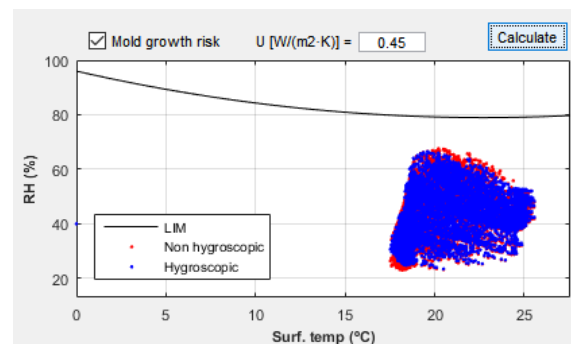
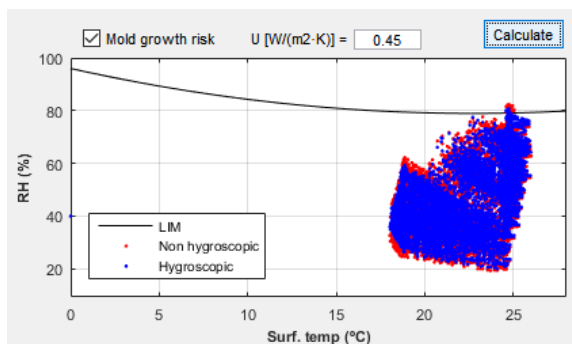


Figura 4-85: Análisis riesgo de crecimiento de moho para los casos no higroscópicos e higroscópicos en las localidades de Valencia (izquierda) y Vitoria (derecha)

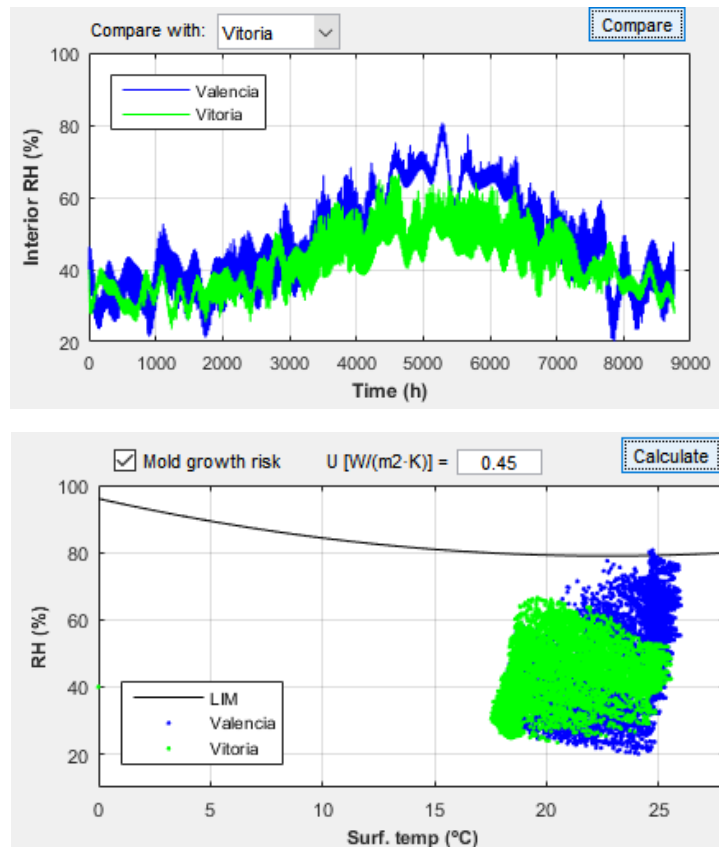


Figura 4-86: Comparativa anual de la evolución de la humedad relativa interior y riesgo de crecimiento de moho para los casos higroscópicos en estancias situadas en las localidades de Vitoria y Valencia, para una tasa de ventilación de 2 l/h

En el caso de Valencia, para evitar este tipo de riesgos, se debería de considerar la disposición de materiales higroscópicos con un potencial de amortiguación mayor al considerado para evitar la formación de hongos. Para ello, a continuación, se presenta un ejemplo que considera un material de acabado con un MBV de 2,12 [g/(m²·RH)] (por ejemplo, podría corresponder a un revestimiento de planchas de fibra de madera) que se aplica a las condiciones simuladas con anterioridad para la localidad de Valencia, para analizar cuán efectivo sería disponer de un revestimiento con mejores prestaciones de amortiguación de la humedad relativa con el fin de evitar el riesgo de crecimiento de hongos (ver figura 4-87).

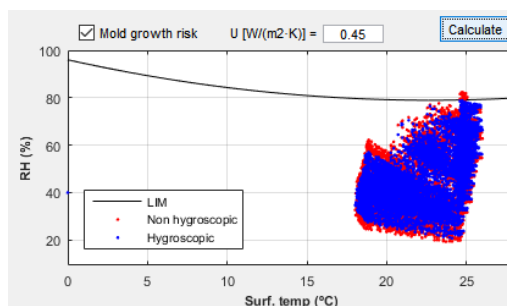


Figura 4-87: Análisis riesgo de crecimiento de moho para los casos no higroscópicos e higroscópicos en la localidad de Valencia para un material de revestimiento con un MBV de 2,12 [g/(m<sup>2</sup>·RH)].

Se observa que, al considerarse una tasa de ventilación tan alta (2 l/h), el cambio del MBV del material de acabado tiene un efecto muy bajo sobre las condiciones interiores, a pesar de que se haya considerado un valor mayor al doble del inicial de 2,12 frente a 0,8 [g/(m<sup>2</sup>·RH)] (comparar figuras 4-85 izquierda y 4-87).

Se debe observar que, en muchas viviendas no se realiza una adecuada ventilación y, por tanto, los valores normativos no se cumplen, pudiendo ser varias las causas. En el caso de ventilación natural, muchos usuarios no tienen como práctica habitual ventilar las estancias. A veces la configuración de la vivienda no permite que algunas habitaciones, como, por ejemplo, aquellas que no disponen de ventanas, no se ventilen de forma adecuada, aunque dispongan de rejillas de extracción. Otra mala práctica es cerrar las rejillas de ventilación por incomodidades térmicas, sobre todo en estaciones invernales, cuando se pierde calor por estas aberturas y algunos usuarios deciden taparlas.

Con el objetivo de comprobar algunos casos para tasas de ventilación más bajas a las establecidas por la normativa, si se realiza la misma prueba para una tasa de ventilación más baja, de por ejemplo 0,5 l/h. Los resultados revelan que, aunque se disponga de un material higroscópico como material de acabado, el riesgo de condensaciones y de crecimiento de moho es inevitable en algunas estaciones del año y existe riesgo de crecimiento de moho para cualquier climatología (ver figura 4-88 superior y 4-89 izquierda). Pero el disponer de materiales con un potencial de amortiguación más alto, reduce ese riesgo e incluso llega a eliminarlo para climas más secos (ver figura 4-88, inferior y figura 4-89, derecha) y, por tanto, será más fácil su prevención.

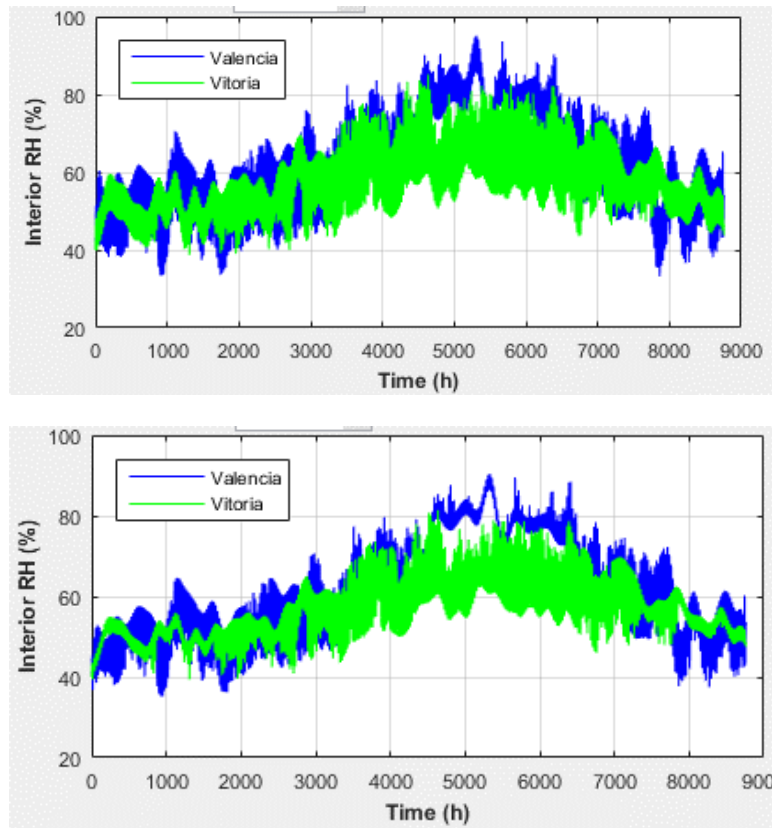


Figura 4-88: Comparativa anual de la evolución de la humedad relativa interior para la localidad de Valencia y Vitoria para una tasa de ventilación de 0,5 1/h. Caso higroscópico con un MBV = 0,8 [g/(m<sup>2</sup>·RH)] (superior) y con un MBV = 2,12 [g/(m<sup>2</sup>·RH)] (inferior).

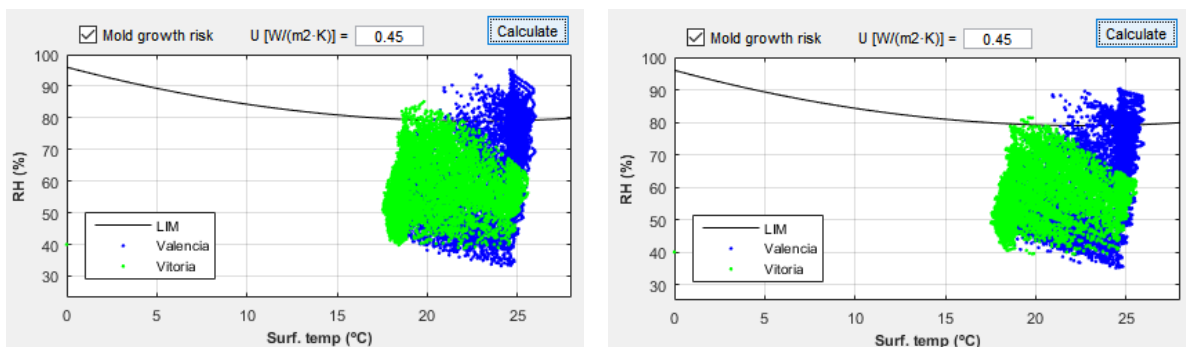


Figura 4-89: Análisis riesgo de crecimiento de moho para los casos no higroscópicos e higroscópicos en la localidad de Valencia para un material de revestimiento con un MBV de 0,8 [g/(m<sup>2</sup>·RH)] (izquierda) y con un MBV de 2,12 [g/(m<sup>2</sup>·RH)] (derecha).

Si la actividad o uso de la estancia fuera otro, el riesgo podría agravarse, dependiendo de la frecuencia de uso, ya que la producción de vapor de un adulto durmiendo es baja (34 g/h) con respecto a otras actividades como tareas de oficina (un adulto trabajando con un ordenador corresponde a una generación de vapor de 81 g/h) o domésticas (un adulto

cocinando corresponde a una generación de vapor de 162 g/h). Por tanto, es recomendable que se realicen simulaciones para cada caso en concreto.

Aunque en esta sección sólo se hayan comparado algunos casos para dos climatologías diferentes, se puede concluir que el incluir materiales higroscópicos de revestimiento podría evitar condensaciones superficiales y crecimiento de moho en algunos casos, especialmente cuando las tasas de ventilación no son suficientes a lo que dictan las normativas de exigencia, como es el CTE para viviendas residenciales.

## 4.5. CONCLUSIONES

Cuando se trata de identificar qué modelo es el que mejor define un proceso físico, no sólo es necesario obtener una concordancia de los resultados obtenidos con los valores de referencia (en este caso que la humedad relativa se describa tal a las mediciones), sino que, además se debe hacer un análisis que permita identificar si todos los parámetros implicados en el fenómeno son acordes a la realidad.

Como se ha comentado en varias secciones de este capítulo, no existen trabajos que hayan hecho una validación de los modelos de predicción de humedad relativa en interiores estudiados introduciendo diferentes tasas de ventilación en la ejecución de los ensayos. A través de este trabajo, el hecho de considerar la tasa de ventilación como variable, ha supuesto, a parte de una complejidad a la hora de realizar los ajustes y de interpretar los resultados, un aporte en el estudio de la transferencia de humedad entre el aire interior y los cerramientos.

Se partía de una idea errónea al considerar que la tasa de ventilación se mantendría constante y ha quedado demostrado, a partir de mediciones reales y a través de los resultados obtenidos mediante los ajustes de los modelos, que la tasa de ventilación en una vivienda no siempre se puede mantener dentro de una estabilidad aceptable. Por tanto, a la hora de hacer simulaciones y, aunque el CTE también considere unos valores límites fijos, el considerar que la tasa de ventilación se va a mantener constante, puede llevar a errores de cálculo en la predicción de la humedad relativa interior.

La comparativa de los modelos ajustados mediante la herramienta Excel, a excepción de algunos casos puntuales, muestra que el modelo EMPD es un modelo de mayor precisión que el modelo EC, lo que concuerda con las conclusiones que otros autores establecen (y que se recogen en la sección 4.2.). El hecho de diferenciar la humedad relativa del aire y del material de recubrimiento, dota al modelo EMPD de una mayor precisión, aunque si se quiere predecir sólo los valores máximos y mínimos de las fluctuaciones de la humedad relativa en una estancia, el modelo EC puede considerarse como válido.

Cuando se alcanzan valores superiores al 90% en el interior de los recintos, ambos modelos se exceden en la predicción de la humedad relativa. La causa puede estar relacionada con la dificultad de alcanzar estos valores de humedad relativa bajo condiciones reales y, además, en espacios no herméticos. En estos casos, también es probable que existan condensaciones en los puntos más fríos de la estancia, lo cual no está considerado en el

modelo debido a la dificultad de cuantificar la cantidad de agua condensada y, por tanto, crea discordancias entre los valores medidos y predichos de la humedad relativa interior.

En el capítulo 3 ya se ha hablado de que tomar valores fijos para las propiedades higroscópicas de los materiales cuando se está trabajando en un intervalo de humedad relativa, puede llevar a errores. Las propiedades higroscópicas dependen y cambian en función de los valores de humedad relativa, por lo que establecer valores constantes, puede ser fruto de error frente a las mediciones y simulaciones, principalmente en rangos de humedad relativa altos donde, por ejemplo, la isoterma de sorción aumenta de forma muy significativa, lo que implica cambios importantes en el comportamiento del material que no se ven reflejados en los modelos. Además, conviene destacar que el nivel de datos medidos e introducidos como datos de entrada en el modelado y ajuste es elevado, por lo que el número de incertidumbres incrementa, significando en una complejidad superior para lograr resultados reproducibles a la realidad mediante simulaciones.

La evaluación del modelado y ajuste del modelo EC utilizando la herramienta CTSM-R, ha revelado que, para los casos de verano, el fenómeno es reproducible y los errores entre las mediciones y los valores estimados se pueden atribuir a las imprecisiones en los equipos de medida y a ruido blanco (ver tabla 4-81). Para estos casos, por lo tanto, los resultados obtenidos se pueden considerar fiables y válidos. Para los casos de invierno, se desecha usar este método para los casos ensayados en pintura impermeable, siendo los resultados no representativos. Se considera que para este caso en especial, se debería implementar modelos más complejos, como podría ser el EMPD utilizando el método de Wiener para CTSM-R. El problema recae en que, al ser un material de acabado superficial, la obtención de sus propiedades higroscópicas es una tarea más compleja, razón por la que tampoco se ha podido implementar el modelo EMPD mediante Excel. Los casos de dormitorio con una tasa de ventilación de 0,2 l/h no se han podido analizar por la pérdida de algunos datos de entrada durante el ensayo.

	Pintura	Yeso	Fibra de madera	Sistema de aislamiento
<b>INVIERNO</b>				
Oficina 0,2	Rojo	Rojo	Verde	Naranja
Oficina 0,5	Rojo	Rojo	Naranja	Rojo
Dormitorio 0,2	Rojo	Naranja	Verde	Verde
Dormitorio 0,5	Rojo	Naranja	Verde	Verde
<b>VERANO</b>				
Oficina 0,2	Naranja	Verde	Naranja	Verde
Oficina 0,5	Naranja	Naranja	Verde	Verde
Dormitorio 0,2	Verde	Verde	-	-
Dormitorio 0,5	Verde	Verde	Verde	Verde

Tabla 4-81: Resumen análisis periodogramas del acumulado residual obtenido en CTSM-R. Verde: se reproduce correctamente el fenómeno. Naranja: adecuado, pero convendría aplicar un método más complejo. Rojo: no representa el fenómeno de transferencia de masa, se deben aplicar modelos de mayor complejidad.

Por lo general, las desviaciones obtenidas para las tasas de ventilación obtenidas mediante CTSM-R han sido más altas que las obtenidas a través del ajuste mediante Excel. Estos

valores no pueden ser directamente comparables, ya que el valor de la tasa de ventilación y su desviación obtenido en Excel se toma a partir de los valores obtenidos para cada ciclo de ensayo (24h horas). Cuando se ha implementado la técnica de modelado en CTSM-R, se ha considerado un único valor para la tasa de ventilación durante todo el ensayo, por lo que la desviación obtenida es fruto de una población de datos mucho más alta a la considerada en los ajustes mediante Excel.

Los ensayos mediante diferentes revestimientos interiores también han señalado que las fluctuaciones en interiores se reducen a medida que el MBV es mayor, aunque cuando las condiciones interiores de humedad relativa son altas, no se reflejan comportamientos muy diferenciados entre los materiales. Esto significa, que para ambientes donde las condiciones interiores de humedad relativa sean altas, elegir materiales con un comportamiento moderado o excelente, no supondrá en un impacto significativo sobre las condiciones de humedad relativa interior.

Las simulaciones con la herramienta diseñada para la predicción de la humedad relativa en interiores han señalado que, el disponer de materiales de acabado con un alto potencial de amortiguación de la humedad relativa frente a los cambios bruscos de ésta, puede ser una solución para evitar el riesgo de condensaciones superficiales y de aparición y crecimiento de moho, ya que su disposición no solo reduce las oscilaciones de humedad relativa, sino que también disminuye los valores máximos de humedad relativa obtenidos o, al menos, se repiten con menos frecuencia.

Cuando las tasas de ventilación son altas, la efectividad de los materiales higroscópicos se ven reducidos, observando comportamientos similares para casos con revestimientos higroscópicos y no higroscópicos. También se debe destacar que, para estancias situadas en zonas climáticas donde las condiciones exteriores son más húmedas, a veces sólo con el uso de materiales higroscópicos no se puede evitar totalmente el riesgo de condensaciones y aparición de mohos, por lo que se deberían tomar otras acciones como la aumentar la ventilación.

En definitiva, se puede establecer que el uso de materiales higroscópicos en interiores puede contribuir a mejorar las condiciones interiores y a evitar condiciones interiores insalubres, siendo en algunos casos donde las viviendas no se ventilan de forma adecuada, una solución pasiva que no requiera la preocupación de los usuarios.





# CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Los objetivos generales de esta tesis han sido la caracterización higroscópica completa de cuatro materiales de construcción junto al estudio de su potencial de amortiguación frente a las oscilaciones bruscas de humedad relativa en interiores, con el fin de establecer su comportamiento en un edificio y, además, evaluar el impacto que los materiales higroscópicos tienen sobre el balance higroscópico de los espacios interiores.

En base a los resultados obtenidos mediante la caracterización higroscópica, se puede concluir que nos encontramos ante materiales de diferente tipología en referencia al comportamiento capilar e higroscópico.

La perlita expandida es un material capilarmente muy activo, pero a su vez, poco higroscópico. Al analizar de forma combinada los resultados de la distribución de tamaño de poro y de las propiedades higroscópicas, se concluye que el material tiene poros finos que permiten succión al agua líquida, pero en cambio, hay otros con un diámetro demasiado grande para permitir la adsorción de vapor de agua, lo que se refleja en un coeficiente de absorción capilar muy alto y una baja higroscopicidad según la isoterma de sorción (la más baja de los materiales investigados). Siendo un material aislante y con una porosidad tan alta, aunque este material sea capaz de redistribuir el agua líquida en toda su sección gracias a su alto coeficiente de absorción capilar y pueda evitar problemas de condensación en algunos casos, hay que evitar que el material se humedezca, ya que podría perder sus propiedades aislantes, además, de los problemas asociados a la congelación que éste podría acarrear. Además de presentar la higroscopicidad más baja, es el material que presenta un potencial de amortiguación de las oscilaciones bruscas de la humedad relativa más bajo, con un MBV práctico de 0,50 [g/(m<sup>2</sup>·%RH)], lo que lo dota de una capacidad limitada para intercambiar humedad con el aire. Tener un MBV bajo no debería ser una desventaja, ya que, al ser un material de aislamiento, va a ocupar una posición interior en el cerramiento y, habitualmente, estas capas no forman parte del fenómeno de transferencia de humedad con el aire cuando se producen oscilaciones de humedad relativa en periodos de tiempo corto. La evaluación de los resultados del capítulo 3 señalan que, si se siguen las especificaciones de espesores del fabricante, el fenómeno de transferencia de humedad entre el aire y el cerramiento se produce en más de una capa. Esto podría implicar a las planchas de perlita expandida en el fenómeno de transferencia de humedad. Lo que se sugiere es que se asegure que los materiales que se colocan sobre este material excedan de su MPD, ya que, por lo general, van a tener un MBV más alto, dotando al cerramiento de mejores prestaciones frente al control de las oscilaciones bruscas de la humedad relativa.

Los yesos estudiados en este trabajo son ambos materiales higroscópicos, pero al hablar de la capilaridad de éstos, se observa que tienen un comportamiento diferente, presentando el yeso de acabado una capilaridad mayor al yeso de agarre. Esto se ve reflejado en la estructura porosa y en el grado de saturación capilar obtenido. El yeso de acabado presenta una distribución de tamaño de poro más uniforme y un grado de saturación del 75%, valor mayor al obtenido para el yeso de agarre, de casi el 40%. El yeso

de agarre, en cambio, presenta una mayor diferencia de tamaño de poro y, la conexión entre poros finos (microporos) y poros gruesos (mesoporos) hacen que la absorción de agua se ralentice, quedando, además, mayor atrapamiento de aire en los poros, lo que concuerda con un grado de saturación capilar bajo, próximo al 40%. Con respecto al MBV práctico obtenido, se observa que ambos materiales tienen un valor similar, siendo el del yeso de acabado mayor (0,82 frente a 1,08 [g/(m<sup>2</sup> · %RH)], respectivamente). Con respecto al MBV ideal, el yeso de agarre es el único material de los cuatro ensayados que ha resultado ser mayor que el práctico. Hay que señalar, que el yeso de acabado es el material que presenta un grado de saturación más alto con respecto al resto de materiales ensayados. La razón es que es el único material que presenta una estructura porosa comprendida únicamente por un tipo de poros (<2nm), lo que implica que las combinaciones entre poros son de tamaños similares y es más difícil que ocurra atrapamiento de aire.

Al observar los resultados obtenidos para la fibra de madera se concluye que este material corresponde a la tipología de materiales higroscópicos y no capilares. Los materiales a base de madera, por lo general, tienen una absorción capilar muy baja y, por tanto, la capilaridad no se puede aprovechar como mecanismo de transporte de humedad. El ensayo de intrusión de mercurio ha revelado que el material tiene una estructura porosa en la que existen diferentes subsistemas de poros, encontrando microporos, mesoporos y macroporos. La estructura macroporosa impide la succión capilar y los microporos tienen una resistencia a la fricción tan alta que impide el transporte capilar, lo que ha supuesto dificultades a la hora de realizar los ensayos de absorción capilar. La curva de sorción capilar para la fibra de madera destaca sobre la del resto de materiales, como suele ser habitual para materiales a base de madera, que destacan por una capacidad de almacenamiento de humedad muy alta. Con respecto a los resultados obtenidos para la curva del factor de resistencia a la difusión del vapor de agua, destaca la similitud obtenida en forma a la de la perlita expandida; además, ambos materiales son los únicos que han obtenido una estructura porosa que combina microporos, mesoporos y macroporos.

El material que ha obtenido mayores desviaciones en los resultados obtenidos en la caracterización higroscópica y en la obtención del MBV práctico ha sido la fibra de madera. Se cree que la causa principal de estas desviaciones es la heterogeneidad del material. Este material ya se presenta desigual a nivel macroscópico debido a que el entrelazado de las fibras que lo componen no sigue un patrón establecido y, además, es un producto fruto de la combinación de varios materiales, donde el material principal, la madera, ya se define como un material heterogéneo y anisotrópico. El material con desviaciones menores, además de una histéresis inapreciable, ha sido la perlita expandida y, aunque las planchas de aislamiento también surgen de la combinación de materiales diferentes, su proceso de fabricación puede que sea el más industrializado y, por tanto, exista menos desviación entre las propiedades de cada pieza al lograr un producto más uniforme.

Debido a que las definiciones del MBV ideal y práctico se basan en asunciones diferentes, sus valores pueden tomar valores diferentes. En el capítulo 3, además de hacer una comparativa de los resultados obtenidos, se han tratado de identificar los parámetros que pueden ser la causa de estas discordancias. Hoy en día, solo hay estudios que demuestran que los factores descritos en esta sección pueden tener un impacto en los resultados, pero

se cree que otros parámetros como la rugosidad del material, que podría modificar el coeficiente de transferencia de masa por convección, podría alterar la capacidad de amortiguación del material frente a la humedad relativa. Debido a que en el análisis de los resultados se ha identificado que hay variaciones para todos los materiales, se cree conveniente que cuando se hagan estudios del MBV, se tengan en cuenta ambas definiciones y haya un control de los parámetros que pueden alterar su valor.

En los ensayos de MBV práctico se ha observado que cada material necesita un periodo diferente para alcanzar unas condiciones de estabilidad en su cambio de masa. Cuando los materiales necesitan de un tiempo de estabilización elevado, como ha sido en el caso de los yesos, se debe considerar que existe una inercia a considerar para cada producto y que, en algunos casos, puede ser significativo hasta que el material alcanza el máximo aprovechamiento de su capacidad de amortiguación de la humedad relativa. Por tanto, estos tiempos de estabilización se deberían considerar, sobre todo, para simulaciones de periodos cortos de tiempo.

A través del ajuste y validación de los modelos de predicción de humedad relativa se ha observado que el modelo EMPD tiene una mayor precisión en la predicción de la humedad relativa que el modelo EC. La aplicación del modelo EMPD requiere la caracterización del material de aplicación, ya que como datos de entrada se necesitan las propiedades higroscópicas de isoterma de sorción y de permeabilidad al vapor de agua. Como la caracterización higroscópica requiere de un tiempo de ensayo elevado, cuando se dispone de los equipos necesarios para la obtención del MBV práctico, a veces se descarta la opción de la caracterización higroscópica, obteniéndose únicamente el MBV práctico y aplicando el modelo EC. Este proceso resulta mucho más rápido, ya que el tiempo de experimentación del MBV práctico es mucho menor que el tiempo de caracterización higroscópica. Para estos casos y aunque el modelo EC no describa de forma correcta la evolución de la humedad relativa entre los picos de humedad, se puede considerar como un modelo fiable y de fácil aplicación, determinándose los valores máximos y mínimos con una aproximación bastante buena.

Cabe señalar que, cuando los valores de humedad relativa interiores son altos (>90%) y para los resultados obtenidos, ambos modelos pierden precisión, excediéndose en la predicción de la humedad relativa. Una de las causas a las que se puede señalar es que, en la estancia no se han podido alcanzar los valores predichos por los modelos porque podría haber ocurrido condensación en el interior del recinto (muy probable debido a los valores tan altos de humedad relativa alcanzados en el interior), lo cual es difícil de cuantificar e implementar en el modelo. Además, cabe señalar que, realizados los ensayos de *Blower Door*, se constata que los recintos de ensayo no son muy herméticos, por tanto, era muy difícil alcanzar las condiciones que los modelos han predicho (alcanzando valores del 100% de humedad relativa).

En este trabajo se ha implementado una nueva herramienta en Rstudio para la validación de los modelos de predicción de humedad relativa en interiores. CTSM-R es una herramienta que ya ha sido implementada para identificar parámetros en el modelado de simulaciones dinámicas de calor en edificación. Se cree que el implementar este tipo de herramientas en la validación de los modelos de predicción de la humedad relativa interior

es muy útil ya que permite determinar si el fenómeno de transferencia de humedad es reproducible y ayuda a descartar los errores debidos a la imprecisión de los equipos o ruido blanco. Implementando CTSM-R, también se puede hacer un análisis sobre la fiabilidad de los modelos, permitiendo identificar cuando el modelo tiene la suficiente complejidad para reproducir el fenómeno de estudio correctamente. Con respecto a los resultados obtenidos y debido a que sólo se ha podido validar el modelo EC, se concluye que los resultados sólo son fiables para los casos de verano. Como los resultados no han sido buenos para todos los casos de ensayo, convendría aplicar el modelo EMPD sobre CTSM-R que, al tener una mayor precisión, probablemente llegaría a ser representativo para todas las condiciones ensayadas.

En cuanto a la efectividad de los materiales de revestimiento sobre las condiciones interiores, se puede afirmar que, cuando una estancia está bien ventilada, los materiales higroscópicos no tienen un impacto significativo. En cambio, cuando se trate de viviendas donde, por mala práctica de los usuarios, por estancamiento del aire debido a la configuración de la vivienda o en situaciones donde se produzcan picos de humedad repentina (especialmente en cocinas y baños), estos materiales pueden jugar un papel fundamental en la prevención de condensaciones superficiales y el crecimiento de moho. Disponiendo de estos materiales, en algunas situaciones se podría prescindir de la ventilación como solución a estos problemas.

## **5.1. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN**

Se exponen a continuación algunas ideas en las que se podría seguir investigando esta línea de investigación, además de ampliar algunos trabajos que ya se han iniciado a partir de esta investigación.

Como se ha comentado en la sección anterior de este capítulo, algunos materiales de construcción necesitan un tiempo de estabilización elevado hasta alcanzar un cambio de masa estable. Se cree conveniente cuantificar, si el no tomar en cuenta este periodo inicial de estabilización, puede afectar en la simulación de la predicción de la humedad relativa, en especial para simulaciones de periodos de tiempo cortos.

En el capítulo 4, en la sección donde se describen los modelos de predicción de humedad relativa se explica que, la implementación del modelo EMPD supone que el espesor del material de acabado supera el MPD. Para los casos donde esta capa no se supera, como es el caso de los ajustes realizados en esta tesis, se puede aplicar un factor de corrección que minimiza el potencial de amortiguación de la humedad relativa. Aunque se aplique la capacidad del material de acabado, el modelo no considera las capas que, además de la de acabado, toman parte en la transferencia de humedad con el aire. Dicho ésto, para mejorar la precisión del modelo EMPD y no subestimar la capacidad del cerramiento, se deberían poder considerar todas aquellas capas que toman parte en el fenómeno.

Para la validación de los modelos de predicción de humedad relativa en interiores, además de utilizarse la herramienta Excel, se ha introducido una nueva herramienta de modelado, CTSM-R. Como se ha comentado en las conclusiones y debido a que la introducción de este

tipo de herramientas para la identificación de parámetros en el modelado de simulaciones dinámicas de calor en edificación ha dado buenos resultados, se cree que podría introducirse en el modelado de las simulaciones dinámicas de humedad. En este trabajo se ha realizado un primer aporte y se ha aplicado en el ajuste del modelo EC y, aunque los resultados no han sido totalmente satisfactorios, para algunas condiciones de ensayo (como el caso de los ensayos realizados en verano) los resultados sí han resultado favorables. Debido a que no se ha podido implementar el modelo EMPD, se cree necesario que se realicen los ajustes con esta herramienta con el fin de verificar si, la aplicación de un modelo más complejo, en este caso el EMPD, conlleva a resultados más satisfactorios.

En el capítulo 4, además, al desarrollar la herramienta de predicción de humedad relativa en interiores, se ha hecho un pequeño apunte sobre la posible influencia que la posición de los materiales podría tener sobre el MBV del material. Se considera que se debe evaluar si la disposición de los materiales higroscópicos en, por ejemplo: paredes, suelo o techo, tiene un impacto significativo sobre su potencial de amortiguación. De ser así, debería de cuantificarse en qué medida hay una reducción o aumento del potencial en función de su ubicación para poder introducir correctamente sus propiedades en los modelos de predicción de humedad relativa en función de su emplazamiento.

En cuanto a la ventilación, debido a que garantizar unas condiciones mínimas de ventilación se ha convertido en un nuevo requisito del CTE en nueva edificación, se debería realizar un estudio del comportamiento de los materiales de acabado higroscópicos en edificios frente a diferentes sistemas de ventilación eficientes con el fin de obtener el uso óptimo de esta capacidad.

Un tema muy interesante relacionado con la energía sería cuantificar el impacto energético de los sistemas activos HVAC al disponer materiales higroscópicos en interiores. Este tema está relacionado con el punto desarrollado en el párrafo anterior, ya que en el caso de disponer de sistemas de ventilación higrorregulables en función de la humedad relativa, al disponer de materiales higroscópicos que regulen las fluctuaciones de humedad relativa, podría significar en una disminución del funcionamiento del sistema de ventilación, lo que implicaría una reducción del consumo energético.

Debido a que los niveles de humedad juegan un papel muy importante en la calidad de aire, también se debería ampliar el conocimiento sobre el impacto que genera su disposición sobre los niveles de calidad ambiental interior. Además, como se ha hecho mención en el estado del arte, empiezan a desarrollarse materiales higroscópicos que, a la vez que reducen los niveles de humedad relativa, son capaces de reducir el nivel de los VOCs. Para este tipo de materiales, además, se podría cuantificar la reducción energética de los sistemas de demanda controlada de ventilación por VOCs.



# BIBLIOGRAFÍA

- [1] DEL GOBIERNO, Presidencia (1975). Decreto 1490/1975, de 12 de junio, por el que se establecen medidas a adoptar en las edificaciones con objeto de reducir el consumo de energía. *Boletín Oficial del Estado*, 165.
- [2] DEL GOBIERNO, Presidencia (1979), Real Decreto 2429/1979, de 6 de julio, por el que se aprueba la norma básica de edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios. *Boletín Oficial del Estado*, 1979, 253: 24524-24550.
- [3] ARUNDEL, Anthony V., et al. (1986). Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. *Environmental health perspectives*, 65: 351-361.
- [4] REINIKAINEN, Leena M.; JAAKKOLA, Jouni JK; HEINONEN, Olli P. (1991). The effect of air humidification on different symptoms in office workers—An epidemiologic study. *Environment International*, 17.4: 243-250.
- [5] FANG, Lei; CLAUSEN, Geo; FANGER, Povl Ole. (1998). Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality. *Indoor air*, 8.2: 80-90.
- [6] BERGLUND, Larry G. (1998). Comfort and humidity. *ASHRAE journal*, 40.8: 35.
- [7] THOMSON, Garry (1986). *The museum environment*, 2nd ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K.
- [8] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (2015). *2015 ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating, and Air-conditioning Applications, Inch-Pound Edition*.
- [9] HENS, Hugo SL. (2016). *Applied building physics: ambient conditions, building performance and material properties*. John Wiley & Sons.
- [10] UNE-EN ISO 12571 (2013). Hygrothermal Performance of Building Materials and Products—Determination of Hygroscopic Sorption Properties.
- [11] UNE-EN ISO 12572 (2016). Hygrothermal Performance of Building Materials and Products—Determination of water transmission properties – Cup method.
- [12] WOODS, J.; WINKLER, J.; CHRISTENSEN, Dane (2013). *Evaluation of the effective moisture penetration depth model for estimating moisture buffering in buildings*. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).
- [13] KERESTECIOGLU, A.; SWAMI, M.; KAMEL, A. (1990). Theoretical and computational investigation of simultaneous heat and moisture transfer in buildings: effective penetration depth theory. *Ashrae Transactions*, 96.1: 447-454.
- [14] CUNNINGHAM, M. J. (1988). The moisture performance of framed structures—A mathematical model. *Building and Environment*, 23.2: 123-135.



- [15] CUNNINGHAM, Malcolm J. (1992). Effective penetration depth and effective resistance in moisture transfer. *Building and Environment*, 27.3: 379-386.
- [16] ARFVIDSSON, Jesper (1999). A new algorithm to calculate the isothermal moisture penetration for periodically varying relative humidity at the boundary. *Nordic Journal of Building Physics*, 2.
- [17] TIME, Berit (1998). *Hygroscopic moisture transport in wood*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- [18] PADFIELD, Tim (1998). The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity. *Department of Structural Engineering and Materials, Lyngby, Technical University of Denmark*.
- [19] PEUHKURI, Ruut (2003). *Moisture dynamics in building envelopes*. BYG. DTU.
- [20] RODE, Carsten, et al. (2005). Moisture buffering of building materials.
- [21] HENS, H. (1992). IEA annex 14: condensation and energy. *Journal of thermal insulation*, 15.3: 261-273.
- [22] RAMOS, Nuno; DE FREITAS, Vasco Peixoto (2004). Hygroscopic Inertia as a function of transient behavior of covering materials. In: *Proceedings of Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings IX International Conference*.
- [23] HARDERUP, Lars-Erik (2005). A pc-model to predict moisture buffer capacity in building materials according to a Nordtest method. In: *7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, 2005*. The Icelandic Building Research Institute. p. 1155-1162.
- [24] JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION (2002). Test method of adsorption/desorption efficiency for building materials to regulate an indoor humidity—Part 1: Response method of humidity. *JIS A*, 2002: 1470e1.
- [25] ISO 24353:2008. Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of moisture adsorption/desorption properties in response to humidity variation.
- [26] ROELS, Staf; JANSSEN, Hans (2006). A comparison of the Nordtest and Japanese test methods for the moisture buffering performance of building materials. *Journal of Building Physics*, 30.2: 137-161.
- [27] GÓMEZ, I., et al. (2011). Moisture buffering performance of a new pozolanic ceramic material: Influence of the film layer resistance. *Energy and Buildings*, 43.4: 873-878.
- [28] JANSSEN, Hans; ROELS, Staf (2007). The hygric inertia of building zones: characterisation and application. *IEA Annex*, 41.
- [29] JANSSEN, Hans; ROELS, Staf (2009). Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures. *Energy and Buildings*, 41.4: 382-394.

- [30] SVENNBERG, Kaisa (2006). *Moisture buffering in the indoor environment*. Building Physics, LTH, Lund University.
- [31] SALONVAARA, Mikael, et al. (2004). Moisture buffering effects on indoor air quality-experimental and simulation results. In: *Proceedings (CD) of the Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings IX International Conference*. p. 11.
- [32] MORTENSEN, Lone Hedegaard; RODE, Carsten; PEUHKURI, Ruut Hannele (2005). Full scale tests of moisture buffer capacity of wall materials. In: *7th Nordic Symposium on Building Physics*. The Icelandic Building Research Institute, IBRI.
- [33] ROELS, Staf, et al. (2010). Reliability of material data measurements for hygroscopic buffering. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53.23-24: 5355-5363.
- [34] GIOSUÈ, Chiara, et al. (2017). Improving the impact of commercial paint on indoor air quality by using highly porous fillers. *Buildings*, 7.4: 110.
- [35] RODE, Carsten; GRAU, Karl (2003). Whole building hygrothermal simulation model. *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS*, 109.1: 572-582.
- [36] SALONVAARA, M. H.; SIMONSON, C. J. (2000). Mass transfer between indoor air and a porous building envelope: Part II. Validation and numerical studies. In: *Proceedings of healthy buildings*.
- [37] SVENNBERG, Kaisa; HEDEGAARD, Lone Grønabæk; RODE, Carsten (2004). Moisture buffer performance of a fully furnished room. In: *Moisture Buffer Performance of a Fully Furnished Room*.
- [38] KIM, Hea-Jeong, et al. (2010). The hygric performances of moisture adsorbing/desorbing building materials. *Aerosol Air Qual. Res*, 10: 625-634.
- [39] ZHANG, Huibo, et al. (2017). Practical moisture buffering effect of three hygroscopic materials in real-world conditions. *Energy and Buildings*, 139: 214-223.
- [40] ZHANG, Huibo; YOSHINO, Hiroshi; HASEGAWA, Kenichi (2012). Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method. *Building and environment*, 48: 27-34.
- [41] VEREECKEN, Evy; ROELS, Staf; JANSSEN, Hans (2011). In situ determination of the moisture buffer potential of room enclosures. *Journal of Building Physics*, 34.3: 223-246.
- [42] DA SILVA, C. F., et al. (2017). Improvement of indoor air quality by MDF panels containing walnut shells. *Building and Environment*, 123: 427-436.
- [43] ROELS, Staf, et al. (2004). Interlaboratory comparison of hygric properties of porous building materials. *Journal of thermal envelope and building science*, 27.4: 307-325.

- [44] GÓMEZ, I. (2006). Caracterización higroscópica de materiales de construcción: arcilla aligerada y picón. PhD Thesis. Ph. D. thesis, Universidad del País Vasco.
- [45] KLŮŠEIKO, Paul; VARDA, Kadi; KALAMEES, Targo (2017). Effect of freezing and thawing on the performance of “capillary active” insulation systems: a comparison of results from climate chamber study to HAM modelling. *Energy Procedia*, 132: 525-530.
- [46] VEREECKEN, Evy; ROELS, Staf (2015). Capillary active interior insulation: do the advantages really offset potential disadvantages? *Materials and Structures*, 48.9: 3009-3021.
- [47] WU, Yi, et al. (2014). The hygroscopic properties of wood fibre, sepiolite and expanded perlite-based breathable wall for moderating the humidity environment. *Indoor and Built Environment*, 23.2: 299-312.
- [48] DE LA GREE, GCH Doudart; YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. (2014). Wood-wool cement board: optimized inorganic coating. In: *Proceedings of the 14th International Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference (IIBCC)*. p. 19.
- [49] EVERETT, D. H. (1972). Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units, appendix II: Definitions, terminology and symbols in colloid and surface chemistry. *Pure and Applied Chemistry*, 31.4: 577-638.
- [50] ASTM D4404-10 (2010). Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry. *ASTM International*.
- [51] NBN, B. B 24-213 (1976). *Belgische norm: proeven op metselstenen-wateropsloping onder vacuum*.
- [52] UNE-EN ISO 15148 (2003). Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion.
- [53] ASTM C1498-04a (2016). Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials. *ASTM International*.
- [54] ASTM E96/E96M-16 (2016). Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. *ASTM International*.
- [55] UNE-EN ISO 12570 (2000). Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of moisture content by drying at elevated temperature.
- [56] KÜNZEL, Hartwig M. (1995). Simultaneous heat and moisture transport in building components. *One-and two-dimensional calculation using simple parameters*. IRB-Verlag Stuttgart.
- [57] IEA-Annex 14. (1991). Condensation and Energy, Final Report, Volume 1: Source Book, Volume 3: Catalogue of Material Properties. Leuven.

- [58] SCHIRMER, Robert (1938). *Die Diffusionszahl von Wasserdampf-Luft-Gemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit*. PhD Thesis. VDI-Verlag.
- [59] ZHAO, Jianhua, et al. (2017). Evaluation of capillary-active mineral insulation systems for interior retrofit solution. *Building and Environment*, 115: 215-227.
- [60] GOOSSENS, Emile Leopold Johan (2003). *Moisture transfer properties of coated gypsum*. TU/e, Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde.
- [61] WU, Yang (2007). *Experimental study of hygrothermal properties for building materials*. PhD Thesis. Concordia University.
- [62] GALLIANO, Rosanna, et al. (2015). Hygrothermal behaviour of three internal retrofit prototype solutions. *Energy Procedia*, 78: 1413-1418.
- [63] Gómez-Arriaran (2016), Capacidad de amortiguación en la humedad interior. *Guía de Calidad del Aire Interior*, dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid.
- [64] PEUHKURI, R.; RODE, Carsten (2005). Moisture buffer value: Analytical determination and use of dynamic measurements. *IEA, ECBCS Annex*, 41.
- [65] RAMOS, Nuno MM; DE FREITAS, Vasco P.; DELGADO, João PQ. (2005). Hygroscopic inertia of a room Evaluation of finishing materials contribution. *International Energy Agency: Annex 41-Whole Building Heat, Air and Moisture Response (MOIST-ENG)*.
- [66] DELGADO, J. M. P. Q.; RAMOS, N. M. M.; DE FREITAS, V. P. (2006). Can moisture buffer performance be estimated from sorption kinetics?. *Journal of building physics*, 29.4: 281-299.
- [67] ERBA, Silvia; CAUSONE, Francesco; ARMANI, Roberto (2016). The effect of weather datasets on building energy simulation outputs. *Energy Procedia*, 134: 545-554.
- [68] MADSEN, Henrik; HOLST, Jan (1995). Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building. *Energy and buildings*, 22.1: 67-79.
- [69] ANDERSEN, Klaus Kaae; MADSEN, Henrik; HANSEN, Lars H. (2000). Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equations. *Energy and Buildings*, 31.1: 13-24.
- [70] BACHER, Peder; MADSEN, Henrik (2011). Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy and Buildings*, 43.7: 1511-1522.
- [71] UNE-EN 15026 (2007). Hygrothermal performance of building components and building elements—Assessment of moisture transfer by numerical simulation.
- [72] HENS, H. S. L. C. (2003). Mold in dwellings: field studies in a moderate climate. In: *Proceedings of the 24th AIVC Conference and BETEC Conference, Ventilation, Humidity Control and Energy*. AIVC. p. 12-14.



# ANEXOS

**ANEXO A: Propiedades higroscópicas de los materiales**

**ANEXO B: *Moisture Buffer Value* práctico**



## ANEXO A: Propiedades higroscópicas de los materiales

### A.1. SATURACIÓN EN VACÍO

#### A.1.1. Perlita

Código muestra	$m_d$ [g]	$m_w$ [g]	$m_a$ [g]	$V_m$ [m <sup>3</sup> ]	$V_a$ [m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]	$\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$w_{sat}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
P1	10,82	117,07	1,24	9,58E-06	1,16E-04	91,73	93,43	1129,78	917,31
P2	11,17	117,23	1,39	9,78E-06	1,16E-04	91,56	96,42	1141,78	915,55
P3	10,67	117,92	1,22	9,46E-06	1,17E-04	91,90	91,45	1128,59	918,97
P4	11,76	116,09	1,63	1,01E-05	1,14E-04	91,15	102,78	1160,84	911,46
P6	11,86	125,26	1,47	1,04E-05	1,24E-04	91,61	95,78	1141,85	916,12
P7	11,88	120,91	1,52	1,04E-05	1,19E-04	91,32	99,47	1146,23	913,22
P8	10,98	119,07	1,32	9,66E-06	1,18E-04	91,80	93,23	1136,43	917,96
P9	11,28	117,62	1,41	9,87E-06	1,16E-04	91,50	97,09	1142,59	915,03
P10	11,16	118,49	1,35	9,81E-06	1,17E-04	91,62	95,26	1137,28	916,24
P11	11,31	113,07	1,53	9,78E-06	1,12E-04	91,23	101,39	1156,47	912,33
P12	11,61	117,36	1,55	1,01E-05	1,16E-04	91,31	100,28	1154,38	913,13
$\bar{X}$						<b>91,52</b>	<b>96,96</b>	<b>1143,29</b>	<b>915,21</b>
$\sigma$						<b>0,23</b>	<b>3,47</b>	<b>10,00</b>	<b>2,31</b>

#### A.1.2. Yeso de agarre

Código muestra	$m_d$ [g]	$m_w$ [g]	$m_a$ [g]	$V_m$ [m <sup>3</sup> ]	$V_a$ [m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]	$\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$w_{sat}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
B8	289,55	414,20	179,43	1,10E-04	2,35E-04	53,09	1233,33	2629,33	530,93
B9	300,96	431,29	186,27	1,15E-04	2,45E-04	53,19	1228,35	2624,14	531,90
B10	285,80	410,63	177,48	1,08E-04	2,33E-04	53,54	1225,78	2638,38	535,41
B11	324,59	466,19	202,79	1,22E-04	2,63E-04	53,76	1232,27	2664,95	537,60
B12	286,93	409,31	177,55	1,09E-04	2,32E-04	52,80	1238,03	2623,22	528,05
B-P37	139,24	199,63	86,05	5,32E-05	1,14E-04	53,17	1225,85	2617,87	531,74
B-P38	148,26	212,43	91,42	5,68E-05	1,21E-04	53,03	1225,11	2608,39	530,32
B-P39	165,17	236,90	102,58	6,26E-05	1,34E-04	53,40	1229,75	2639,00	534,01
B-P40	183,72	263,97	113,67	7,00E-05	1,50E-04	53,40	1222,37	2622,83	533,95
B-P41	153,44	220,24	94,90	5,85E-05	1,25E-04	53,29	1224,28	2621,13	532,92
$\bar{X}$						<b>53,27</b>	<b>1228,51</b>	<b>2628,92</b>	<b>532,68</b>
$\sigma$						<b>0,26</b>	<b>4,60</b>	<b>14,78</b>	<b>2,58</b>



### A.1.3. Yeso de acabado

Código muestra	$m_d$ [g]	$m_w$ [g]	$m_a$ [g]	$V_m$ [m <sup>3</sup> ]	$V_a$ [m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]	$\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$w_{sat}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
D6	279,549	385,628	172,540	1,07E-04	2,13E-04	49,78	1311,89	2612,39	497,82
D7	288,150	398,687	174,522	1,14E-04	2,24E-04	49,31	1285,44	2535,91	493,11
D8	279,473	386,173	169,166	1,10E-04	2,17E-04	49,17	1287,85	2533,59	491,69
D9	291,002	401,867	175,769	1,15E-04	2,26E-04	49,03	1287,06	2525,34	490,34
D10	273,783	378,943	165,448	1,08E-04	2,13E-04	49,26	1282,39	2527,19	492,56
D11	286,957	397,053	173,275	1,14E-04	2,24E-04	49,20	1282,33	2524,21	491,99
D12	270,844	373,441	164,266	1,07E-04	2,09E-04	49,05	1294,82	2541,27	490,48
D13	307,389	424,079	186,834	1,21E-04	2,37E-04	49,19	1295,66	2549,78	491,85
$\bar{X}$						<b>49,25</b>	<b>1290,93</b>	<b>2543,71</b>	<b>492,48</b>
$\sigma$						<b>0,22</b>	<b>9,21</b>	<b>27,19</b>	<b>2,20</b>

### A.1.4. Fibra de madera

Código muestra	$m_d$ [g]	$m_w$ [g]	$m_a$ [g]	$V_m$ [m <sup>3</sup> ]	$V_a$ [m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]	$\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$w_{sat}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
A1	16,674	36,752	8,054	8,62E-06	2,87E-05	69,96	581,02	1934,34	699,63
A2	16,638	35,940	8,010	8,63E-06	2,79E-05	69,11	595,70	1928,37	691,08
A3	18,305	39,983	8,809	9,50E-06	3,12E-05	69,54	587,19	1927,65	695,39
A4	15,911	34,553	7,516	8,40E-06	2,70E-05	68,95	588,49	1895,29	689,50
A5	16,483	36,266	8,207	8,28E-06	2,81E-05	70,51	587,44	1991,66	705,05
31	20,507	45,591	9,700	1,08E-05	3,59E-05	69,89	571,37	1897,57	698,89
32	21,425	47,690	9,872	1,16E-05	3,78E-05	69,45	566,53	1854,50	694,51
33	22,243	51,628	9,715	1,25E-05	4,19E-05	70,11	530,69	1775,46	701,10
34	27,211	58,815	12,862	1,43E-05	4,60E-05	68,77	592,15	1896,37	687,75
35	19,200	44,103	8,612	1,06E-05	3,55E-05	70,17	540,98	1813,37	701,67
36	20,380	48,941	9,692	1,07E-05	3,92E-05	72,77	519,25	1906,81	727,69
M1	28,938	65,289	13,985	1,50E-05	5,13E-05	70,85	564,05	1935,26	708,54
M2	31,939	74,546	15,252	1,67E-05	5,93E-05	71,86	538,65	1914,00	718,57
M3	33,621	74,788	16,575	1,70E-05	5,82E-05	70,72	577,55	1972,37	707,18
$\bar{X}$						<b>70,19</b>	<b>567,22</b>	<b>1903,07</b>	<b>701,90</b>
$\sigma$						<b>1,07</b>	<b>24,14</b>	<b>55,33</b>	<b>10,72</b>

## A.2. ABSORCIÓN CAPILAR

### A.2.1. Perlita

Muestra 2		Muestra 3		Muestra 5		Muestra 15	
$\sqrt{t}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$\Delta m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$\sqrt{t}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$\Delta m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$\sqrt{t}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$\Delta m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$\sqrt{t}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$\Delta m$ [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	0	0	0	0	0	0
5,48	15,09	5,48	14,50	5,48	13,83	8,37	19,49
7,75	20,02	7,75	19,34	7,75	18,45	10,00	22,98
9,49	23,67	9,80	23,45	9,49	21,94	11,40	25,86
10,95	26,52	11,22	26,37	10,95	24,89	12,65	28,27
12,25	29,03	12,49	28,82	12,25	27,48	13,78	30,46
14,49	32,81	14,70	32,62	14,49	31,37	14,83	32,42
16,43	36,01	16,61	35,82	17,23	35,87	16,73	35,67
18,17	38,81	18,33	38,58	18,89	38,58	18,44	38,54
19,75	41,28	19,90	41,03	20,42	41,03	20,00	41,04
21,21	43,35	21,35	43,15	21,84	43,24	21,45	43,02
23,87	44,81	24,00	44,76	24,43	45,74	22,80	43,70
26,27	44,89	26,38	44,86	26,78	45,97	25,30	43,79
28,46	44,98	28,57	44,92	29,09	46,05	27,57	43,84
30,63	45,02	30,59	44,98	31,08	46,10	29,66	43,90
32,66	45,04	32,50	44,99	32,95	46,12	31,62	43,93
37,78	45,09	36,82	45,00	37,23	46,15	33,47	43,95
41,56	45,14	40,69	45,04	41,06	46,20	37,68	44,00
45,02	45,13	44,34	--	44,56	46,27	41,47	44,01
51,25	45,19	50,66	45,15	50,85	46,27	44,94	44,02
56,81	45,22	56,27	45,18	56,44	46,29	51,19	44,06
61,86	45,25	61,37	45,22	61,53	46,36	56,75	44,07
70,90	45,27	70,47	45,26	71,11	46,43	61,81	44,10
78,91	45,34	78,52	45,31	79,10	46,47	70,85	44,12
86,18	45,46	85,83	45,42	86,35	46,65	78,87	44,20
96,06	45,91	95,74	45,91	96,21	47,06	86,14	44,29
107,42	46,65	90,43	46,71	105,15	47,68	96,02	44,59
123,04	47,74	108,52	47,83	121,07	48,84	104,98	45,12
136,89	48,76	124,13	48,86	135,12	49,94	121,30	46,50
149,55	49,56	138,01	49,47	147,84	50,72	135,62	47,40
162,03	50,35	151,35	50,49	159,55	51,45	148,30	48,11
286,13	57,61	278,55	57,49	169,27	52,08	154,12	48,58
297,91	58,23	290,63	58,19	287,91	59,25	297,78	56,55
310,50	58,78	303,43	58,76	301,15	59,87	318,05	57,59
321,44	59,25	314,72	59,23	312,85	60,40	584,96	66,76
332,99	59,84	326,51	59,39	324,67	60,89	593,00	66,96
337,23	59,94	330,77	59,96	332,31	61,34	604,92	67,17
409,83	63,01	404,53	62,94	418,75	64,85	610,35	67,30
419,29	63,35	414,11	63,41	433,54	65,37	654,01	68,16
427,76	63,65	422,72	63,64	655,01	71,94	664,84	68,29
436,49	63,91	431,52	63,92	662,16	72,06	676,69	68,53
442,20	64,14	437,25	64,17	672,90	72,14	719,66	69,24
510,24	66,34	506,01	66,52	677,79	72,30	729,60	69,35
523,01	66,74	518,54	66,92	717,31	73,03	738,06	69,44
717,37	71,23	714,08	71,26	727,24	73,17	775,79	70,06

723,53	71,33	720,52	71,33	738,09	73,34	785,02	70,07
733,38	71,47	730,40	71,43	777,67	74,05	973,25	72,40
737,74	71,62	734,78	71,46	786,84	74,19	982,15	72,45
774,37	72,19	771,51	72,17	794,69	74,27	986,26	72,45
783,57	72,25	780,71	72,23	829,89	74,83	1016,73	72,73
793,65	72,37	790,83	72,52	838,48	74,91	1022,85	72,75
829,15	72,86	827,93	72,64	1016,89	77,09	1029,39	72,79
839,22	73,03	836,55	73,12	1023,72	77,13	1099,65	73,70
846,55	73,10	843,90	73,18	1029,33	77,15	1105,12	73,78
879,67	73,62	877,09	73,71	1058,55	77,39	1136,31	74,07
887,41	73,65	884,92	73,78	1064,43	77,37	1143,39	74,02
1057,91	75,46	1055,77	75,61	1070,75	77,40	1245,53	75,12
1064,50	75,53	1062,34	75,68	1138,46	78,35	1282,65	75,46
1069,93	75,56	1067,75	75,66	1143,80	78,41	1314,46	75,72
1098,07	75,77	1095,95	75,88	1173,96	78,67	1468,75	76,87
1103,71	75,76	1101,60	75,88	1180,84	78,61	1529,47	77,16
1109,81	75,78	1107,71	75,88	1280,00	79,67	1561,50	77,29
1175,27	76,59	1173,26	76,67	1316,12	79,98	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,79</b>
1180,44	76,63	1178,42	76,74	1347,14	80,25	<b>W<sub>cap</sub></b>	<b>435,32</b>
1209,69	76,86	1207,69	76,96	1498,09	81,45		
1216,39	76,82	1214,38	76,93	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,78</b>		
1312,80	77,70	1310,96	77,87	<b>W<sub>cap</sub></b>	<b>457,10</b>		
1348,09	78,10	1346,32	78,19				
1378,39	78,31	1376,66	78,40				
1526,25	79,40	1524,67	79,50				
1584,78	79,70	1583,26	79,82				
1615,72	79,82	1614,22	79,93				
<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,78</b>	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,79</b>				
<b>W<sub>cap</sub></b>	<b>451,31</b>	<b>W<sub>cap</sub></b>	<b>451,30</b>				

Muestra 20		Muestra 21		Muestra 26		Muestra MB3	
$\sqrt{t}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$\Delta m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$\sqrt{t}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$\Delta m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$\sqrt{t}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$\Delta m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$\sqrt{t}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$\Delta m$ [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	0	0	0	0	0	0
7,75	17,85	7,75	18,11	5,48	13,07	5,48	14,84
10,95	24,38	10,95	24,18	7,75	17,56	7,75	19,75
13,42	29,14	13,42	28,64	9,49	20,87	9,49	23,51
17,69	35,57	16,03	33,01	10,95	23,59	10,95	26,63
19,31	38,42	17,80	35,96	12,25	26,05	12,25	29,27
22,20	42,89	20,90	40,56	14,49	29,94	14,49	33,19
24,76	45,06	23,60	43,88	16,43	33,25	16,43	36,51
27,07	45,21	26,02	44,54	18,17	36,09	18,17	39,32
29,21	45,27	28,23	44,61	19,75	38,60	19,75	41,90
31,19	45,31	30,28	44,63	21,21	40,85	21,21	44,25
35,68	45,36	34,89	44,70	23,87	43,34	23,87	48,00
39,66	45,38	38,95	44,75	26,27	43,50	26,27	49,83
43,28	45,42	42,63	44,77	28,46	43,54	28,46	50,19
49,73	45,47	49,16	44,88	30,50	43,56	30,50	50,26
55,43	45,50	54,93	44,86	32,40	43,60	32,62	50,32
60,61	45,51	60,14	44,88	36,92	43,59	36,93	50,40
69,81	45,58	69,40	44,91	40,78	43,66	40,79	50,40
77,93	45,64	77,57	44,97	44,34	43,69	45,04	50,49
85,28	45,76	84,95	45,10	50,66	43,72	51,27	50,54
95,25	46,20	94,96	45,56	56,27	43,74	56,82	50,61
104,27	46,79	104,00	46,10	61,37	43,78	61,88	50,63
120,30	48,00	120,07	47,40	70,47	43,82	78,56	50,80
134,44	48,95	134,23	48,21	78,52	43,87	85,96	50,89
147,22	49,81	147,03	49,05	85,89	44,06	577,49	75,45
181,24	52,03	180,81	51,26	99,83	44,81	589,67	75,67
290,60	58,16	290,33	57,34	108,48	45,59	599,16	75,97
307,26	58,97	307,00	58,22	123,96	46,60	648,17	76,93
327,49	59,93	327,29	59,11	137,72	47,46	657,68	77,09
341,70	60,64	341,69	59,81	150,22	48,22	667,82	77,20
413,38	63,51	413,29	62,85	161,76	48,97	771,77	79,19
421,69	64,08	421,53	63,20	281,77	55,84	779,54	79,31
430,74	64,27	430,52	63,49	293,72	56,49	823,12	79,91
438,66	64,50	438,49	63,84	306,48	57,05	832,83	79,86
447,21	64,83	447,02	64,09	317,60	57,46	968,31	81,57
450,40	64,96	450,21	64,23	329,26	58,01	1015,61	82,06
506,93	66,82	506,82	66,18	333,51	58,22	1055,50	82,43
514,72	67,07	514,56	66,44	406,78	61,14	1242,38	83,93
521,59	67,22	521,49	66,61	416,31	61,53	1313,60	84,25
528,81	67,44	528,67	66,79	424,89	61,77	1350,85	84,41
533,50	67,62	533,40	66,93	433,67	62,01	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,79</b>
590,86	69,01	590,92	68,34	439,38	62,22	<b>W<sub>cap</sub></b>	<b>452,59</b>
602,13	69,27	602,14	68,62	507,91	64,53		
776,94	72,61	776,91	71,70	520,28	64,81		
782,64	72,62	782,57	71,75	715,34	69,42		

791,78	72,70	791,68	71,86	721,81	69,50
795,86	72,73	795,76	71,91	731,68	69,60
829,85	73,28	829,75	72,46	736,05	69,67
838,49	73,31	838,35	72,54	772,72	70,27
847,88	73,41	847,74	72,58	781,90	70,30
880,92	73,91	881,06	73,05	792,01	70,42
890,67	74,05	890,55	73,18	827,57	71,00
897,59	74,10	897,42	73,32	837,69	71,24
928,92	74,62	928,77	73,81	845,04	71,28
936,23	74,67	936,10	73,81	878,22	71,81
1099,15	76,37	1099,08	75,52	886,01	71,83
1105,49	76,36	1105,42	75,52	1056,74	73,77
1110,69	76,34	1110,64	75,49	1063,30	73,75
1137,83	76,62	1137,76	75,72	1068,73	73,76
1143,30	76,65	1143,23	75,73	1096,91	74,05
1149,22	76,64	1149,12	75,72	1102,56	74,09
1212,45	77,34	1212,38	76,49	1108,66	74,16
1217,51	77,50	1217,42	76,55	1174,16	75,00
1245,84	77,73	1245,75	76,76	1179,34	75,06
1252,37	77,70	1252,28	76,72	1208,58	75,29
1345,96	78,59	1345,90	77,58	1215,27	75,27
1380,62	78,90	1380,58	77,87	1311,78	76,25
1410,21	79,10	1410,19	78,04	1347,10	76,58
1555,04	80,15	1555,03	79,12	1377,42	76,80
1612,49	80,42	1612,54	79,44	1525,36	77,92
1642,98	80,46	1642,95	79,58	1583,94	78,24
				1614,89	78,38
<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,70</b>	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,71</b>	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,76</b>
<b>W<sub>cap</sub></b>	<b>453,19</b>	<b>W<sub>cap</sub></b>	<b>442,78</b>	<b>W<sub>cap</sub></b>	<b>450,82</b>

Muestra MB4		Muestra MB5		Muestra MB6		Muestra MB10	
$\sqrt{t}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$\Delta m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$\sqrt{t}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$\Delta m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$\sqrt{t}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$\Delta m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$\sqrt{t}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$\Delta m$ [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	0	0	0	0	0	0
5,48	14,22	5,48	17,25	5,48	14,74	5,48	13,11
7,75	18,99	7,75	22,78	7,75	19,58	7,75	17,66
9,49	22,65	9,49	26,74	9,49	23,16	9,49	21,03
10,95	25,61	10,95	29,97	10,95	26,12	10,95	23,79
12,25	28,10	12,25	32,75	12,25	28,62	12,25	26,17
14,76	32,35	14,49	36,77	14,49	32,46	14,49	29,83
16,67	35,54	16,43	40,09	16,43	35,66	16,43	32,84
18,38	38,26	18,17	42,91	18,17	38,43	18,17	35,56
19,95	40,71	19,75	45,40	19,75	40,91	19,75	37,93
20,37	43,47	21,21	47,34	21,21	43,11	21,21	40,09
23,13	46,99	23,87	48,57	23,87	46,72	23,87	43,65
25,59	49,13	25,10	48,72	26,27	48,64	26,27	46,59
27,84	49,72	27,39	48,77	28,46	49,06	28,46	48,03
29,92	49,86	29,50	48,82	30,50	49,19	30,50	48,44
31,86	49,95	31,46	48,90	32,40	49,28	32,40	48,55
36,26	50,03	35,92	48,95	36,74	49,36	36,74	48,68
40,19	50,09	39,87	49,02	40,62	49,41	40,62	48,72
43,76	50,15	43,47	49,07	44,28	49,46	44,16	48,77
50,15	50,25	49,90	49,19	50,61	49,50	50,56	48,86
55,81	50,34	55,59	49,23	56,22	49,54	56,18	48,92
60,95	50,36	60,75	49,33	61,33	49,61	61,29	48,97
70,11	50,50	69,93	49,42	70,43	49,66	72,44	49,10
78,20	50,62	78,04	49,52	78,49	49,78	80,49	49,21
85,60	50,71	87,84	49,60	85,80	49,86	87,63	49,44
95,54	51,09	97,54	49,82	96,53	50,41	97,36	49,86
104,54	51,62	578,70	72,05	105,44	50,95	106,20	50,46
120,53	52,82	590,86	72,30	121,32	52,06	121,98	51,67
134,64	53,80	600,28	72,58	135,34	53,15	135,94	52,60
149,85	54,86	649,16	73,51	154,05	54,50	151,59	53,65
283,05	63,37	658,66	73,60	285,29	63,24	156,54	54,02
307,43	64,77	668,79	73,74	309,40	64,36	417,31	68,87
652,33	76,98	772,56	75,59	653,31	76,54	431,51	69,50
663,19	77,16	780,33	75,71	664,10	76,72	506,07	71,83
671,64	77,31	823,90	76,25	672,54	76,80	521,71	72,19
715,66	78,00	833,64	76,32	716,51	77,65	718,52	76,47
724,29	78,19	969,04	77,84	725,13	77,70	781,13	77,42
733,51	78,28	1016,33	78,28	734,34	77,74	832,34	78,04
829,26	79,87	1056,20	78,67	829,99	79,31	1059,34	80,41
836,54	80,02	1242,99	79,95	837,23	79,48	1142,06	80,95
877,32	80,44	1314,18	80,25	877,98	79,98	1184,71	81,16
886,47	80,41	1351,39	80,42	887,12	80,00	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,61</b>
1014,85	81,98	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,89</b>	1015,42	81,42	<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>442,22</b>
1060,04	82,43	<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>457,27</b>	1060,62	81,90		

1098,32	82,73		1098,88	82,22
1278,98	84,07		1279,43	83,59
1348,29	84,37		1348,70	83,93
1384,58	84,45		1384,98	84,04
<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,84</b>		<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,73</b>
<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>449,28</b>		<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>447,17</b>

Muestra G1		Muestra G2	
$\sqrt{t}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$\Delta m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$\sqrt{t}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$\Delta m$ [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	0	0
5,48	14,97	5,48	14,30
7,75	20,23	7,75	19,16
9,49	24,11	8,94	21,99
10,95	27,32	10,49	25,16
12,25	30,09	11,83	27,94
14,49	34,20	14,46	32,59
16,43	37,66	16,40	36,06
18,17	40,61	18,14	39,03
19,75	42,93	19,72	41,61
21,21	43,84	21,19	43,81
23,87	44,07	23,85	45,23
26,27	44,15	26,25	45,37
28,46	44,18	28,44	45,46
30,50	44,21	30,48	45,48
32,40	44,25	32,39	45,50
36,74	44,27	36,73	45,57
40,62	44,33	40,61	45,63
44,16	44,42	44,15	45,65
50,50	44,45	50,49	45,70
56,12	44,48	56,12	45,76
61,24	44,51	65,28	45,82
70,36	44,55	75,27	45,89
78,96	44,58	83,34	45,93
86,79	44,64	90,25	46,07
96,70	44,81	99,72	46,37
105,60	45,31	108,37	46,80
121,45	46,56	124,99	48,00
136,77	47,53	138,99	49,00
145,31	48,03	154,18	49,94
160,43	48,90	294,16	57,58
297,49	56,32	301,02	57,92
304,27	56,76	312,56	58,52
315,69	57,23	323,41	58,98
326,43	57,73	329,02	59,24
331,99	58,00	718,88	70,01
720,21	68,64	736,20	70,20
737,54	68,83	835,96	71,45
837,14	70,11	893,35	72,10
894,41	70,62	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,87</b>
<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,95</b>	<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>459,92</b>
<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>457,53</b>		



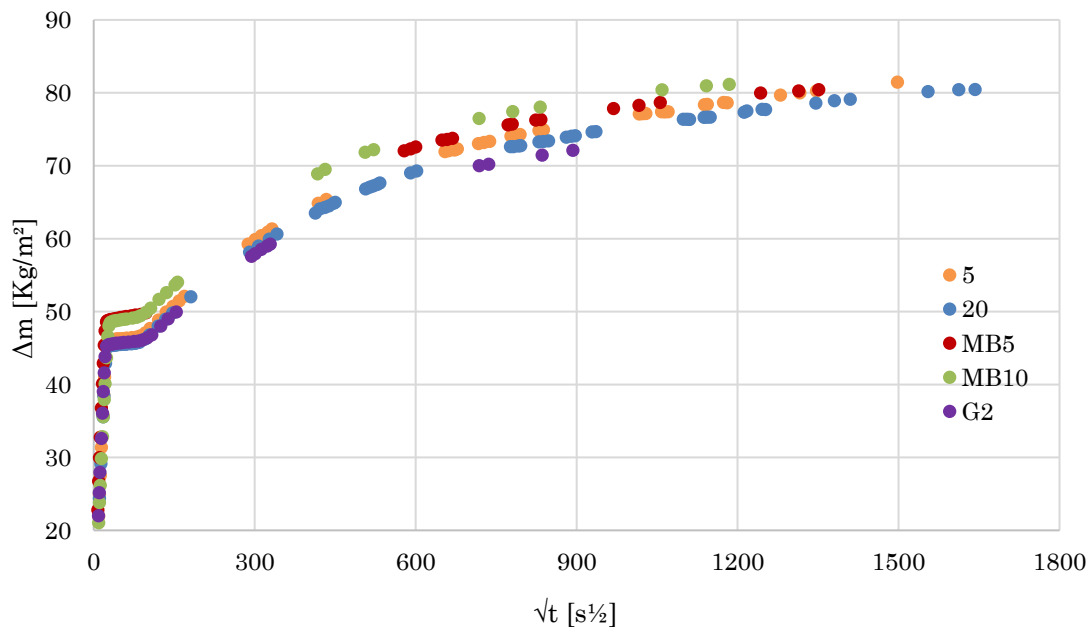


Figura A.2-1: Curva de absorción capilar muestras de perlita

### A.2.2. Yeso de agarre

Muestra B1		Muestra B2		Muestra B3		Muestra B4		Muestra B7	
$\sqrt{t}$	$\Delta m$	$\sqrt{t}$	$\Delta m$	$\sqrt{t}$	$\Delta m$	$\sqrt{t}$	$\Delta m$	$\sqrt{t}$	$\Delta m$
[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,75	0,63	7,75	0,62	8,43	0,60	7,75	0,53	7,75	0,71
10,95	0,80	10,95	0,79	11,45	0,75	10,95	0,70	10,95	0,95
13,42	0,92	13,42	0,92	13,82	0,89	13,42	0,83	13,42	1,12
15,49	1,02	15,49	1,02	15,84	1,01	15,49	0,96	15,49	1,28
17,32	1,13	17,32	1,11	17,64	1,10	17,69	1,09	17,32	1,40
20,49	1,27	20,49	1,24	20,76	1,30	20,81	1,26	20,49	1,60
23,24	1,41	23,24	1,36	23,47	1,46	23,52	1,42	23,24	1,74
25,69	1,53	25,69	1,48	26,17	1,62	25,94	1,54	25,69	1,92
27,93	1,64	27,93	1,57	28,37	1,76	28,16	1,67	27,93	2,07
30,00	1,75	30,00	1,67	30,41	1,88	30,22	1,80	30,00	2,18
34,64	1,96	34,64	1,85	35,00	2,15	34,83	2,02	34,64	2,40
38,73	2,15	38,73	2,02	39,05	2,39	38,90	2,22	38,73	2,65
42,43	2,33	42,43	2,19	42,72	2,62	42,90	2,42	42,43	2,86
48,99	2,63	48,99	2,45	49,24	3,00	49,57	2,76	52,46	3,32
54,77	2,91	54,87	2,70	55,00	3,36	55,29	3,03	60,42	3,74
60,00	3,15	60,09	2,94	60,31	3,69	60,76	3,30	65,19	3,98
69,28	3,58	69,46	3,33	70,63	4,31	70,10	3,77	73,82	4,39
78,03	3,99	77,61	3,70	78,66	4,81	78,50	4,17	77,78	4,57
85,38	4,35	84,99	4,04	86,48	5,29	86,24	4,55	94,59	5,38
95,34	4,81	94,99	4,51	96,33	5,91	96,11	5,05	103,67	5,81
104,55	5,24	104,32	4,97	105,26	6,45	105,06	5,49	119,78	6,61
120,54	6,02	120,35	5,73	121,16	7,43	114,82	6,00	133,97	7,28
130,90	6,53	128,88	6,17	126,53	7,75	283,94	14,75	196,13	--

290,41	14,72	289,71	14,59	288,67	17,00	291,66	15,15	402,50	20,24
297,95	15,11	297,17	14,98	296,26	17,41	297,77	15,46	406,65	20,39
303,93	15,42	303,27	15,29	302,27	17,73	305,42	15,85	411,79	20,55
311,44	15,80	310,79	15,67	309,82	18,14	312,51	16,22	417,79	20,78
318,40	16,16	317,66	16,04	316,81	18,52	320,19	16,62	426,25	20,95
325,94	16,56	325,22	16,44	324,39	18,93	407,88	20,64	430,94	21,15
412,33	20,70	411,84	20,33	411,18	22,49	412,85	20,80	435,71	21,28
417,32	20,89	416,83	20,47	416,11	22,59	418,69	20,96	438,25	21,38
423,17	21,11	422,62	20,60	421,98	22,69	423,25	21,07	711,71	23,27
427,62	21,26	427,14	20,69	426,51	22,74	428,33	21,16	714,23	23,29
432,71	21,42	432,17	20,78	431,54	22,80	431,88	21,23	717,00	23,30
436,23	21,52	435,70	20,84	435,07	22,83	503,23	22,01	720,55	23,29
506,91	22,68	506,51	21,52	505,97	23,38	508,51	22,03	778,23	23,50
512,15	22,70	511,75	21,55	511,16	23,40	511,63	22,05	781,04	23,51
515,24	22,72	514,85	21,57	514,27	23,42	839,95	23,60	784,15	23,52
842,13	23,88	841,89	23,14	841,56	24,78	877,92	23,76	823,81	23,88
880,00	24,02	879,77	23,33	879,46	24,94	925,72	23,93	826,36	23,90
927,69	24,20	927,48	23,51	927,18	25,09	1096,20	24,28	829,29	23,91
1097,90	24,64	1097,71	23,89	1097,46	25,44	1134,85	24,46	831,57	23,93
1136,48	24,78	1136,28	24,11	1136,04	25,60	1135,48	24,64	834,20	23,91
1137,09	24,96	1136,91	24,31	1136,67	25,80	<b>A<sub>w</sub> 0,05</b>		836,03	23,93
<b>A<sub>w</sub> 0,05</b>		<b>A<sub>w</sub> 0,05</b>		<b>A<sub>w</sub> 0,06</b>		<b>W<sub>cap</sub> 200,84</b>		875,02	24,14
<b>W<sub>cap</sub> 208,06</b>		<b>W<sub>cap</sub> 201,60</b>		<b>W<sub>cap</sub> 219,78</b>				878,07	24,14
								879,88	24,14
								1103,55	24,85
								1132,72	24,98
								1170,18	25,10
								1309,21	25,34
								1341,71	25,50
								1342,25	25,67
								<b>A<sub>w</sub> 0,05</b>	
								<b>W<sub>cap</sub> 196,82</b>	

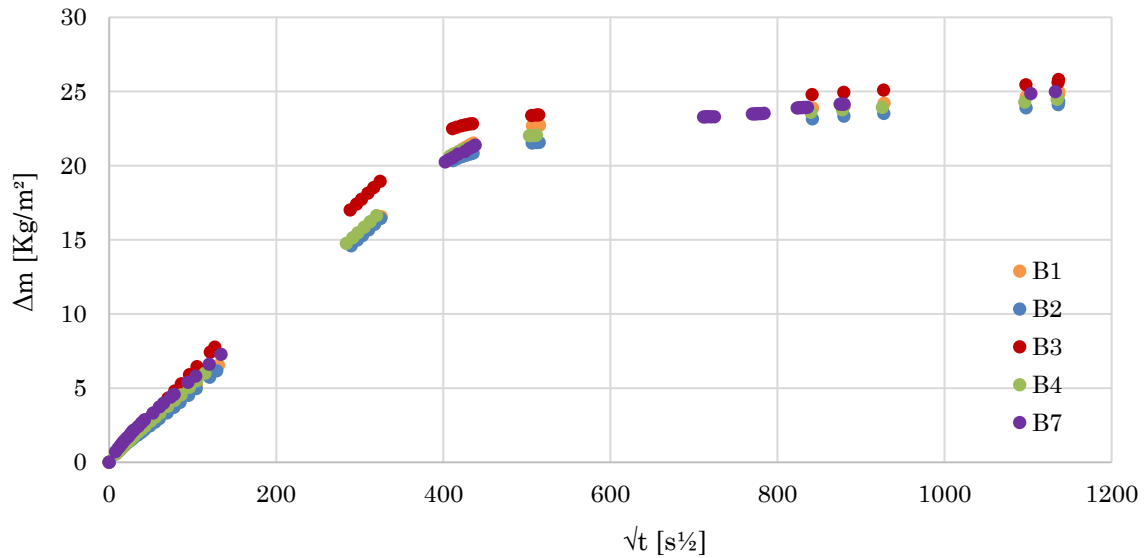


Figura A.2-2: Curva de absorción capilar muestras yeso de agarre

### A.2.3. Yeso de acabado

Muestra D1		Muestra D2		Muestra D3		Muestra D4		Muestra D5	
$\sqrt{t}$	$\Delta m$	$\sqrt{t}$	$\Delta m$	$\sqrt{t}$	$\Delta m$	$\sqrt{t}$	$\Delta m$	$\sqrt{t}$	$\Delta m$
[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,48	0,59	5,48	0,41	5,48	0,54	5,48	0,69	5,48	3,25
7,75	0,88	7,75	0,64	8,37	0,97	7,75	1,12	7,75	3,76
9,49	1,15	10,30	0,88	10,00	1,35	10,39	1,77	9,49	4,18
10,95	1,41	11,66	1,06	11,40	1,69	11,75	2,16	10,95	4,59
12,25	1,65	12,88	1,24	12,65	2,00	12,96	2,52	12,25	4,92
15,00	2,12	15,03	1,51	15,07	2,52	15,20	3,13	14,49	5,47
16,88	2,49	16,91	1,75	16,94	2,96	17,06	3,64	16,43	6,01
18,57	2,84	18,60	1,98	18,63	3,41	18,73	4,16	18,17	6,49
20,12	3,19	20,15	2,22	20,15	3,81	20,27	4,62	19,75	6,92
21,56	3,52	21,59	2,44	21,59	4,18	21,75	5,10	21,21	7,32
24,19	4,11	24,21	2,82	23,04	4,59	24,35	5,88	23,87	8,03
26,55	4,69	26,93	3,23	25,51	5,26	26,70	6,60	26,27	8,67
28,72	5,23	29,24	3,60	27,77	5,86	28,86	7,25	28,46	9,28
30,74	5,77	31,22	3,95	29,85	6,42	30,71	7,78	30,50	9,86
32,68	6,29	33,09	4,29	31,80	6,94	32,60	8,39	32,40	10,44
37,07	7,47	37,35	5,04	36,21	7,93	37,18	9,75	36,92	11,72
41,32	8,62	41,17	5,75	39,38	9,05	41,01	10,91	40,78	12,80
44,80	9,61	44,54	6,44	43,02	10,07	44,52	11,96	44,31	13,83
51,06	11,39	50,83	7,73	49,51	11,89	50,81	13,85	50,63	15,64
56,63	13,00	56,58	8,99	55,31	13,53	56,41	15,55	56,24	17,30
61,70	14,54	61,72	10,21	60,49	15,07	61,50	17,11	61,34	18,80
70,83	17,21	71,26	12,52	69,71	17,72	70,58	19,90	70,45	21,51
78,94	19,63	79,23	14,08	77,84	20,17	78,63	22,37	78,50	23,85
86,24	21,85	86,52	16,40	84,85	22,25	85,92	24,59	85,80	26,00

96,11	24,84	96,50	18,99	94,92	25,30	95,82	27,66	95,72	28,92
105,06	27,52	105,83	21,47	103,97	28,03	105,14	30,60	104,70	31,70
120,98	32,44	121,66	25,66	120,04	32,91	121,06	35,45	120,67	36,61
135,04	36,72	135,65	29,43	133,75	36,98	135,11	36,79	134,77	39,04
147,77	38,25	148,32	32,92	142,44	38,02	147,98	37,03	147,59	39,40
159,49	38,49	160,12	36,14	154,58	38,23	159,68	37,17	159,39	39,53
170,40	38,67	171,00	38,07	165,88	38,39	170,82	37,26	170,35	39,63343
181,35	38,77	181,30	38,54	176,39	38,48	179,01	37,30	180,61	39,63901
188,94	38,81	187,13	38,62	181,10	38,46	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>0,30</b>	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>0,29</b>
<b>A<sub>w</sub></b>	<b>0,28</b>	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>0,23</b>	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>0,28</b>	<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>357,48</b>	<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>380,07</b>
<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>369,59</b>	<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>373,74</b>	<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>367,14</b>				

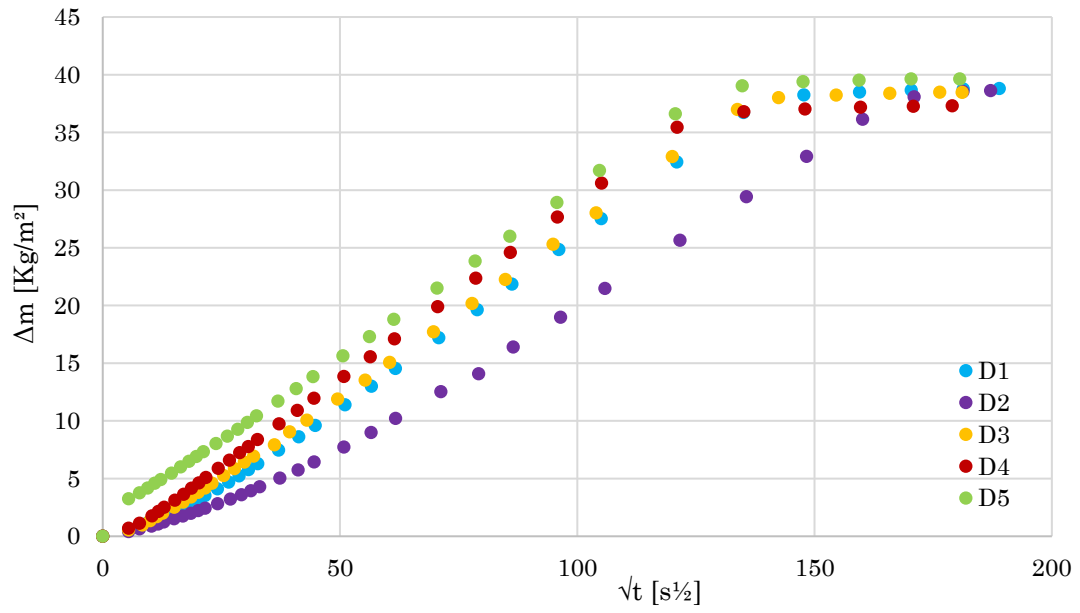


Figura A.2-3: Curva de absorción capilar muestras yeso de acabado

#### A.2.4. Fibra de madera

MB11		MB12		MB13		MB14		MB15	
$\sqrt{t}$	$\Delta m$	$\sqrt{t}$	$\Delta m$	$\sqrt{t}$	$\Delta m$	$\sqrt{t}$	$\Delta m$	$\sqrt{t}$	$\Delta m$
[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>1/2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,48	7,78	5,48	5,44	5,48	5,47	5,48	4,92	5,48	5,50
7,75	8,05	7,75	5,28	7,75	5,51	7,75	5,18	7,75	5,53
9,49	7,97	9,49	5,85	9,49	5,28	9,49	5,14	9,49	5,57
10,95	7,85	10,95	5,73	10,95	5,60	10,95	5,25	10,95	5,69
12,25	7,91	12,25	5,72	12,25	5,68	12,25	5,21	12,25	5,87
14,49	8,02	14,49	6,18	14,49	5,98	14,49	5,51	14,49	5,88
16,43	7,81	16,43	6,14	16,43	6,01	16,43	5,75	16,43	5,97
18,17	8,23	18,49	6,34	18,17	6,21	18,17	5,55	18,17	6,07
19,75	8,09	20,05	6,27	19,75	6,15	19,75	5,61	19,75	6,06
21,21	8,13	21,49	6,21	21,21	6,17	21,21	5,70	21,21	5,98
23,87	8,01	24,12	6,15	23,87	6,21	23,87	5,88	23,87	6,08
26,27	8,35	26,50	6,32	26,27	6,34	26,27	5,65	26,27	6,23
28,46	8,51	28,67	5,95	28,46	6,31	28,46	5,87	28,46	6,21
30,50	8,51	33,50	6,63	33,32	6,78	33,32	5,93	30,50	6,18
32,40	8,61	37,71	6,37	37,55	7,06	37,55	6,13	32,50	6,45
36,99	8,84	41,50	6,43	41,35	6,75	41,35	6,19	104,67	6,52
40,84	8,80	48,19	6,67	53,94	7,05	48,06	6,29	106,09	6,54
44,14	8,77	55,41	7,10	59,41	7,10	53,94	6,56	107,50	6,59
50,48	8,94	60,76	6,76	64,27	7,33	59,29	6,67	110,30	6,51
56,11	9,08	70,09	6,90	73,01	7,39	68,67	6,81	112,98	6,67
61,22	9,29	78,18	7,16	83,02	7,47	76,91	6,76	115,74	6,69
70,39	9,70	85,51	6,94	89,96	7,62	84,35	6,83	120,81	6,93
78,45	9,34	95,46	7,18	99,46	7,73	94,42	6,89	125,68	6,92
85,82	9,66	104,46	6,96	108,13	7,80	103,78	7,27	130,37	7,27
95,76	9,65	120,47	7,50	112,62	8,05	108,45	7,41	137,63	7,43
104,74	9,86	121,30	7,66	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>3,09E-02</b>	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>2,92E-02</b>	138,54	7,58
120,71	10,04	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>2,27E-02</b>	<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>56,67</b>	<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>50,18</b>	<b>A<sub>w</sub></b>	<b>1,48E-02</b>
126,44	10,21	<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>52,29</b>					<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>55,37</b>
<b>A<sub>w</sub></b>	<b>2,99E-02</b>								
<b>w<sub>cap</sub></b>	<b>73,03</b>								

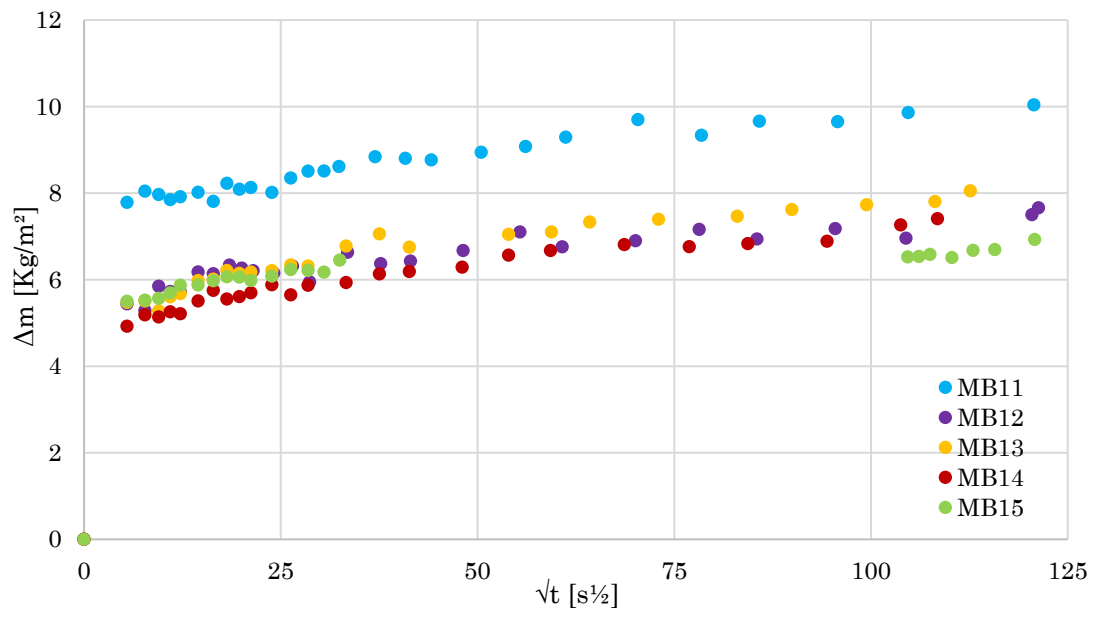


Figura A.2-4: Curva de absorción capilar muestras fibra de madera

### A.3. SORCIÓN HIGROSCÓPICA

#### A.3.1. Perlita

Datos ensayo isoterma de sorción:

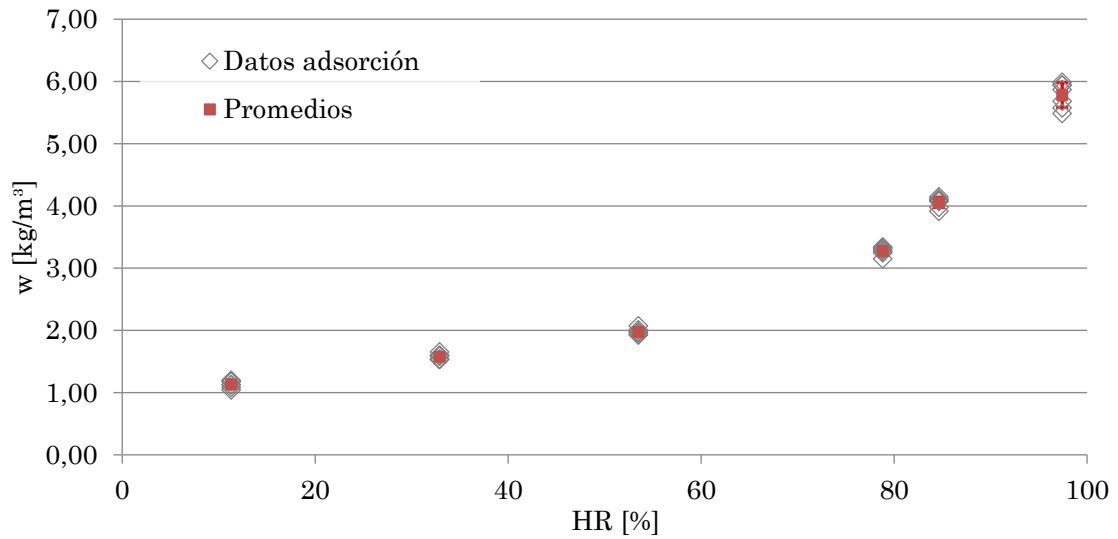
(1) Adsorción

Código muestra	Sal	HR [%]	$m_a$ [g]	$m_e$ [g]	$u$ [% kg/kg]	$w$ [kg/m <sup>3</sup> ]
P20			9,99	10,11	1,16	1,12
P21			11,45	11,57	1,08	1,04
P22			9,48	9,59	1,12	1,08
P23	LiCl	11,3	11,76	11,90	1,23	1,20
P24			9,88	10,00	1,21	1,18
P25			11,70	11,84	1,22	1,18
P26			11,77	11,90	1,16	1,13
$\bar{X}$						<b>1,13</b>
$\sigma$						<b>0,06</b>
P48			11,65	11,83	1,58	1,53
P49			11,63	11,81	1,58	1,54
P50			11,87	12,06	1,59	1,54
P51	MgCl <sub>2</sub>	32,9	11,46	11,65	1,64	1,59
P52			11,87	12,06	1,65	1,60
P53			11,36	11,54	1,64	1,59
P54			11,05	11,24	1,70	1,65
$\bar{X}$						<b>1,58</b>
$\sigma$						<b>0,04</b>
P34			9,99	10,20	2,07	2,01
P35			10,46	10,67	2,04	1,97
P36			10,53	10,74	2,03	1,97
P37	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	53,5	10,48	10,69	1,99	1,93
P38			11,27	11,49	1,99	1,93
P39			10,11	10,31	2,03	1,96
P40			11,73	11,99	2,14	2,07
$\bar{X}$						<b>1,98</b>
$\sigma$						<b>0,05</b>
P27			9,32	9,64	3,37	3,26
P28			12,13	12,54	3,43	3,33
P29			10,53	10,89	3,39	3,29
P30	NH <sub>4</sub> Cl	78,83	10,73	11,10	3,42	3,31
P31			9,36	9,68	3,45	3,34
P32			11,22	11,59	3,25	3,15
P33			10,58	10,94	3,35	3,25
$\bar{X}$						<b>3,28</b>
$\sigma$						<b>0,06</b>



Código muestra	Sal	HR [%]	$m_d$ [g]	$m_e$ [g]	$u$ [% kg/kg]	$w$ [kg/m <sup>3</sup> ]
P13	KCl	84,65	11,91	12,41	4,24	4,11
P14			11,92	12,42	4,20	4,07
P15			11,75	12,25	4,21	4,08
P16			11,16	11,64	4,28	4,15
P17			11,51	12,00	4,22	4,10
P18			9,59	9,97	4,04	3,91
P19			10,16	10,58	4,10	3,98
$\bar{X}$						<b>4,06</b>
$\sigma$						<b>0,08</b>
P41	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,42	11,43	12,14	6,13	5,94
P42			10,34	10,98	6,17	5,99
P43			11,54	12,25	6,13	5,94
P44			11,24	11,92	6,05	5,87
P45			11,48	12,15	5,86	5,68
P46			10,08	10,66	5,75	5,57
P47			10,75	11,35	5,66	5,48
$\bar{X}$						<b>5,78</b>
$\sigma$						<b>0,20</b>

Adsorción higroscópica - Perlita



Ajustes:

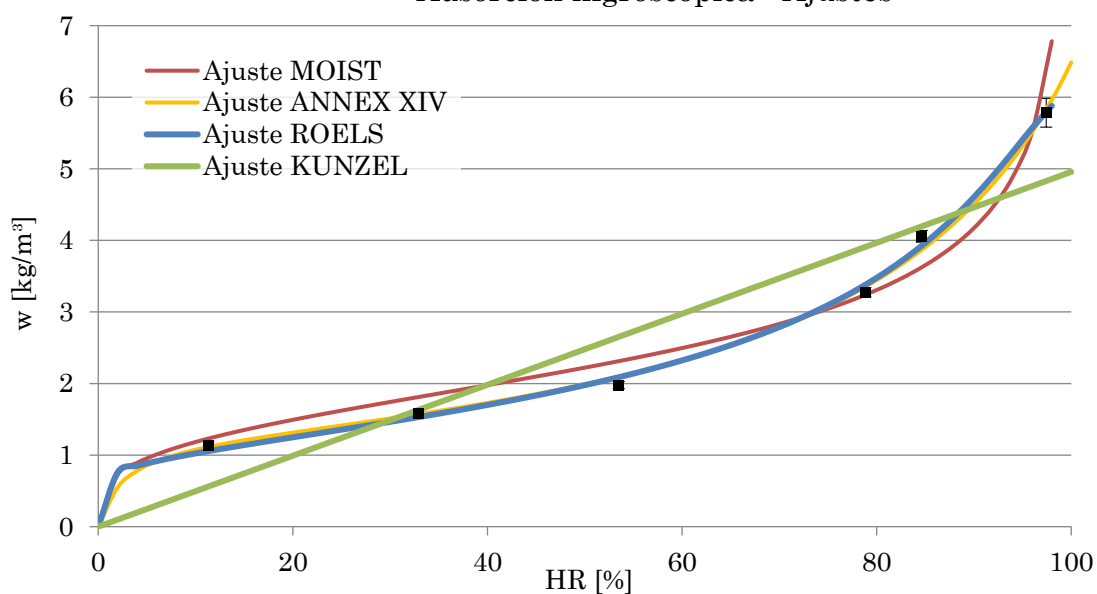
HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w Moist [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	1,13	1,23	7,65E-03
32,9	1,58	1,81	3,02E-02
53,5	1,98	2,31	4,86E-02
78,83	3,28	3,24	4,33E-04
84,65	4,06	3,63	5,15E-02
97,42	5,78	6,29	4,15E-02
<b>Σ</b>			<b>1,80E-01</b>

HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w Künzel [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	1,13	0,56	5,87E-01
32,9	1,58	1,63	1,78E-03
53,5	1,98	2,65	1,72E-01
78,83	3,28	3,91	1,02E-01
84,65	4,06	4,20	4,61E-03
97,42	5,78	4,83	1,88E-01
<b>Σ</b>			<b>1,05</b>

HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w Annex XIV [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	1,13	1,11	3,41E-04
32,9	1,58	1,57	1,25E-05
53,5	1,98	2,10	6,86E-03
78,83	3,28	3,35	1,67E-03
84,65	4,06	3,87	9,16E-03
97,42	5,78	5,83	3,29E-04
<b>Σ</b>			<b>1,84E-02</b>

HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w R&J [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	1,13	1,06	5,77E-03
32,9	1,58	1,53	1,40E-03
53,5	1,98	2,09	5,87E-03
78,83	3,28	3,38	3,13E-03
84,65	4,06	3,93	4,29E-03
97,42	5,78	5,80	3,61E-05
<b>Σ</b>			<b>2,05E-02</b>

### Adsorción higroscópica - Ajustes

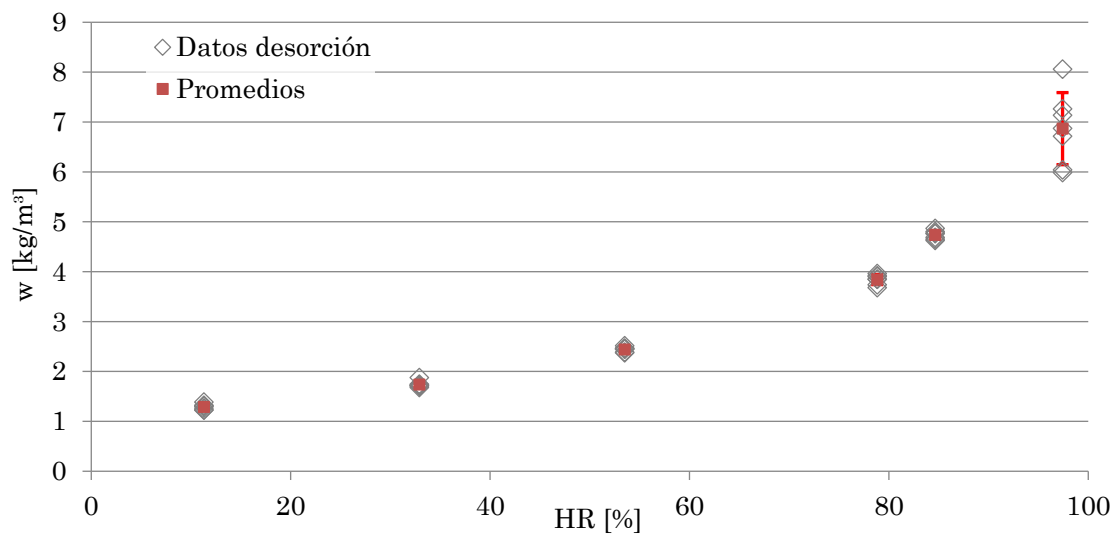


### (2) Desorción

Código muestra	Sal	HR [%]	$m_d$ [g]	$m_e$ [g]	$u$ [% kg/kg]	$w$ [kg/m <sup>3</sup> ]
P48	LiCl	11,3	11,65	11,80	1,26	1,22
P49			11,63	11,78	1,27	1,23
P50			11,87	12,02	1,30	1,26
P51			11,46	11,62	1,34	1,30
P52			11,87	12,03	1,36	1,32
P53			11,36	11,51	1,35	1,31
P54			11,05	11,20	1,43	1,39
$\bar{X}$						
$\sigma$						<b>0,06</b>
P34	MgCl <sub>2</sub>	32,9	9,99	10,17	1,78	1,73
P35			10,46	10,64	1,77	1,71
P36			10,53	10,72	1,78	1,72
P37			10,48	10,66	1,73	1,68
P38			11,27	11,46	1,76	1,70
P39			10,11	10,29	1,80	1,74
P40			11,73	11,96	1,93	1,88
$\bar{X}$						
$\sigma$						<b>0,06</b>
P27	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	53,5	9,32	9,56	2,53	2,46
P28			12,13	12,43	2,52	2,44
P29			10,53	10,79	2,45	2,37
P30			10,73	11,00	2,54	2,47
P31			9,36	9,60	2,59	2,51
P32			11,22	11,50	2,46	2,39
P33			10,58	10,85	2,53	2,45
$\bar{X}$						
$\sigma$						<b>0,05</b>

Código muestra	Sal	HR [%]	m <sub>d</sub> [g]	m <sub>e</sub> [g]	u [% kg/kg]	w [kg/m <sup>3</sup> ]
P13			11,91	12,39	4,04	3,92
P14			11,92	12,40	3,97	3,85
P15			11,75	12,23	4,02	3,90
P16	NH <sub>4</sub> Cl	78,83	11,16	11,62	4,09	3,96
P17			11,51	11,97	3,97	3,85
P18			9,59	9,95	3,79	3,68
P19			10,16	10,55	3,86	3,74
$\bar{X}$						<b>3,84</b>
$\sigma$						<b>0,10</b>
P41			11,43	12,01	5,02	4,87
P42			10,34	10,85	4,95	4,80
P43			11,54	12,11	4,92	4,77
P44	KCl	84,65	11,24	11,79	4,91	4,76
P45			11,48	12,03	4,83	4,69
P46			10,08	10,57	4,80	4,65
P47			10,75	11,26	4,77	4,63
$\bar{X}$						<b>4,47</b>
$\sigma$						<b>0,09</b>
P20			9,99	10,74	7,49	7,26
P21			11,45	12,40	8,31	8,06
P22			9,48	10,16	7,09	6,87
P23	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,42	11,76	12,62	7,36	7,13
P24			9,88	10,50	6,23	6,04
P25			11,70	12,42	6,17	5,99
P26			11,77	12,58	6,93	6,72
$\bar{X}$						<b>6,87</b>
$\sigma$						<b>0,72</b>

Desorción higroscópica - Perlita



Ajustes:

HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w Moist [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	1,29	1,42	1,28E-02
32,9	1,74	2,08	5,75E-02
53,5	2,44	2,65	1,65E-02
78,83	3,84	3,69	6,13E-03
84,65	4,74	4,12	9,15E-02
97,42	6,87	7,10	7,36E-03
<b>Σ</b>			<b>1,92E-01</b>

HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w Künzel [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	1,29	0,54	1,05E+00
32,9	1,74	1,57	1,79E-02
53,5	2,44	2,55	4,87E-03
78,83	3,84	3,76	1,71E-03
84,65	4,74	4,04	1,21E-01
97,42	6,87	4,65	1,06E+00
<b>Σ</b>			<b>2,25</b>

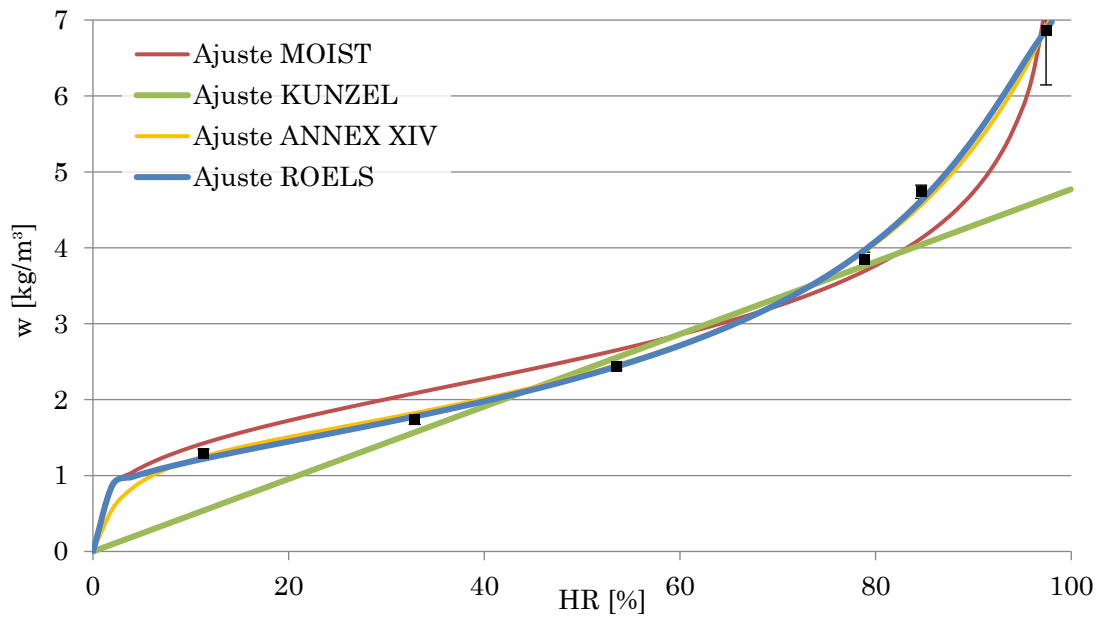
  

HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w Annex XIV [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	1,29	1,25	1,17E-03
32,9	1,74	1,82	4,13E-03
53,5	2,44	2,45	6,34E-05
78,83	3,84	3,95	2,73E-03
84,65	4,74	4,56	6,78E-03
97,42	6,87	6,90	1,94E-04
<b>Σ</b>			<b>1,51E-02</b>

HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w R&J [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	1,29	1,22	3,96E-03
32,9	1,74	1,78	9,11E-04
53,5	2,44	2,43	1,85E-05
78,83	3,84	3,97	3,94E-03
84,65	4,74	4,62	2,92E-03
97,42	6,87	6,88	1,52E-05
<b>Σ</b>			<b>1,18E-02</b>

### Desorción higroscópica - Ajustes



### A.3.2. Yeso de agarre

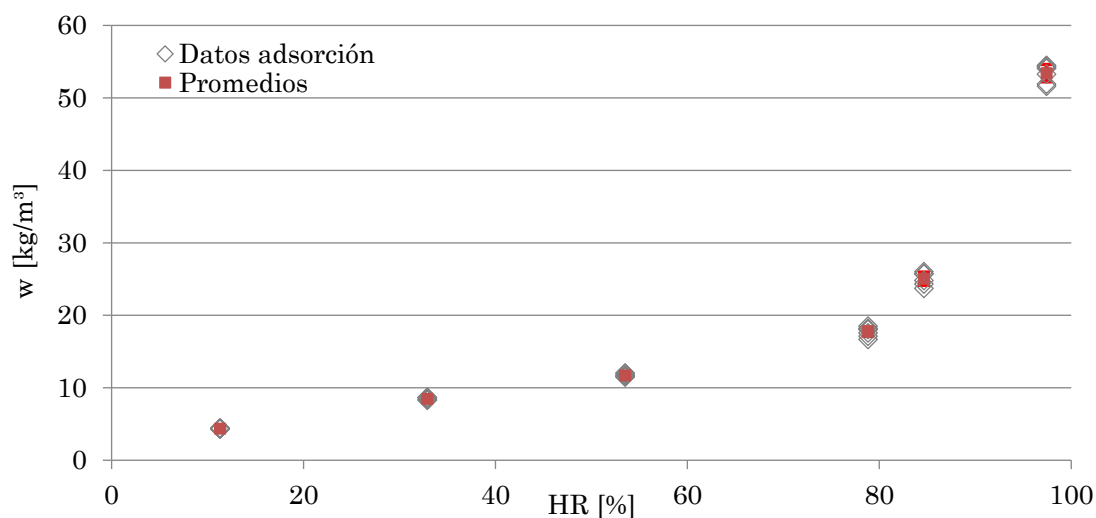
Datos ensayo isoterma de sorción:

(1) Adsorción

Código muestra	Sal	HR [%]	m <sub>d</sub> [g]	m <sub>e</sub> [g]	u [% kg/kg]	w [kg/m <sup>3</sup> ]
B-P5			168,74	169,35	0,36	4,38
B-P6			145,90	146,41	0,35	4,31
B-P7			149,19	149,72	0,36	4,41
B-P8	LiCl	11,3	143,40	143,91	0,35	4,36
B-P9			136,27	136,76	0,36	4,44
B-P10			151,27	151,81	0,35	4,34
B-P11			141,50	142,00	0,36	4,37
$\bar{X}$						<b>4,37</b>
$\sigma$						<b>0,04</b>
B-P12			143,41	144,38	0,67	8,28
B-P13			140,10	141,09	0,70	8,61
B-P14	MgCl <sub>2</sub>	32,9	145,30	146,29	0,68	8,36
B-P15			134,76	135,71	0,71	8,67
B-P16			136,84	137,78	0,68	8,37
B-P17			142,60	143,61	0,70	8,63
$\bar{X}$						<b>8,49</b>
$\sigma$						<b>0,17</b>
B-P19			156,39	157,85	0,94	11,51
B-P20			143,51	144,89	0,96	11,78
B-P21			150,97	152,38	0,94	11,50
B-P22	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	53,5	155,07	156,59	0,98	12,00
B-P23			140,44	141,82	0,98	12,02
B-P24			151,71	153,15	0,95	11,71
B-P25			146,64	148,03	0,95	11,62
$\bar{X}$						<b>11,73</b>
$\sigma$						<b>0,21</b>
B-P33			134,66	136,54	1,39	17,11
B-P34			137,43	139,29	1,36	16,67
B-P35			151,23	153,46	1,47	18,11
B-P36	NH <sub>4</sub> Cl	78,83	147,45	149,67	1,51	18,51
B-P37			152,65	154,91	1,48	18,20
B-P38			142,95	145,05	1,47	18,03
B-P39			136,87	138,83	1,43	17,57
$\bar{X}$						<b>17,75</b>
$\sigma$						<b>0,66</b>
B-P40			147,04	150,11	2,09	25,71
B-P41			138,97	141,88	2,09	25,73
B-P42			140,11	142,94	2,02	24,80
B-P43	KCl	84,65	149,74	152,70	1,98	24,31
B-P44			155,90	158,91	1,93	23,73
B-P45			133,50	136,33	2,12	26,02
$\bar{X}$						<b>25,05</b>
$\sigma$						<b>0,92</b>

Código muestra	Sal	HR [%]	m <sub>d</sub> [g]	m <sub>e</sub> [g]	u [% kg/kg]	w [kg/m <sup>3</sup> ]
B-P26			162,82	169,89	4,34	53,28
B-P27			150,61	157,28	4,43	54,36
B-P28			145,55	151,95	4,40	54,07
B-P29	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,42	147,38	153,92	4,43	54,47
B-P30			137,64	143,71	4,41	54,18
B-P31			134,38	140,05	4,22	51,90
B-P32			130,83	136,32	4,20	51,62
$\bar{X}$						53,41
$\sigma$						1,20

### Adsorción higroscópica - Yeso de agarre



Ajustes:

HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w Moist [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	4,37	4,54	6,62E-03
32,9	8,49	8,15	1,39E-02
53,5	11,73	11,79	3,04E-04
78,83	17,75	19,62	1,79E-01
84,65	25,05	23,26	1,38E-01
97,42	53,41	53,53	2,48E-04
$\Sigma$			3,38E-01

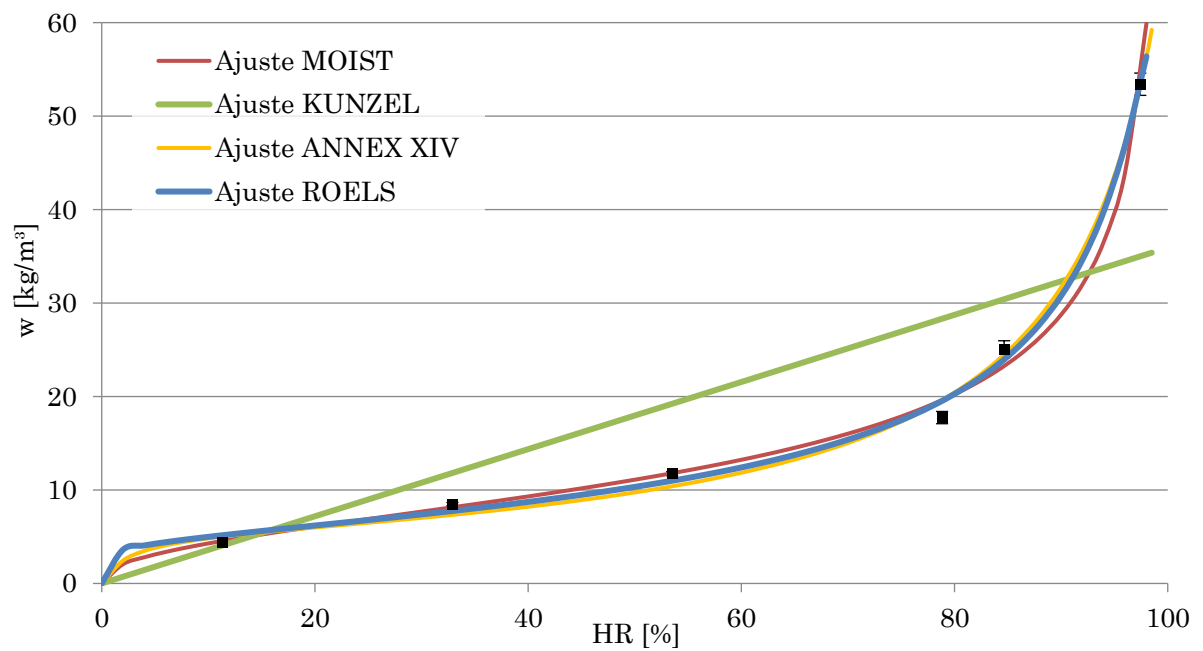
  

HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w Künzel [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	4,37	4,06	2,40E-02
32,9	8,49	11,82	9,40E-01
53,5	11,73	19,22	2,92
78,83	17,75	28,32	3,95
84,65	25,05	30,41	9,45E-01
97,42	53,41	35,00	9,69
$\Sigma$			18,46



HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w Annex XIV [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	4,37	5,01	8,09E-02
32,9	8,49	7,34	1,78E-01
53,5	11,73	10,39	1,73E-01
78,83	17,75	19,61	1,77E-01
84,65	25,05	24,48	1,32E-02
97,42	53,41	53,35	8,08E-05
<b>Σ</b>			<b>6,23E-01</b>
HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w R&J [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0	0	0
11,3	4,37	5,15	1,19E-01
32,9	8,49	7,76	6,83E-02
53,5	11,73	10,99	5,08E-02
78,83	17,75	19,53	1,64E-01
84,65	25,05	23,96	4,90E-02
97,42	53,41	53,43	4,40E-06
<b>Σ</b>			<b>3,32E-01</b>

### Adsorción higroscópica - Ajustes

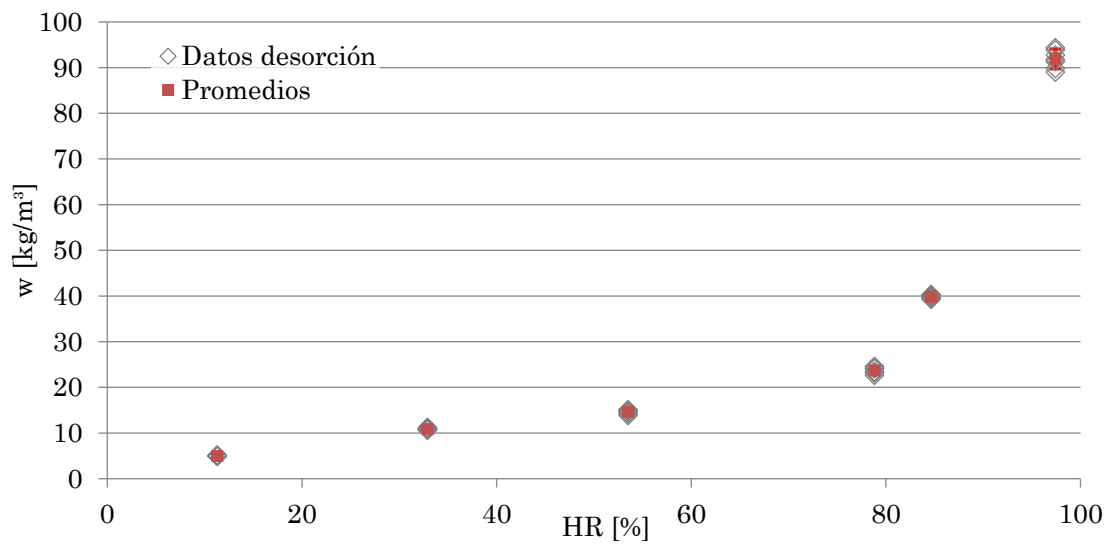


## (2) Desorción

Código muestra	Sal	HR [%]	m <sub>d</sub> [g]	m <sub>e</sub> [g]	u [% kg/kg]	w [kg/m <sup>3</sup> ]
B-P12			143,41	143,98	0,40	4,91
B-P13			140,10	140,67	0,40	4,97
B-P14			145,30	145,89	0,41	4,98
B-P15	LiCl	11,3	134,76	135,31	0,41	5,06
B-P16			136,84	137,42	0,42	5,17
B-P17			142,60	143,18	0,40	4,96
B-P18			150,85	151,45	0,40	4,90
$\bar{X}$						<b>4,99</b>
$\sigma$						<b>0,09</b>
B-P19			156,39	157,75	0,87	10,65
B-P20			143,51	144,79	0,89	10,93
B-P21			150,97	152,27	0,87	10,64
B-P22	MgCl <sub>2</sub>	32,9	155,07	156,48	0,91	11,15
B-P23			140,44	141,72	0,91	11,17
B-P24			151,71	153,05	0,88	10,83
B-P25			146,64	147,93	0,88	10,79
$\bar{X}$						<b>10,88</b>
$\sigma$						<b>0,22</b>
B-P33			134,66	136,22	1,16	14,22
B-P34			137,43	138,98	1,13	13,86
B-P35			151,23	153,07	1,21	14,90
B-P36	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	53,5	147,45	149,26	1,23	15,07
B-P37			152,65	154,50	1,22	14,93
B-P38			142,95	144,68	1,21	14,87
B-P39			136,87	138,50	1,19	14,62
$\bar{X}$						<b>14,64</b>
$\sigma$						<b>0,44</b>
B-P40			147,04	149,92	1,96	24,09
B-P41			138,97	141,71	1,97	24,20
B-P42			140,11	142,79	1,91	23,45
B-P43	NH <sub>4</sub> Cl	78,83	149,74	152,56	1,88	23,13
B-P44			155,90	158,77	1,84	22,62
B-P45			133,50	136,17	2,00	24,58
$\bar{X}$						<b>23,68</b>
$\sigma$						<b>0,74</b>
B-P26			162,82	168,13	3,26	40,06
B-P27			150,61	155,53	3,26	40,10
B-P28			145,55	150,29	3,26	40,05
B-P29	KCl	84,65	147,38	152,21	3,28	40,29
B-P30			137,64	142,10	3,24	39,74
B-P31			134,38	138,68	3,20	39,29
B-P32			130,83	135,03	3,21	39,48
$\bar{X}$						<b>39,86</b>
$\sigma$						<b>0,36</b>

Código muestra	Sal	HR [%]	$m_d$ [g]	$m_e$ [g]	$u$ [% kg/kg]	$w$ [kg/m <sup>3</sup> ]
B-P5			168,74	181,28	7,43	91,30
B-P6			145,90	156,47	7,25	89,01
B-P7			149,19	160,09	7,31	89,78
B-P8	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,42	143,40	154,11	7,47	91,76
B-P9			136,27	146,73	7,68	94,34
B-P10			151,27	162,83	7,64	93,84
B-P11			141,50	152,18	7,55	92,73
$\bar{X}$						<b>91,91</b>
$\sigma$						<b>2,16</b>

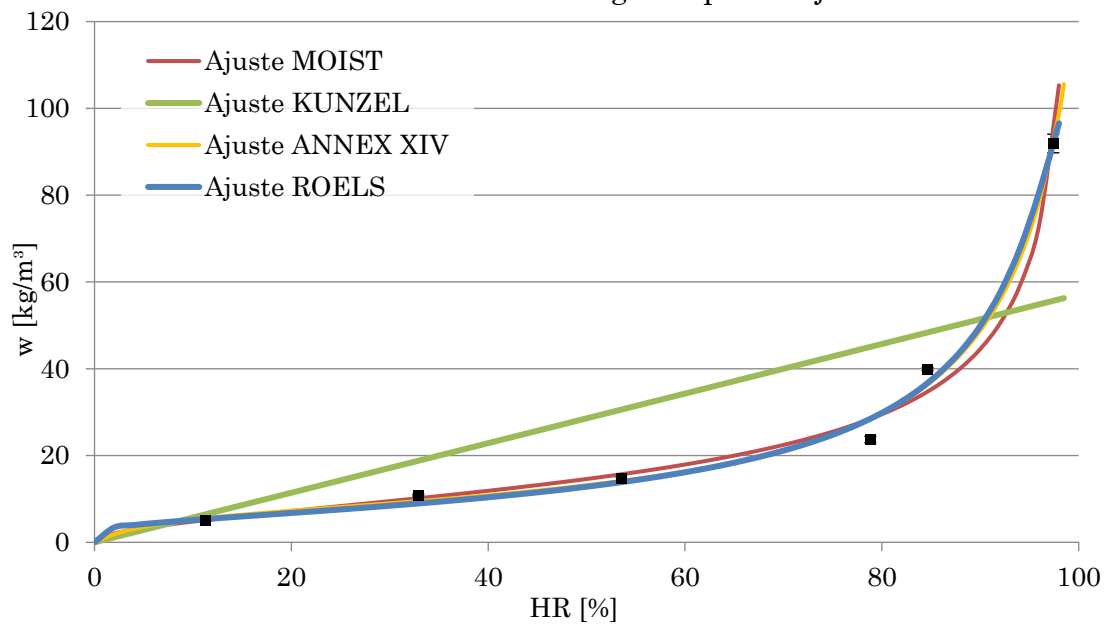
Desorción higroscópica - Yeso de agarre



Ajustes:

HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w Moist [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	4,99	5,12	3,31E-03
32,9	10,88	10,16	5,13E-02
53,5	14,64	15,67	6,77E-02
78,83	23,68	28,45	8,00E-01
84,65	39,86	34,73	7,58E-01
97,42	91,91	92,27	1,38E-03
<b>Σ</b>			<b>1,68</b>
HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w Künzel [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	4,99	6,46	3,31E-01
32,9	10,88	18,80	3,33
53,5	14,64	30,56	8,30
78,83	23,68	45,04	10,1
84,65	39,86	48,36	1,49
97,42	91,91	55,66	23,6
<b>Σ</b>			<b>47,20</b>
HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w Annex XIV [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	4,99	5,56	5,80E-02
32,9	10,88	9,50	2,01E-01
53,5	14,64	14,14	1,75E-02
78,83	23,68	28,38	7,78E-01
84,65	39,86	36,34	3,40E-01
97,42	91,91	92,04	1,84E-04
<b>Σ</b>			<b>1,39</b>
HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w R&J [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	4,99	5,36	2,50E-02
32,9	10,88	8,95	4,15E-01
53,5	14,64	13,85	4,47E-02
78,83	23,68	28,48	8,09E-01
84,65	39,86	36,72	2,69E-01
97,42	91,91	91,97	3,13E-05
<b>Σ</b>			<b>1,56</b>

### Desorción higroscópica - Ajustes



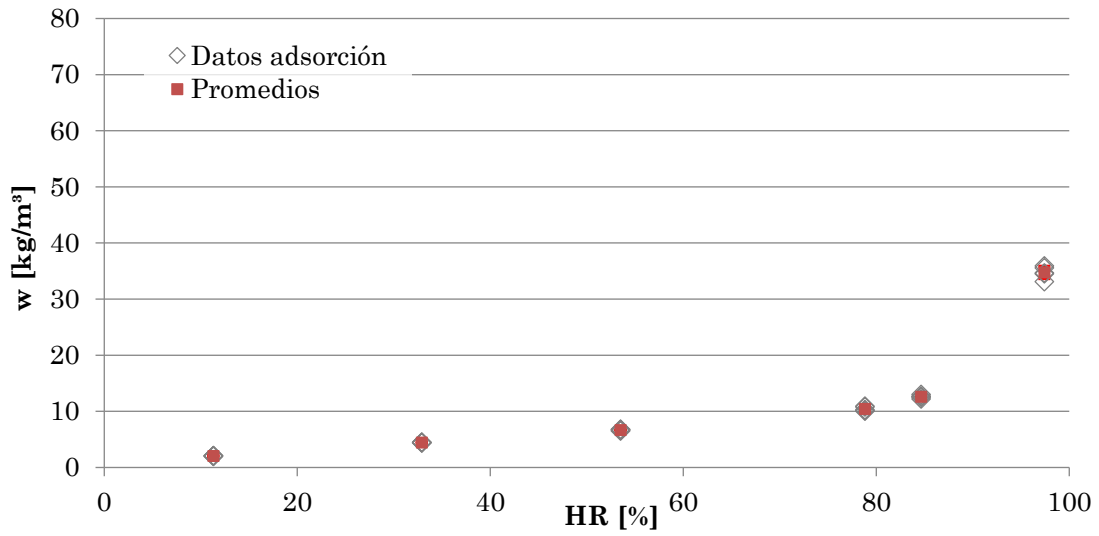
### A.3.3. Yeso de acabado

Datos ensayo isoterma de sorción:

(1) Adsorción

Código muestra	Sal	HR [%]	m <sub>d</sub> [g]	m <sub>e</sub> [g]	u [% kg/kg]	w [kg/m <sup>3</sup> ]
DP1	LiCl	11,3	152,39	152,64	0,16	2,08
DP2			144,35	144,57	0,16	2,02
DP3			145,96	146,20	0,16	2,10
DP4			143,86	144,09	0,16	2,08
DP5			146,74	146,96	0,15	1,95
$\bar{X}$						<b>2,05</b>
$\sigma$						<b>0,06</b>
DP6	MgCl <sub>2</sub>	32,9	148,00	148,51	0,35	4,48
DP7			152,65	153,17	0,34	4,40
DP8			147,56	148,08	0,35	4,50
DP9			144,95	145,44	0,34	4,40
DP10			141,02	141,50	0,34	4,41
$\bar{X}$						<b>4,44</b>
$\sigma$						<b>0,05</b>
DP1	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	53,5	152,39	153,16	0,51	6,53
DP2			144,35	145,10	0,52	6,70
DP3			145,96	146,72	0,52	6,77
DP4			143,86	144,61	0,53	6,78
DP5			146,74	147,48	0,51	6,53
$\bar{X}$						<b>6,66</b>
$\sigma$						<b>0,13</b>
DP6	NH <sub>4</sub> Cl	78,83	148,00	149,24	0,84	10,79
DP7			152,65	153,86	0,80	10,29
DP8			147,56	148,81	0,85	10,92
DP9			144,95	146,09	0,79	10,15
DP10			141,02	142,12	0,78	10,03
$\bar{X}$						<b>10,44</b>
$\sigma$						<b>0,39</b>
DP1	KCl	84,65	152,39	153,83	0,95	12,21
DP2			144,35	145,76	0,98	12,61
DP3			145,96	147,38	0,97	12,53
DP4			143,86	145,31	1,01	12,99
DP5			146,74	148,18	0,98	12,68
$\bar{X}$						<b>12,60</b>
$\sigma$						<b>0,28</b>
DP1	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,42	152,39	156,48	2,68	34,66
DP2			144,35	148,21	2,67	34,52
DP3			145,96	150,02	2,78	35,89
DP4			143,86	147,82	2,76	35,57
DP5			146,74	150,50	2,57	33,12
$\bar{X}$						<b>34,75</b>
$\sigma$						<b>1,08</b>

### Adsorción higroscópica - Yeso de acabado

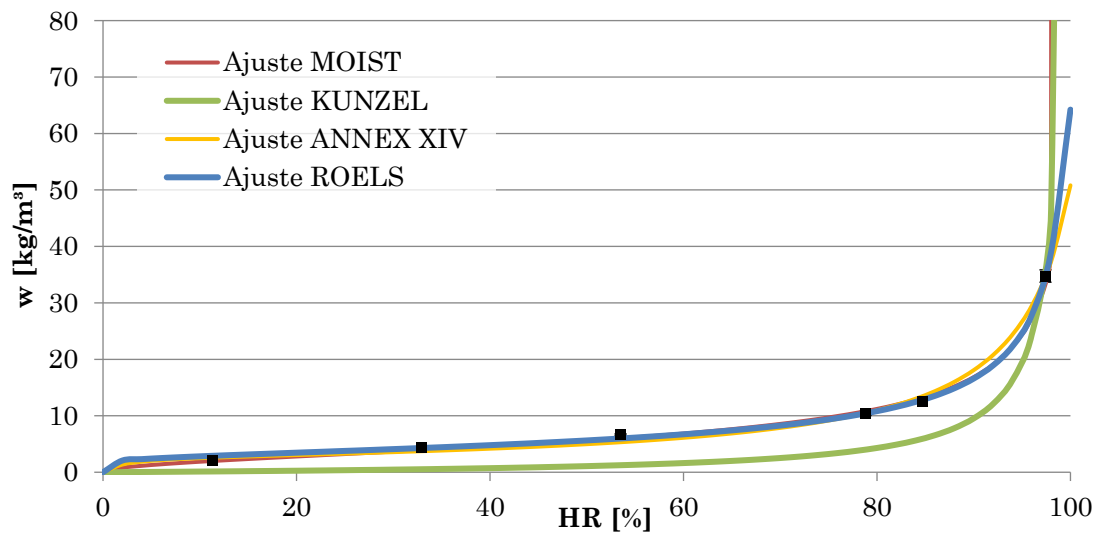


Ajustes:

HR [%]	w [kg/m³]	w Moist [kg/m³]	X <sup>2</sup>
0	0	0	0
11,3	2,05	1,99	1,91E-03
32,9	4,44	3,91	7,23E-02
53,5	6,66	6,00	7,45E-02
78,83	10,44	10,81	1,30E-02
84,65	12,60	13,17	2,42E-02
97,42	34,75	34,60	6,75E-04
<b>Σ</b>			<b>1,87E-01</b>
HR [%]	w [kg/m³]	w Künzel [kg/m³]	X <sup>2</sup>
0	0	0	0
11,3	2,05	0,14	2,63E+01
32,9	4,44	0,53	2,86E+01
53,5	6,66	1,25	2,35E+01
78,83	10,44	4,01	1,03E+01
84,65	12,60	5,90	7,61E+00
97,42	34,75	36,96	1,32E-01
<b>Σ</b>			<b>9,65E+01</b>
HR [%]	w [kg/m³]	w Annex XIV [kg/m³]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	2,05	2,58	1,09E-01
32,9	4,44	3,72	1,37E-01
53,5	6,66	5,32	3,40E-01
78,83	10,44	10,49	2,39E-04
84,65	12,60	13,43	5,11E-02
97,42	34,75	34,66	2,44E-04
<b>Σ</b>			<b>6,38E-01</b>

HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w R&J [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	2,05	2,91	2,54E-01
32,9	4,44	4,29	5,13E-03
53,5	6,66	5,98	7,83E-02
78,83	10,44	10,43	1,50E-06
84,65	12,60	12,79	2,74E-03
97,42	34,75	34,75	3,56E-07
<b>Σ</b>			<b>3,40E-01</b>

Adsorción higroscópica - Ajustes

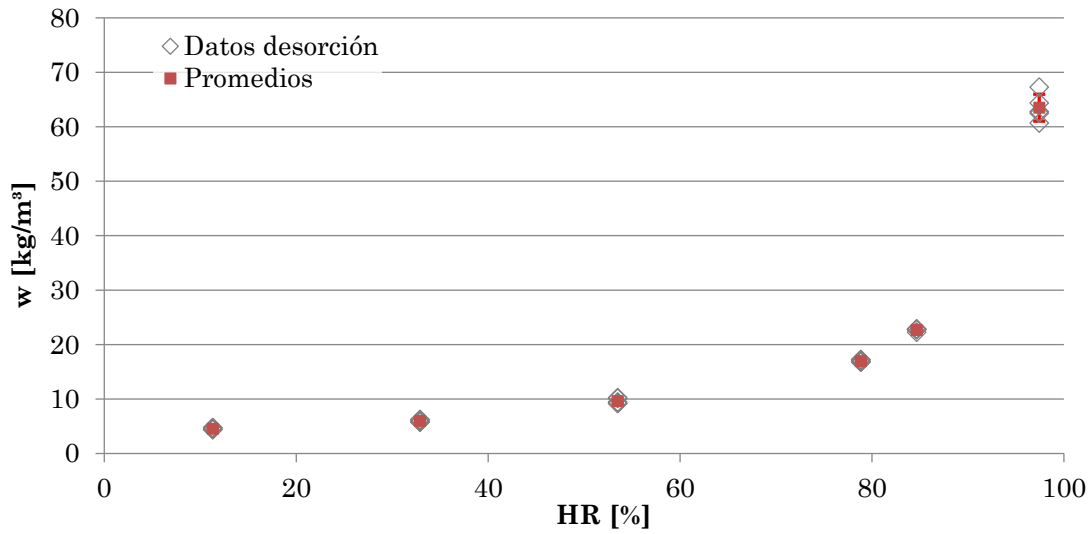




## (2) Desorción

Código muestra	Sal	HR [%]	m <sub>d</sub> [g]	m <sub>e</sub> [g]	u [% kg/kg]	w [kg/m <sup>3</sup> ]
DP11	LiCl	11,3	147,56	148,06	0,34	4,41
DP12			145,83	146,33	0,35	4,51
DP13			135,98	136,48	0,37	4,72
DP14			148,63	149,18	0,37	4,74
DP15			141,98	142,46	0,34	4,36
$\bar{X}$						<b>4,55</b>
$\sigma$						<b>0,17</b>
DP11	MgCl <sub>2</sub>	32,9	147,56	148,21	0,45	5,77
DP12			145,83	146,51	0,47	6,05
DP13			135,98	136,64	0,48	6,24
DP14			148,63	149,33	0,47	6,08
DP15			141,98	142,61	0,45	5,75
$\bar{X}$						<b>5,98</b>
$\sigma$						<b>0,21</b>
DP6	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	53,5	148,00	149,16	0,78	10,12
DP7			152,65	153,76	0,73	9,43
DP8			147,56	148,73	0,79	10,23
DP9			144,95	145,98	0,71	9,17
DP10			141,02	142,03	0,71	9,21
$\bar{X}$						<b>9,63</b>
$\sigma$						<b>0,51</b>
DP16	NH <sub>4</sub> Cl	78,83	146,48	148,41	1,32	17,05
DP17			152,13	154,16	1,33	17,23
DP18			147,55	149,47	1,30	16,79
DP19			156,59	158,62	1,30	16,79
DP20			148,76	150,74	1,33	17,22
$\bar{X}$						<b>16,98</b>
$\sigma$						<b>0,21</b>
DP1	KCl	84,65	152,39	155,09	1,77	22,82
DP2			144,35	146,90	1,77	22,85
DP3			145,96	148,53	1,76	22,77
DP4			143,86	146,39	1,76	22,73
DP5			146,74	149,26	1,72	22,25
$\bar{X}$						<b>22,69</b>
$\sigma$						<b>0,25</b>
DP6	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,42	148,00	155,16	4,84	62,48
DP7			152,65	160,60	5,21	67,27
DP8			147,56	154,50	4,70	60,69
DP9			144,95	151,99	4,86	62,75
DP10			141,02	148,05	4,99	64,35
$\bar{X}$						<b>63,51</b>
$\sigma$						<b>2,47</b>

Desorción higroscópica - Yeso de acabado

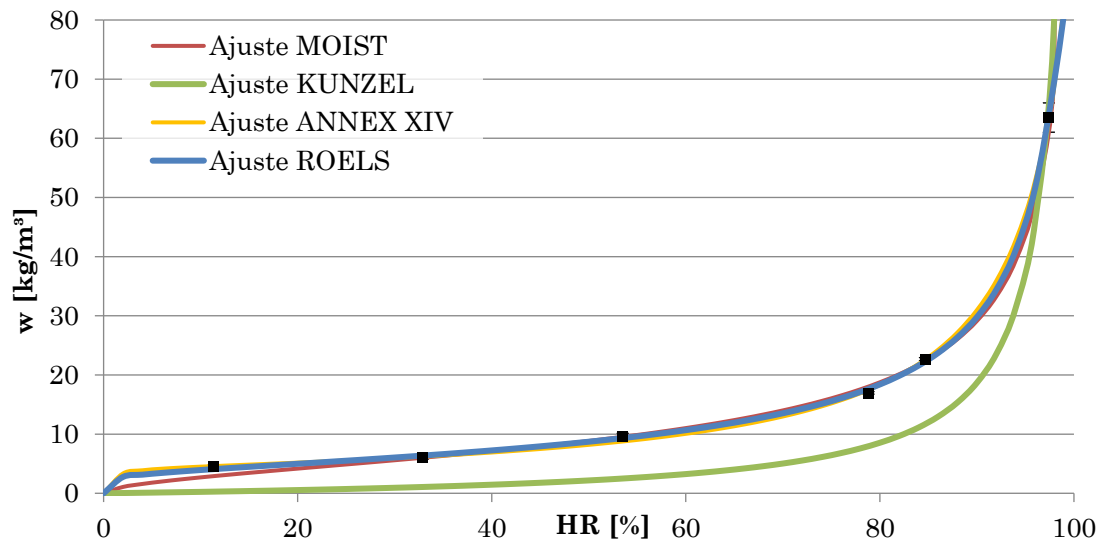


Ajustes:

HR [%]	w [kg/m³]	w Moist [kg/m³]	X²
0	0,00	0,00	0
11,3	4,55	2,89	9,49E-01
32,9	5,98	6,01	1,72E-04
53,5	9,63	9,54	8,37E-04
78,83	16,98	18,05	6,32E-02
84,65	22,69	22,33	5,63E-03
97,42	63,51	63,42	1,37E-04
<b>Σ</b>			<b>1,02</b>
HR [%]	w [kg/m³]	w Künzel [kg/m³]	X²
0	0,00	0,00	0
11,3	4,55	0,28	6,55E+01
32,9	5,98	1,07	2,25E+01
53,5	9,63	2,50	2,04E+01
78,83	16,98	7,96	1,02E+01
84,65	22,69	11,67	1,04E+01
97,42	63,51	67,48	2,33E-01
<b>Σ</b>			<b>1,29E+02</b>
HR [%]	w [kg/m³]	w Annex XIV [kg/m³]	X²
0	0,00	0,00	0
11,3	4,55	4,59	4,64E-04
32,9	5,98	6,19	7,72E-03
53,5	9,63	8,76	8,69E-02
78,83	16,98	17,47	1,38E-02
84,65	22,69	22,61	2,74E-04
97,42	63,51	63,50	2,19E-06
<b>Σ</b>			<b>1,09E-01</b>

HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w R&J [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0
11,3	4,55	4,08	5,43E-02
32,9	5,98	6,38	2,51E-02
53,5	9,63	9,33	9,56E-03
78,83	16,98	17,65	2,53E-02
84,65	22,69	22,24	8,89E-03
97,42	63,51	63,51	2,36E-07
<b>Σ</b>			<b>1,23E-01</b>

Desorción higroscópica - Ajustes



### A.3.4. Fibra de madera

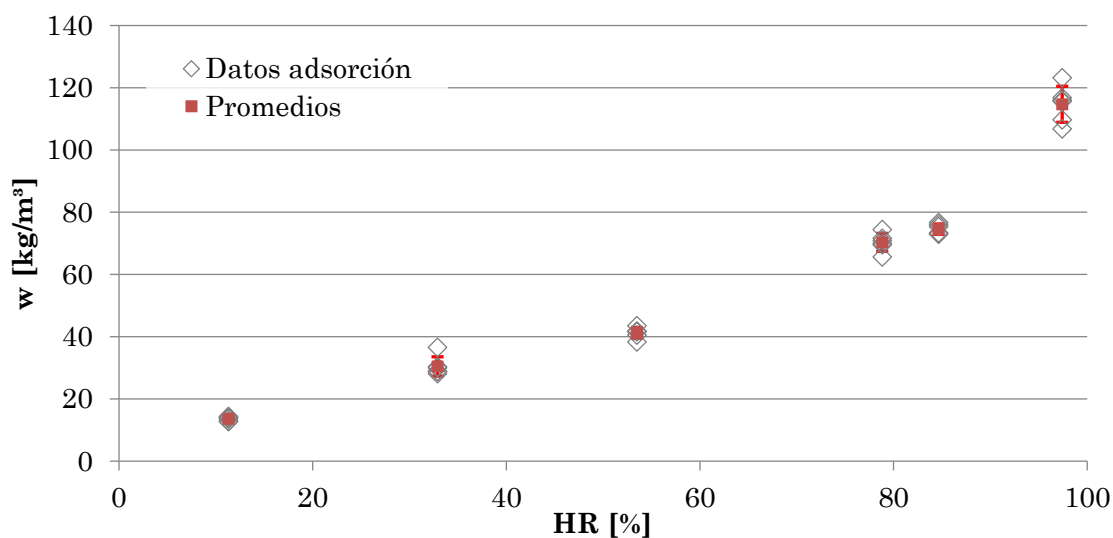
Datos ensayo isoterma de sorción:

(1) Adsorción

Código muestra	Sal	HR [%]	$m_d$ [g]	$m_e$ [g]	$u$ [% kg/kg]	$w$ [kg/m <sup>3</sup> ]
13			24,09	24,61	2,16	12,70
14			19,06	19,52	2,43	14,33
15	LiCl	11,3	21,48	21,99	2,38	14,02
16			22,41	22,90	2,19	12,87
17			20,81	21,31	2,40	14,11
18			29,59	30,28	2,31	13,58
$\bar{X}$						<b>13,60</b>
$\sigma$						<b>0,68</b>
31			20,51	21,55	5,10	29,99
35			19,20	20,19	5,15	30,28
36	MgCl <sub>2</sub>	32,9	20,38	21,65	6,21	36,55
37			22,65	23,73	4,78	28,11
38			23,32	24,46	4,90	28,82
39			21,52	22,57	4,90	28,83
$\bar{X}$						<b>30,43</b>
$\sigma$						<b>3,11</b>
25			27,82	29,63	6,51	38,31
26			19,25	20,61	7,07	41,63
27	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	53,5	23,03	24,62	6,89	40,52
28			20,08	21,51	7,10	41,76
29			23,45	25,19	7,39	43,51
30			22,42	24,00	7,08	41,63
$\bar{X}$						<b>41,23</b>
$\sigma$						<b>1,72</b>
7			26,25	29,37	11,88	69,91
8			23,01	25,81	12,16	71,58
9	NH <sub>4</sub> Cl	78,83	20,77	23,40	12,64	74,39
10			21,52	24,06	11,81	69,51
11			21,82	24,45	12,04	70,87
12			27,64	30,72	11,15	65,61
$\bar{X}$						<b>70,31</b>
$\sigma$						<b>2,88</b>
19			22,25	25,15	13,03	76,68
20			21,79	24,61	12,92	76,01
21	KCl	84,65	22,23	25,00	12,44	73,21
22			21,35	24,00	12,39	72,90
23			23,79	26,83	12,81	75,36
24			24,54	27,59	12,45	73,26
$\bar{X}$						<b>74,57</b>
$\sigma$						<b>1,65</b>

Código muestra	Sal	HR [%]	m <sub>d</sub> [g]	m <sub>e</sub> [g]	u [% kg/kg]	w [kg/m <sup>3</sup> ]
1			22,56	27,29	20,94	123,20
2			26,59	31,82	19,66	115,68
3	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,42	22,28	26,70	19,85	116,82
4			19,95	23,89	19,71	115,99
5			19,61	23,26	18,64	109,68
6			30,11	35,57	18,14	106,76
$\bar{X}$						<b>114,69</b>
$\sigma$						<b>5,79</b>

### Adsorción higroscópica - Fibra de madera

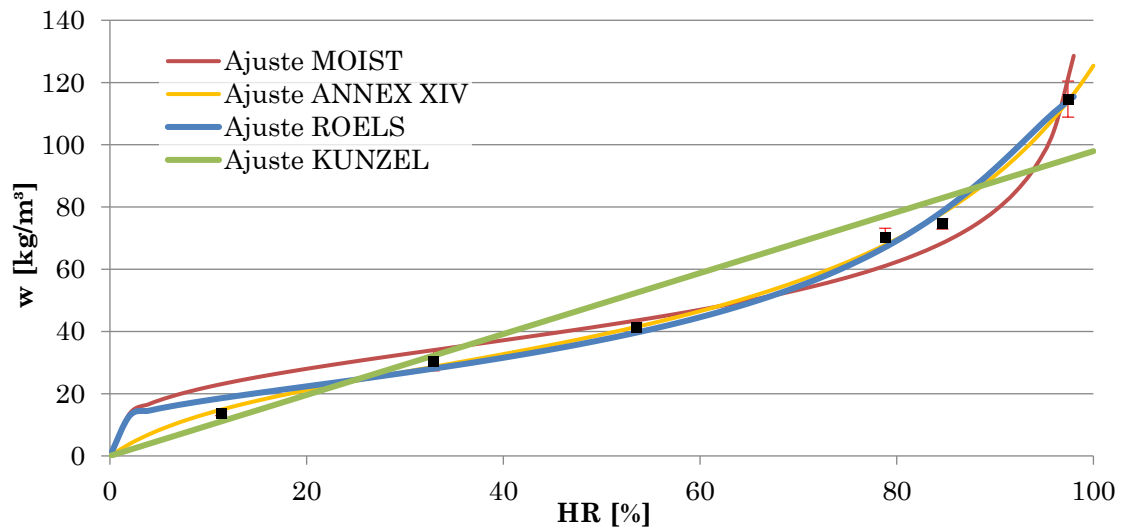


Ajustes:

HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w Moist [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	3,87
11,3	13,60	23,04	0,38
32,9	30,43	34,01	0,12
53,5	41,23	43,51	1,39
78,83	70,31	61,08	0,55
84,65	74,57	68,42	0,18
97,42	114,69	119,26	3,87
$\Sigma$			<b>6,49</b>
HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w Künzel [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	0,00	0,00	0,58
11,3	13,60	11,07	0,10
32,9	30,43	32,22	2,38
53,5	41,23	52,40	0,62
78,83	70,31	77,21	0,84
84,65	74,57	82,91	3,89
97,42	114,69	95,41	0,58

$\Sigma$		8,41	
HR	w	w Annex XIV	$X^2$
[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	
0	13,60	14,85	1,05E-01
11,3	30,43	28,65	1,11E-01
32,9	41,23	41,44	1,14E-03
53,5	70,31	67,83	9,09E-02
78,83	74,57	78,00	1,51E-01
84,65	114,69	114,03	3,83E-03
97,42	13,60	14,85	1,05E-01
$\Sigma$		4,63E-01	
HR	w	w R&J	$X^2$
[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	
0	0,00	0,00	1,31
11,3	13,60	18,54	0,20
32,9	30,43	28,05	6,55E-02
53,5	41,23	39,62	0,16
78,83	70,31	67,07	0,21
84,65	74,57	78,61	2,47E-03
97,42	114,69	114,16	1,31
$\Sigma$		1,95	

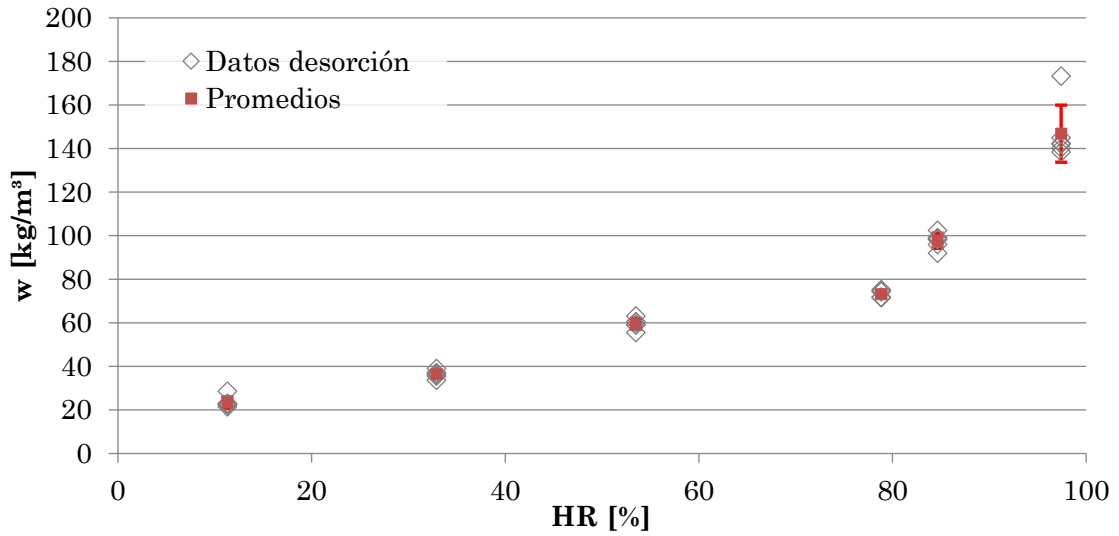
Adsorción higroscópica - Ajustes



## (2) Desorción

Código muestra	Sal	HR [%]	m <sub>d</sub> [g]	m <sub>e</sub> [g]	u [% kg/kg]	w [kg/m <sup>3</sup> ]
31			20,507	21,30	3,86	22,70
35			19,200	19,95	3,90	22,96
36	LiCl	11,3	20,380	21,37	4,85	28,53
37			22,650	23,48	3,64	21,43
38			23,321	24,20	3,79	22,28
39			21,515	22,33	3,80	22,37
$\bar{X}$						
$\sigma$						2,57
25			27,816	29,41	5,72	33,64
26			19,252	20,43	6,13	36,10
27	MgCl <sub>2</sub>	32,9	23,034	24,42	6,03	35,48
28			20,082	21,35	6,29	37,01
29			23,454	25,01	6,63	38,99
30			22,416	23,83	6,29	36,99
$\bar{X}$						
$\sigma$						1,79
7			26,252	28,89	10,06	59,18
8			23,010	25,37	10,27	60,40
9	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	53,5	20,773	23,00	10,72	63,09
10			21,520	23,68	10,01	58,93
11			21,820	24,05	10,24	60,25
12			27,642	30,25	9,43	55,48
$\bar{X}$						
$\sigma$						2,48
19			22,254	25,10	12,78	75,20
20			21,792	24,55	12,65	74,45
21	NH <sub>4</sub> Cl	78,83	22,234	24,94	12,16	71,56
22			21,351	23,95	12,17	71,63
23			23,785	26,79	12,63	74,34
24			24,538	27,53	12,19	71,70
$\bar{X}$						
$\sigma$						1,69
1			22,564	26,49	17,40	102,41
2			26,590	31,04	16,72	98,39
3	KCl	84,65	22,275	26,00	16,70	98,27
4			19,953	23,31	16,83	99,06
5			19,609	22,81	16,30	95,94
6			30,106	34,81	15,62	91,94
$\bar{X}$						
$\sigma$						3,50
13			24,09	29,76	23,52	138,38
14			19,06	23,66	24,13	141,99
15	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,42	21,48	26,77	24,63	144,93
16			22,41	27,83	24,19	142,37
17			20,81	26,93	29,44	173,22
$\bar{X}$						
$\sigma$						13,11

### Adsorción higroscópica - Fibra de madera



Ajustes:

HR [%]	w [kg/m³]	w Moist [kg/m³]	X <sup>2</sup>
0	23,38	29,02	1,10E+00
11,3	36,37	42,83	9,76E-01
32,9	59,55	54,80	4,11E-01
53,5	73,15	76,95	1,88E-01
78,83	97,67	86,19	1,53E+00
84,65	146,84	150,27	7,86E-02
97,42	23,38	29,02	1,10E+00
<b>Σ</b>			<b>4,28</b>

HR [%]	w [kg/m³]	w Künzel [kg/m³]	X <sup>2</sup>
0	23,38	13,83	6,58E+00
11,3	36,37	40,28	3,80E-01
32,9	59,55	65,50	5,40E-01
53,5	73,15	96,51	5,66E+00
78,83	97,67	103,64	3,43E-01
84,65	146,84	119,27	6,37E+00
97,42	23,38	13,83	6,58E+00
<b>Σ</b>			<b>1,99E+01</b>

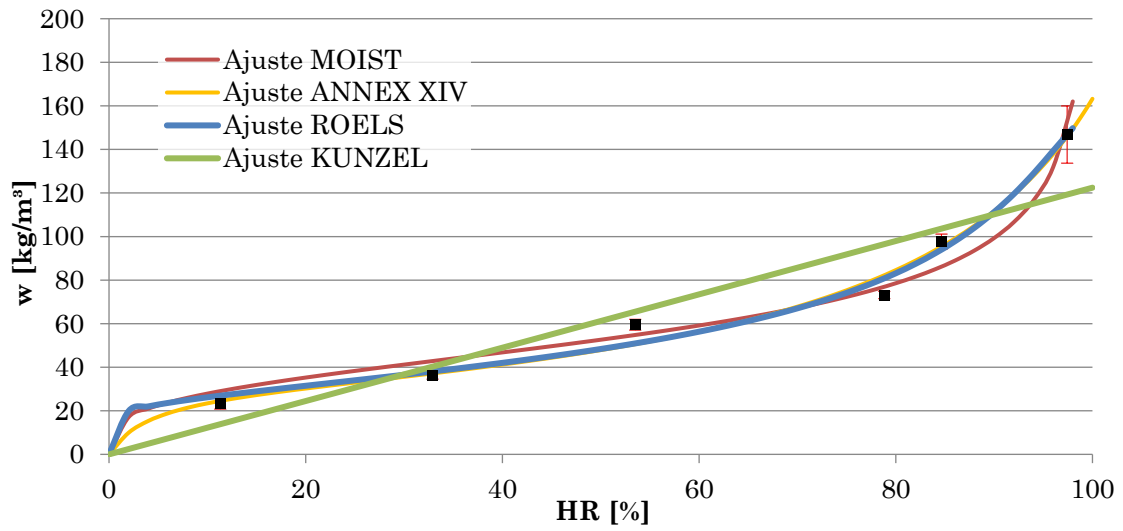
  

HR [%]	w [kg/m³]	w Annex XIV [kg/m³]	X <sup>2</sup>
0	23,38	24,54	5,47E-02
11,3	36,37	37,17	1,72E-02
32,9	59,55	50,58	1,59E+00
53,5	73,15	82,23	1,00E+00
78,83	97,67	95,39	5,45E-02
84,65	146,84	145,92	5,72E-03
97,42	23,38	24,54	5,47E-02
<b>Σ</b>			<b>2,73</b>



HR [%]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	w R&J [kg/m <sup>3</sup> ]	X <sup>2</sup>
0	23,38	26,93	4,69E-01
11,3	36,37	38,07	7,64E-02
32,9	59,55	50,93	1,46E+00
53,5	73,15	80,82	7,28E-01
78,83	97,67	94,00	1,43E-01
84,65	146,84	146,86	3,55E-06
97,42	23,38	26,93	4,69E-01
<b>Σ</b>			<b>2,87</b>

Desorción higroscópica - Ajustes



## A.4. DIFUSIÓN AL VAPOR DE AGUA

### A.4.1. Perlita

Código muestra	s [m]	$\Phi_m$ [%]	$g_v$ [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]	$W_p$ [kg/(s·m <sup>2</sup> ·Pa)]	$\delta_p$ [kg/(s·m·Pa)]	$\mu$ UNE [-]	$\mu$ Hens [-]	$\mu$ Carmeliet [-]
C3	2,30E-02		3,150E-07	5,449E-10	1,252E-11	15,61	14,79	13,92
C5	2,40E-02		2,987E-07	5,166E-10	1,237E-11	15,80	14,97	14,13
C10	1,90E-02	42,95	3,227E-07	5,582E-10	1,058E-11	18,48	17,51	16,45
C11	2,29E-02		4,072E-07	7,044E-10	1,611E-11	12,13	11,50	10,62
C12	1,98E-02		3,832E-07	6,628E-10	1,313E-11	14,89	14,10	13,09
C20	2,32E-02		6,489E-07	4,321E-10	1,004E-11	19,46	18,44	17,58
C21	2,16E-02		7,042E-07	4,689E-10	1,014E-11	19,27	18,26	17,33
C22	2,07E-02	26,50	6,950E-07	4,627E-10	9,592E-12	20,37	19,31	18,34
C23	2,34E-02		6,529E-07	4,347E-10	1,015E-11	19,25	17,84	17,39
C24	2,39E-02		6,514E-07	4,337E-10	1,038E-11	18,83	18,24	17,01
C15	2,25E-02		4,717E-07	1,231E-09	2,974E-11	6,57	7,01	6,18
C16	2,42E-02	77,14	4,332E-07	1,119E-09	2,642E-11	7,40	7,81	6,96
C18	2,36E-02		4,103E-07	9,508E-10	2,195E-11	8,90	8,44	7,57
C25	2,31E-02		-5,389E-07	1,776E-09	3,649E-11	5,36	6,00	5,02
C26	1,94E-02		-5,179E-07	1,695E-09	3,513E-11	5,56	6,18	5,22
C27	2,05E-02	91,21	-5,323E-07	1,750E-09	3,411E-11	5,73	6,40	5,37
C28	2,07E-02		-4,800E-07	1,551E-09	2,908E-11	6,72	7,38	6,31
C29	1,95E-02		-4,411E-07	1,407E-09	3,378E-11	5,79	6,27	5,44

\*Los valores marcados en azul han sido corregidos por tener una  $s_d < 0,2m$  tal y como indica la norma UNE-EN ISO 12572

Ajustes:

HR [%]	$\mu$ UNE [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$X^2$
26,75	19,44	18,67	3,15E-02
43,20	15,38	16,34	5,60E-02
76,97	8,18	8,13	3,16E-02
91,04	6,80	4,96	1,54E-01
$\Sigma$			2,73E-01
HR [%]	$\mu$ Hens [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$X^2$
26,75	18,42	17,78	2,29E-02
43,20	14,57	15,37	4,15E-02
76,97	7,75	8,32	3,90E-02
91,04	6,45	5,60	1,28E-01
$\Sigma$			2,32E-01
HR [%]	$\mu$ Carmeliet [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$X^2$
26,75	17,53	17,12	9,90E-03
43,20	13,64	14,25	2,62E-02
76,97	6,90	7,15	8,72E-03
91,04	5,47	4,74	1,12E-01
$\Sigma$			1,57E-01

#### A.4.2. Yeso de agarre

Código muestra	s [m]	$\Phi_m$ [%]	$g_v$ [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]	$W_p$ [kg/(s·m <sup>2</sup> ·Pa)]	$\delta_p$ [kg/(s·m·Pa)]	$\mu$ UNE [-]	$\mu$ Hens [-]	$\mu$ Carmeliet [-]
BC9	4,04E-02	32,40	4,454E-07	4,247E-10	1,716E-11	11,32	9,02	8,60
BC11	4,12E-02		5,214E-07	4,972E-10	2,046E-11	9,50	9,05	8,56
BC12	4,34E-02		4,444E-07	4,237E-10	1,841E-11	10,56	10,06	9,60
BC14	4,04E-02		4,819E-07	4,595E-10	1,857E-11	10,47	9,97	9,48
BC1	4,23E-02	43,20	2,646E-07	5,170E-10	2,187E-11	8,89	8,47	7,99
BC2	4,41E-02		2,469E-07	4,825E-10	2,127E-11	9,14	8,71	8,25
BC3	4,29E-02		2,618E-07	5,115E-10	2,193E-11	8,86	8,45	7,98
BC4	4,20E-02		2,669E-07	5,216E-10	2,191E-11	8,87	8,45	7,98
BC5	4,14E-02	75,46	-6,317E-07	5,785E-10	2,394E-11	8,12	7,73	7,25
BC8	4,11E-02		-6,404E-07	5,865E-10	2,411E-11	8,06	7,68	7,19
BC5	4,14E-02	91,04	-2,038E-07	6,421E-10	2,658E-11	7,31	6,97	6,48
BC8	4,11E-02		-2,084E-07	6,567E-10	2,700E-11	7,20	6,86	6,37
BC20	4,18E-02		-2,246E-07	7,076E-10	2,956E-11	6,57	6,26	5,78

Ajustes:

HR [%]	$\mu$ UNE [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$\chi^2$
32,40	10,46	9,915	2,74E-03
43,20	8,94	9,591	5,30E-03
75,46	8,09	8,044	3,17E-05
91,04	7,03	6,964	8,53E-05
$\Sigma$			8,16E-03
HR [%]	$\mu$ Hens [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$\chi^2$
32,40	9,52	9,25	8,07E-04
43,20	8,52	8,90	1,99E-03
75,46	7,71	7,54	4,57E-04
91,04	6,70	6,75	6,66E-05
$\Sigma$			3,32E-03
HR [%]	$\mu$ Carmeliet [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$\chi^2$
32,40	9,06	8,79	8,68E-04
43,20	8,05	8,43	2,19E-03
75,46	7,22	7,05	5,36E-04
91,04	6,21	6,27	8,12E-05
$\Sigma$			3,68E-03

### A.4.3. Sistema de aislamiento completo

Código muestra	s [m]	$\Phi_m$ [%]	$g_v$ [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]	$W_p$ [kg/(s·m <sup>2</sup> ·Pa)]	$\delta_p$ [kg/(s·m·Pa)]	$\mu$ UNE [-]	$\mu$ Hens [-]	$\mu$ Carmeliet [-]
C-C16	3,10E-02		8,127E-07	6,861E-10	2,128E-11	9,18	8,67	8,10
C-C17	3,09E-02		8,652E-07	7,304E-10	2,256E-11	8,66	8,24	7,66
C-C18	3,00E-02	32,40	8,759E-07	7,394E-10	2,219E-11	8,81	8,36	7,76
C-C19	3,36E-02		7,236E-07	6,109E-10	2,053E-11	9,52	8,99	8,48
C-C20	3,38E-02		7,256E-07	6,125E-10	2,071E-11	9,44	8,93	8,42
C-C1	3,16E-02		3,856E-07	6,669E-10	2,108E-11	9,27	8,86	8,31
C-C2	3,44E-02		3,344E-07	5,785E-10	1,990E-11	9,82	9,52	9,03
C-C3	3,20E-02	43,20	3,481E-07	6,021E-10	1,927E-11	10,14	9,68	9,15
C-C4	3,34E-02		3,481E-07	6,021E-10	2,011E-11	9,72	9,30	8,78
C-C5	3,44E-02		3,361E-07	5,814E-10	1,999E-11	9,78	9,31	8,82
C-C8	3,32E-02		3,077E-07	7,131E-10	2,364E-11	8,27	7,8	7,23
C-C9	3,16E-02	76,97	3,210E-07	7,439E-10	2,350E-11	8,32	8,0	7,30
C-C10	3,25E-02		3,085E-07	7,148E-10	2,321E-11	8,42	7,9	7,43
C-C11	3,45E-02		-3,773E-07	1,179E-09	4,070E-11	4,80	5,15	4,61
C-C12	3,25E-02		-3,769E-07	1,178E-09	3,825E-11	5,11	5,42	4,86
C-C13	3,29E-02	91,04	-3,869E-07	1,213E-09	3,987E-11	4,90	5,33	4,76
C-C14	3,41E-02		-3,799E-07	1,188E-09	4,050E-11	4,83	5,56	5,02
C-C15	3,31E-02		-3,571E-07	9,959E-10	3,299E-11	5,92	5,84	5,29

\*Los valores marcados en azul han sido corregidos por tener una  $s_d < 0,2m$  tal y como indica la norma UNE-EN ISO 12572

Ajustes:

HR [%]	$\mu$ UNE [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$X^2$
32,40	9,12	9,49	1,46E-02
43,20	9,75	9,48	7,68E-03
76,97	8,33	8,36	6,00E-05
91,04	5,59	5,58	3,98E-02
$\Sigma$			6,22E-02
HR [%]	$\mu$ Hens [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$X^2$
32,40	8,64	9,05	1,84E-02
43,20	9,34	9,02	1,09E-02
76,97	7,87	7,90	1,36E-04
91,04	5,46	5,45	1,89E-05
$\Sigma$			2,95E-02
HR [%]	$\mu$ Carmeliet [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$X^2$
32,40	8,09	8,51	2,15E-02
43,20	8,82	8,49	1,25E-02
76,97	7,32	7,35	1,51E-04
91,04	4,91	4,90	2,25E-05
$\Sigma$			3,42E-02

#### A.4.4. Yeso de acabado

Código muestra	s [m]	$\Phi_m$ [%]	$g_v$ [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]	$W_p$ [kg/(s·m <sup>2</sup> ·Pa)]	$\delta_p$ [kg/(s·m·Pa)]	$\mu$ UNE [-]	$\mu$ Hens [-]	$\mu$ Carmeliet [-]
DC5	2,91E-02	43,20	4,264E-07	8,332E-10	2,421E-11	8,03	7,65	6,96
DC6	2,94E-02		4,207E-07	8,220E-10	2,418E-11	8,04	7,66	6,98
DC7	2,84E-02		4,105E-07	8,021E-10	2,276E-11	8,54	8,14	7,43
DC8	2,65E-02		4,052E-07	7,917E-10	2,095E-11	9,28	8,84	8,08
DC1	2,82E-02	91,04	-4,623E-07	1,713E-09	4,836E-11	4,02	4,50	3,79
DC2	3,02E-02		-4,700E-07	1,747E-09	5,276E-11	3,68	4,14	3,48
DC3	2,73E-02		-4,570E-07	1,690E-09	4,611E-11	4,22	4,71	3,98
DC4	2,96E-02		-4,503E-07	1,661E-09	4,912E-11	3,96	4,41	3,74

\*Los valores marcados en azul han sido corregidos por tener una  $s_d < 0,2m$  tal y como indica la norma UNE-EN ISO 12572

Ajustes:

HR [%]	$\mu$ UNE [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$\chi^2$
43,20	8,47	8,45	6,59E-06
91,04	4,66	3,97	2,22E-06
$\Sigma$			8,81E-06
HR [%]	$\mu$ Hens [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$\chi^2$
43,20	8,07	8,07	3,00E-13
91,04	4,44	4,44	4,15E-12
$\Sigma$			4,44E-12
HR [%]	$\mu$ Carmeliet [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$\chi^2$
43,20	7,36	7,48	2,55E-04
91,04	3,75	3,79	1,03E-04
$\Sigma$			3,58E-04

#### A.4.5. Fibra de madera

Código muestra	s [m]	$\Phi_m$ [%]	$g_v$ [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]	$W_p$ [kg/(s·m <sup>2</sup> ·Pa)]	$\delta_p$ [kg/(s·m·Pa)]	$\mu$ UNE [-]	$\mu$ Hens [-]	$\mu$ Carmeliet [-]
MC6	2,42E-02		2,372E-07	4,635E-10	1,120E-11	17,35	16,53	15,71
MC7	2,42E-02		2,250E-07	4,397E-10	1,064E-11	18,27	17,41	16,58
MC8	2,42E-02	43,20	2,878E-07	5,624E-10	1,361E-11	14,28	13,61	12,78
MC9	2,43E-02		2,562E-07	5,005E-10	1,216E-11	15,99	15,23	14,41
MC10	2,43E-02		3,684E-07	7,199E-10	1,746E-11	11,13	10,60	9,78
MC11	2,42E-02		-1,207E-06	1,247E-09	3,023E-11	6,43	6,91	6,09
MC12	2,42E-02		-8,578E-07	7,856E-10	1,903E-11	10,21	9,73	8,90
MC13	2,43E-02	75,46	-1,504E-06	1,604E-09	3,898E-11	4,99	5,53	4,71
MC14	2,43E-02		-1,223E-06	1,266E-09	3,075E-11	6,32	6,81	5,98
MC15	2,43E-02		-9,623E-07	8,813E-10	2,141E-11	9,08	8,65	7,83

\*Los valores marcados en azul han sido corregidos por tener una  $s_d < 0,2m$  tal y como indica la norma UNE-EN ISO 12572

Ajustes:

HR [%]	$\mu$ UNE [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$\chi^2$
43,20	15,41	15,41	7,27E-16
75,46	7,41	7,41	6,56E-15
$\Sigma$			7,29E-15
HR [%]	$\mu$ Hens [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$\chi^2$
43,20	14,68	14,68	3,02E-13
75,46	7,53	7,53	4,18E-14
$\Sigma$			3,44E-13
HR [%]	$\mu$ Carmeliet [-]	Ajuste $\mu$ [-]	$\chi^2$
43,20	13,85	13,85	8,21E-13
75,46	6,70	6,70	3,67E-17
$\Sigma$			8,21E-13



## ANEXO B: *Moisture Buffer Value* práctico

### B.1. Perlita

Código muestra	MBV [g/(m <sup>2</sup> ·%RH)]	MBV promedio [g/(m <sup>2</sup> ·%RH)]	σ
MB01	0,535	0,536	1,67E-03
	0,537		
	0,538		
MB02	0,514	0,510	6,98E-03
	0,514		
	0,502		
MB07	0,485	0,484	2,32E-03
	0,485		
	0,481		
MB08	0,526	0,525	4,41E-03
	0,521		
	0,530		
MB11	0,422	0,424	2,82E-03
	0,427		
	0,423		
<b>MBV perlita [g/(m<sup>2</sup>·%RH)]</b>	<b><math>\bar{X}</math></b>	<b>0,50</b>	
	<b>σ</b>	<b>0,04</b>	

### B.2. Yeso de agarre

Código muestra	MBV [g/(m <sup>2</sup> ·%RH)]	MBV promedio [g/(m <sup>2</sup> ·%RH)]	σ
B-C13	0,751	0,747	1,12E-02
	0,757		
	0,735		
B-C22	0,784	0,774	8,74E-03
	0,773		
	0,766		
B-C16	0,751	0,752	1,87E-03
	0,751		
	0,754		
B-C18	0,855	0,853	7,67E-03
	0,845		
	0,859		
B-C19	0,961	0,969	7,01E-03
	0,974		
	0,972		
<b>MBV yeso agarre [g/(m<sup>2</sup>·%RH)]</b>	<b><math>\bar{X}</math></b>	<b>0,82</b>	
	<b>σ</b>	<b>0,09</b>	



### B.3. Yeso de acabado

Código muestra	MBV [g/(m <sup>2</sup> ·%RH)]	MBV promedio [g/(m <sup>2</sup> ·%RH)]	σ
DMB1	1,051	1,052	4,46E-03
	1,048		
	1,056		
DMB2	1,091	1,086	2,07E-02
	1,104		
	1,063		
DMB3	1,105	1,120	1,53E-02
	1,122		
	1,135		
DMB4	1,125	1,123	5,67E-03
	1,128		
	1,117		
DMB5	1,003	1,024	1,94E-02
	1,042		
	1,028		
<b>MBV yeso acabado [g/(m<sup>2</sup>·%RH)]</b>	$\bar{X}$	<b>1,08</b>	
	$\sigma$	<b>0,04</b>	

### B.4. Sistema de aislamiento completo

Código muestra	MBV [g/(m <sup>2</sup> ·%RH)]	MBV promedio [g/(m <sup>2</sup> ·%RH)]	σ
C_MBV	0,823	0,817	2,20E-02
	0,835		
	0,792		
C_MBV2	0,713	0,709	4,52E-03
	0,710		
	0,704		
C_MBV3	0,578	0,574	4,04E-03
	0,570		
	0,574		
C_MBV4	0,749	0,754	8,44E-03
	0,764		
	0,749		
C_MBV5	0,749	0,754	8,44E-03
	0,764		
	0,749		
<b>MBV sistema aislamiento [g/(m<sup>2</sup>·%RH)]</b>	$\bar{X}$	<b>0,72</b>	
	$\sigma$	<b>0,09</b>	

### B.5. Fibra de madera

Código muestra	MBV [g/(m <sup>2</sup> ·%RH)]	MBV promedio [g/(m <sup>2</sup> ·%RH)]	$\sigma$
MB_1	2,049	1,998	4,50E-02
	1,984		
	1,963		
MB_2	2,447	2,466	2,36E-02
	2,459		
	2,493		
MB_3	1,980	1,987	9,48E-03
	1,984		
	1,998		
MB_4	2,049	2,010	3,50E-02
	1,999		
	1,981		
MB_5	2,111	2,136	2,20E-02
	2,152		
	2,144		
<b>MBV fibra madera [g/(m<sup>2</sup>·%RH)]</b>	$\bar{X}$	<b>2,12</b>	
	$\sigma$	<b>0,20</b>	