



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DEL MICROCLIMA DE
LOS FRESCOS RENACENTISTAS DE LA CATEDRAL
METROPOLITANA DE VALENCIA**



**Tesis doctoral de Ángel Fernández Navajas
Director: Fernando J. García-Diego**

Departamento de Física Aplicada

Valencia, Marzo de 2012

AGRADECIMIENTOS.

A **Fernando J. García-Diego**, tutor, compañero y a pesar de ello, amigo. Sin su ayuda, consejo y apoyo no habría sido posible realizar esta tesis.

A **Manuel Zarzo Castelló** por sus correcciones en la parte estadística.

A **M^a Carmen Pérez García** por su ayuda y sus opiniones sobre este trabajo.

A **Jorge Curiel Esparza** por sus palabras de ánimo y sus opiniones sobre este trabajo.

A **Juan Pérez Miralles** por colocar los sensores de la Catedral y por sus opiniones sobre este trabajo.

A **Álvaro Muñoz Sánchez**, del Área de Medio Ambiente de la UPV por su amabilidad al facilitar los datos meteorológicos.

RESUMEN.

En este trabajo se describe el funcionamiento de un sistema de monitorización de humedad relativa y temperatura que se llevó a cabo para la conservación preventiva de los frescos renacentistas de la bóveda del ábside de la Catedral Metropolitana de Valencia, que se restauraron en 2006. Este sistema está compuesto por 29 sensores de humedad relativa (HR) y temperatura: 10 de ellos se insertaron en la capa de yeso que sirve de apoyo a las pinturas al fresco, otros 10 sensores se colocaron en el interior de las paredes cerca de los frescos y el resto monitorizan el microclima interior en diferentes puntos de la bóveda.

La gran cantidad de datos recogidos (millones de datos), hizo necesaria la creación de un software específico para almacenar y gestionar estos datos. Este software, llamado Burrito, es una base de datos basada en software libre, con una enorme capacidad de almacenamiento y con la ventaja de poder exportar resultados a formato texto, para su análisis con software estadístico.

A los datos recogidos en 2007, 2008 y 2010 se les ha aplicado un análisis de componentes principales (PCA) y los resultados obtenidos revelan que las semejanzas y diferencias entre los sensores se mantuvieron aproximadamente a lo largo de los tres años. Adicionalmente, se hace una interpretación física de la primera y la segunda componente principales.

Curiosamente, los sensores que en el análisis de PCA aparecen alejados del resto de sensores, corresponden a zonas donde están apareciendo problemas de conservación debido a la formación de eflorescencias salinas.

Los datos registrados de humedad relativa y temperatura se analizan de acuerdo a la norma UNI 10829 italiana (1999).

RESUM.

En este treball es descriu el funcionament d'un sistema de monitorització d'humitat relativa i temperatura que es va dur a terme per a la conservació preventiva dels frescos renaixentistes de la volta de l'absis de la Catedral Metropolitana de València, que es van restaurar en 2006. Este sistema està compost per 29 sensors d'humitat relativa (HR) i temperatura: 10 d'ells es van inserir en la capa d'algeps que servix de suport a les pintures al fresc, altres 10 sensors es van col·locar en l'interior de les parets prop dels frescos i la resta monitoritzen el microclima interior en diferents punts de la volta.

La gran quantitat de dades arreplegats (milions de dades) , va fer necessària la creació d'un software específic per a emmagatzemar i gestionar estes dades. Este software, cridat Burrito, és una base de dades basada en software lliure, amb una enorme capacitat d'emmagatzemament i amb l'avantatge de poder exportar resultats a format text, per a la seua anàlisi amb software estadístic.

A les dades arreplegats en 2007, 2008 i 2010 se'ls ha aplicat una anàlisi de components principals (PCA) i els resultats obtinguts revelen que les semblances i diferències entre els sensors es van mantindre aproximadament al llarg dels tres anys. Addicionalment, es fa una interpretació física de la primera i la segona component principals.

Curiosament, els sensors que en l'anàlisi de PCA apareixen allunyats de la resta de sensors, corresponen a zones on estan apareixent problemes de conservació degut a la formació d'eflorescències salines.

Les dades registrats d'humitat relativa i temperatura s'analitzen d'acord amb la norma UNI 10829 italiana (1999) .

ABSTRACT.

We describe the performance of a microclimate monitoring system that was implemented for the preventive conservation of the Renaissance frescoes in the apse vault of the Cathedral of Valencia, that were restored in 2006. This system comprises 29 relative humidity (*RH*) and temperature sensors: 10 of them inserted into the plaster layer supporting the fresco paintings, 10 sensors in the walls close to the frescoes and nine sensors measuring the indoor microclimate at different points of the vault.

To manage the large amount of recollected data (millions of data), was necessary the creation of a specific software to store and manage this data. This software, called Burrito, is a database based on free software, with a huge storage capacity and the advantage of being able to export results to format text for analysis with statistical software.

Principal component analysis was applied to *RH* data recorded in 2007. The analysis was repeated with data collected in 2008 and 2010. The resulting loading plots revealed that the similarities and dissimilarities among sensors were approximately maintained along the three years. A physical interpretation was provided for the first and second principal components.

Interestingly, sensors recording the highest *RH* values correspond to zones where humidity problems are causing formation of efflorescence.

Recorded data of *RH* and temperature are discussed according to Italian Standard UNI 10829 (1999).

o. ÍNDICES.

o.1. Índice general.

o. ÍNDICES. _____	1
o.1. Índice general. _____	1
o.2. Índice de figuras. _____	2
1. INTRODUCCION. _____	7
1.1. Antecedentes. _____	7
1.2. Conservación preventiva de las pinturas murales (frescos) mediante monitorización del microclima. _____	15
1.3. Breve reseña histórica sobre los frescos renacentistas de la Catedral de Valencia. _____	16
1.4. Remodelación de la terraza situada por encima de la bóveda. _____	17
1.5. Restauración de los frescos. _____	20
1.6. Instalación del sistema de monitorización de temperatura y HR. _____	25
2. OBJETIVOS. _____	27
3. MATERIALES Y MÉTODOS. _____	29
3.1. Propósito general del sistema. _____	29
3.2. Descripción del hardware del sistema. _____	30
3.3. Descripción del software del sistema. _____	42
4. Aplicación del sistema en los frescos renacentistas de la Catedral de Valencia. _	65
4.1. Antecedentes _____	65
4.2. Resultados obtenidos en 2008 y discusión. _____	70
4.3. Resultados obtenidos en 2010 y discusión. _____	122
4.4. Datos recogidos en 2011. _____	128
5. Estudio de los datos mediante Análisis de Componentes Principales (PCA). ____	131
5.1. Generalidades. _____	131
5.2. Aspectos cuantitativos de los datos de HR obtenidos. _____	131
5.3. Justificación del método de análisis empleado. _____	135
5.4. Metodología para la realización de los PCA. _____	135
5.5. PCA de los datos de 2008 y 2010. _____	137
5.6. Estudio de las componentes principales más relevantes. _____	139
6. Utilización de los modelos obtenidos para explicar los problemas de conservación. _____	149
6.1. Sensores de las pinturas en la “zona correcta” del modelo. _____	152
6.2. Sensores de las pinturas en la “zona con problemas” del modelo. _____	157
7. Conclusiones. _____	167
7.1. Obtención de datos sobre el microclima de la obra. _____	167

7.2. Almacenamiento y gestión de los datos obtenidos. _____	168
7.3. Detección temprana de situaciones de emergencia. _____	170
7.4. Análisis estadístico de los datos y obtención de modelos. _____	170
7.5. Conclusiones finales: idoneidad de la ubicación de la obra desde el punto de vista ambiental. _____	172
08. Bibliografía y referencias _____	173
09. Notas finales. _____	189

0.2. Índice de figuras.

Figura 1.1. Perspectiva de la parte superior del ápside y la terraza sobre los frescos. _____	18
Figura 1.2.A. Estado inicial de los frescos. _____	22
Figura 1.2.B. Restauración de los frescos y de la cúpula barroca. _____	23
Figura 1.2.C. Frescos después del trabajo de restauración. _____	24
Figura 3.1.A: Dibujo esquemático de la distribución actual de la instalación _____	32
Figura 3.1.B: Esquema actual de la instalación. _____	33
Figura 3.2.A. Sensor de encharcamiento. _____	34
Figura 3.2.B. Sensor de humedad HIH4000, sensor de temperatura/conversor A/D DS2438 y regulador de tensión L7805. _____	35
Figura 3.3.A. Topografía lineal. _____	36
Figura 3.3.B. Topografía ramificada. _____	37
Figura 3.3.C. Topografía estrellada. _____	37
Figura 3.4.A: Placa Arduino con el chip ATmega168. _____	38
Figura 3.4.B: Plataforma Arduino (a la izquierda) y ampliación de hardware similar a la utilizada en el sistema de la Catedral. _____	39
Figura 3.4.C: Detalle de como se inserta la ampliación de hardware en la placa Arduino. _____	40
Figura 3.4.D: Esquema de la ampliación para la plataforma Arduino que utiliza el sistema de monitorización de la Catedral. _____	41
Figura 3.5: Pantalla principal. _____	44
Figura 3.6: Crear un nuevo tipo de sensor. _____	45
Figura 3.7: Rango de valores máximo y mínimo. _____	46
Figura 3.8: Creación de un nuevo tipo de sensor. _____	47
Figura 3.9: Pantalla sobre los tipos de sensores creados. _____	48
Figura 3.10: Listado de sensores del proyecto en blanco. _____	49
Figura 3.11: Añadiendo sensores. _____	49
Figura 3.12: Listado de sensores completado. _____	50
Figura 3.13: Preparación del fichero txt en Excel. _____	51
Figura 3.14: Apertura de un fichero CSV de datos. _____	52

Figura 3.15: Lectura del fichero CSV. Paso 1. _____	53
Figura 3.16: Lectura del fichero CSV. Paso 2. _____	53
Figura 3.17: Lectura del fichero CSV. Paso 3. _____	54
Figura 3.18: Pantalla para la generación de consultas. _____	55
Figura 3.19: Resultados de la consulta. _____	57
Figura 3.20: Gráfico de datos desglosados. _____	58
Figura 3.21: Datos desglosados. _____	58
Figura 3.22: Resultados de la consulta en columnas. _____	59
Figura 3.23: Gráfico de resultados de la consulta. _____	60
Figura 3.24: Menú contextual al pulsar sobre un registro del gráfico. _____	61
Figura 3.25: Gráfico donde se han dibujado líneas y rectángulos. Se han dejado sólo dos series ocultando el resto. _____	61
Figura 3.26: Botón de exportar a Excel desde la pantalla de resultados de la consulta en forma de tabla. _____	62
Figura 3.27: Datos exportados a Excel. _____	63
Figura 4.1: Tubo poroso con los sensores en su interior. _____	66
Figura 4.2.A: Distribución de los sensores. _____	67
Figura 4.2.B: Distribución de los sensores, con indicación de las distintas líneas. _____	68
Figura 4.3: Gráfico de T y HR externas. _____	72
Figura 4.4: Variación media diaria de HR en el exterior del templo. _____	73
Figura 4.5: Variación media diaria de Temperatura en el exterior del templo. _____	74
Figura 4.6: Gráfico comparativo de HR, exterior e interior. _____	75
Figura 4.7: Gráfico comparativo de temperatura, exterior e interior. _____	77
Figura 4.8: Variación HR horaria. Semana de invierno. _____	80
Figura 4.9: Variación T ^a horaria. Semana de invierno. _____	80
Figura 4.10: Variación HR horaria. Semana de primavera. _____	81
Figura 4.11: Variación T ^a horaria. Semana de primavera. _____	82
Figura 4.12: Variación HR horaria. Semana de verano. _____	83
Figura 4.13: Variación T ^a horaria. Semana de verano. _____	83
Figura 4.14: Variación HR horaria. Semana de otoño. _____	84
Figura 4.15: Variación T ^a horaria. Semana de otoño. _____	85
Figura 4.16: Media diaria HR. Primer trimestre 2008. _____	88
Figura 4.17: Variación diaria HR. Primer trimestre. _____	89
Figura 4.18: Media diaria T ^a . Primer trimestre 2008. _____	89
Figura 4.19: Variación diaria T ^a . Primer trimestre. _____	90
Figura 4.20: Media diaria HR. Segundo trimestre. _____	93
Figura 4.21: Variación diaria HR. Segundo trimestre. _____	93
Figura 4.22: Media diaria T ^a . Segundo trimestre. _____	94
Figura 4.23: Variación diaria T ^a . Segundo trimestre. _____	94

Figura 4.24: Media diaria HR. Tercer trimestre. _____	97
Figura 4.25: Variación diaria HR. Tercer trimestre. _____	97
Figura 4.26: Media diaria T ^a . Tercer trimestre. _____	98
Figura 4.27: Variación diaria T ^a . Tercer trimestre. _____	98
Figura 4.28: Media diaria HR. Cuarto trimestre. _____	101
Figura 4.29: Variación diaria HR. Cuarto trimestre. _____	101
Figura 4.30: Media diaria T ^a . Cuarto trimestre. _____	102
Figura 4.31: Variación diaria T ^a . Cuarto trimestre. _____	102
Figura 4.32: HR media mensual entre líneas. _____	105
Figura 4.33: T ^a medias mensuales para todos los sensores y la media por líneas. _____	108
Figura 4.34: HR media mensual. Todos los sensores. _____	109
Figura 4.35: HR media mensual. Sensores que miden el aire a la altura de la cornisa. _____	110
Figura 4.36: HR media anual. Sensores que miden la HR del aire a la altura de los nervios. _____	111
Figura 4.37: HR media mensual. Sensores del interior de las pinturas. _____	112
Figura 4.38: Diferencias de humedad entre cada sensor de la línea del interior de los frescos con la media de la línea del aire a la altura de los nervios. _____	113
Figura 4.39: HR media mensual de los sensores del interior de las paredes. _____	114
Figura 4.40: Diferencias entre cada sensor de la línea del interior de las paredes con la media de la línea del aire. _____	115
Figura 4.41: Diagrama de humedades. Enero 2008. _____	116
Figura 4.42: Diagrama de humedades. Febrero 2008. _____	116
Figura 4.43: Diagrama de humedades. Marzo 2008. _____	117
Figura 4.44: Diagrama de humedades. Abril 2008. _____	117
Figura 4.45: Diagrama de humedades. Mayo 2008. _____	118
Figura 4.46: Diagrama de humedades. Junio 2008. _____	118
Figura 4.47: Diagrama de humedades. Julio 2008. _____	119
Figura 4.48: Diagrama de humedades. Agosto 2008. _____	119
Figura 4.49: Diagrama de humedades. Septiembre 2008. _____	120
Figura 4.50: Diagrama de humedades. Octubre 2008. _____	120
Figura 4.51: Diagrama de humedades. Noviembre 2008. _____	121
Figura 4.52: Diagrama de humedades. Diciembre 2008. _____	121
Figura 4.53: HR media diaria. Año 2010. _____	123
Figura 4.54: T ^a media diaria. Año 2010. _____	124
Figura 4.55: T ^a media mensual. Año 2010. _____	124
Figura 4.56: HR media mensual. Año 2010. _____	125
Figura 4.57: HR % de los sensores de la línea de cornisa. Año 2010. _____	126
Figura 4.58: HR % de los sensores de la línea de nervios. Año 2010. _____	126

Figura 4.59: HR % de los sensores de la línea de pinturas. Año 2010.	127
Figura 4.60: HR % de los sensores de la línea de paredes. Año 2010.	127
Figura 5.1. Datos simulados de HR para aplicar PCA.	136
Figura 5.2: p[1] frente a p[2] de los años 2007, 2008 y 2010.	138
Figura 5.3: RH media frente a p[2] de los años 2007, 2008 y 2010.	140
Figura 5.4: Evolución de HR frente al tiempo para los sensores de HR 3 y 23.	144
Figura 5.5: Interpretación física de p[2] ($-DMV-0,12 \cdot RH$) frente a HR promedio para los años 2007, 2008 y 2010. El punto para 2010 del sensor 29 está fuera del gráfico, en la intersección de las dos rectas.	145
Figura 5.6: Puntos para estudiar en el gráfico de interpretación física de p[2] frente a HR promedio.	146
Figura 5.7: Gráfica HR promedio horaria (%) frente a tiempo en horas de cada uno de los puntos de la figura 5.5. Punto A = Sensor HUMO17, Punto B = Sensor HUMO22, Punto C = Sensor HUMO25 y Punto D = Sensor HUMO23.	147
Figura 6.1: Gráfico de la interpretación física de p[2] frente a la HR promedio.	149
Figura 6.2.A: Modelo con el código de colores.	151
Figura 6.2.B: Cúpula con código de colores.	151
Figura 6.3.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 5. Año 2010.	153
Figura 6.3.B. Zona del sensor 5. Foto tomada en Abril de 2011.	153
Figura 6.4.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 11. Año 2010.	154
Figura 6.4.B. Zona del sensor 11. Foto tomada en Abril de 2011.	154
Figura 6.5.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 16. Año 2010.	155
Figura 6.5.B. Zona del sensor 16. Foto tomada en Abril de 2011.	155
Figura 6.6.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 21. Año 2010.	156
Figura 6.6.B. Zona del sensor 21. Foto tomada en Abril de 2011.	156
Figura 6.7.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 8. Año 2008.	157
Figura 6.7.B. Zona del sensor 8. Fotografía tomada en Abril de 2011.	158
Figura 6.8.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 19. Año 2010.	159
Figura 6.8.B. Zona del sensor 19. Fotografía tomada en Abril de 2011.	159
Figura 6.9.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 24. Año 2010.	160
Figura 6.9.B. Zona del sensor 24. Fotografía tomada en Abril de 2011.	160

Figura 6.10.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 26. Año 2010.	161
Figura 6.10.B. Zona del sensor 26. Fotografía tomada en Abril de 2011.	161
Figura 6.11.A: Gráfica HR promedio diario (%) frente a tiempo para el sensor 29. Año 2008.	162
Figura 6.11.B: Gráfica HR promedio diario (%) frente a tiempo para el sensor 29. Año 2010.	163
Figura 6.11.C: Fotografía del estado de los frescos en abril de 2007 en la zona del sensor 29.	164
Figura 6.11.D: Fotografía del estado de los frescos en marzo de 2011, en la zona del sensor 29.	165

1. INTRODUCCION.

1.1. Antecedentes.

En este inicio del siglo XXI tenemos la gran ventaja de poder disfrutar del legado artístico de más de 4000 años anteriores. Este legado es de un valor incuantificable desde varios puntos de vista: artístico, cultural, histórico, documental, científico, académico, etc.

Indudablemente, esta herencia artística ha sobrevivido al paso de los siglos, en mejores o peores condiciones, gracias a que ha estado en un medio ambiente adecuado o, al menos no hostil, para salvaguardar sus características fundamentales.

Por tanto, consideramos que es nuestro deber de privilegiados herederos de este valiosísimo legado, el procurar mantenerlo en las mejores condiciones posibles, ayudados de los actuales avances de la técnica, para que esta herencia pueda ser disfrutada por las generaciones venideras.

Se trata, en definitiva, de realizar una **conservación preventiva**, entendida como un método de trabajo y herramienta que ayude en el control del deterioro de las obras de arte antes de que éste se produzca. [1 -3]

La conservación preventiva no es una idea nueva. Desde la antigüedad, y más específicamente desde la época medieval, el renacimiento o el barroco, se aplicaban prácticas para la conservación de edificios, pinturas, murales, esculturas y pinturas con un enfoque de prevención del deterioro. [1]

La aplicación práctica de un plan de conservación preventiva, implica el estudio y control eficaz de ciertos riesgos para las obras, como son las condiciones ambientales inadecuadas y otros de carácter físico debido a la manipulación de objetos, etc. [4-6]

Es preciso distinguir entre los conceptos de conservación preventiva y restauración. Técnicas modernas de conservación de obras de arte en museos, buscan minimizar la realización de “restauraciones interventivas” ya que, aunque importante, la restauración siempre supone un riesgo potencial de dañar piezas sensibles. El concepto de conservación preventiva ha hecho una importante contribución a la protección de piezas del legado artístico durante la segunda mitad del siglo XX. [7].

La conservación preventiva se ocupa entre otras cuestiones de determinar cuáles son las condiciones idóneas de humedad, temperatura, iluminación, etc... Y diseñar los sistemas de control y seguridad para prolongar la vida material de un bien cultural [8-11]. Y para que éste mantenga en lo posible las propiedades originales deseadas por el autor. [12]

La actual preocupación por las condiciones climáticas de las obras de arte es cada vez mayor [13], de ahí que el estudio del medio ambiente que envuelve a la obra es fundamental para prevenir su deterioro[14-17]. Cualquier objeto está influenciado por el ambiente que lo rodea, en términos de estrés producido por agentes físicos como la temperatura, la humedad y las radiaciones y por agentes químicos como el CO₂, SO₂, O₃, sales, etc. creando condiciones perjudiciales para su conservación. [18, 19].

En una primera aproximación, podría concluirse que las obras de arte sólo pueden sufrir riesgos en los traslados, en los museos provisionales o en circunstancias extraordinarias. Podría pensarse que mientras estén colocadas en sus ubicaciones originales (esto es: iglesias, palacios u otros edificios históricos, museos, etc), el control ambiental podría ser una acción gratuita dado que esos lugares son los adecuados para contener el legado patrimonial.

En efecto, los gruesos muros propios de los edificios históricos, ayudan a suavizar los ciclos diarios de temperatura y humedad relativa y atenúan los extremos estacionales de estos parámetros, lo que crea un micro clima favorable para la conservación de muchas piezas artísticas [20].

Sin embargo, el patrimonio cultural está salvaguardado en muchos lugares con diferentes niveles de seguridad ambiental. La contaminación del aire, el microclima, el efecto humano y el uso de la obra y sus sinergismos, pueden influir negativamente sobre el deterioro de ésta. Las consecuencias pueden ser incluso peores en el caso de desajustes microclimáticos periódicos. [21]

Concretamente, en el caso de museos y archivos, las obras están en una situación afortunada, siendo utilizadas bajo la supervisión de especialistas en su conservación. Sin embargo, en muchos casos, la temperatura y la humedad relativa producen peligrosos ciclos diarios sinérgicos cuyas consecuencias son todavía desconocidas cualitativamente. [21]

Incluso en el caso de museos modernos, donde el medio ambiente en general es aceptable, son reseñables una serie de desventajas, siendo la más serias, las grandes fluctuaciones de humedad y temperatura que ocurren en determinados periodos del año. [22,23]

También, el flujo de visitantes que acuden a los lugares donde se exponen las obras de arte, eleva los niveles de humedad relativa por encima de los niveles típicos del interior de los edificios. [24-26].

Mención especial, por su impacto negativo sobre el microclima de las obras, merece el uso de sistemas de aire acondicionado o sistemas de ventilación. El desajuste en humedad y temperatura generado por estos sistemas es potencialmente peligroso y está ampliamente tratado en la bibliografía. [27-40].

Las condiciones térmicas en el interior de los museos deben cumplir dos características importantes: la salvaguarda de los objetos de arte y el confort de los visitantes del museo y de los trabajadores. Desafortunadamente, diferentes tipos de obras de arte tienen diferentes parámetros internos que hacen que el manejo y el control de la temperatura interna de los museos sea problemática [18, 41-46].

El uso de aire acondicionado caliente, ventilación e iluminación y el flujo diario de un gran número de visitantes produce cambios rápidos y marcados gradientes termo-higrométricos. Por otra parte, el encendido por la mañana y el apagado por la tarde de los sistemas de climatización produce acentuadas variaciones de las condiciones microclimáticas, en vez de suaves ciclos día/noche que ocurren en la naturaleza, los cuales son deseables para la conservación de las pinturas. [7, 47].

En un intento de evaluar la complejidad de estos riesgos in situ, varios estudios han monitorizado diversos parámetros microclimáticos (temperatura del aire, humedad relativa, humedad específica, punto de rocío, etc.) en el interior de museos como por ejemplo el British Museum de Londres [48], el Chiericati Palace Municipal Museum de Vicenza, Italia [49] o el Museo del Louvre en París [50]. Un estudio similar se llevó a cabo durante varios años en la Uffizi Gallery de Florencia, Italia, donde se encontraron importantes gradientes termo-higrométricos que podrían perjudicar a las obras de arte a largo plazo [7].

Las iglesias u otros edificios históricos no son una excepción en cuanto a microclimas desfavorables [51-63]. Las iglesias han sido utilizadas durante siglos en ambientes fríos, y cuando han sido calentadas, las obras de arte han sufrido o han sido dañadas

dramáticamente. La temperatura sube durante la celebración de los servicios, originando una bajada de la humedad relativa, lo que ocasiona que las pinturas sobre lienzo y otros materiales con baja inercia térmica sufran con estos ciclos constantes un estrés que termina originando destensados, deshidratación y craquelados por fatiga de los materiales. En contraposición, los frescos que tienen una alta inercia térmica, sufren condensación de la humedad, provocada por la respiración de la gente en condiciones de aglomeración [13, 64, 65]. La solución ideal sería la utilización de las iglesias sólo para albergar patrimonio, en condiciones frías, sin gente en su interior. [21, 66-68].

En las iglesias, los requerimientos microclimáticos para la correcta conservación de las colecciones artísticas, son similares a los de los museos [69, 70]. Diversos investigadores han estudiado la temperatura y la humedad relativa en iglesias de Rusia [71], Italia [72, 24] y Chipre [73], donde se identificaron grandes variaciones entre el día y la noche y entre las estaciones.

Además de los parámetros microclimáticos, otros estudios han caracterizado la calidad del aire en el interior de varios museos europeos mediante la medida de la concentración de gases contaminantes perjudiciales para las obras, el origen y la deposición de materia suspendida y concentraciones de microorganismos en el aire [22, 27, 74-76].

También se han identificado interacciones entre la radiación solar incidente sobre los muros y las obras de arte del interior. Así, la radiación sobre los muros origina ciclos térmicos y de humedad que son responsables en muchos procesos de deterioro. Los frescos pintados sobre los muros o sobre albañilería, sufren numerosos ciclos de “respiración” del soporte, ya que la humedad es absorbida o liberada por los muros periódicamente. [77].

¿Cómo puede afectar la variación de temperatura y humedad relativa a la obra de arte? ¿Qué efectos produce en los materiales? Los ciclos de temperatura y humedad relativa son los responsables de cambios en las dimensiones y en la tensión interna de los materiales, los cuales pueden ser acumulativos a largo plazo o incluso, en algunas ocasiones, pueden superar ciertos umbrales por encima de los cuales algunas piezas estructurales pueden llegar a romperse en casos extremos. Esto es especialmente relevante para materiales higroscópicos y frágiles, sobre todo cuando la obra está compuesta por varias piezas ensambladas unas con otras. [78].

Adicionalmente, nunca debemos olvidar que sobre todo la temperatura y la humedad relativa son siempre los factores que intervienen en las reacciones físico-químicas y el crecimiento de microorganismos, que son los determinantes del deterioro natural de las piezas artísticas [79]. Así, elevados valores de humedad relativa y temperatura del aire, unido a un escaso flujo de aire, favorece la proliferación de hongos y consiguientemente, la degradación de las piedras, especialmente las ubicadas en muros y columnas. [80].

Parece pues demostrado que mantener un ambiente estable y no agresivo es la base de gran parte de la conservación preventiva [7]. En este sentido, se han realizado modernos estudios que tratan de establecer mediante caracterizaciones “multivariantes” del microclima que rodea a las obras de arte, un medio ambiente que proteja al patrimonio artístico de futuros daños [18].

Corresponde a los conservadores y responsables del mantenimiento del patrimonio junto con los investigadores, definir qué es un ambiente estable y no perjudicial, lo cual, como se trata a continuación, es bastante complejo.

Existen diversos estudios al respecto los cuales, dependiendo del tipo de obra de arte en cuestión y en unas condiciones determinadas, establecen unos parámetros óptimos de conservación [81-86].

Así por ejemplo, el estudio sobre “Requerimientos en climatización de interiores en Iglesias y Catedrales rusas” [13], nos da los siguientes parámetros de referencia.

Parámetros admisibles del interior del templo.

Periodo del año	Localización	Parámetros	
		T ^a (°C)	HR (%)
Invierno y transición	Altar	14 – 16	30 – 55
	Parte central del templo	14 – 16	30 - 55
Verano	Todo el templo	Aprox. 28	Aprox. 75

Parámetros óptimos del interior del templo.

Periodo del año	Localización	Parámetros	
		T ^a (°C)	HR (%)
Invierno y transición	Altar	16	40 – 55
	Parte central del templo	14	40 - 55
Verano	Todo el templo	20 – 22	50 - 55

Tabla 1.1: Parámetros admisibles de T y HR en templos.

Más interesante, por su extensión, es la siguiente tabla donde se dan **valores aproximados para la conservación óptima de diferentes objetos de arte en el interior de edificios** (Normas UNI 10829 standard and Minister Decree May 2001) [18]

Material del objeto	T^a (°C)	ΔT^a (°C)	HR (%)	ΔHR (%)
Materiales orgánicos				
Papel, papel maché, papel artístico, papel-tisú, papel mural, colecciones de sellos, manuscritos, papiros, impresiones, materiales celulósicos	18-22 15-24	1.5	40-55 50-60	6
Telas, velos, cortinas, alfombras, tapices de telas, tapices, seda, trajes, vestidos, ornamentos religiosos, materiales de fibras naturales, sisal, el yute.	19-24	1.5	30-50 40-60	6
Cera, ceras anatómicas	<18	N.S.	N.S.	N.S.
Herbolarios y colecciones botánicas	21-23	1.5	45-55 40-60	2
Colecciones entomológicas	19-24	1.5	40-60	N.S.
Órganos animales y anatómicos conservados en formalina	15-25	-	N.S.	N.S.
Animales y órganos anatómicos momificados	21-23 19-24	1.5	20-35 40-60	-
Pieles, plumas, animales disecados y aves	4-10 15- 21	1.5	30-50 45-60	5
Acuarelas, óleos, pasteles	19-24	1.5	45-60 50-60	2
Colecciones etnográficas, máscaras, pieles	19-24	1.5	45-60 50-60	6
Pinturas sobre lienzo, óleos sobre telas, témperas, gouaches	19-24	1.5	40-55 35-50	6
Documentos, archivos	13-18	-	50-60	-
Libros de gran valor, libros encuadernados en cuero, encuadernaciones de cuero, pergamino, miniaturas	19-24	1.5	45-55 50-60	6

Laca, marquetería, decoración o muebles de laca	19-24	1.5	50-60	2
Tallas de madera policromada, de madera pintada, pintura sobre madera, iconos, relojes de péndulo de madera, instrumentos musicales de madera	19-24	1.5	50-60 45-60	2
Tallas de madera sin pintar, cestería, paneles de madera o corteza	19-24	1.5	45-60	2
Materiales inorgánicos.				
Porcelana, cerámica, gres, terracota, azulejos y baldosas procedentes de excavaciones	N.S.	-	N.S.	10
Piedras, rocas, minerales estables y porosos, meteoritos	19-24	-	40-60	6
Mosaicos de piedra, piedras, rocas, minerales, meteoritos (no porosos), fósiles y colecciones de piedras	15-25	-	20-60 45-60	10
Metales, metales alisados, aleaciones de metal, plata, armaduras, armas de bronce, monedas, objetos de cobre, estaño, hierro, acero, plomo, estaño	N.S.	-	<50 <55	-
Metales con procesos de corrosión	N.S.	-	<40	-
Oro	N.S.	-	<45	-
Yeso y escayola	21-23	1.5	45-55	2
Vidrios inestables, vidrio iridiscente, delicados mosaicos de vidrio	20-24	1.5	40-45	-
Varios objetos.				
Murales, frescos	10-24 6-25	-	55-65 45-60	-
Murales en seco (independiente)	10-24 6-25	-	40-45 45-60	-
Marfiles, cuernos, colecciones de malacología, huevos, nidos, corales	19-24	1.5	40-60 45-65	6
Grabaciones fonográficas.	10-21	-	40-55 40-60	2
Fibras artificiales	19-24	-	40-60	-
Fotografías y películas a color	0-15 15 a -5	-	30-45 30-50	-
Fotografías y películas en blanco y negro	5-15 2-20	-	40-60 20-30	-
Materiales orgánicos procedentes de excavaciones (antes de ser tratados)	19-24	-	Aire saturado 50-65	-

Plásticos	19-24	-	30-50	-
-----------	-------	---	-------	---

N.S. = No significativo.

Tabla 1.2: Valores aproximados para la conservación óptima de diferentes objetos de arte en el interior de edificios (Normas UNI 10829)

Las variaciones de Temperatura y Humedad se refieren a variaciones diarias.

De esta tabla podemos extraer dos conclusiones rápidas:

- Debido a la falta de experiencias científicas o porque por su naturaleza no les influyen mucho estos parámetros ambientales, existen muchos objetos de los que no se tienen datos.
- Los parámetros óptimos varían de unos objetos a otros.

Esto supone, obviamente un claro problema para la determinación de unos umbrales óptimos de T y HR para la conservación de obras artísticas.

No obstante, parece claro que una Humedad Relativa del 55% es un valor óptimo, dado que se encuentra en el punto medio de una zona considerada segura entre el 40% (límite por debajo del cual la obra se reseca en exceso, aumentando su fragilidad) y el 70% (proliferación de hongos). [87]

En cuanto a las variaciones de HR aceptables, hay muy pocos estudios realizados que permitan conocer estas variaciones y su influencia sobre las obras con precisión [88]. Son aceptados valores entre $\pm 4-5\%$ de variación diaria, pero algunos autores se muestran escépticos al considerar que estos valores responden más a las limitaciones de los aparatos de aire acondicionado que a las necesidades reales de conservación. [87].

Parece pues aceptada la teoría de que “cuanto más constante, mejor” lo que nos lleva a considerar una variación diaria del 5% de RH como buena y una variación de un 2% como mejor, o al menos como no dañina. En estos parámetros influyen dos hechos innegables:

- Proporcionar variaciones menores con los actuales aparatos de climatización es prácticamente imposible.
- Las incertidumbres en los sensores de medida son mayores que estas variaciones. [89].

En ocasiones es útil la utilización de materiales porosos absorbentes de la humedad, que actúen como tampones de sus variaciones; varios estudios se hacen eco de estas técnicas [90-92].

¿Y la Temperatura? Está aceptado que las temperaturas bajas influyen positivamente sobre la conservación del patrimonio pero chocan con las necesidades del público que asiste a los oficios religiosos o a las exhibiciones de arte. También se sabe que la Temperatura produce sus efectos de forma sinérgica con la HR; así Temperaturas por encima de 20 °C junto con HR de más del 65%, favorecen mucho el crecimiento de hongos y aumentan los ciclos vitales de determinados insectos perjudiciales para las obras [93].

Por tanto, se aceptan como promedio temperaturas de 20-25 °C durante todo el año, con variaciones máximas de ± 1.5 °C diarios [93].

1.2. Conservación preventiva de las pinturas murales (frescos) mediante monitorización del microclima.

Fresco es una técnica pictórica muy antigua, ya empleada en época de los griegos, en la que se aplica color (el cual se obtiene mediante un pigmento aglutinado con agua de cal) a una capa de cal y arena, llamada enfoscado. La aplicación del color se hace cuando el enfoscado aún está fresco, de ahí su nombre.

El período de la Baja Edad Media y el Renacimiento vio el uso más importante de esta técnica, en particular en Italia, donde la mayoría de las iglesias y muchos edificios del gobierno todavía hoy disponen de una decoración al fresco.

Los cambios de temperatura y la humedad pueden afectar a la conservación de los frescos. Idealmente, la temperatura de la pared en cualquier punto debe ser la misma que la temperatura del aire en la inmediata proximidad. Si es diferente, se genera un flujo de aire a lo largo de la superficie de la pared que aumenta la deposición aerodinámica de partículas del aire y la suciedad de la pared. La ventilación natural y la turbulencia en el interior también afectan al transporte y difusión de los contaminantes en el aire. Diferentes trabajos han caracterizado la distribución de los parámetros térmicos e higrométricos, así como las turbulencias en el interior, con el fin de estudiar las interacciones entre la atmósfera interior y los muros con frescos o pinturas murales [77, 94-97]. El impacto de otros factores adversos, tales como calefacción, iluminación, radiación solar, o la afluencia de público también se discutieron.

Los gradientes verticales de temperatura (es decir, variaciones en altura) generan flujos de aire a lo largo de la superficie de los frescos que incrementan la deposición

aerodinámica de partículas del aire y suciedad. Por lo tanto, los gradientes débiles de temperatura y HR son deseables para fines de conservación, dado que estas condiciones hacen que las deposiciones de contaminantes en los frescos sean pequeñas. "La última cena" de Leonardo es una pintura mural famosa localizada en una iglesia en Milán. Algunos autores [98] analizaron los gradientes termo-higrométricos que existen entre el mural y el aire circundante, así como los procesos de deposición que se inducen.

Las tensiones internas en las pinturas forzadas por el sistema de iluminación, la calefacción central, y la presencia de visitantes también se discutieron. En un trabajo posterior, estos autores midieron los parámetros ambientales principales y estudiaron la dinámica del microclima dentro de la Capilla Sixtina del Vaticano con el fin de evaluar los factores que pueden causar procesos indeseables de microfísica (por ejemplo, la deposición de contaminantes, los esfuerzos mecánicos, microfracturas, los ciclos de la condensación y evaporación en los microporos, etc .) sobre los famosos frescos de Miguel Ángel [99].

1.3. Breve reseña histórica sobre los frescos renacentistas de la Catedral de Valencia.

En la Revista RR [100] puede obtenerse información histórica y contemplar la galería fotográfica de los frescos, su descubrimiento y restauración.

La construcción de la Catedral Metropolitana de Valencia, dedicada a Santa María, comenzó en 1262 bajo el estilo gótico. Dos siglos después un incendio arrasó completamente la decoración del ábside y destruyó las pinturas de la bóveda.

Tras varios intentos fallidos de restauración, en 1472, el obispo de Valencia, Rodrigo Borgia (posteriormente se convertiría en el Papa Alejandro VI) se desplazó a Valencia desde su residencia en Roma con la idea de traer a la Catedral el nuevo movimiento artístico que estaba desarrollándose en Italia, el Renacimiento. Para sus propósitos trajo consigo a dos pintores italianos, Francesco Pagano y Paolo da San Leocadio. Entre otras cosas, estos pintores tenían el cometido de pintar al fresco la bóveda del presbiterio.

En 1647, la autoridad eclesiástica decidió redecorar completamente la bóveda utilizando el estilo actual, el barroco. Se colocaron mármoles y adornos barrocos tapando el ábside y dejando los frescos de la bóveda ocultos a una profundidad de 80 cm. Esta

circunstancia hizo que los frescos quedaran preservados de la luz y de la suciedad hasta hoy.

La existencia de estos frescos renacentistas está documentada en los archivos de la Catedral, pero se pensaba que las pinturas estarían deterioradas.

En junio de 2004, durante la restauración de la Capilla principal, se descubrió con sorpresa que el estado de conservación de los frescos era bueno y que mostraban toda su belleza. Las autoridades eclesíásticas requirieron entonces que fueran restaurados y para acceder a ellos fue necesario retirar todos los ornamentos barrocos que los habían tapado y protegido durante 350 años.

1.4. Remodelación de la terraza situada por encima de la bóveda.

Los trabajos de restauración terminaron en diciembre de 2006. Sin embargo, se encontraron varias eflorescencias salinas durante el proceso de restauración [101], por lo que se remodeló la cubierta colocada sobre el ápside para evitar infiltraciones del agua de lluvia.

Aunque la estructura del tejado, que estaba compuesta por una cubierta inclinada de tejas, era efectiva en el drenaje de las aguas pluviales, se decidió desmontarla completamente para reconstruir la terraza y convertirla en una cubierta plana, más cercana al original estilo gótico. La nueva estructura de la terraza está compuesta de ladrillos planos (30 x 15 cm) de barro cocido, dispuestas en diferentes planos cuyas intersecciones convergen en la posición de la piedra angular de la bóveda (figura 1.1). La disposición de estos planos, que se asemeja a un abanico de mano, proporciona una evacuación eficaz del agua de lluvia hacia los cuatro desagües ubicados en los extremos de la terraza. Estos desagües drenan el agua de lluvia a través de cuatro canales con una sección efectiva de unos 150 cm² (figura 1.1 flechas).

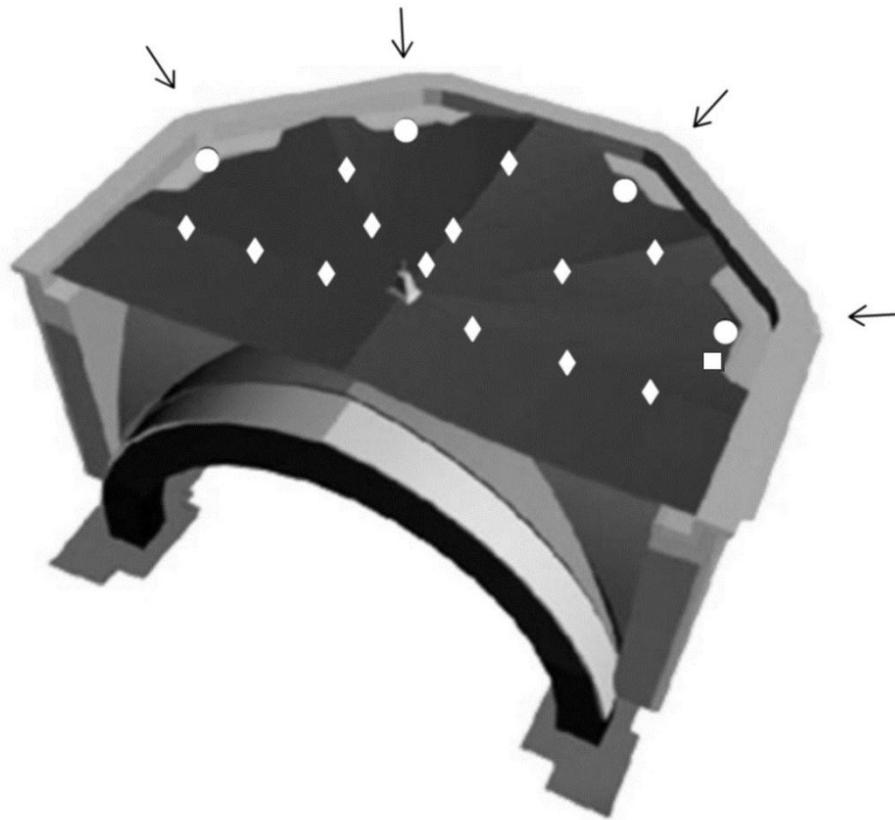


Figura 1.1. Perspectiva de la parte superior del ábside y la terraza sobre los frescos.

Las cuatro flechas indican la posición de los desagües del agua de lluvia. Los círculos indican los sensores de encharcamiento que se activan en caso de que se obstruyan los desagües. El cuadrado indica la ubicación de un sensor de lluvia que se activa cuando llueve. Los rombos indican la posición de los tubos de ventilación.

Desgraciadamente, las palomas construyen a veces refugios en el interior de estos canales de desagüe o se van acumulando sus excrementos junto a otros objetos que mueve el viento (incluso cadáveres de estas aves), lo que incrementa el riesgo de que se acumulen materiales que obstruyan la evacuación del agua. Teniendo en cuenta este riesgo potencial, el equipo de restauración decidió instalar cuatro sensores para detectar posibles encharcamientos, lo que actuaría como un mecanismo de alarma si alguno de los desagües se obstruyera inundando parte de la terraza (figura 1.1, círculos).

La remodelación de la terraza se completó con una capa asfáltica colocada sobre los ladrillos planos. Esta actuación es muy común en la impermeabilización de tejados y terrazas pero, para comprobar la efectividad de la capa se realiza habitualmente una

prueba de estanqueidad que consiste en inundar la superficie asfaltada y comprobar si se producen filtraciones en el nivel inferior. Sin embargo, en esta ocasión, para evitar a los frescos riesgos innecesarios, no se realizó ninguna prueba sobre la capa impermeable a pesar de que su colocación en estas circunstancias era más complicada que en una terraza convencional: había que sellar los bordes de la terraza, los bordes de los desagües y los bordes de los conductos de ventilación (figura 1.1, rombos) que comunicaban los frescos con el ambiente exterior. Estos conductos han de estar situados de forma que impidan la entrada de aguas pluviales.

Dado que bajo de los ladrillos planos hay un mortero de 1 cm de espesor formado por materiales porosos que absorben el agua por capilaridad, la presencia de cualquier junta que no esté correctamente sellada o de alguna grieta puede representar un riesgo de infiltración de agua de lluvia. En opinión de los técnicos responsables de la restauración, este riesgo no es despreciable, además de aumentar a lo largo de las décadas. Es muy difícil garantizar una perfecta estanqueidad de la terraza sobre los frescos, y por lo tanto algún tipo de mantenimiento o control periódico debe llevarse a cabo dado el valor del bien cultural que debe ser conservado durante siglos.

La distancia desde los frescos hasta la terraza por encima de ellos es de unos 50 cm por el lado de los contrafuertes, pero aumenta hacia los bordes de la terraza. Este espacio entre la bóveda y la terraza se llena de materiales de cal y arena que son bastante permeables. La probabilidad de la infiltración del agua de lluvia a través de la terraza es pequeña, pero si ocurre, el agua será absorbida por el material de relleno. Teniendo en cuenta que la hoja de asfalto impide la evaporación del agua a través de la terraza, una pequeña cantidad de agua acumulada año tras año se difundiría por capilaridad en todo el material de relleno hasta los frescos y podría llegar a las pinturas y causar problemas de humedad.

La importancia de la impermeabilización de las cubiertas por encima de frescos se discute en la literatura. La iglesia de San Stephan en Nessebar, Bulgaria, fue restaurada en 1975, pero después de algunos años, se observaron procesos graves de deterioro de las pinturas murales. Las investigaciones posteriores revelaron grandes errores en el diseño y la construcción del sistema de impermeabilización y drenaje. Las tejas del techo se repararon para tratar de detener por todos los medios disponibles la penetración de agua externa, así como para evitar que la humedad descendiera por capilaridad. Estas modificaciones tuvieron éxito y la situación de deterioro se logró atajar [102].

Otra fuente probable de aporte de humedad externa son los muros que sustentan la bóveda, los cuales están contruidos por una doble hoja de piedra caliza con un relleno intermedio de mortero de cal y arena. Tanto las piedras como el relleno son muy porosos, lo que significa que el agua de lluvia que incide sobre la cara exterior de la pared puede penetrar hacia el interior y afectar de forma indirecta a los frescos.

1.5. Restauración de los frescos.

Los trabajos de restauración se iniciaron en mayo de 2004 y concluyeron dos años y medio después, en diciembre de 2006.

A muy grandes rasgos, este trabajo tuvo las siguientes fases [100]:

- El objetivo inicial fue el de restaurar la cúpula bárroca, ya que aunque se sabía de la existencia de frescos renacentistas por los archivos catedralicios, se pensaba que éstos estarían en muy mal estado.
- Los trabajos de restauración de la cúpula se inician en mayo de 2004 con la limpieza de las vidrieras.
- Se limpian, reconstruyen y reintegran cromáticamente los mármoles que son el elemento decorativo por excelencia.
- Se reconstruyen las decoraciones doradas y de madera de la cúpula.
- Tras la realización de unas catas, se advierte con grata sorpresa que los frescos no están tan deteriorados como se pensaba.
- Surge el dilema de dejar visibles las mejores pinturas prerrenacentistas al fresco de toda Europa o la decoración barroca más relevante del barroco local.
- Se toma la difícil decisión de retirar la cúpula barroca para poder restaurar los frescos renacentistas. El desmontaje de las plementerías barrocas es totalmente reversible.
- Tras exhaustivos estudios analíticos, fotográficos y técnicos, se inicia la intervención sobre los frescos.
- Se limpia la suciedad superficial de los frescos.
- Se eliminan las eflorescencias salinas.
- Se consolidan los soportes de algunas zonas de los frescos.
- En la plementería seis, hubo que arrancar y posteriormente volver a recolocar algunas piezas del intónaco, por el peligro de desprendimiento que tenían.
- Se realiza una reintegración volumétrica de los faltantes y de las grietas.

- Por último se realiza una reintegración de la película pictórica.
- Los trabajos de restauración concluyen en diciembre de 2006.

En estos trabajos se buscó en primer lugar la reversibilidad de los materiales, la compatibilidad con los materiales originales de la obra, que fueran estables en el tiempo y que se pudieran discernir las zonas reintegradas.

En definitiva, unos trabajos de una gran complejidad técnica que lograron sacar a la luz los frescos más importantes de Europa en su época.

A continuación se expone una pequeña galería de figuras para ilustrar los magníficos resultados obtenidos dado el estado inicial de relativo deterioro.



Figura 1.2.A. Estado inicial de los frescos.



Figura 1.2.B. Restauración de los frescos y de la cúpula barroca.



Figura 1.2.C. Frescos después del trabajo de restauración.

Nota: Las figuras 1.2.x. proceden de [100, 103 y 104]

1.6. Instalación del sistema de monitorización de temperatura y HR.

Durante 350 años los frescos renacentistas de la Catedral de Valencia han permanecido en condiciones estables de temperatura, humedad relativa e iluminación. Pero actualmente esta situación ha cambiado. Para asegurar que las nuevas condiciones ambientales no suponen un riesgo para la conservación a largo plazo, se decidió implementar un sistema de monitorización de la temperatura y la HR mediante sensores, los cuales fueron instalados durante el proceso de restauración en diferentes puntos de la bóveda así como en la superficie de las pinturas, como se describe más adelante en este trabajo. Este sistema de control es bastante singular, dado que los sensores rara vez pueden ser introducidos en los muros pintados con frescos. Sin embargo, en esta ocasión pudo hacerse así porque el sistema de monitorización se instaló al mismo tiempo que se realizaban los trabajos de restauración.

Con el control de la temperatura y la humedad relativa se pensó conseguir varios objetivos. Por un lado, la detección de incrementos de humedad en partes específicas de la bóveda podría indicar la infiltración de agua a través del techo, lo que requeriría medidas correctivas similares a las del caso descrito en una iglesia de Bulgaria en [102]. Por otro lado, si se detectaban excesivas variaciones termo-higrométricas diurnas o estacionales, daría lugar a recomendaciones correctivas. En este trabajo se presentan los análisis de los datos de humedad relativa obtenidos durante los primeros cuatro años de seguimiento y destaca las ventajas de los sensores de humedad inserta en las paredes de los frescos para la conservación preventiva de los mismos.

2. OBJETIVOS.

El objetivo final del sistema de monitorización está dirigido a establecer si las condiciones ambientales en las que se encuentran los frescos renacentistas de la Catedral de Valencia son apropiadas para la adecuada conservación de este Patrimonio Cultural. Aunque también se recogen datos de temperatura, en el caso que nos ocupa, se trata fundamentalmente de garantizar que los frescos no sufren problemas de deterioro por humedades excesivas o filtraciones de agua, que son los factores críticos a los que se enfrentan los frescos, sobre todo teniendo en cuenta que la estanqueidad de la capa asfáltica superior no está garantizada.

Para lograr estos objetivos, es necesario que se desarrollen los siguientes apartados:

1. Es necesario obtener datos suficientes y de calidad sobre las condiciones de los materiales sobre los que están pintados los frescos y el ambiente contiguo a los mismos.
2. Una vez obtenidos los datos, es necesario almacenarlos y gestionarlos de manera adecuada. Teniendo en cuenta el gran volumen de datos recogidos (entre 10 y 20 millones de datos por año) la cuestión no es trivial. El sistema de almacenamiento debe ser potente pero a la vez, sencillo y económico de implementar. Hay que huir de bases de datos con licencias muy caras (tipo Oracle) y deben poderse instalar en ordenadores domésticos con Windows XP o Vista.
3. Detección temprana de situaciones de emergencia para la conservación de la obra: inundación de la terraza por encima de los frescos, aparición de niveles anormalmente elevados de humedad relativa, caídas bruscas de humedad relativa, etc.
4. Análisis estadístico de los datos. Obtención de un modelo que, a través de los datos recogidos, permita caracterizar el microclima que envuelve a la obra mediante la determinación de los parámetros más relevantes desde el punto de vista de la conservación, esto es, la temperatura y principalmente la humedad relativa.
5. Extraer conclusiones acerca de la idoneidad de la ubicación de la obra desde el punto de vista ambiental.

El sistema de monitorización tratará de dar respuesta a los objetivos 1 y 2, toma de datos y almacenamiento y gestión de los mismos.

El objetivo 3 se cumplirá mediante la observación periódica de los datos recogidos y su análisis con la ayuda del software de almacenamiento y gestión que se crea para ello.

El análisis estadístico no puede realizarse con el software de gestión y almacenamiento, ya que su función principal es precisamente la de almacenar y realizar consultas. Para ello habrá que recurrir a herramientas específicas para ello, como es el software para la realización de análisis estadísticos.

Por último, se espera que se puedan hacer recomendaciones técnicas que permitan mejorar las estrategias en cuanto a conservación preventiva de los frescos, a la vista de los modelos obtenidos, aunque la última palabra la tendrán siempre los responsables de conservación de la obra.

3. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. Propósito general del sistema.

Se propone un método de control del microclima de bienes culturales como parte de la conservación preventiva de las mismas.

Este método está basado en la monitorización continua de diversos parámetros del ambiente que rodea a la obra, mediante la colocación de sensores y el cableado necesario para llevar los datos recogidos a un microcontrolador, el cual los procesa y los guarda en una memoria USB.

Los parámetros que pueden recogerse son muy variados: temperatura, humedad relativa, componentes químicos presentes en el aire (O_3 , CO_2 , SO_2 , etc.), intensidad luminosa, conductividad (en medios líquidos) y un largo etcétera. En el mercado existen actualmente sensores específicos para casi cualquier agente químico y, por lo tanto, podrían utilizarse en un sistema de monitorización. Incluso podrían recogerse datos de tensiones en lienzos de obras pictóricas, distancias entre grietas, etc.

Sin embargo, nuestro sistema pretende tener dos virtudes fundamentales:

- La sencillez de implementación, que le permita adaptarlo a casi cualquier obra de arte e incluso desplazarlo si la obra se reubica.
- La economía. Los sensores específicos de agentes químicos son costosísimos en términos económicos. Esto podría ser una limitación en exposiciones, museos o iglesias con escaso presupuesto, que no podrían costearse un sistema de estas características.

Por otra parte, mayor número de sensores significa más cableado, lo que implica un impacto visual negativo en lugares donde se expone arte y más interferencias electrónicas, lo que podría suponer un peor funcionamiento de los sensores.

Esto nos lleva a una limitación práctica en cuanto al número de parámetros a monitorizar en aras de preservar las dos virtudes descritas. Para ello, proponemos un sistema que únicamente recoja datos de Humedad Relativa y Temperatura.

¿Por qué monitorizar únicamente T^a y HR cuando existen otros parámetros a tener en cuenta desde el punto de vista de la conservación preventiva [18]? Por los motivos expuestos, porque son los parámetros físicos que influyen en mayor medida en la

obra de arte y por la razón de que, por sí solos, los parámetros de T^a y HR dan una información casi suficiente para definir el ambiente en que se encuentra inmersa una obra y por tanto, poder tomar decisiones en materia de conservación preventiva, hemos optado por monitorizar estos dos parámetros y obviar el resto.

No obstante, se ha hablado de limitación práctica pero no técnica, ya que este sistema puede adaptarse a cada situación particular y es posible monitorizar casi cualquier parámetro, con el consiguiente incremento de complejidad del sistema.

Así pues, el sistema pretende ser una solución integral para la recogida, almacenamiento y posterior estudio de datos de humedad y temperatura del ambiente en que se encuentre la obra objeto del estudio. El objetivo es crear un “historial microclimático” donde se recojan todas las circunstancias relativas a T^a y HR que ha experimentado la obra a lo largo de un periodo y con estos datos, los conservadores sean capaces de extraer conclusiones y tomar medidas que repercutan en beneficio de la conservación de la obra.

3.2. Descripción del hardware del sistema.

3.2.1. Descripción general del sistema. Evolución histórica.

Hasta llegar a la configuración actual, han sido necesarias varias instalaciones previas, cada una con sus ventajas e inconvenientes, los cuales se han ido resolviendo paulatinamente.

Primer sistema. Año 2007.

El primer sistema contaba con un microprocesador 8051 que almacenaba en su memoria interna los datos recogidos y estaba programado en lenguaje ensamblador, el cual se caracteriza por la rapidez con la que ejecuta las rutinas. Además, el cableado era único y muy largo con todos los sensores colocados en serie: un cable de gran longitud partía del microprocesador, recorría toda la cúpula y volvía al micro.

Con esta disposición se llegaba a una longitud de cable de casi 800 metros, superior en más del 50% a los 500 metros recomendados por el fabricante de los sensores - Maxim Integrated Products (2003)-. Esto podría ser debido a la meticulosa instalación en la que no se emplearon conectores ya que todas las conexiones fueron soldadas.

A pesar de su buen funcionamiento, este sistema planteó varios problemas basados en el hecho de que cada modificación del software (y éstas eran muy frecuentes) requería la intervención de un especialista en lenguaje ensamblador. Además el sistema no era eficaz en la capacidad de almacenamiento de los datos que se guardaban en la memoria interna del 8051 y ésta solamente podía almacenar un volumen correspondiente a un dato cada hora durante dos semanas. Con este sistema se estuvieron recogiendo datos durante el último trimestre del año 2007, con una frecuencia de un dato por sensor cada hora.

Segundo sistema. Año 2008.

A partir de entonces se optó por comunicar el 8051 con un software en un PC bajo un entorno LabVIEW que almacenaba los datos en el disco duro. Esta segunda versión del sistema permitía almacenar un número prácticamente ilimitado de datos y aumentar la frecuencia de adquisición de los mismos hasta un dato cada minuto. De esta manera se recogieron datos durante casi todo el año 2008.

Este sistema planteaba, sin embargo, nuevos problemas: un ordenador enchufado día y noche consume mucha energía y además se colgaba de forma aleatoria.

La lectura del sensor de humedad relativa es función de la tensión de alimentación y de la tensión de salida. Por ello, fue necesario medir las tensiones de alimentación de todos los sensores una vez realizada la instalación. Los resultados de estas medidas fueron desde 4,964 Voltios hasta 5,006 Voltios debido a la caída de potencial en un cable. Al eliminar los andamios resultaba imposible comprobar si esta tensión se mantenía constante en todos los sensores, únicamente se podía comprobar en dos de ellos y su valor no varió en cuatro años.

El micro dejó de funcionar por causas desconocidas en diciembre de 2008 y antes de repararlo, se prefirió replantear el sistema totalmente y llegar a la configuración actual (Figura 3.4 A y 3.1. B) que empezó a funcionar al 100% en febrero de 2010.

Sistema actual. A partir de Febrero de 2010 hasta la actualidad.

El sistema actual está basado en la plataforma Arduino, que incorpora un microcontrolador más potente, más fácil de programar y con una comunidad altruista en la web dedicada a programar ejemplos y difundirlos. El driver elegido para manejar el bus fue el DS2482-800. Este chip transforma el protocolo de comunicación I2C (fácilmente generado por el Arduino a través de la librería Wire) a un protocolo 1-Wire

como ya se explicó. Sin embargo, este sistema no lograba comunicar con todos los esclavos si todos ellos estaban en una sola línea de gran longitud. Según el fabricante, la longitud máxima de línea es de 200 m. y la línea tenía una longitud mucho mayor.

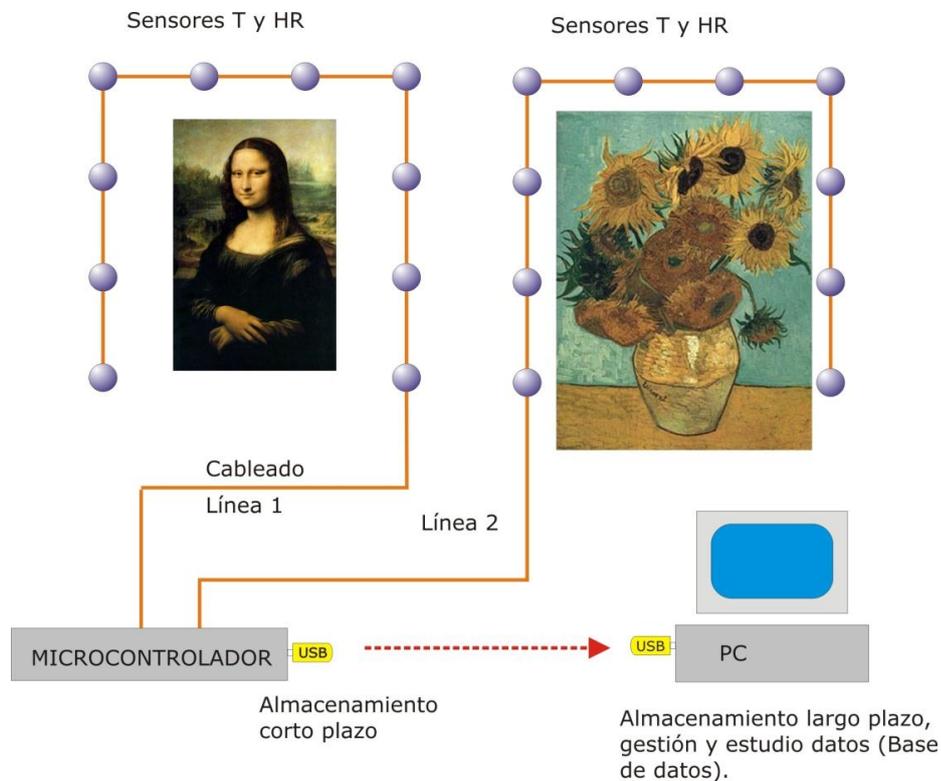


Figura 3.1.A: Dibujo esquemático de la distribución actual de la instalación

Como este chip tiene la posibilidad de manejar un máximo de ocho líneas, se dividió la línea original en cuatro. Esto se pudo hacer ya que aunque no se tenía acceso a los sensores sí podía accederse a parte de la línea porque ésta iba y venía a cada sensor, escondida en los nervios barrocos de la catedral. La línea más larga de la nueva configuración resultó tener una longitud de 310 metros, otra vez más larga que la máxima recomendada por el fabricante, aunque esta vez no daba problemas de comunicación. La ramificación secundaria, de conexión entre el sensor y la línea principal, fue siempre de longitud inferior a 3 metros (Figura 3.1.B).

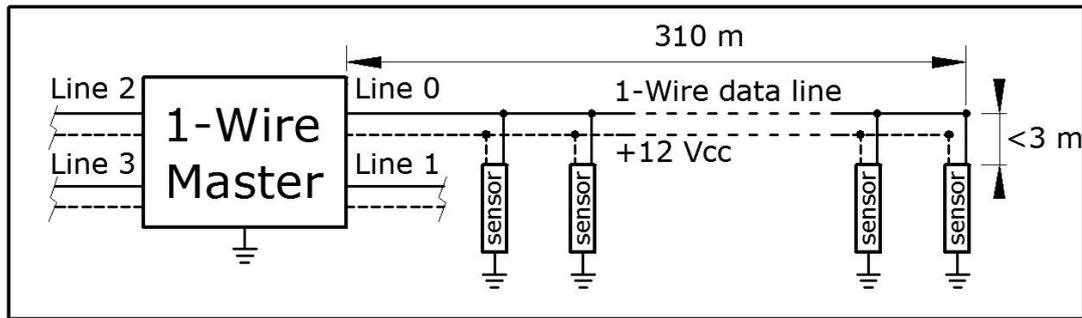


Figura 3.1.B: Esquema actual de la instalación.

Nota: en el capítulo 4, en la figura 4.2.B. puede verse la disposición real de cada línea, con los sensores correspondientes.

Los datos se guardaban en una memoria USB de 4GB a través de un módulo VDIP1 de la casa Future Technology Devices International Limited. Este módulo (figura 3.4.C, punto 1) dispone de un microcontrolador que se ocupa del protocolo para abrir, cerrar, guardar, crear o borrar ficheros a través de comandos AT parecidos al antiguo MS-DOS. Estos comandos son transmitidos del Arduino a este módulo utilizando el puerto serie del microcontrolador.

Este nuevo sistema ya no necesita de un PC para almacenar los datos y mide la tensión de alimentación de cada sensor de humedad antes de cada lectura, lo que permite unas lecturas mucho más fiables a largo plazo.

Este sistema se utilizó para recoger los datos a partir de febrero de 2010.

3.2.2. Sensores en el tejado.

En cada uno de los desagües de la terraza (figura 1.1, flechas) se colocó un sensor que detecta si el nivel del agua en la terraza es muy alto, algo que sólo se producirá si el canal se obstruye. Si esto ocurre será necesaria una actuación inmediata debido a las desastrosas consecuencias que podrían derivarse de una inundación.

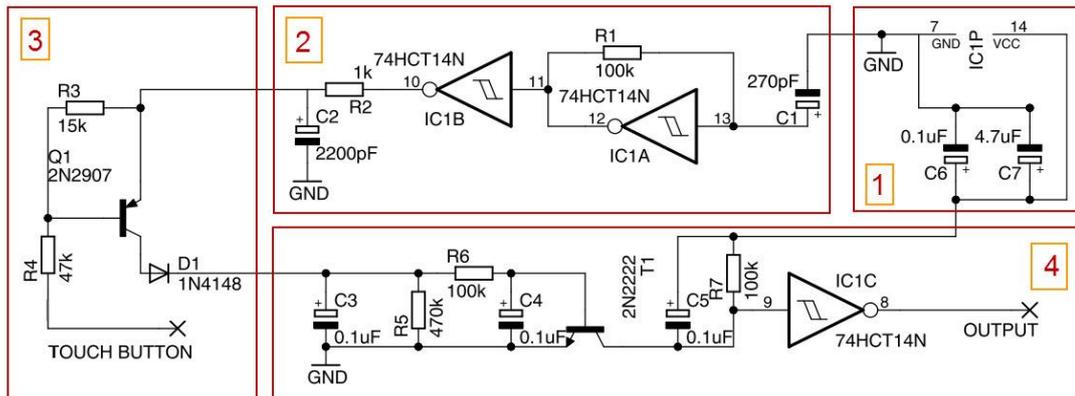


Figura 3.2.A. Sensor de encharcamiento.

Estos sensores de encharcamiento están compuestos por un punto (denominado touch button) (figura 3.2.A, detalle 3) orientado hacia el suelo, que al ser derivado a tierra a través del contacto con el agua, produce una subida a 5V de la salida. Hasta la fecha, estos sensores no se han activado nunca, lo que significa que se ha registrado un valor constante inferior a 5V todo el tiempo. El detalle 3, de la figura 3.2.A, está situado a una distancia de 20 m del resto de componentes del sensor.

Para evitar la electrolisis del agua, la señal de excitación del sensor es alterna a 20 KHz (figura 3.2.A, detalle 2). La tensión de alimentación es a 5V. El detalle 1 de la figura 3.2.A es la alimentación y el detalle 4 un conversor A/D de la señal del touch-button.

3.2.3. Sensores en el interior de la bóveda.

Los sensores deben estar colocados lo más cerca posible de la obra, incluso sobre ella o en el interior si las características de la misma lo permiten. En este caso, algunos se introdujeron dentro de los materiales y otros se colocaron en la superficie de los frescos, como se explica en el capítulo 4. Estos sensores tomarán la Temperatura (en °C) y la Humedad Relativa (en %) de los materiales constructivos y del aire que envuelve a la obra.

El **sensor de Humedad Relativa** (figura 3.2.B) es un circuito integrado HIH-4000 (Honeywell International, Inc.) con una precisión de $\pm 2,5\%$ RH. El **sensor de Temperatura** es un circuito integrado (encapsulado SMD, Surface Mounting Device), modelo DS2438 (Maxim Integrated Products, Inc.) que tiene una precisión de ± 2 °C. Este SMD está diseñado originalmente para controlar la temperatura de las pilas en aparatos electrónicos.

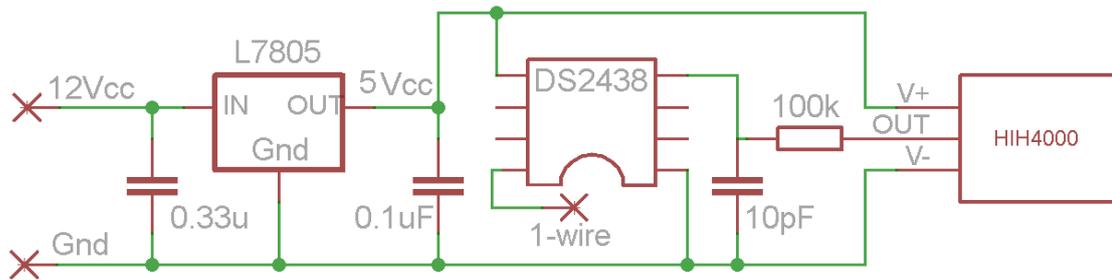


Figura 3.2.B. Sensor de humedad HIH4000, sensor de temperatura/conversor A/D DS2438 y regulador de tensión L7805.

Sobre la escasa precisión del sensor de temperatura hay que indicar que se han realizado algunas pruebas en laboratorio (ver el punto 4.4) que sugieren que este dato es muy conservador, siendo en realidad aproximadamente de ± 0.5 °C.

3.2.4. Cableado.

Como se vio, en el sistema de monitorización el cableado desde los sensores hasta el microcontrolador se resolvió de la forma más sencilla posible: un cableado simple que permite colocar varios sensores en paralelo sobre el mismo cable. Para distinguir de qué sensor procede cada dato, cada sensor dispone de un número único e irrepetible, de forma que el microcontrolador pregunta por un número en particular y solamente responde el sensor en cuestión.

Las ventajas de este método son evidentes: se ahorra cableado (que estéticamente podría influir de forma negativa), pueden colocarse todos los sensores en paralelo como si de un sistema de telegrama se tratase y, caso de ser necesario reubicar la obra, el cableado puede adaptarse fácilmente a nuevas situaciones.

Obviamente, existe una limitación en cuanto a longitud del cable en el que se colocan los sensores: según el fabricante, de 200 m. Sin embargo, como se indicó anteriormente, la línea más larga tiene una longitud de 310 metros y no presenta problemas de comunicación. Si hubiera necesidad de mayores longitudes, puede ponerse el microcontrolador en el centro geométrico de la zona a monitorizar y de él partir varias líneas independientes, formando un sistema radial. En casos más complejos, pueden colocarse varios microcontroladores dado que su precio es muy asequible.

Es interesante añadir que la limitación de la longitud del cable es únicamente en cuanto a comunicación: no existe error por pérdida de tensión en el cable ya que los datos que se reciben son digitales (0 y 1) y no lectura en voltios que sí tendría errores

por pérdida de potencial con longitudes largas. El dato que devuelve el sensor es un dato de 8 bits: los 4 primeros bits se utilizan para enviar la lectura en sí, pero en sistema binario de 0 y 1; y los 4 bits restantes son un código CRC (Código de Redundancia Cíclica) que es un dato que se calcula a partir de los datos que se envían pero aplicándoles un algoritmo matemático. De esta manera, el código CRC sirve como comprobación de que el dato se recibe en el microcontrolador de forma correcta: al recibir el dato y su código CRC, el microcontrolador aplica el algoritmo matemático a la inversa al código CRC y el resultado debe coincidir con el dato. Si no coinciden, ha habido un problema de comunicación y el dato es descartado.

Puede obtenerse más información sobre cómo se calculan los códigos CRC en la página web del fabricante de los sensores y en sus Application Notes [105].

Según el fabricante, es posible configurar de varias formas distintas el cableado que sirve para conectar los sensores con el microcontrolador. Es lo que el fabricante denomina “topografía”.

Las diferentes topografías son [106]:

Topografía lineal: El cable parte del microcontrolador y se extiende linealmente hasta que alcanza al sensor más lejano. Todos los sensores están colocados en paralelo sobre este cable, permitiéndose de forma puntual, pequeñas ramificaciones de menos de 3 m. de longitud.

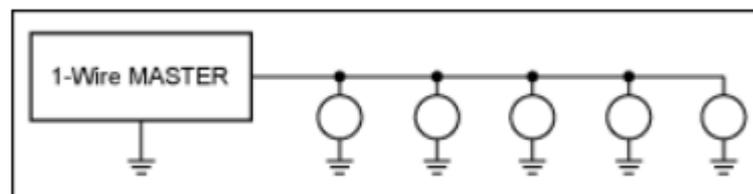


Figura 3.3.A. Topografía lineal.

Topografía ramificada: Igual que en el caso anterior, el cable parte del microcontrolador y se extiende linealmente hasta que alcanza al sensor más lejano. Sin embargo, los sensores están colocados en ramificaciones del cable principal. Estas ramas deben de tener una longitud mayor de 3 m.

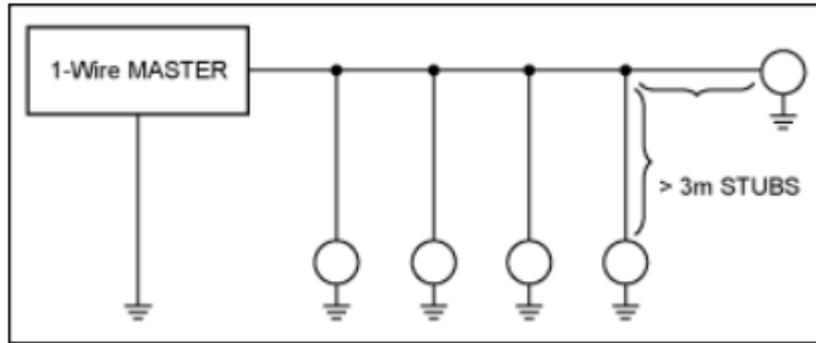


Figura 3.3.B. Topografía ramificada.

Topografía estrellada: El cable principal parte del microcontrolador y a escasa longitud de éste, se ramifica en varias ramas de longitudes variables. Los sensores pueden estar colocados en cualquier posición: a lo largo de las ramas o al final de ellas.

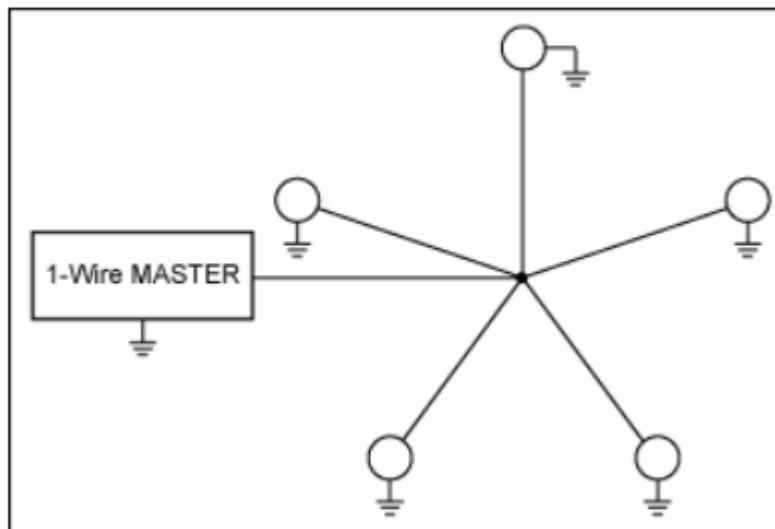


Figura 3.3.C. Topografía estrellada.

Topografía mixta: El cable principal puede tomar cualquier configuración mixta de las vistas anteriormente.

El fabricante especifica que cualquier distribución puede ser buena, pero recomienda la topografía lineal porque da menos problemas de comunicación. Por este motivo fue la seleccionada para el sistema de monitorización.

3.2.5. Microcontrolador.

En el mercado existen infinidad de microcontroladores que pueden realizar correctamente esta función. Tras varias configuraciones como se explicó, finalmente se utilizó uno en concreto denominado ATmega168 montado sobre una plataforma conocida comercialmente como Arduino [107]. En la figura 3.4.A puede verse esta plataforma, con los distintos componentes y conexiones que se explicarán más adelante.

Arduino es una plataforma open-hardware basada en una sencilla placa con entradas y salidas (E/S), analógicas y digitales. Se programa a través de un entorno de desarrollo que implementa un lenguaje de programación muy parecido a C++, derivado de éste, llamado Processing/Wiring. Esta programación se realiza en un ordenador personal a través de un software específico (gratuito y proporcionado por los fabricantes de Arduino) y se transfiere a la placa Arduino mediante la conexión USB (punto 1 de la figura 3.4.A).

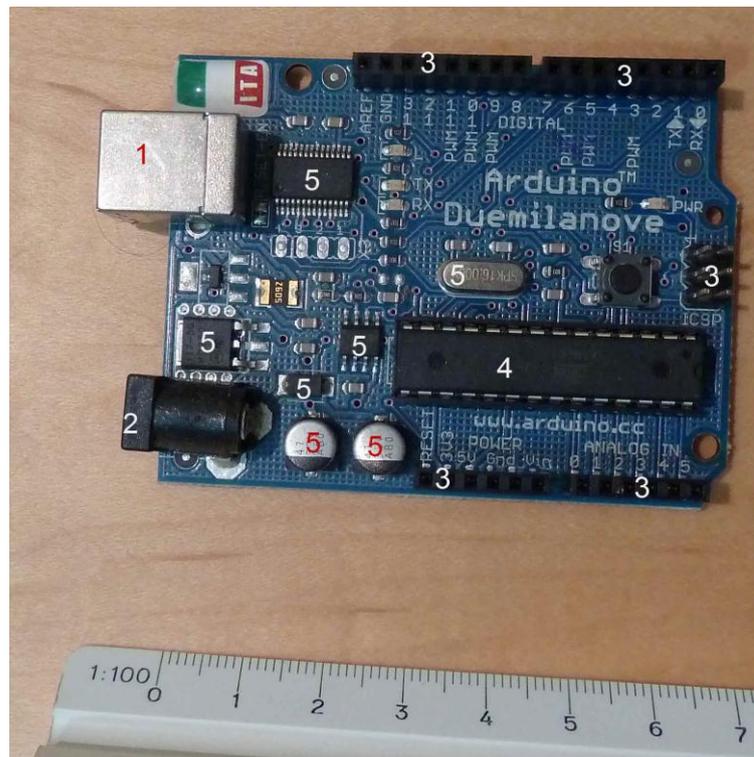


Figura 3.4.A: Placa Arduino con el chip ATmega168.

1: Conexión USB para conectar Arduino con un PC. 2: Toma de corriente (puede utilizarse también alimentación por pilas). 3: Conexiones de entrada/salida. 4: Chip ATmega168. 5: Otros componentes de la placa

El corazón del arduino es el chip ATmega168 (figura 3.4.A, punto 4) , sencillo y de bajo coste que permite el desarrollo de múltiples diseños.

Al ser open-hardware, tanto su diseño como su distribución es libre, es decir, puede utilizarse libremente para desarrollar cualquier tipo de proyecto sin tener que adquirir ningún tipo de licencia.

Todo esto redundará en unos costes muy bajos de implementación, por lo que no resulta problemática su utilización en varios lugares distintos, o en muchas obras.

El micro debe ser alimentado a 9-12V, lo que puede solventarse de muchas formas distintas: pilas, baterías, conexión a la red, etc.

Otra ventaja de esta plataforma es que tiene muchos complementos que aumentan su funcionalidad. Estos complementos se montan sobre unas placas que se insertan o “clavan” literalmente (figura 3.4.C) sobre las conexiones de Arduino (punto 3 de la figura 3.4.A).

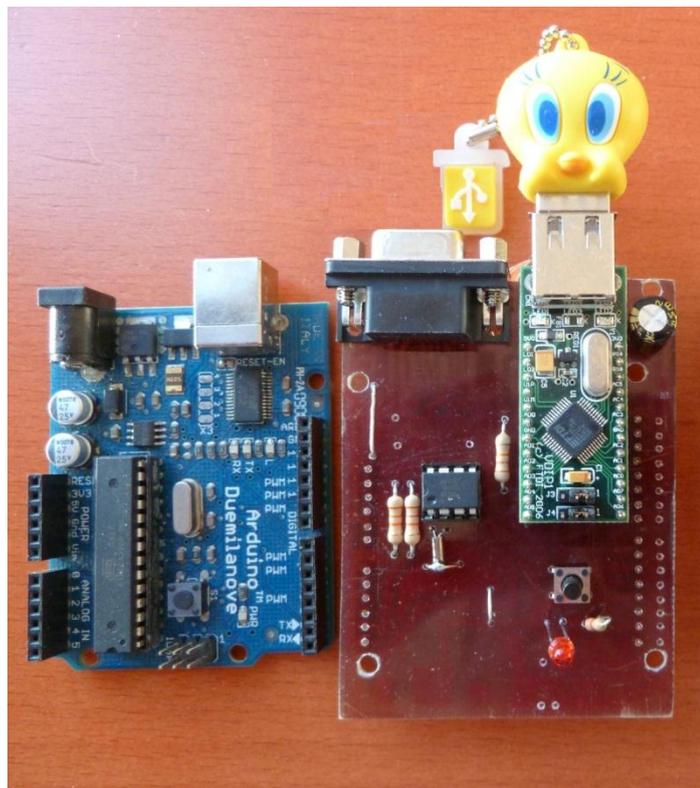


Figura 3.4.B: Plataforma Arduino (a la izquierda) y ampliación de hardware similar a la utilizada en el sistema de la Catedral.

El muñequito es una llave USB que se conecta a la ampliación y que almacena los datos recibidos por el microcontrolador.

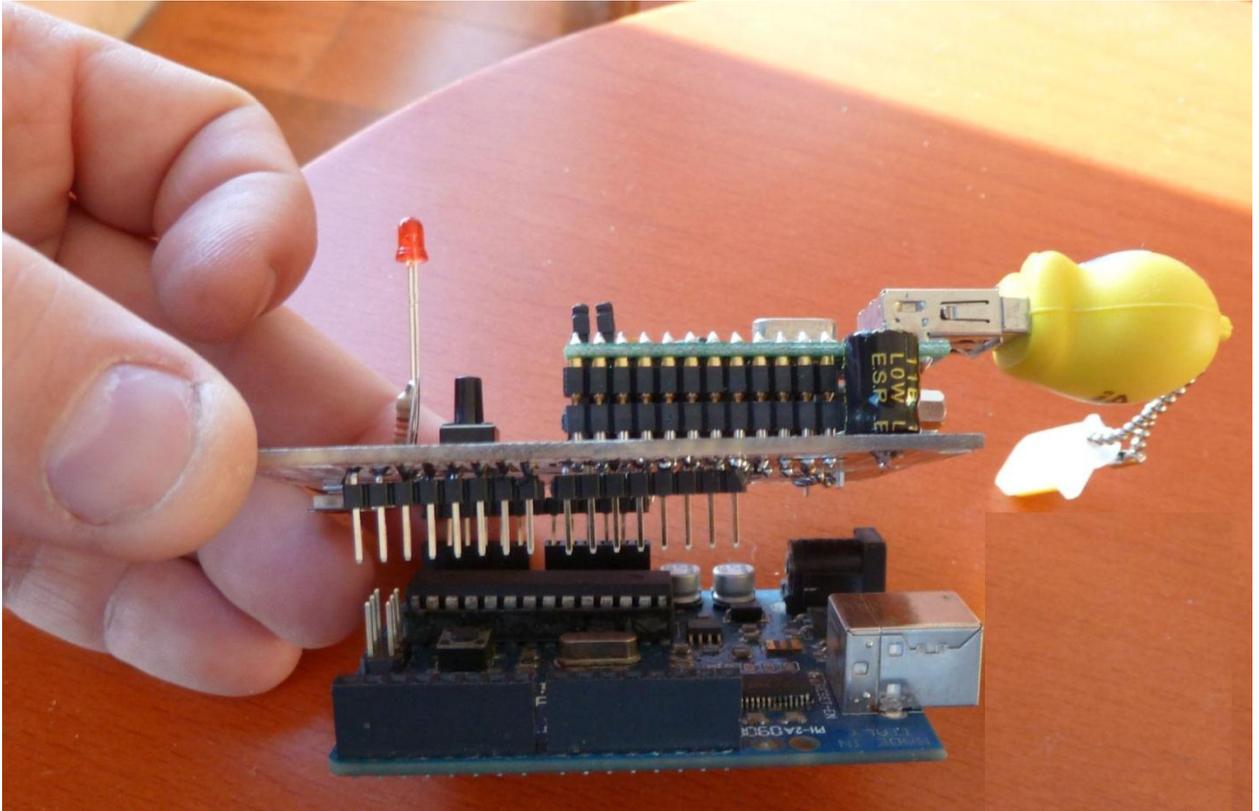


Figura 3.4.C: Detalle de como se inserta la ampliación de hardware en la placa Arduino.

La ampliación de hardware con los distintos complementos que se utilizó en el sistema de monitorización de la catedral, es similar a la de la figura 3.4.B. Un esquema de las conexiones de esta ampliación puede verse en la figura 3.4.D.

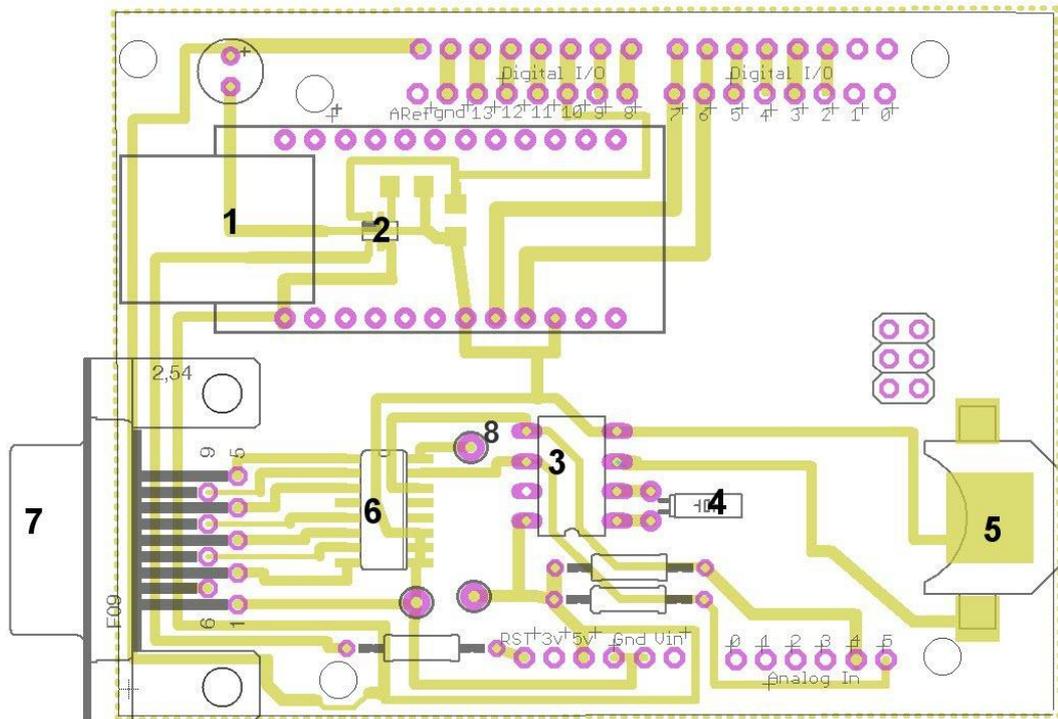


Figura 3.4.D: Esquema de la ampliación para la plataforma Arduino que utiliza el sistema de monitorización de la Catedral.

1: Microcontrolador VDIP-1. Permite la conexión de una llave USB y gestiona la escritura de los datos en este dispositivo. 2: Circuito TPS 3813. Controla que el sistema no se “cuelgue”, por este motivo, también se le conoce como sistema “watch dog”, (“perro guardián” en inglés). 3: Circuito DS 1037. Es un reloj a tiempo real. 4: Cuarzo para el reloj. 5: Pila para el reloj. 6: Circuito DS2482-800. Conversor I2C a 1-Wire. 7: Conector de 9 hilos 1-Wire (7 líneas 1-Wire mas 1 línea para potencial positivo mas 1 línea para potencial negativo). 8: Línea auxiliar 1-Wire.

Es interesante destacar el conversor I2C a 1-Wire, ya que el protocolo de comunicación 1-Wire permite una comunicación bidireccional con todos los sensores con un único cable (1-Wire en inglés significa “un cable”), reduciendo el impacto visual del cableado.

3.2.6. Recogida y procesado de los datos

Cuando ha concluido el periodo que se pretende monitorizar o, a intervalos regulares, se retira la llave USB y se vuelcan los datos en el ordenador donde tengamos instalada la base de datos para almacenar a largo plazo y estudiar los datos recogidos.

Una memoria USB de 4 GB de capacidad, que se encuentra fácilmente en el mercado, puede almacenar datos del sistema instalado en la Catedral de Valencia durante más de 10 años, por lo que no hay problema en monitorizar periodos de tiempo muy grandes.

3.3. Descripción del software del sistema.

3.3.1. Software del microcontrolador.

El microcontrolador Arduino, ya se explicó, consta entre otras de un entorno de programación basado en C++. Esto significa que puede programarse en este lenguaje cualquier rutina que se desee para que la ejecute el micro.

En este caso, es necesario que el microcontrolador recoja los datos procedentes de los sensores. Para ello, el software debe enviar una señal a través del cable 1-Wire en el que están situados los sensores para “preguntar” por el dato. Como sobre un mismo cable hay situados varios sensores, esta “pregunta” debe ir dirigida a un sensor en concreto, mediante el código de este sensor (cada sensor tiene un código único).

De vuelta, por el mismo cable 1-Wire, esta información que es la procedente únicamente del sensor al que se le pregunta, es el dato de la lectura de HR en % o de temperatura en °C. A continuación este dato, junto con el nombre del sensor, debe almacenarse en algún sitio; en nuestro caso en una llave USB en un fichero de texto.

En realidad nosotros no guardamos el dato que identifica al sensor, sino únicamente el dato de la lectura de HR o T^a. Lo que hacemos es que el software interroga al sistema siempre en el mismo orden y entonces sabemos que el dato 1 pertenece al sensor 1, el dato 2 al sensor 2, etc. Esta información, junto con la fecha y hora del dato, es la que se almacena en el fichero de texto, que tiene esta estructura:

10;1;2008;20;35;57.63;25.36;58.28;26.35;45.36;24.24;.....

Como vemos, cada dato se separa del siguiente por el carácter punto y coma. Así, en este ejemplo, tenemos:

Columna	Día	Mes	Año	Hora	Minuto	HR sensor 1	T sensor 1	HR sensor 2	T sensor 2	Etc.
Ejemplo	10	1	2008	20	35	57.63	25.36	58.28	26.35	Etc.

Para cada registro se necesita una fila en el fichero de texto. Como el sistema puede recoger como máximo un dato cada minuto, al final se obtiene un fichero con este aspecto:

```
10;1;2008;20;35;57.63;25.36;58.28;26.35;45.36;24.24;.....
```

```
10;1;2008;20;36;57.57;24.95;58.30;25.95;45.00;24.32;.....
```

```
10;1;2008;20;37;57.60;25.10;58.50;26.01;45.25;24.02;.....
```

Etc.

Obviamente, con este sistema se obtienen ficheros de texto enormes (hemos alcanzado más de 100.000 filas en un único fichero sin problemas) si el período de monitorización se extiende más allá de unas 4 ó 5 semanas.

3.3.2. Software de almacenamiento y gestión.

El volumen inmenso de datos que genera el sistema no puede ser manejado con los programas habituales de ofimática. Por ello, hemos creado un sistema informatizado de almacenamiento y gestión de los datos que nos permiten conservar los registros para su posterior análisis. Este sistema está creado específicamente para dar respuesta a la problemática que un volumen tan grande de datos genera, esto es, permite generar informes, gráficos, análisis, etc. sobre los datos almacenados.

El sistema consta de un software creado con Delphi 5 (lenguaje de programación en Object Pascal desarrollado por Borland, actualmente renombrado como Embarcadero [108] del que existe una licencia en la UPV, que genera una base de datos en un solo fichero con extensión FDB (Firebird Data Base, motor de Base de Datos relacional, basado en lenguaje SQL, de código libre, que no necesita licencia [109]).

Al sistema se le ha bautizado como **Burrito** (por la gran cantidad de carga que puede soportar) y permite almacenar en un solo fichero FDB millones de registros. Actualmente se dispone de un fichero que ocupa más de 4 GB con 13 millones de registros de T^a y HR recogidos a lo largo de todo un año, y el sistema funciona perfectamente.

Se ha pretendido que sea sencillo de manejar el programa, sin complicados menús anidados ni opciones poco claras y, a pesar de ello, debe manejar una gran cantidad de información y mostrar gráficos, informes, análisis, etc.

Veamos cómo funciona:

Preparación del fichero de base de datos (fichero FDB).

En primer lugar, en la pantalla principal del programa tendremos que darle al botón “Crear BD Nueva” (figura 3.5, detalle 1).

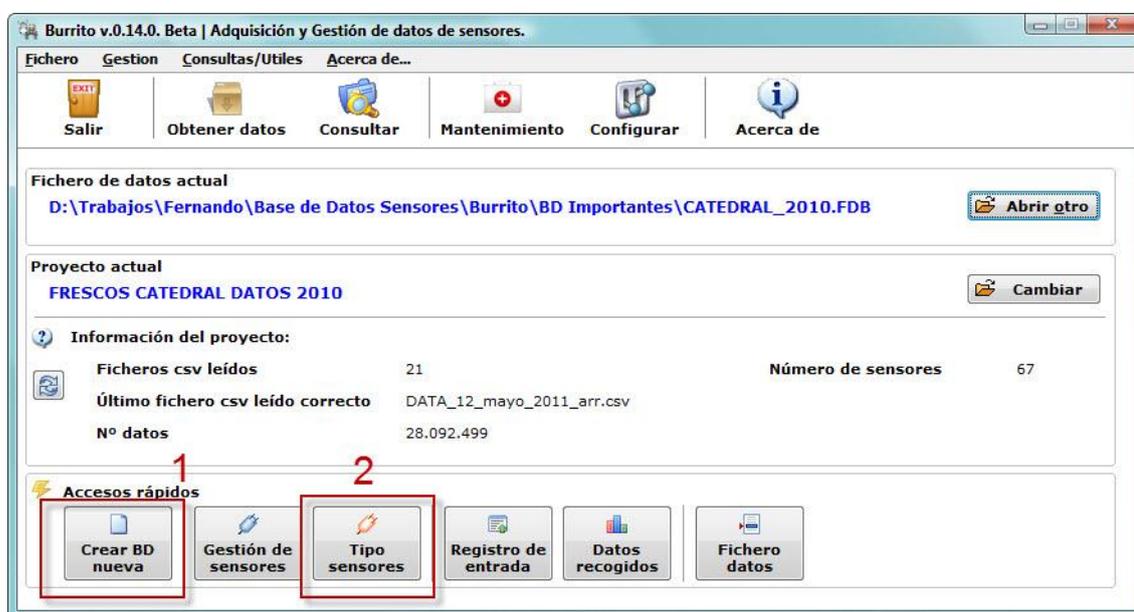


Figura 3.5: Pantalla principal.

A continuación se nos pedirá el nombre y la ruta de la nueva base de datos. Damos un nombre y aceptamos. Ya tenemos creado un fichero FDB en blanco.

Ahora hay que crear el sensor tipo de Humedad Relativa. Para ello, le damos al botón “Tipo sensores” (figura 3.5, detalle 2) y nos aparece una nueva ventana. Elegimos la pestaña “Crear tipo nuevo” y tendremos un formulario como este:

Gestión Tipo de Sensor

Tipos de sensor actuales | **Crear nuevo tipo**

Texto que define el tipo de sensor (Ej: Temperatura en °C, Irradiancia, Humedad en %)

Tipo corto (sólo 3 letras. El programa lo crea automáticamente pero se puede cambiar)

Texto para definir las unidades (Ej: °C, dB(A), %, milímetros, micras, etc)

Indique tipo de datos que recoge el sensor

- Datos continuos. Rango entre -100.000.000 y 100.000.000 con dos decimales de precisión.
- Datos continuos con el rango anterior pero que deben ser pasados a 1 ó 0 según un valor de corte.
- 1 ó 0

Amplitudes permitidas | **Rango valores**

La amplitud permitida es, al promediar, la máxima diferencia entre el valor máximo y el mínimo que se considera como correcta.

Máx. amplitud para el intervalo de 5 minutos	1
Máx. amplitud para el intervalo de 15 minutos	2
Máx. amplitud para el intervalo de 30 minutos	5
Máx. amplitud para el intervalo de 1 hora	10
Máx. amplitud para el intervalo de 1 día	25
Máx. amplitud para el intervalo de 1 semana	30
Máx. amplitud para el intervalo de 1 mes	30

Cerrar | **Guardar nuevo tipo**

Figura 3.6: Crear un nuevo tipo de sensor.

Tendremos que rellenar una serie de información para identificar el tipo de sensor: el texto que define el tipo, las unidades, etc. También se nos pedirá el tipo de datos que va a recoger este tipo de sensor. En nuestro caso elegiremos datos continuos, la primera opción.

También se nos pedirá que rellenemos unos datos para **amplitudes permitidas**. Este paso es opcional y puede omitirse, pero es muy útil posteriormente a la hora de hacer informes.

La amplitud es la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo que vamos a recoger en un intervalo de tiempo. Por ejemplo, si en cinco minutos recogemos para un mismo sensor 5 valores 58.25, 58.30, 59.25, 58.36, 57.90, la amplitud será valor máximo menos valor mínimo: $59.25 - 57.90 = 1.35$

Pues bien, podemos definir cuál es la amplitud máxima que vamos a permitir en el intervalo de 5 minutos. Por ejemplo 2. Los valores por encima de 2, se marcarán en

rojo a la hora de obtener informes, lo cual nos indicará de un vistazo que hay algún dato anómalo o erróneo o variación brusca de humedad.

Podemos definir amplitudes distintas para intervalos de tiempo distintos. El programa trabaja con los siguientes intervalos de tiempo: 5 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 1 día, 1 semana y 1 mes. Más adelante veremos qué significado concreto tienen estos intervalos.

El caso es que podemos definir amplitudes para todos estos intervalos. Cuanto mayor sea el intervalo de tiempo, mayor deberá ser en teoría la diferencia entre dos valores, puesto que la HR, la T^a y cualquier otro parámetro físico, varían a lo largo del tiempo.

Una vez rellenados estos datos, podemos ir a la pestaña de **rango de valores**.



Amplitudes permitidas Rango valores

Si los datos del sensor deben estar entre un máximo y/o un mínimo, indique los valores.
(La coma decimal es una coma, no un punto)
Si no existen esos valores máximo o mínimo, deje las casillas en blanco.

Valor máximo

Valor mínimo

Figura 3.7: Rango de valores máximo y mínimo.

Aquí podemos indicar cuál será el valor máximo que puede recoger el sensor de humedad relativa (en este caso 100) y el valor mínimo (en este caso 0). Cualquier valor fuera de este rango, será descartado o arreglado, según veremos más adelante.

Una vez recogidos todos los datos, podemos darle al botón “guardar nuevo tipo”.

Gestión Tipo de Sensor

Tipos de sensor actuales **Crear nuevo tipo**

Listado tipo de sensor Detalles/edición

Tipo Largo Tipo corto

Texto para definir las unidades (Ej: °C, dB(A), %, milímetros, micras, etc)

Tipo de datos que recoge el sensor

- Datos continuos. Rango entre -100.000.000 y 100.000.000 con dos decimales de precisión.
- Datos continuos con el rango anterior pero que deben ser pasados a 1 ó 0 según un valor de corte.
- 1 ó 0

Amplitudes permitidas **Rango valores**

La amplitud permitida es, al promediar, la máxima diferencia entre el valor máximo y el mínimo que se considera como correcta.

Máx. amplitud para el intervalo de 5 minutos	<input type="text" value="10,00"/>
Máx. amplitud para el intervalo de 15 minutos	<input type="text" value="10,00"/>
Máx. amplitud para el intervalo de 30 minutos	<input type="text" value="10,00"/>
Máx. amplitud para el intervalo de 1 hora	<input type="text" value="15,00"/>
Máx. amplitud para el intervalo de 1 día	<input type="text" value="30,00"/>
Máx. amplitud para el intervalo de 1 semana	<input type="text" value="30,00"/>
Máx. amplitud para el intervalo de 1 mes	<input type="text" value="30,00"/>

Figura 3.8: Creación de un nuevo tipo de sensor.

Ya tendremos creado el sensor tipo de humedad relativa. Siguiendo los mismos pasos, podemos crear el sensor Temperatura. Cuando los tengamos creados, obtendremos un listado como el siguiente:

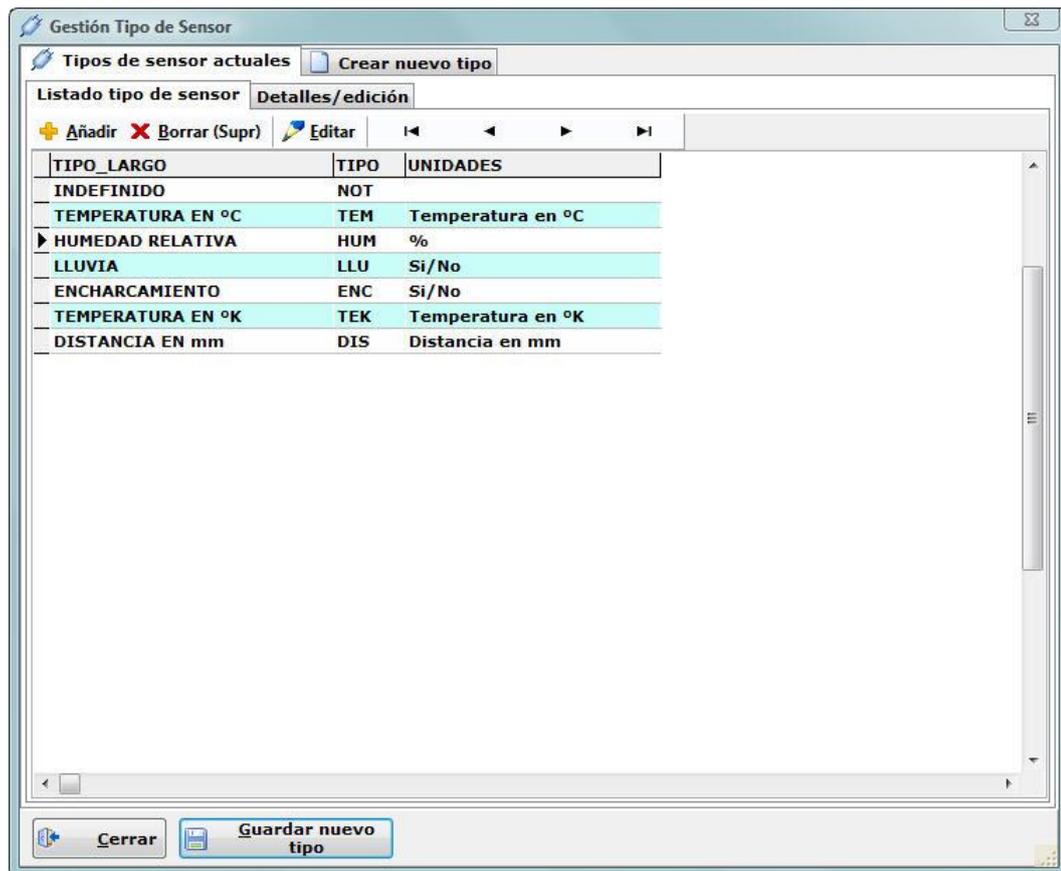


Figura 3.9: Pantalla sobre los tipos de sensores creados.

Dándole al botón de cerrar volveremos a la pantalla principal. Ahora tenemos que dar de alta cada uno de los sensores de humedad relativa y temperatura.

Hacemos click en el botón “Gestión de sensores” y nos aparecerá la siguiente pantalla:

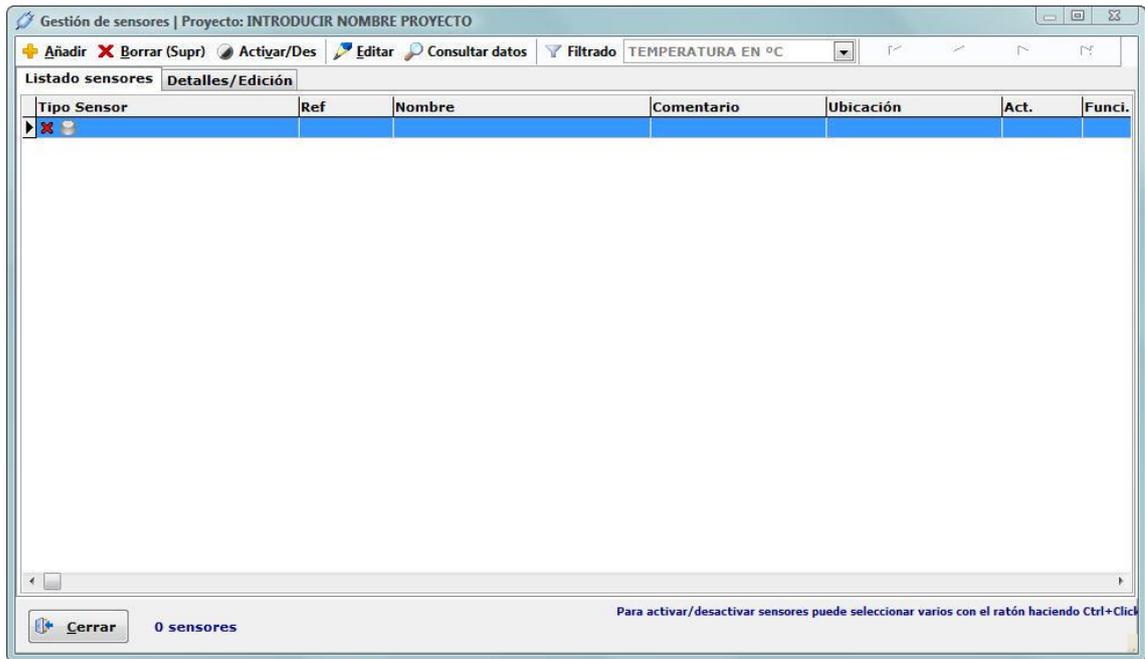


Figura 3.10: Listado de sensores del proyecto en blanco.

Veremos una lista vacía porque aún no hemos añadido ningún sensor. Para ello, hacemos click en el botón “Añadir” y nos aparecerá la siguiente pantalla:

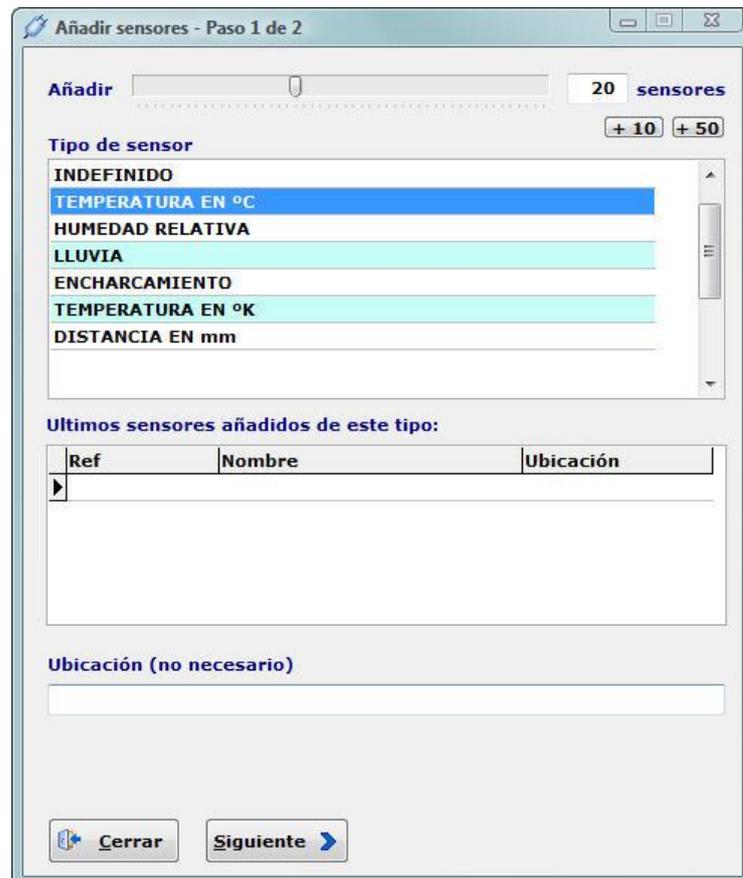


Figura 3.11: Añadiendo sensores.

Aquí introducimos el número de sensores que vamos a añadir, por ejemplo 20. En el siguiente cuadro, Tipo de sensor, elegimos el tipo de sensor (que ya tendremos creado previamente) por ejemplo Temperatura. Podemos opcionalmente indicar una ubicación, por ejemplo “Frescos del Altar Mayor”. Le damos a “Siguiente”, nos aparecerá una ventana de confirmación y le damos a añadir. Ya tendremos añadidos 20 sensores de Temperatura numerados consecutivamente del TEM001 al TEM020.

Repetimos la misma operación con los sensores de Humedad Relativa y tendremos en la pantalla de Gestión de sensores un listado como este:

Tipo Sensor	Ref	Nombre	Comentario	Ubicación	Act.	Funci...
HUMEDAD RELATIVA	HUM001	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 001		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM002	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 002		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM003	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 003		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM004	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 004		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM005	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 005		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM006	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 006		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM007	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM008	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 008		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM009	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 009		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM010	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 010		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM011	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 011		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM012	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 012		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM013	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 013		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM014	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 014		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM015	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 015		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM016	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 016		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM017	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 017		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM018	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 018		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM019	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 019		Frescos del altar	Activo	Si
HUMEDAD RELATIVA	HUM020	SENSOR HUMEDAD RELATIVA 020		Frescos del altar	Activo	Si
TEMPERATURA EN °C	TEM001	SENSOR TEMPERATURA EN °C 001		Frescos del altar	Activo	Si
TEMPERATURA EN °C	TEM002	SENSOR TEMPERATURA EN °C 002		Frescos del altar	Activo	Si
TEMPERATURA EN °C	TEM003	SENSOR TEMPERATURA EN °C 003		Frescos del altar	Activo	Si
TEMPERATURA EN °C	TEM004	SENSOR TEMPERATURA EN °C 004		Frescos del altar	Activo	Si
TEMPERATURA EN °C	TEM005	SENSOR TEMPERATURA EN °C 005		Frescos del altar	Activo	Si
TEMPERATURA EN °C	TEM006	SENSOR TEMPERATURA EN °C 006		Frescos del altar	Activo	Si
TEMPERATURA EN °C	TEM007	SENSOR TEMPERATURA EN °C 007		Frescos del altar	Activo	Si
TEMPERATURA EN °C	TEM008	SENSOR TEMPERATURA EN °C 008		Frescos del altar	Activo	Si
TEMPERATURA EN °C	TEM009	SENSOR TEMPERATURA EN °C 009		Frescos del altar	Activo	Si
TEMPERATURA EN °C	TEM010	SENSOR TEMPERATURA EN °C 010		Frescos del altar	Activo	Si
TEMPERATURA EN °C	TEM011	SENSOR TEMPERATURA EN °C 011		Frescos del altar	Activo	Si
TEMPERATURA EN °C	TEM012	SENSOR TEMPERATURA EN °C 012		Frescos del altar	Activo	Si

Figura 3.12: Listado de sensores completado.

Desde esta pantalla podemos editar casi todos los datos de los sensores. Si vamos a la pestaña de “Detalles/Edición”, podemos indicar si un sensor funciona bien o no, si está activo o inactivo, podemos añadirle un comentario, etc. También podemos pulsar el botón de “Consultar datos” de un sensor concreto y obtenemos un listado con todos los datos recogidos por ese sensor.

Ya tenemos listo el fichero FDB para recoger datos.

Recogida de datos desde un fichero generado por el microcontrolador hasta el fichero FDB.

El fichero con formato txt generado por el micro necesita una pequeña preparación para poder ser importado a nuestra base de datos (el fichero FDB). Desde Excel u otra aplicación de hoja de cálculo, abrimos el fichero txt y creamos una nueva fila al principio (fila 1). Esta fila va a contener los nombres de cada registro, en nuestro caso: día, mes, año, hora, minuto, nombre sensor 1, nombre sensor 2, etc.

Quedaría algo así:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	hora	minuto	día	mes	año	tem020	hum020	tem021	hum021	tem022	hum022	tem023	hum023
2	12	16	22	2	2010	14	57,31	14,59	56,97	14,69	64,31	14,41	67,11
3	12	17	22	2	2010	14	56,98	14,47	56,64	14,72	64,49	14,38	67,11
4	12	18	22	2	2010	14,03	56,98	14,5	56,97	14,75	64,16	14,34	67,11
5	12	19	22	2	2010	14	57,31	14,5	56,64	14,63	64,31	14,38	67,11
6	12	20	22	2	2010	14,06	56,98	14,59	56,97	14,66	64,31	14,34	67,11
7	12	21	22	2	2010	14	57,64	14,47	56,97	14,63	64,82	14,22	67,11
8	12	22	22	2	2010	14,03	57,97	14,41	56,64	14,63	64,49	14,34	68,09
9	12	23	22	2	2010	14	56,98	14,53	56,97	14,53	64,49	14,22	67,11
10	12	24	22	2	2010	14,06	57,31	14,56	56,64	14,63	64,31	14,31	67,11
11	12	25	22	2	2010	14	56,32	14,59	56,64	14,63	64,82	14,38	67,11
12	12	26	22	2	2010	14	57,31	14,5	56,97	14,63	64,49	14,31	67,11
13	12	27	22	2	2010	14,06	57,31	14,53	56,64	14,66	64,49	14,28	67,11
14	12	28	22	2	2010	14,13	56,98	14,56	56,64	14,66	64,82	14,31	67,11
15	12	29	22	2	2010	14,06	57,48	14,59	56,97	14,63	64,49	14,38	67,11
16	12	30	22	2	2010	14	56,98	14,56	56,97	14,59	64,49	14,31	67,11
17	12	31	22	2	2010	14,03	57,31	14,63	56,97	14,66	64,49	14,34	67,11
18	12	32	22	2	2010	14,03	57,31	14,5	57,29	14,59	64,82	14,31	67,11
19	12	33	22	2	2010	14	56,98	14,53	56,97	14,75	64,49	14,38	67,11
20	12	34	22	2	2010	14,03	57,48	14,53	56,97	14,66	64,49	14,31	67,11
21	12	35	22	2	2010	14	57,31	14,59	56,97	14,59	64,31	14,31	67,43
22	12	36	22	2	2010	14,13	56,65	14,5	56,31	14,59	64,49	14,31	67,11

Figura 3.13: Preparación del fichero txt en Excel.

El orden de los registros no es importante, siempre que se identifiquen correctamente y siempre que las variables de tiempo (hora, minuto, día, mes y año) estén en columnas anteriores a los datos de los sensores.

Ahora guardamos el fichero como CSV (delimitado por comas) en la opción del menú “Guardar como...” de Excel. Ya tenemos el fichero listo para ser importado.

Desde Burrito, pantalla principal, seleccionamos el botón “Obtener datos” o pulsamos la tecla rápida F2. Nos aparecerá una pantalla donde haremos click en el botón “Abrir”. Seleccionamos el fichero csv en cuestión y tendremos algo así:

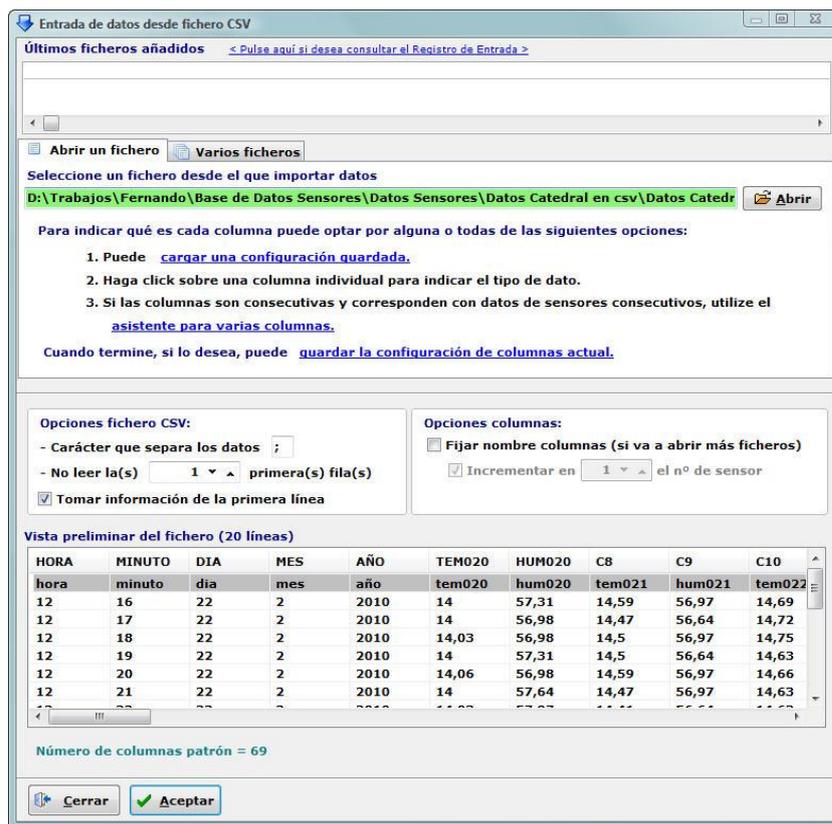


Figura 3.14: Apertura de un fichero CSV de datos.

Si hemos preparado bien el fichero csv (si la fila 1 contiene los nombres de los registros), el programa asignará correctamente cada columna a un registro: hora, minuto, día, mes, año, sensor 1, sensor 2, etc. Le damos al botón “Aceptar” y nos aparecerá una ventana de información:

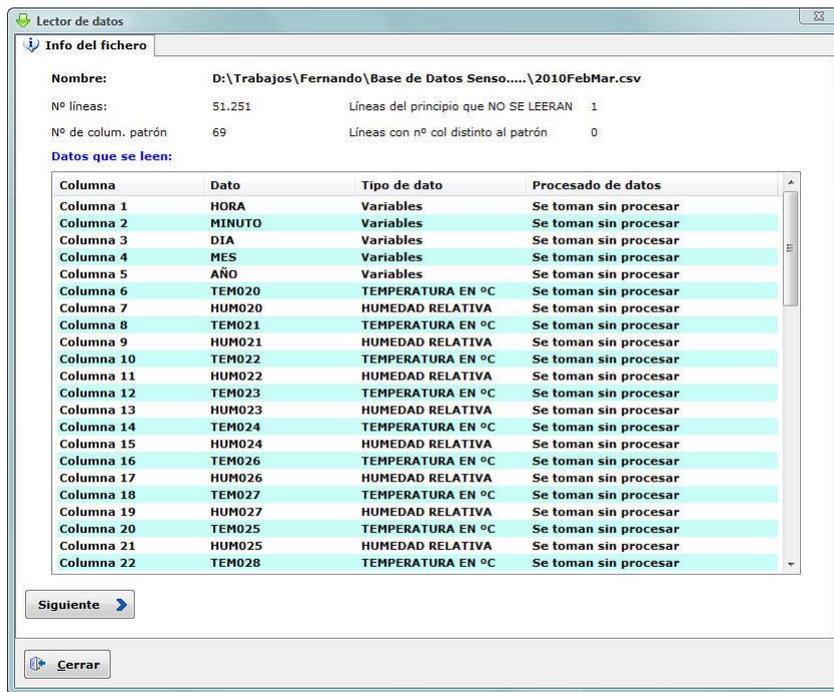


Figura 3.15: Lectura del fichero CSV. Paso 1.

Damos en el botón “Siguiente”.

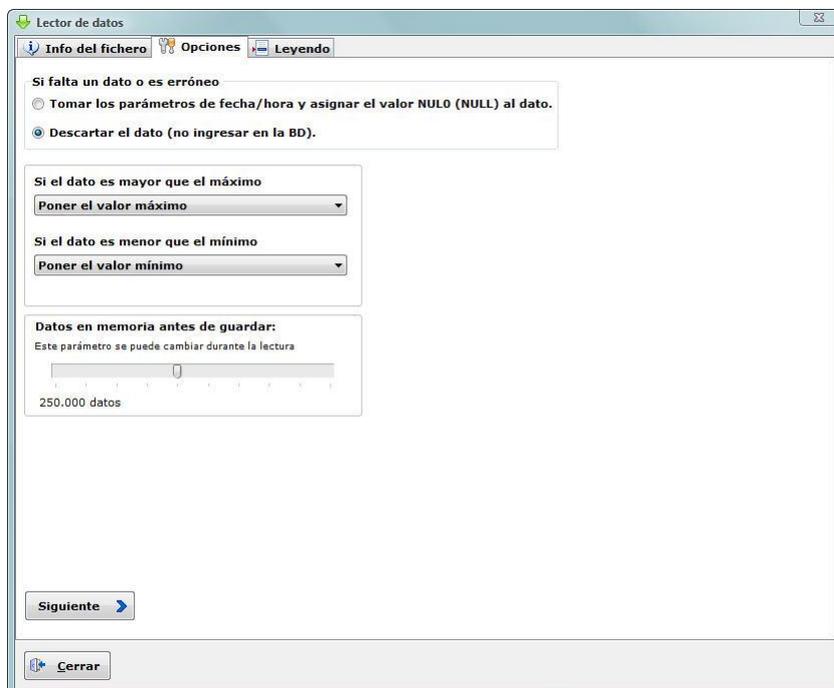


Figura 3.16: Lectura del fichero CSV. Paso 2.

En esta pantalla podemos ajustar un poco el comportamiento del programa al leer el fichero txt. En primer lugar, si falta un dato o es erróneo (está en blanco o hay un carácter no numérico, cosa habitual cuando se producen interferencias) podemos elegir entre tomar el dato como nulo (en blanco) o descartarlo totalmente y no ingresarlo en la base de datos.

En segundo lugar, nos pide qué hacer si el dato es mayor que el máximo o menor que el mínimo permitido para el tipo de sensor. Estos límites son los que previamente habremos introducido a la hora de preparar el fichero FDB.

Una tercera opción se refiere a la gestión de la memoria del ordenador mientras se importan los datos. Lo mejor es dejar el valor por defecto.

Damos otra vez en “Siguiente” y nos aparece la pestaña de Lectura de datos. Damos en “¡Leer datos!” y esperamos a que se importe el fichero txt.

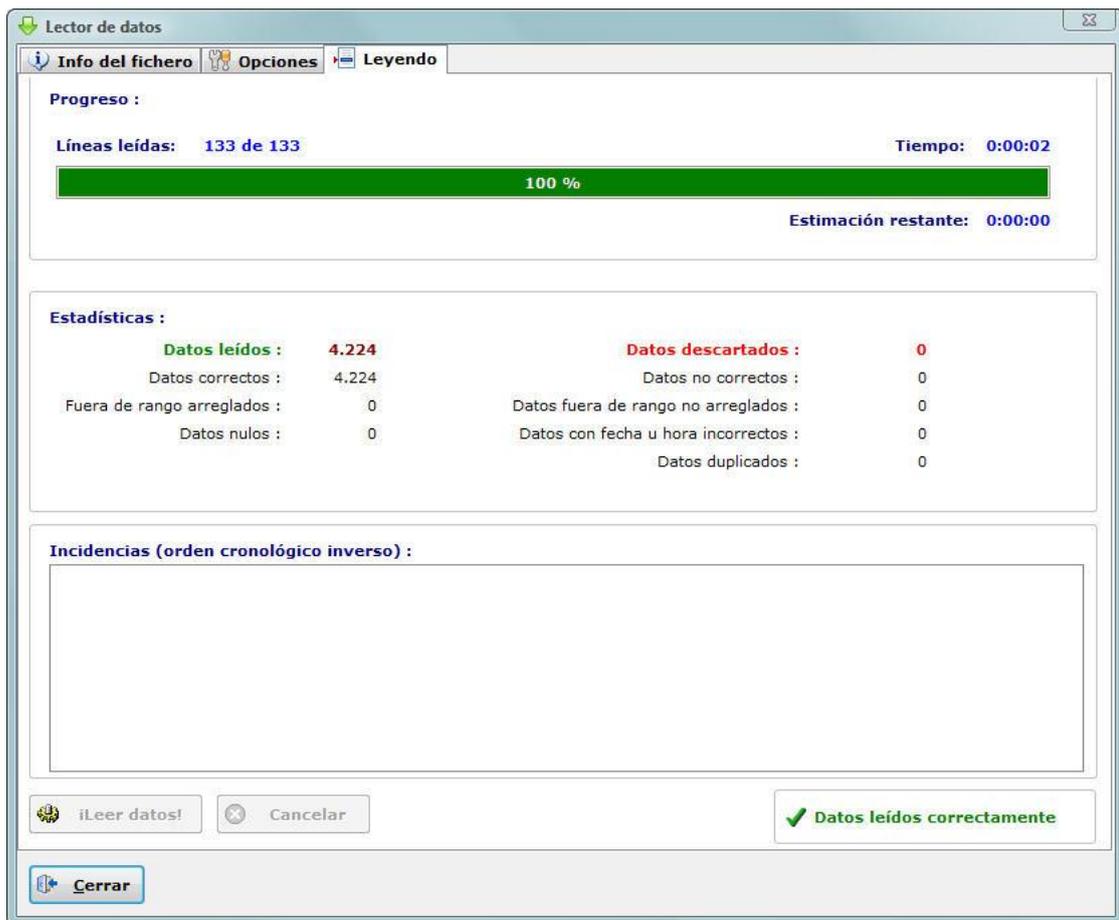


Figura 3.17: Lectura del fichero CSV. Paso 3.

Ya tendremos los datos importados a nuestro fichero FDB. Ahora podemos realizar búsquedas, análisis, gráficos, etc.

Realizando búsquedas.

Cuando tenemos introducidos muchos datos en el fichero FDB, es interesante poder realizar consultas filtradas por fecha, sensor, etc. Para ello el programa dispone de una pantalla donde podemos indicarle con bastante precisión qué tipo de datos buscamos.

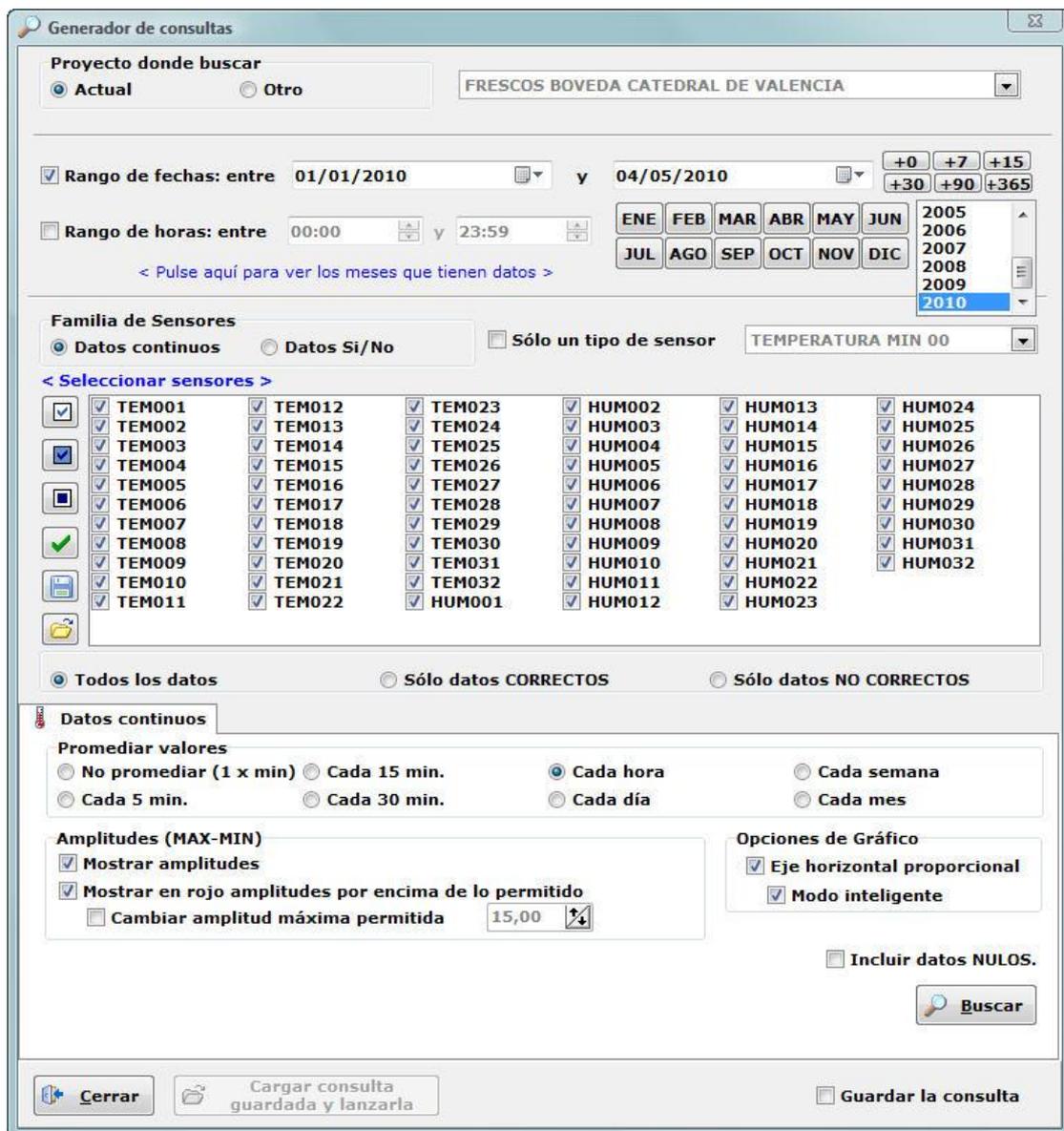


Figura 3.18: Pantalla para la generación de consultas.

En primer lugar indicamos el proyecto donde buscar. Un fichero FDB puede contener datos de varios proyectos de monitorización distintos a la vez y por lo tanto hay que indicar en cuál queremos buscar.

A continuación indicaremos el rango de fechas, esto es desde qué fecha hasta qué fecha queremos encontrar datos. Para ello disponemos de dos calendarios y varios botones para indicar la fecha inicial y la fecha final. También podemos indicar un rango de horas, por ejemplo si sólo queremos datos entre las 00:00 y las 6:00 horas.

Luego indicaremos de qué sensores queremos datos y para ello tendremos un listado con todos los sensores disponibles y algunas herramientas para filtrar los sensores por si disponemos de muchos de ellos.

Y a continuación, una de las opciones más interesantes del programa, **el promediado de valores**. Vamos a intentar explicar en qué consiste esta función.

Se dijo anteriormente que el sistema de monitorización puede recoger como máximo un dato de todos los sensores cada minuto. Esto supone, a poco que se extienda el periodo de toma de datos, varios millones de registros. Si esos datos se almacenan en la base de datos (fichero con extensión .FDB) luego se podrá realizar consultas y obtener un dato cada minuto o bien obtener el promedio de datos cada periodo de 5 minutos, o cada 15 minutos, o 30 minutos o 1 hora o 1 día o 1 semana o 1 mes. De esta forma, aunque se han recogido datos para cada minuto, puede obtenerse un resultado promediado para cada día por ejemplo, lo que permite trabajar con una cantidad más pequeña de datos y por tanto más manejable, pero sin perder la información del resto de registro recogidos.

Las **amplitudes** (el término estadístico, más correcto, sería **Rango**) también son una interesante función del programa. Si tildamos las opciones de mostrar amplitudes y mostrar en rojo amplitudes por encima de lo permitido, obtendremos un informe de resultados donde se pintarán en rojo las amplitudes por encima de lo permitido (para ello deben estar definidas las amplitudes máximas en el formulario de Tipo de sensor que vimos antes). Esto permitirá de forma visual, evaluar la calidad de los resultados, aunque haya muchos.

Si le damos al botón “Buscar” veremos un ejemplo:

Fecha	Rango de tiempo	Sensor	Media	Número datos	Mínimo	Máximo	Amplitud
06/03/2008	De 12:00 a 12:59	HUM027	71,22	4	71,22	71,22	0,00
06/03/2008	De 12:00 a 12:59	HUM028	71,74	4	71,74	71,74	0,00
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM001	53,69	4	31,43	70,37	38,94
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM002	51,82	4	31,54	66,98	35,44
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM003	50,26	4	30,92	64,71	33,79
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM004	50,30	4	30,82	64,91	34,09
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM005	53,52	4	35,09	67,21	32,12
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM007	57,57	4	41,75	69,34	27,59
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM008	65,01	4	48,05	77,64	29,59
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM009	50,65	4	30,85	65,46	34,61
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM010	52,26	4	31,60	67,60	36,00
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM011	53,70	4	35,58	67,21	31,63
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM012	55,79	4	38,57	68,73	30,16
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM015	53,31	4	32,96	68,46	35,50
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM016	52,00	4	34,93	64,84	29,91
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM017	54,77	4	39,44	66,28	26,84
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM019	66,51	4	53,81	76,02	22,21
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM021	59,21	4	45,48	65,43	19,95
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM022	58,30	4	43,71	69,15	25,44
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM023	64,61	4	49,90	75,65	25,75
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM024	60,82	4	48,39	70,03	21,64
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM025	53,51	4	32,89	68,92	36,03
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM026	65,27	4	52,18	75,04	22,86
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM027	59,65	4	44,22	71,22	27,00
06/03/2008	De 13:00 a 13:59	HUM028	61,06	4	46,74	71,74	25,00
06/03/2008	De 14:00 a 14:59	HUM001	30,67	4	30,60	30,73	0,13
06/03/2008	De 14:00 a 14:59	HUM002	30,36	4	30,23	30,44	0,21
06/03/2008	De 14:00 a 14:59	HUM003	30,54	4	30,41	30,76	0,35
06/03/2008	De 14:00 a 14:59	HUM004	30,75	4	30,67	30,80	0,13
06/03/2008	De 14:00 a 14:59	HUM005	34,55	4	34,43	34,70	0,27
06/03/2008	De 14:00 a 14:59	HUM007	41,57	4	41,49	41,67	0,18

Figura 3.19: Resultados de la consulta.

Aquí se han obtenido una serie de resultados promediados cada hora para un intervalo de tiempo concreto. Vemos el primer registro que es el dato promediado (en azul) de todos los registros recogidos el día 6/3/2008 de 12:00 a 12:59 horas. La amplitud es de 0, valor correcto. Sin embargo, el tercer registro y siguientes tienen las amplitudes en rojo, lo que indica que están por encima del valor que marcamos como permitido. Si hacemos doble click sobre un registro que tenga la amplitud en rojo veremos por qué tiene una amplitud por encima de lo permitido: se abre una nueva ventana y nos desglosa los datos que han sido promediados en ese registro, mostrando un gráfico.

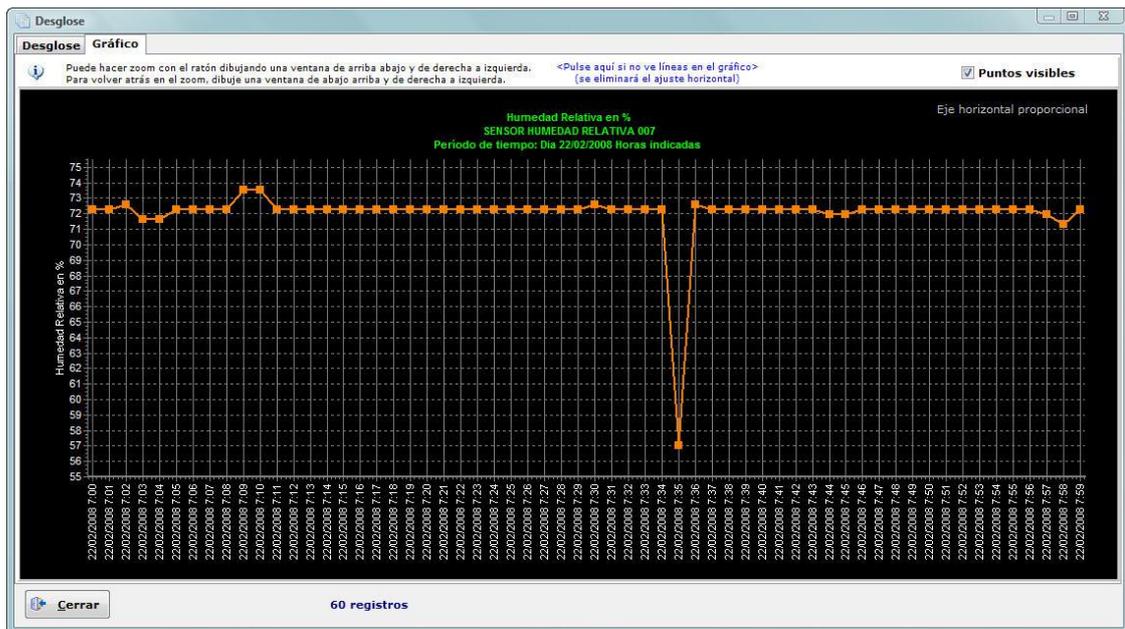


Figura 3.20: Gráfico de datos desglosados.

En este gráfico aparecen los 60 datos que se recogieron en esa hora (uno cada minuto). Vemos que hay un valle, lo que indica que en ese minuto hubo un error de lectura o una interferencia. Si hacemos click sobre el punto erróneo nos aparecerá un menú contextual “Localizar dato del sensor” que al pulsarlo nos lleva a la pestaña Desglose.

Desglose Gráfico

Más info. Exportar a Excel Panel Marcado Mínimo 57 Máximo 73,56

Editar Selec. Manual Editar Selec. Automático Nota: Si edita datos, los cambios no se verán hasta que vuelva a lanzar la consulta en el Generador de Consultas

Marcar como incorrectos: Selección TODOS Los Mínimos Los Máximos Introducir RANGO ...

Marcar como correctos: Selección TODOS Los Mínimos Los Máximos Introducir RANGO ...

Puede seleccionar varios registros a la vez con Ctrl + clic en cada registro

SENSOR	FECHA	HORA	DATO	MIN	MAX	Info.
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:20	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:21	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:22	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:23	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:24	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:25	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:26	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:27	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:28	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:29	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:30	72,58			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:31	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:32	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:33	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:34	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:35	57,00	min		
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:36	72,58			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:37	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:38	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:39	72,26			
SENSOR HUMEDAD RELATIVA 007	22/02/2008	7:40	72,26			

60 registros

Figura 3.21: Datos desglosados.

Vemos con detalle el dato que ha originado el error. Desde esta pantalla podemos marcar el dato como erróneo o editarlo manualmente o asignarle el valor anterior.

Examinando los resultados de la búsqueda.

El programa brinda varias opciones para evaluar los resultados de una búsqueda. En la primera pantalla obtenida (Figura 3.19) los resultados aparecen de forma secuencial, unos detrás de otros que es la forma en que se guardan en el fichero de la base de datos. Sin embargo, para las personas esta no es la mejor manera de ver los resultados. Si pulsamos sobre la pestaña “En columnas” obtendremos el mismo listado pero en un formato más intuitivo, ordenado como en una tabla y también con código de colores para amplitudes excesivas.

Resultados														
En Columnas														
<input type="checkbox"/> Gráfico <input type="checkbox"/> Opc. Gráfico <input type="checkbox"/> Desglosar <input type="checkbox"/> Opc. Exportación <input checked="" type="checkbox"/> Exportar a Excel * = Amplitud excesiva ! = Amplitud cero Datos promediados cada hora														
Doble click con el ratón sobre una celda para desglosar														
Fecha	Rango de tiempo	HUM001	HUM002	HUM003	HUM004	HUM005	HUM007	HUM009	HUM010	HUM011	HUM015	HUM016	HUM021	HUM022
19/02/2008	De 20:00 a 20:59	67,56	67,34	65,33	67,10	67,96	69,68	67,19	69,32	67,52	72,14	66,29	65,91	68,78
19/02/2008	De 21:00 a 21:59	67,56	67,53	65,32	67,16	67,82	69,68	67,30	69,39	67,57	72,30	66,12	66,00	68,86
19/02/2008	De 22:00 a 22:59	68,41	67,60	65,20	67,23	68,00	69,82	67,32	69,52	67,66	72,42	66,25	66,09 !	68,80
19/02/2008	De 23:00 a 23:59	68,51	67,58	65,30	67,31	68,17	70,00	67,33	69,53	67,67	72,50	66,23	66,50	68,84
20/02/2008	De 00:00 a 00:59	68,33	67,48	65,19	67,15	68,17	69,98	67,03	69,25	67,53	72,37	66,44	66,03	68,73
20/02/2008	De 01:00 a 01:59	68,30	67,28	65,04	67,16	68,14	69,99	66,98	69,23	67,52	72,14	66,27	66,06	68,79
20/02/2008	De 02:00 a 02:59	68,51	67,39	65,37	67,39	55,43*	70,30	67,00	69,19	67,82	72,33	66,73	66,04	68,94
20/02/2008	De 03:00 a 03:59	68,46	67,37	65,27	67,20 !	50,96*	70,14	67,08 !	69,30	67,96	72,36 !	66,32	66,09 !	69,05
20/02/2008	De 04:00 a 04:59	68,63	67,59	65,43	67,40	53,45*	70,23	67,17	69,39	67,92	72,58	66,36	66,09 !	68,99
20/02/2008	De 05:00 a 05:59	68,87	67,82	65,44	67,57	47,16*	70,28	67,40	69,79	67,97	72,77	66,32	66,09 !	68,83
20/02/2008	De 06:00 a 06:59	68,76	67,65	65,49	67,60	68,55	70,41	67,39	69,80	67,94	72,65	66,37	66,44	69,15
20/02/2008	De 07:00 a 07:59	68,75	67,64	65,41	67,51	68,55	70,50	67,42	69,65	67,91	72,57	66,59	66,40	69,30
20/02/2008	De 08:00 a 08:59	68,73	67,66	65,37	67,50	68,47	70,57	67,29	69,51	67,82	72,57	66,74	66,44	69,15
20/02/2008	De 09:00 a 09:59	68,90	67,84	65,49	67,66	68,56	70,59	67,40	69,72	67,94	72,67	66,87	66,38	69,21
20/02/2008	De 10:00 a 10:59	68,97	66,99	65,61	67,72	68,78	70,70	67,59	69,92	68,27	72,83	66,97	66,47	69,31
20/02/2008	De 11:00 a 11:59	69,54	68,11	65,87	67,95	69,15	70,87	67,93	70,39	68,51	73,38	67,26	66,63	69,44
20/02/2008	De 12:00 a 12:59	70,02	68,55	66,49	68,50	69,64	71,05	68,51	70,93	68,92	74,26	67,67	67,13	70,13
20/02/2008	De 13:00 a 13:59	70,37	68,86	67,14	69,18	70,13	71,38	69,34	71,53	69,32	75,56	67,85	67,38	70,49
20/02/2008	De 14:00 a 14:59	71,15	68,42	67,58	69,61	70,57	71,69	69,59	71,56	69,58	76,37	68,24	67,70	70,64
20/02/2008	De 15:00 a 15:59	70,91	67,52	67,52	69,53	70,36	71,90	69,41	71,48	69,41	75,96	68,25	67,68	70,62
20/02/2008	De 16:00 a 16:59	71,45	68,35	67,77	69,80	70,77	72,18	69,70	71,85	69,71	76,79	67,85	68,00	70,94
20/02/2008	De 17:00 a 17:59	71,32	68,75	67,92	69,86	70,65	72,24	69,75	71,80	69,61	76,40	67,98	67,86	70,73

Figura 3.22: Resultados de la consulta en columnas.

También desde aquí, haciendo doble click sobre una celda, obtendremos el gráfico de la figura 3.21.

Realización de gráficos.

Pero aunque en el apartado anterior los datos aparecen de forma bastante clara, si hay muchísimos datos (una consulta que devuelva varias decenas de miles de resultados es muy habitual), se hace prácticamente imposible evaluar los resultados. En este caso podemos pulsar sobre el botón “Gráfico” que aparece arriba a la izquierda tanto en la pantalla de resultados secuenciales (Figura 3.19) como en la pantalla de resultados en forma de tabla (Figura 3.22).

Obtendremos un gráfico de los resultados tal que así:

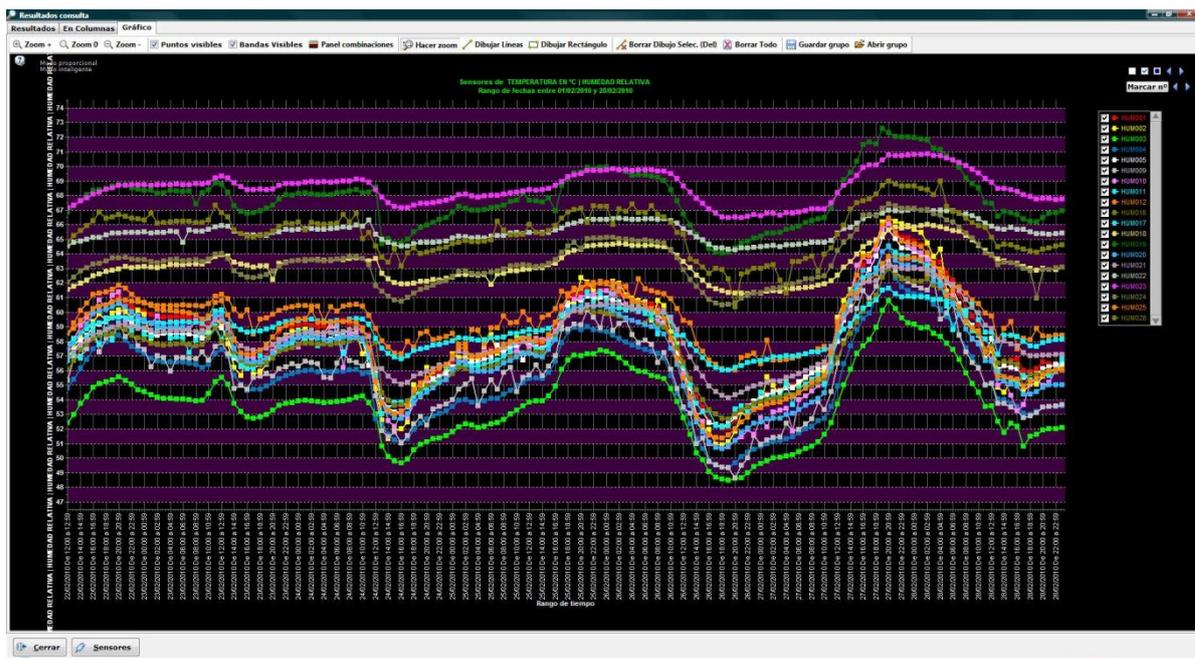


Figura 3.23: Gráfico de resultados de la consulta.

Mediante un gráfico de líneas, una para cada sensor, y teniendo en el eje X la variable de tiempo, podemos apreciar de forma visual la evolución de los parámetros muestreados en el periodo de tiempo de la consulta. Si aún así se muestran demasiados resultados, podemos hacer zoom con el ratón sobre un área del gráfico y mostrar con más detalle esa zona. Después podemos hacer zoom inverso y volver a ver todo el gráfico.

Además el gráfico permite hacer click sobre un dato en concreto (aparecen los registros marcados con un cuadrado relleno) y obtenemos un menú contextual el cual nos brinda, entre otras opciones, la posibilidad de localizar el dato en la pantalla de resultados secuenciales (Figura 19) o localizar el dato en la pantalla en forma de tabla (Figura 22). Esta posibilidad es muy interesante de cara al estudio de puntos singulares (picos o valles anómalos).

Por otra parte, el gráfico también permite dibujar líneas o rectángulos sobre el mismo, para marcar zonas, delimitar máximos, etc. También es posible ocultar (y después volver a mostrar) líneas para estudiar en detalle las restantes.

En definitiva, la pantalla de gráficos pretende ser una ayuda al estudio de los resultados obtenidos.

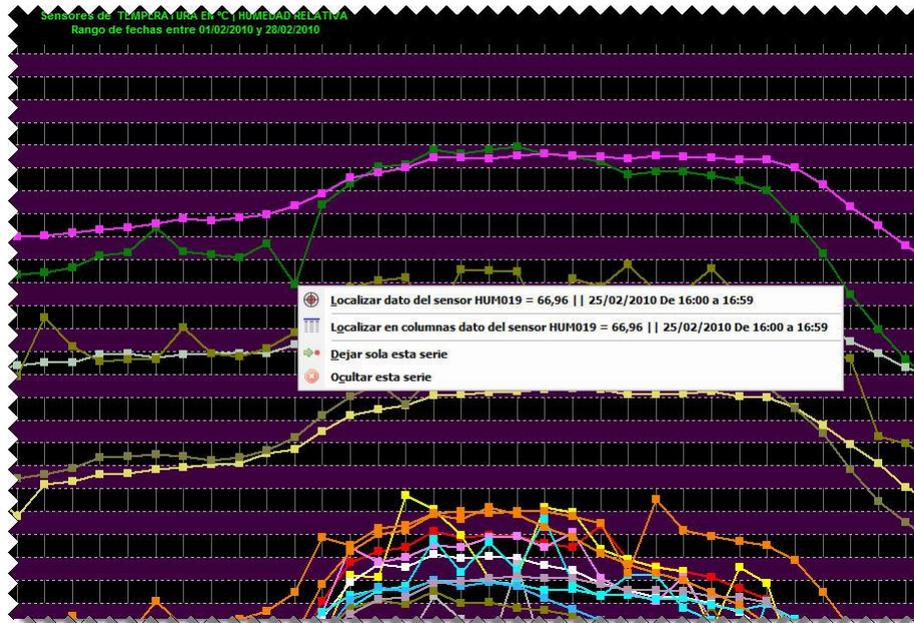


Figura 3.24: Menú contextual al pulsar sobre un registro del gráfico.

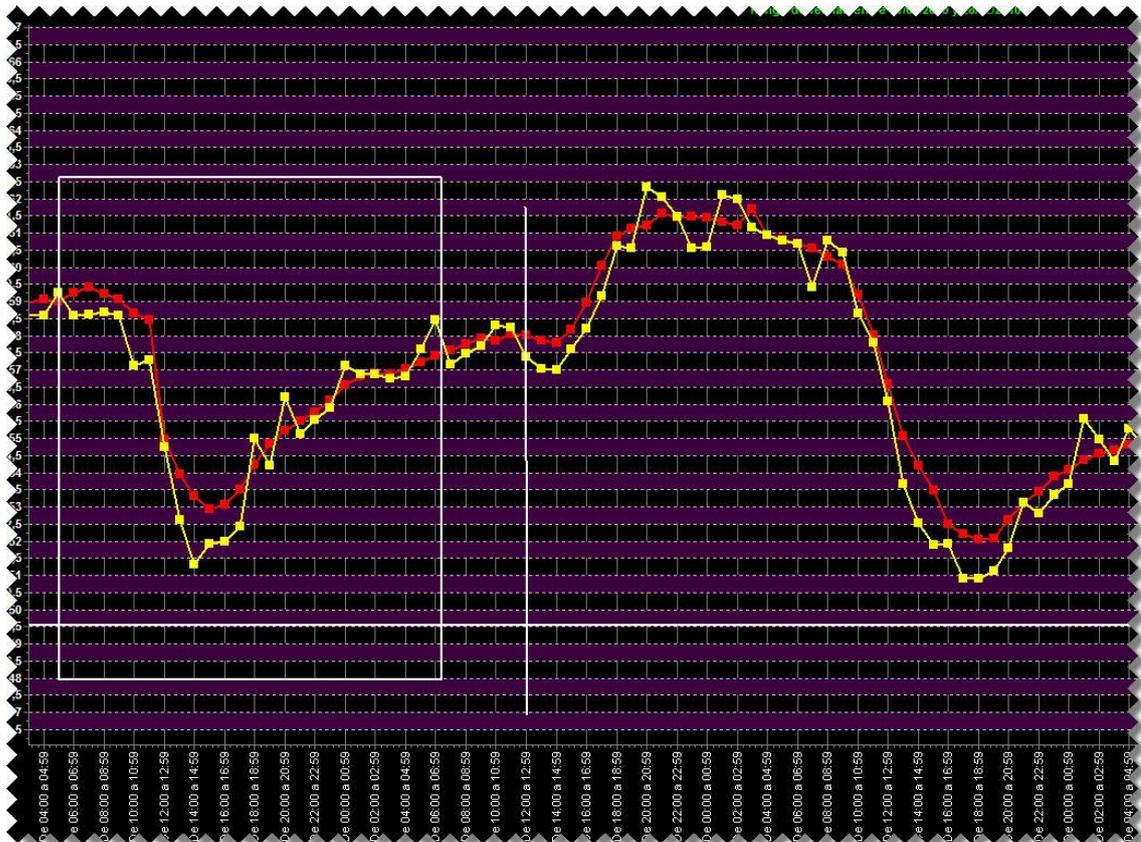


Figura 3.25: Gráfico donde se han dibujado líneas y rectángulos. Se han dejado sólo dos series ocultando el resto.

Creación de informes.

Todo programa de tratamiento de datos que se precie debe ser capaz de crear informes con los resultados de una consulta. Burrito no genera estos informes por sí, sino que puede exportar los resultados de una consulta a la popular hoja de cálculo MS Excel.

Para ello, pulsamos sobre el botón “Exportar a Excel” que aparece en las dos pantallas de resultados de la consulta (Figuras 3.21 y 3.26) y el programa abrirá automáticamente una hoja nueva de Excel y escribirá todos los datos de la consulta.

Resultados consulta

Resultados En Columnas Gráfico

Gráfico Opc. Gráfico Desglosar Opc. Exportación Exportar a Excel * = Amplitud excesiva ! = Amplitud cero Datos p

Doble click con el ratón sobre una celda para desglosar

Fecha	Rango de tiempo	HUM001	HUM002	HUM003	HUM004	HUM005	HUM009	HUM010	HUM011	HUM012	HUM013
22/02/2010	De 12:00 a 12:59	57,52	56,84	52,42	54,82	56,83	55,30	57,39	56,66	58,54	56,84
22/02/2010	De 13:00 a 13:59	58,11	57,61	52,97	55,39	57,34	56,86*	58,22	57,20	58,90	56,84
22/02/2010	De 14:00 a 14:59	58,93	58,36	53,72	56,18	58,07	56,95	59,10	56,85*	59,44	57,61
22/02/2010	De 15:00 a 15:59	59,46	58,92	54,19	56,76	58,43	57,48	59,66	58,28	59,84	57,61
22/02/2010	De 16:00 a 16:59	60,00	59,35	54,83	57,47	59,03	58,83*	60,16	58,69	60,23	58,90
22/02/2010	De 17:00 a 17:59	60,15	59,88*	55,11	57,86	59,17	57,25*	60,84*	57,78*	60,39	58,90
22/02/2010	De 18:00 a 18:59	60,32	59,45	55,23	57,97	59,36	58,24	60,29	59,58*	60,49	58,90
22/02/2010	De 19:00 a 19:59	60,76	59,96	55,36	58,14	59,59	58,42	61,16*	58,07*	60,70	58,90
22/02/2010	De 20:00 a 20:59	61,02	60,15	55,58	58,40	59,83	59,28*	61,37*	59,27	60,83	58,90
22/02/2010	De 21:00 a 21:59	60,69	60,01	55,32	58,06	59,58	58,32	59,40*	59,10	60,85	58,90
22/02/2010	De 22:00 a 22:59	60,36	59,60	55,06	57,65	59,25	58,69*	60,01	58,77	60,76	58,90
22/02/2010	De 23:00 a 23:59	60,19	60,10*	54,66	57,40	58,92	57,69	59,62	59,31*	60,72	58,90
23/02/2010	De 00:00 a 00:59	60,05	59,86*	54,54	57,12	58,84	57,44	59,42	58,49	60,66	58,90
23/02/2010	De 01:00 a 01:59	59,86	57,99*	54,33	56,84	58,51	56,23*	59,20	58,27	60,55	58,90
23/02/2010	De 02:00 a 02:59	59,68	58,91	54,18	56,69	58,43	57,03	59,71*	58,83*	60,47	58,90
23/02/2010	De 03:00 a 03:59	59,64	58,87	54,06	56,60	58,52	56,88	58,98	58,89*	60,45	58,90
23/02/2010	De 04:00 a 04:59	59,64	58,89	54,08	56,60	58,51	55,95*	58,90	58,22	60,46	58,90

Figura 3.26: Botón de exportar a Excel desde la pantalla de resultados de la consulta en forma de tabla.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	HUMEDAD RELATIVA Rango de fechas entre 01/02/2010 y 28/02/2010												
2													
3													
4	Fecha/Hora	Fecha	Rango de tiempo	HUM001	HUM002	HUM003	HUM004	HUM005	HUM009	HUM010	HUM011	HUM012	HUM016
5	22/02/2010 12:00	~ 22/02/2010	De 12:00 a 12:59	57,52	56,84	52,42	54,82	56,83	55,30	57,39	56,66	58,54	56,03
6	22/02/2010 13:00	~ 22/02/2010	De 13:00 a 13:59	58,11	57,61	52,97	55,39	57,34	56,86	58,22	57,20	58,90	56,66
7	22/02/2010 14:00	~ 22/02/2010	De 14:00 a 14:59	58,93	58,36	53,72	56,18	58,07	56,95	59,10	56,85	59,44	57,42
8	22/02/2010 15:00	~ 22/02/2010	De 15:00 a 15:59	59,46	58,92	54,19	56,76	58,43	57,48	59,66	58,28	59,84	57,78
9	22/02/2010 16:00	~ 22/02/2010	De 16:00 a 16:59	60,00	59,35	54,83	57,47	59,03	58,83	60,16	58,69	60,23	58,19
10	22/02/2010 17:00	~ 22/02/2010	De 17:00 a 17:59	60,15	59,88	55,11	57,86	59,17	57,25	60,84	57,78	60,39	58,41
11	22/02/2010 18:00	~ 22/02/2010	De 18:00 a 18:59	60,32	59,45	55,23	57,97	59,36	58,24	60,29	59,58	60,49	58,45
12	22/02/2010 19:00	~ 22/02/2010	De 19:00 a 19:59	60,76	59,96	55,36	58,14	59,59	58,42	61,16	58,07	60,70	58,53
13	22/02/2010 20:00	~ 22/02/2010	De 20:00 a 20:59	61,02	60,15	55,58	58,40	59,83	59,28	61,37	59,27	60,83	58,95
14	22/02/2010 21:00	~ 22/02/2010	De 21:00 a 21:59	60,69	60,01	55,32	58,06	59,58	58,32	59,40	59,10	60,85	58,79
15	22/02/2010 22:00	~ 22/02/2010	De 22:00 a 22:59	60,36	59,60	55,06	57,65	59,25	58,69	60,01	58,77	60,76	58,43
16	22/02/2010 23:00	~ 22/02/2010	De 23:00 a 23:59	60,19	60,10	54,66	57,40	58,92	57,69	59,62	59,31	60,72	58,26
17	23/02/2010 0:00	~ 23/02/2010	De 00:00 a 00:59	60,05	59,86	54,54	57,12	58,84	57,44	59,42	58,49	60,66	58,15
18	23/02/2010 1:00	~ 23/02/2010	De 01:00 a 01:59	59,86	57,99	54,33	56,84	58,51	56,23	59,20	58,27	60,55	57,86
19	23/02/2010 2:00	~ 23/02/2010	De 02:00 a 02:59	59,68	58,91	54,18	56,69	58,43	57,03	59,71	58,83	60,47	57,77
20	23/02/2010 3:00	~ 23/02/2010	De 03:00 a 03:59	59,64	58,87	54,06	56,60	58,52	56,88	58,98	58,89	60,45	57,72
21	23/02/2010 4:00	~ 23/02/2010	De 04:00 a 04:59	59,64	58,89	54,08	56,60	58,51	55,95	58,90	58,22	60,46	57,77
22	23/02/2010 5:00	~ 23/02/2010	De 05:00 a 05:59	59,70	58,85	54,05	56,57	58,48	56,89	58,92	58,28	60,47	57,82
23	23/02/2010 6:00	~ 23/02/2010	De 06:00 a 06:59	59,69	58,87	54,05	56,57	58,53	56,87	58,94	58,24	60,49	57,84

Figura 3.27: Datos exportados a Excel.

Obviamente, para que la exportación funcione, debe estar previamente instalado MS Excel en el mismo ordenador que Burrito.

Esta característica amplía infinitamente las posibilidades de tratamiento de datos ya que Burrito es básicamente una base de datos capaz de almacenar millones de datos pero que no puede realizar análisis estadísticos avanzados; únicamente calcular medias, máximos, mínimos y poco más. Sin embargo, con los resultados de una consulta, ya promediados por hora por ejemplo, en una hoja de Excel se pueden calcular desviaciones típicas, análisis de varianzas, etc.

Esta característica brinda lo mejor de dos mundos: la capacidad de almacenamiento de una base de datos y la potencia de cálculo de una hoja de cálculo.

Otras características.

Aquí se han visto las principales características del programa Burrito enfocadas a la obtención de resultados sintéticos para poder ser evaluados. Sin embargo, el programa ofrece otras muchas opciones de manejo de datos y mantenimiento.

- Opciones de mantenimiento de la base de datos. En cualquier base de datos hay que realizar copias de seguridad de forma periódica y dar la opción de restaurar esas copias, caso de ser necesario.
- Estadísticas de los datos de cada sensor por fecha.
- Registro de entrada de los ficheros txt. Se pueden eliminar los datos de un fichero txt que se descubra a posteriori que son erróneos.

4. APLICACIÓN DEL SISTEMA EN LOS FRESCOS RENACENTISTAS DE LA CATEDRAL DE VALENCIA.

4.1. Antecedentes

Como se explica en el punto 1.6, el sistema de monitorización propuesto se creó para dar respuesta a las necesidades de conservación preventiva que surgieron al destapar los frescos renacentistas del ábside de la Catedral Metropolitana de Valencia. Estos frescos fueron descubiertos durante unos trabajos de restauración de la bóveda barroca que los cubría y los mantenía aislados en unas condiciones ambientales distintas a las del interior del templo. Al retirar la bóveda y sacar a la luz los frescos, los puso a disposición del público para que pudieran ser admirados pero, al mismo tiempo, los exponía a unas condiciones ambientales nuevas, distintas a las que habían estado los últimos 350 años.

Para asegurar que las nuevas condiciones no suponen un riesgo para la conservación a largo plazo de los frescos y teniendo en cuenta que la impermeabilidad del techo no está garantizada, se instala en los frescos un sistema de monitorización de temperatura y humedad relativa que permita detectar problemas en estados incipientes y tomar medidas para atajar cualquier incidencia.

Características y detalles de la colocación de los sensores.

Durante el proceso de restauración, los especialistas tuvieron que reintegrar el arriccio y el intonaco, las capas que sirven de apoyo a las pinturas al fresco, porque en algunas zonas estaba muy deterioradas debido a la humedad.

Para monitorizar el resultado de la restauración se decidió controlar la T^a y la Humedad Relativa de estas zonas. Para ello, se introdujeron los sensores de T^a y HR en el interior de tubos de cerámica porosa según el procedimiento que se detalla a continuación.

Ambos sensores, el de T^a y el de HR, se montan juntos en una pequeña placa integrada, de dimensiones 10 x 30 mm. Esta placa se coloca en los puntos donde se desee tomar medidas bien directamente, o caso de necesitarse una protección para los sensores (en nuestro caso porque se introduce en un muro), puede colocarse en el interior de un tubo de cerámica blanca porosa de barro blanco cocido. Las dimensiones de este tubo son 16 mm de diámetro exterior y 12 mm de diámetro interior. La longi-

tud del tubo puede amoldarse a las necesidades de cada caso concreto (profundidad a la que se desee introducir los sensores).

En estos casos, las placas se montan de forma que el sensor de humedad quede colocado en la boca del tubo para que permanezca en el mismo plano que la pintura, en contacto con la superficie de la misma.

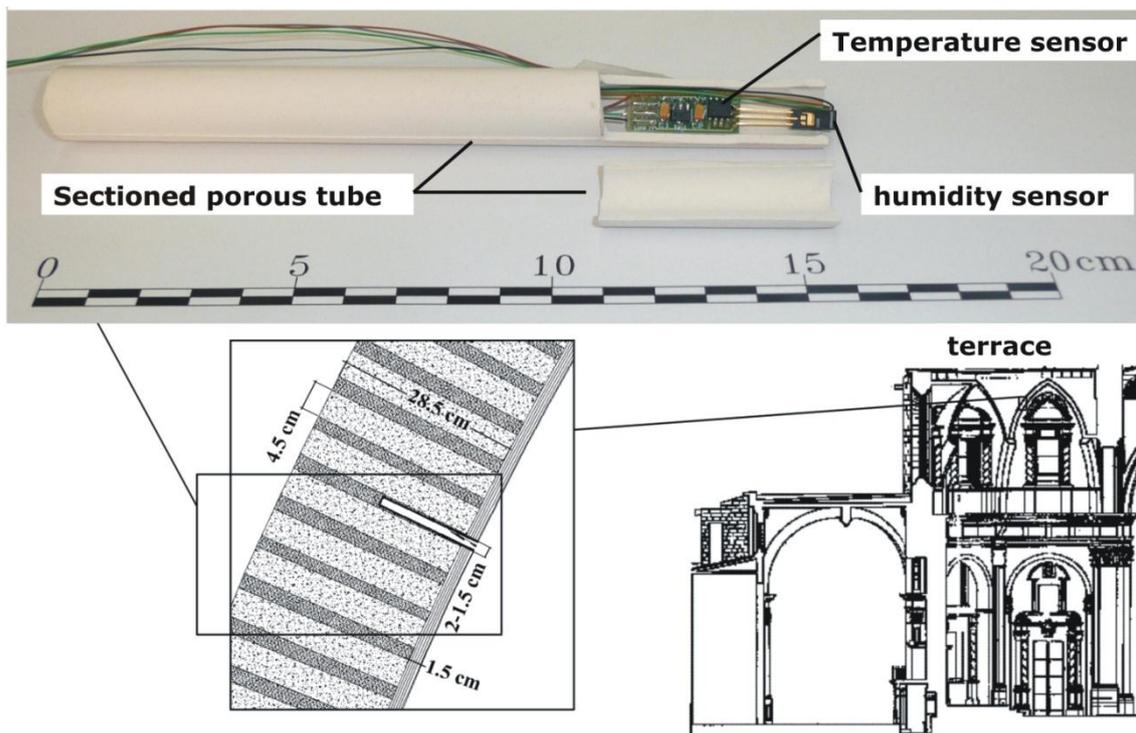


Figura 4.1: Tubo poroso con los sensores en su interior.

Nota: esta figura pertenece al artículo que se cita en la bibliografía [110].

Los tubos se insertaron en el muro por medio de perforaciones en el mortero entre dos ladrillos de la cúpula. La posición exacta de los ladrillos fue identificada por medio de un aparato de ultrasonidos.

Varios sondeos del mismo tipo se llevaron a cabo en diferentes puntos de los frescos con el fin de obtener información de varias zonas.

La distribución espacial de los sensores queda reflejada en las figuras de la página siguiente:

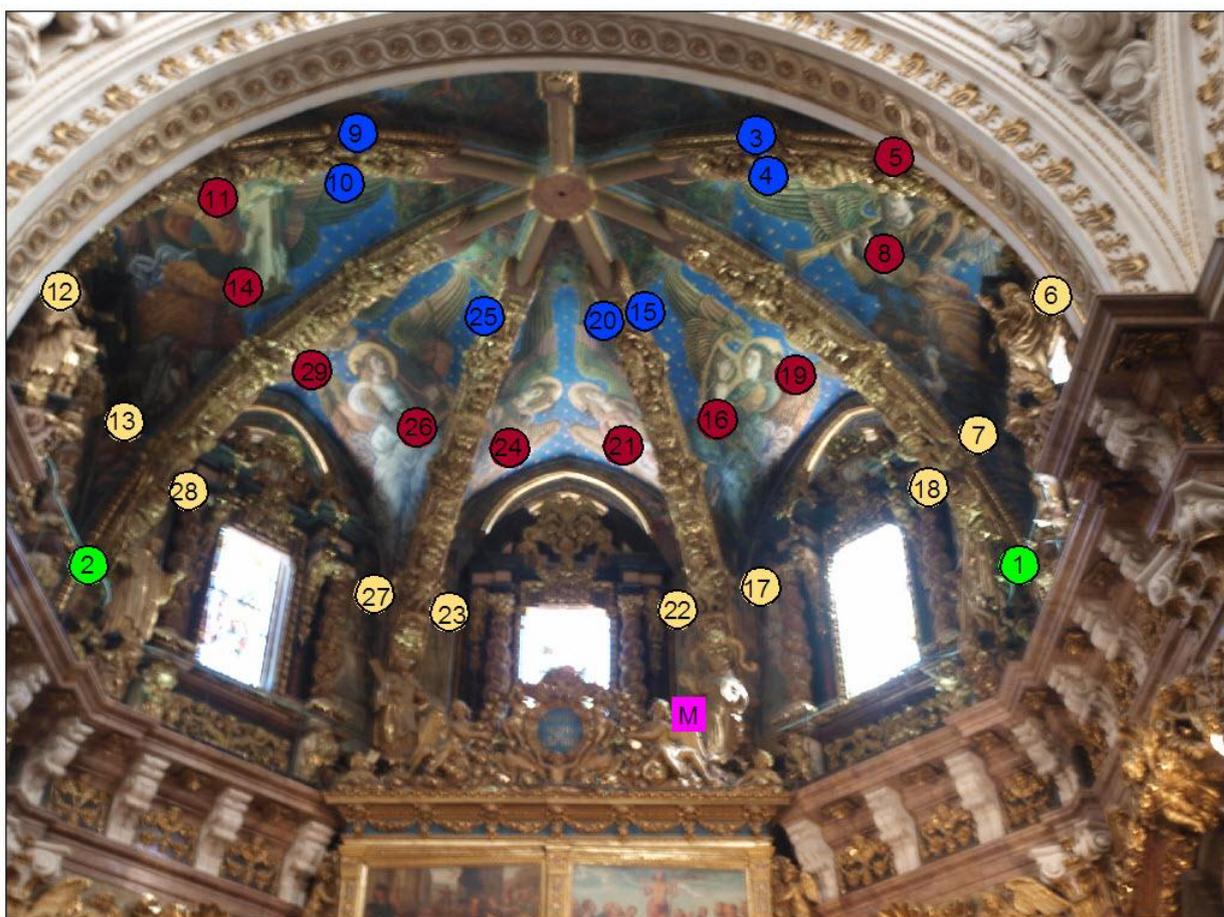


Figura 4.2.A: Distribución de los sensores.

La distribución de los sensores quedó como sigue:

- Los sensores 1 y 2, marcados en verde, están colocados sobre una repisa (en la cornisa) a 3,5 metros por debajo de las paredes y miden la HR y la T^a del aire a esa cota.
- La siguiente línea de sensores, 12, 13, 28, 27, 23, 22, 17, 18, 7 y 6, marcados en amarillo, están insertados dentro del muro donde se apoya la bóveda, a una distancia de unos 120 cm por debajo de los paños. Estas sondas fueron introducidas en tubos de cerámica del tipo descrito que se insertaron en la pared, perforando el mortero entre dos sillares y miden la HR y la T^a dentro de la pared.
- La siguiente línea, con los sensores 11, 14, 29, 26, 24, 21, 16, 19, 8 y 5, marcados en rojo, están insertados dentro del material de la bóveda sobre la que están pintados los frescos. Miden la HR y T^a del interior de la bóveda.
- Por último, los sensores 9, 10, 25, 20, 15, 4 y 3 están colocados en los nervios que separan los paños de la bóveda del ábside. Estos sensores miden la humedad relativa y la temperatura del aire a unos 5 cm de la superficie de los frescos. Aparecen marcados en azul.

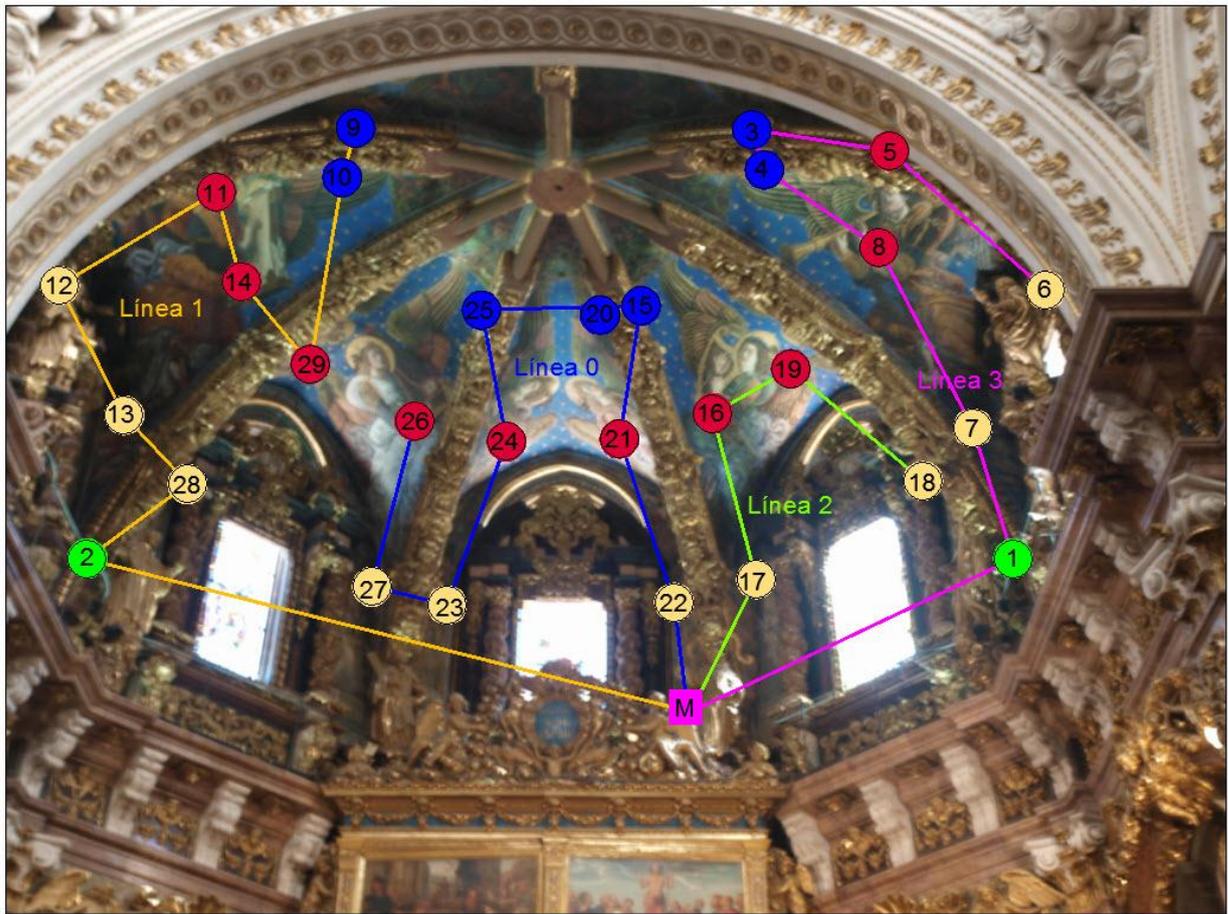


Figura 4.2.B: Distribución de los sensores, con indicación de las distintas líneas.

Ubicación del microcontrolador

El microcontrolador estaría situado en el punto M que se indica en las figuras 4.2.A y 4.2.B, detrás de los adornos barrocos. Estos adornos ocultan una pequeña plataforma de 1 m. de ancho por 3 m. de largo aproximadamente, a la que se accede desde el tejado de la catedral a través de una angosta escalera. Para subir al tejado puede utilizarse una escalera de caracol que arranca desde una de las capillas laterales del coro.

Calibración de los sensores

Todos los sensores son del modelo HIH-4000 (Honeywell International Inc.) y fueron adquiridos con una calibración individual realizada por el fabricante.

Cada sensor de humedad relativa recibe 5 Voltios de CC de entrada suministrados por un circuito integrado TL7805. Este circuito presenta cierta variabilidad, y el suminis-

tro de tensión real varía en un rango de 4,9 a 5,1 V, lo que afecta a la estimación de RH. Según el fabricante, el voltaje de salida del sensor HIH-4000 es proporcional al voltaje de entrada. Así, con el fin de mejorar la exactitud de las mediciones de humedad relativa, el valor exacto de la tensión se midió para cada sensor de humedad una vez que todas las sondas y las conexiones se instalaron en la bóveda del ábside, y las curvas de calibración de cada sensor individual se corrigieron en consecuencia.

Recogida de datos

Los trabajos de restauración terminaron en diciembre de 2006 y la adquisición de datos se inició en febrero de 2007, estando actualmente en proceso.

Por diversas circunstancias, que ya se explicaron en el punto 3.2.1, hay varios periodos en los que no se han registrado datos:

- En 2007 sólo se recogieron datos de los meses de febrero, septiembre, octubre y noviembre.
- En 2008 se recogieron datos desde el 15 de enero hasta el 15 de diciembre.
- En 2009 no se recogieron datos.
- En 2010 se recogieron datos a partir del 22 de febrero.
- Actualmente – julio de 2011- el sistema sigue funcionando y registrando datos.

4.2. Resultados obtenidos en 2008 y discusión.

4.2.1. Introducción.

Los resultados que se van a mostrar aquí son los obtenidos sólo durante el año 2008, porque pertenecen a un trabajo de estadística descriptiva realizado con la finalidad de probar la potencia del software de almacenamiento y gestión (Burrito), a principios de 2010, cuando aún no había datos suficientes de este año.

No se incluyen los datos de 2009 porque ya se explicó que no se recogieron por problemas en el sistema, ni tampoco los de 2007 por tratarse de unos datos recogidos con una frecuencia mucho menor y haberse registrado muy pocos meses.

La discusión de los datos obtenidos en 2008 nos permite establecer un marco general de la situación ambiental de los frescos y detectar situaciones indeseables en cuanto a la conservación de los mismos.

4.2.2. Generalidades.

Cuantitativamente se obtuvieron los siguientes datos en 2008:

Mes	Cantidad de datos obtenidos
Enero de 2008	1.454.179
Febrero de 2008	2.205.836
Marzo de 2008	1.965.212
Abril de 2008	2.261.543
Mayo de 2008	2.670.918
Junio de 2008	2.586.524
Julio de 2008	1.672.718
Agosto de 2008	2.296.500
Septiembre de 2008	2.575.975
Octubre de 2008	2.637.244
Noviembre de 2008	1.515.464
Diciembre de 2008	608.498

Los datos se tomaron con una frecuencia de un dato por minuto para cada sensor.

Adicionalmente, se obtuvieron los datos de HR y T^a del Instituto Metereológico para Valencia en el mismo periodo de tiempo. Estos datos proporcionados por el I.M. están tomados con una frecuencia de 2 datos al día, es decir, 1 dato cada 12 horas.

En este apartado, vamos a analizar los resultados obtenidos y a compararlos con el patrón de idoneidad para conservación de patrimonio artístico que fijamos en el punto 1.1. Dicho patrón adaptado a murales y frescos es el siguiente:

	Para HR		Para Temperatura	
	Máximo	Óptimo	Máximo	Óptimo
Límites	40 – 70%	45 – 65 %	6 – 25 °C	20 – 25 °C
Variación diaria	10 % *	5 %	1,5 °C	-

Tabla 4.1: Parámetros microclimáticos de referencia para la conservación de frescos.

(*) Nota referente al dato de variación máxima diaria en HR. El valor aquí reflejado del 10% es un dato conservador que hemos considerado como aceptable dadas las características climáticas de la zona y los materiales sobre los que encuentran los frescos. No hemos encontrado ningún dato específico para la conservación de murales y frescos en la bibliografía consultada, quizá por la escasa experiencia en este campo.

Condiciones ambientales externas.

Comenzaremos el análisis por los datos meteorológicos del I. M. para conocer las condiciones extramuros.

En la siguiente gráfica se muestra la evolución anual de los parámetros de T y HR en el exterior:

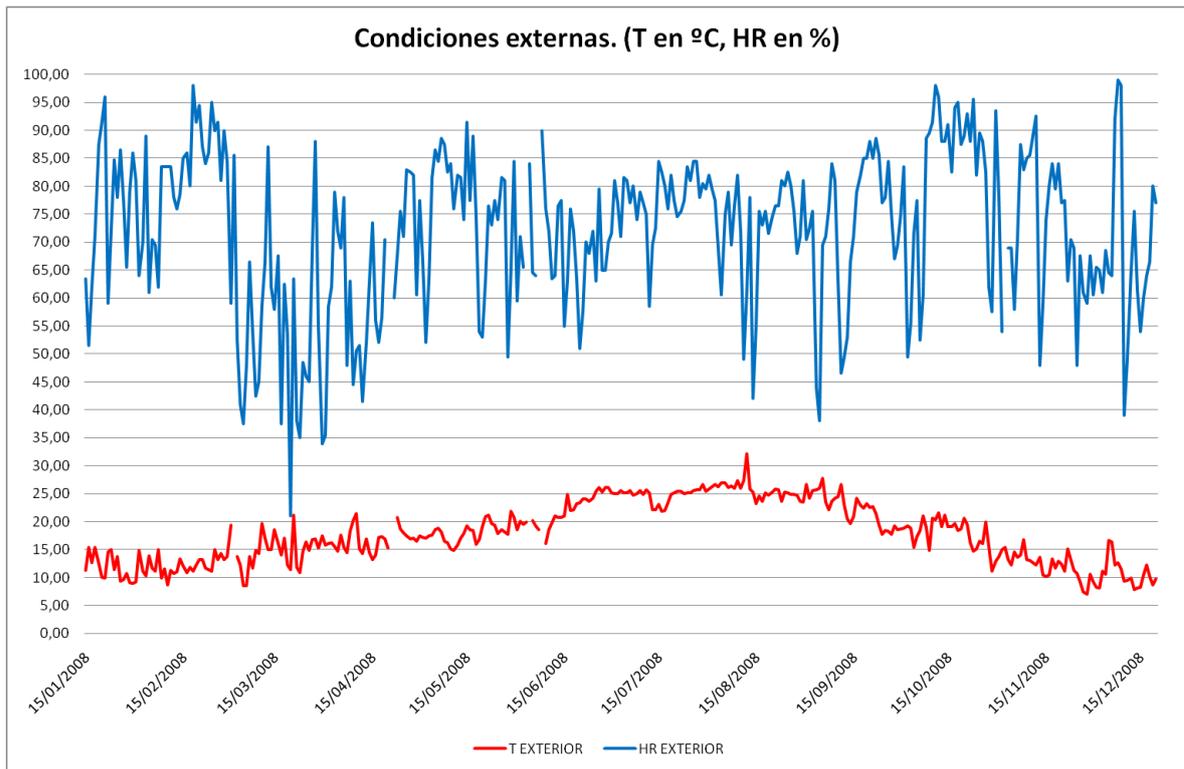


Figura 4.3: Gráfico de T y HR externas.

En cuanto a la humedad relativa, es evidente la enorme variación diaria que se produce en este parámetro, dibujando dientes de sierra muy acusados.

Los datos más relevantes de HR durante el año 2008 son los siguientes:

- La HR media fue de 71,90 %
- La HR mínima fue de 21,00 %
- La HR máxima fue de 99,00 %
- La HR fue superior al 70 % el 60 % de los días del año.
- La HR fue inferior al 40% el 3 % de los días del año.
- La variación media diaria fue de 11,19 %
- La variación mínima diaria fue de 0,00 %
- La variación máxima diaria fue de 72,00 %
- La variación diaria fue superior a 5 % el 65 % de los días del año.
- La variación diaria fue superior a 10 % el 40 % de los días del año.

Nota: Las variaciones diarias se calculan como la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo en un mismo día. Son valores siempre positivos o cero porque son en valor absoluto.

Estos datos nos indican dos cosas claramente: el clima en Valencia es muy húmedo y la variación diaria de humedad es muy alta, como puede apreciarse en el siguiente gráfico.

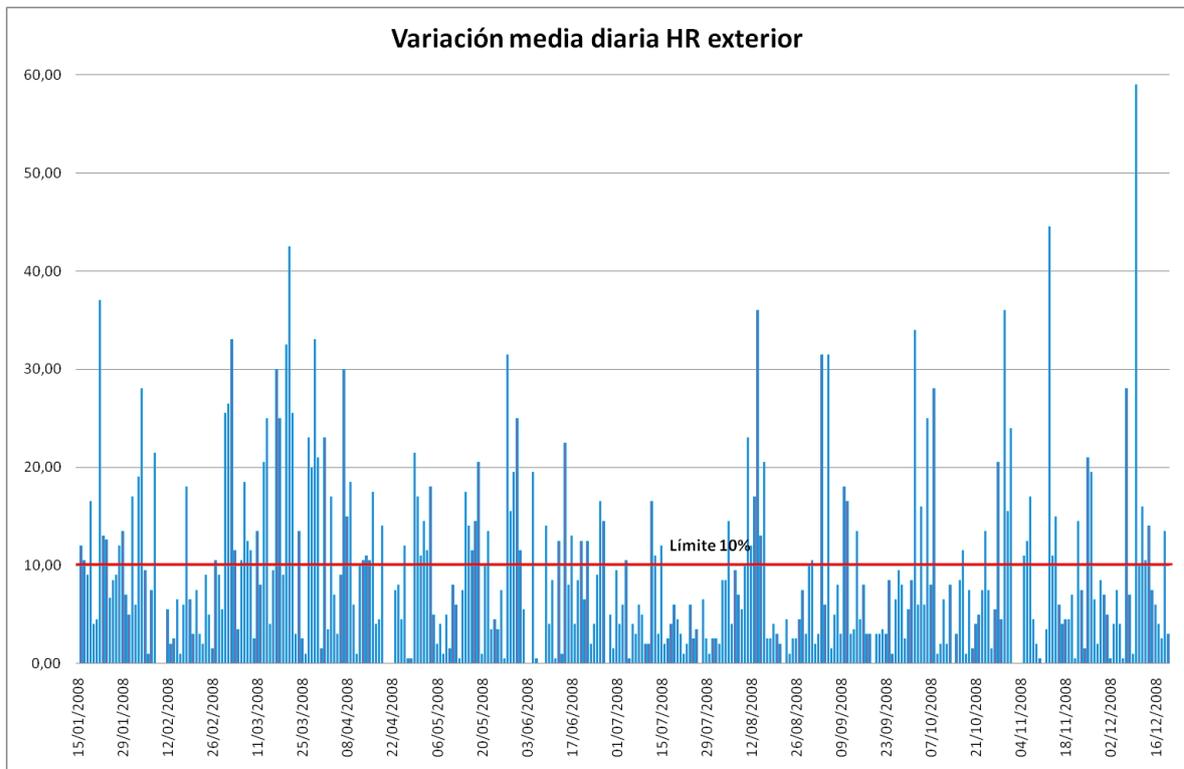


Figura 4.4: Variación media diaria de HR en el exterior del templo.

Estos parámetros son, en general, nocivos para la conservación de patrimonio artístico, ciñéndonos a los criterios de calidad que nos marcamos como patrón.

En cuanto a la temperatura, tenemos los siguientes datos:

- La T^a media fue de 17,90 °C
- La T^a mínima fue de 7,05 °C
- La T^a máxima fue de 32,10 °C
- La T^a fue superior a 25 °C el 15 % de los días del año.
- La T^a nunca fue inferior a 6 °C.
- La variación media diaria fue de 3,29 °C
- La variación mínima diaria fue de 0,00 °C
- La variación máxima diaria fue de 13,20 °C
- La variación diaria fue superior a 1,5 °C el 74% de los días del año.
- La variación diaria fue superior a 5 °C el 22% de los días del año.

Vemos que las temperaturas son suaves, con importantes variaciones diarias aunque más suaves que las variaciones de HR que ya vimos y por lo tanto, en cuanto a este parámetro, tampoco es beneficioso para la conservación preventiva.

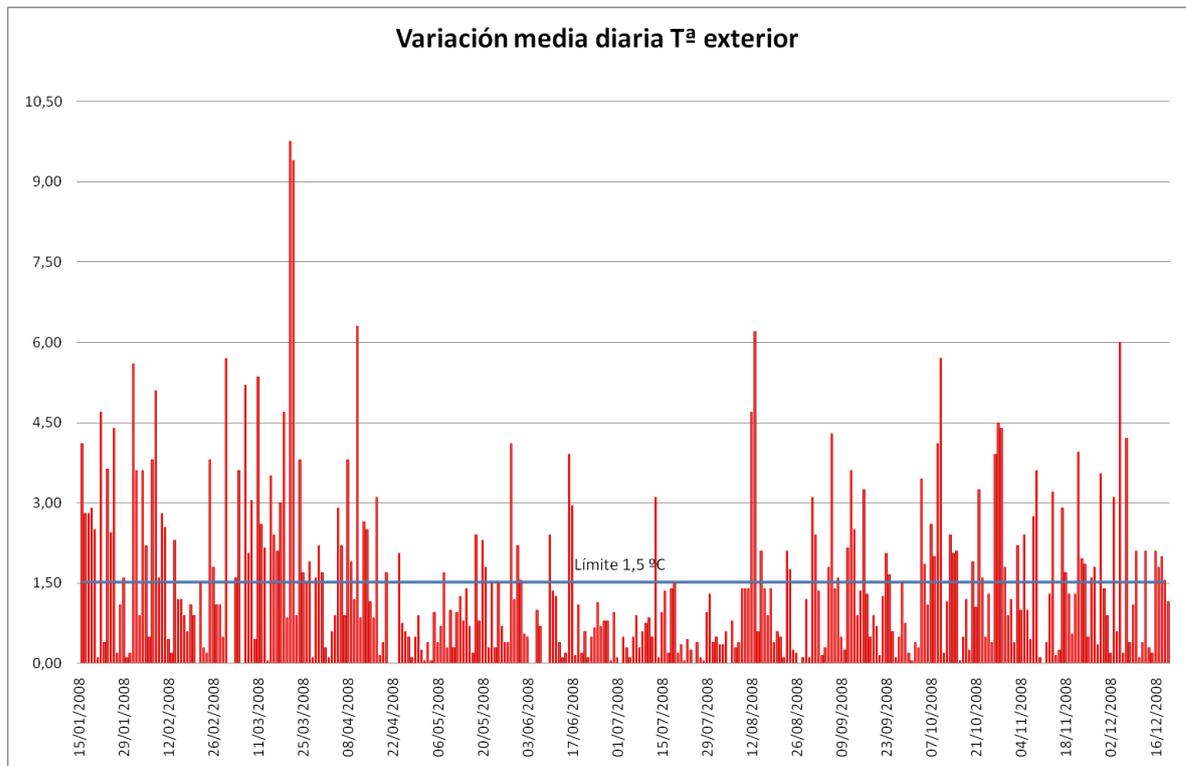


Figura 4.5: Variación media diaria de Temperatura en el exterior del templo.

Sin embargo, estos datos son referentes a condiciones externas, fuera de la Catedral y por tanto serían interesante su estudio si la obra se encontrara a la intemperie, en el exterior del templo. No es el caso y por tanto, vamos a ver las condiciones in situ, en el interior de la bóveda.

Condiciones ambientales en el interior del templo.

Comparando los datos de HR del exterior con los del interior, obtenemos el siguiente gráfico:

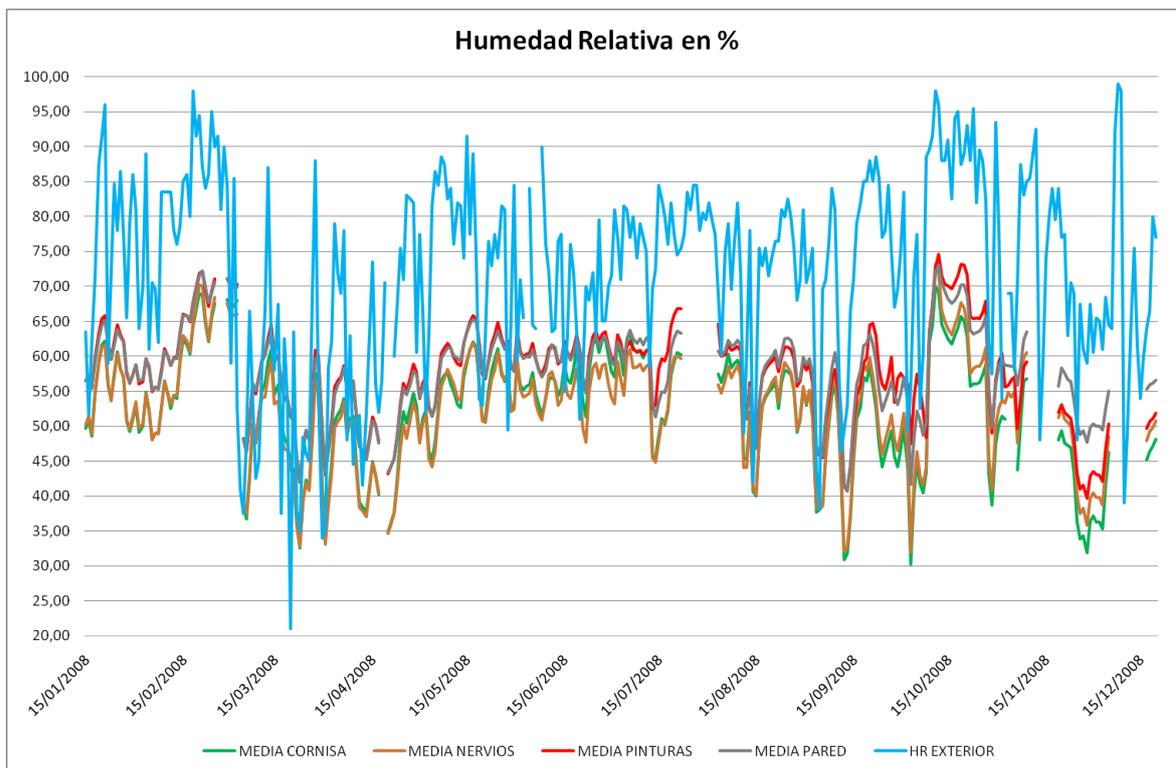


Figura 4.6: Gráfico comparativo de HR, exterior e interior.

En color azul se muestra la HR del exterior, en color verde la HR media de los sensores colocados en la cornisa, en naranja la HR media de los sensores colocados encima de los nervios, en rojo la HR media de los sensores colocados dentro de las pinturas y en gris la HR media de los sensores colocados dentro de los muros (ver punto 4.1 donde se explica la distribución de líneas).

Puede apreciarse que las variaciones de HR también se producen en el interior del templo, pero en general atenuadas como cabría esperar por el grosor de los muros [20].

Veámoslo en tabla:

	EXTE- RIOR	CORNI- SA	NER- VIOS	INTE- RIOR PINTU- RAS	INTE- RIOR MUROS
Media	71.90	52.38	52.51	57.86	57.96
Mínima	21.00	30.20	31.96	39.65	40.66
Máxima	99.00	69.99	73.13	74.61	73.05
HR > 70% *	60	0	1	6	3
HR < 40% *	3	10	9	0	0
Var. media	11.19	6.87	7.18	5.51	4.40
Var. mínima	0.00	0.00	0.33	0.77	0.55
Var. máxima	72.00	38.31	35.41	28.11	27.41
Var. HR > 5% *	65	59	65	48	30
Var. HR > 10%*	40	18	18	9	5

Tabla 4.2: Comparativa de HR entre exterior y las distintas líneas de sensores. Datos anuales.

(*) Datos expresados en % de veces sobre el total. Por ejemplo: 60 en la fila de HR > 70% indica que el 60% de los datos recogidos superaban el 70% de humedad relativa. **Var.** significa variación diaria.

En efecto, la humedad relativa baja respecto al exterior, tanto la media como la máxima mientras la mínima sube, lo que indica un efecto de suavizado. También baja el porcentaje de veces que se supera el 70% de HR aunque, como efecto negativo en el interior, se produce un incremento de las veces en que la HR es menor del 40%.

En cuanto a las variaciones de HR superiores al 10%, se produce una drástica disminución de las mismas en el interior, lo que es beneficioso para las obras.

Estos datos no vienen sino a corroborar lo que ya sabíamos: respecto a la HR, las obras están en un ambiente más favorable para su conservación en el interior del templo que en el exterior.

Sin embargo, estos números revelan otro dato importante y no tan evidente. Si nos fijamos en las distintas líneas de sensores y las comparamos entre ellas, olvidando ahora el exterior, vemos que la línea del interior de las pinturas y la línea del interior de los muros tienen humedades sensiblemente superiores (un 5% de media) a la línea

de la cornisa y la línea de los nervios. Estas dos últimas líneas recordemos que miden la HR del aire a la altura de la cornisa y de la bóveda respectivamente.

Además, las variaciones de las dos líneas de interior son inferiores a las otras dos líneas, lo que indica que el interior de las paredes y el interior de la bóveda tiene una humedad mayor que el aire que las rodea y además esta humedad fluctúa menos que la del aire.

En condiciones idóneas, los materiales de los muros y de la bóveda, deberían tener la misma humedad relativa que el aire próximo a ellas del interior de la Catedral. Si esto no es así como estamos comprobando, sino que es superior, debe ser porque estos materiales tienen en su interior más agua que el aire, lo que nos indica que hay un aporte externo.

Este efecto es indeseable para la conservación de los frescos y lo estudiaremos con detalle más adelante.

En cuanto a la Temperatura:

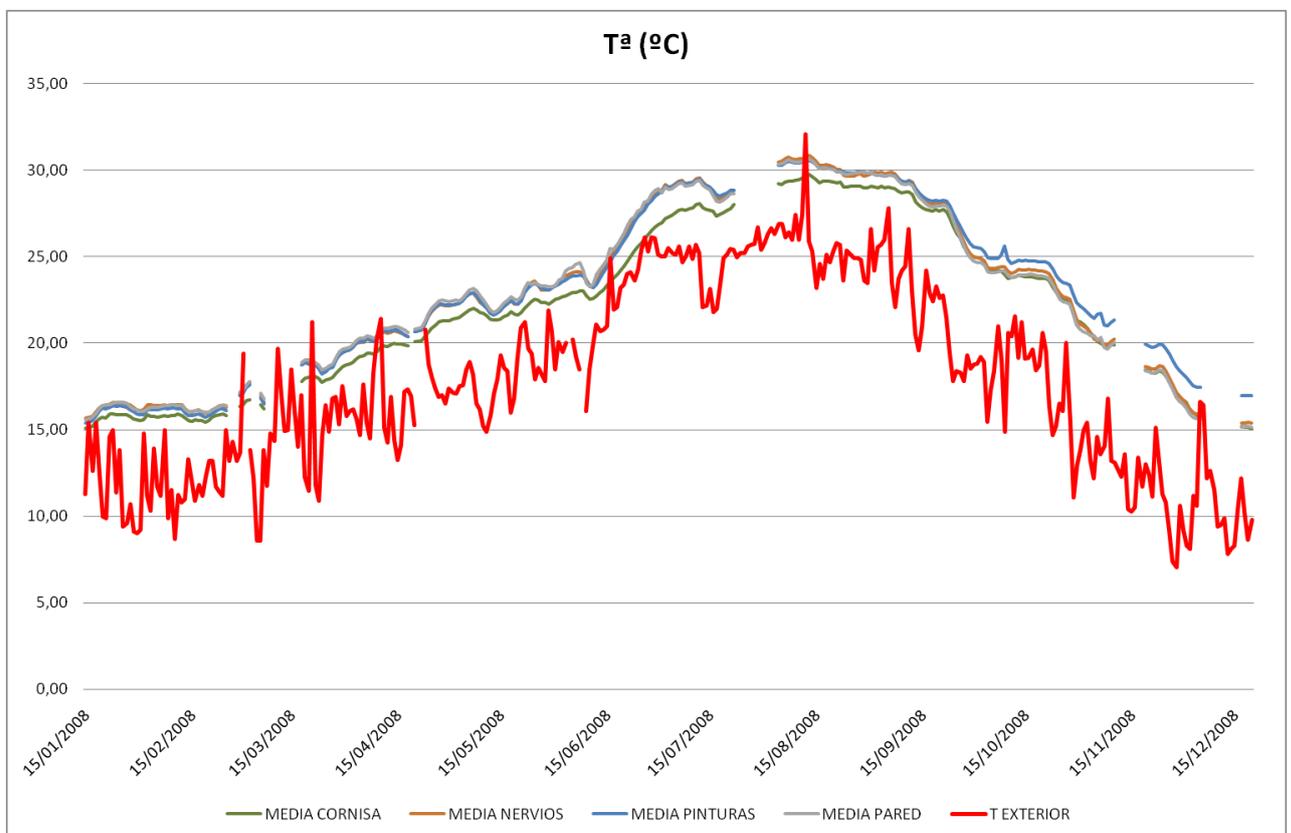


Figura 4.7: Gráfico comparativo de temperatura, exterior e interior.

Vemos un incremento general de la T^a en el interior del templo con unas variaciones más suaves que en el exterior. Si vemos los datos numéricos:

	EXTE- RIOR	CORNI- SA	NER- VIOS	INTE- RIOR PINTU- RAS	INTE- RIOR MUROS
Media	17.90	22.24	22.96	23.13	22.94
Mínima	7.05	15.03	15.37	15.40	15.13
Máxima	32.10	29.73	30.84	30.56	30.66
$T > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ *	15	30	32	34	32
$T < 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ *	0	0	0	0	0
Var. media	3.29	0.52	0.47	0.44	0.62
Var. mínima	0.00	0.13	0.13	0.11	0.09
Var. máxima	13.20	2.88	3.12	3.04	4.42
Var. $T^a > 1.5^{\circ}\text{C}$ *	74	1	0	0	10

Tabla 4.3: Comparativa de T^a entre exterior y las distintas líneas de sensores. Datos anuales.

(*) Datos expresados en % de veces sobre el total. **Var.** significa variación diaria.

Podemos comprobar en los datos de la tabla que la T media sube unos $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el interior respecto de la T exterior. También sube la T mínima, mientras que la máxima desciende ligeramente. Como dato negativo, observamos que en el interior, un tercio de los datos sobrepasan la T límite teórica de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que puede provocar condiciones favorables para el crecimiento de microorganismos que deterioren las pinturas.

En contraposición, es positivo el hecho de que las variaciones en el interior se suavizan, hasta el punto de que prácticamente nunca se supera el límite de variación, excepto en la línea del interior de los muros, donde se supera en un 10% de los casos.

No se observan diferencias significativas entre las distintas líneas de sensores, por lo que cabría deducir que la temperatura del aire de la bóveda es la misma que en el interior de los muros y de los materiales de la cúpula.

4.2.3. Estudio detallado de las condiciones microclimáticas en la bóveda, en el interior del templo.

Variaciones diarias de HR y T.

Vamos a ver en qué condiciones ambientales se encuentra el interior del templo y para ello, vamos a estudiar en detalle el microclima de la bóveda donde se hallan pintados los frescos.

Para empezar, vamos a entrar a analizar los parámetros de HR y T^a diariamente para comprobar si existe algún patrón de variación diaria. Teóricamente, la temperatura debe aumentar durante el día, sobre todo en las horas centrales, lo que en principio debe hacer que la humedad relativa del aire descienda en este período. Por la noche, las temperaturas deben bajar y consecuentemente subir la humedad relativa.

Trataremos de comprobar si efectivamente se cumple este patrón.

Por razones de espacio no vamos a estudiar todos los días del año, sino que vamos a tomar una semana del mes de enero, otra semana de abril, otra semana de julio y por último una semana de octubre, obteniendo de este modo una muestra pretendemos que representativa, de las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño, respectivamente. Todos los datos, recordemos, del año 2.008.

A continuación podemos observar los gráficos, tanto de HR como de Temperatura.

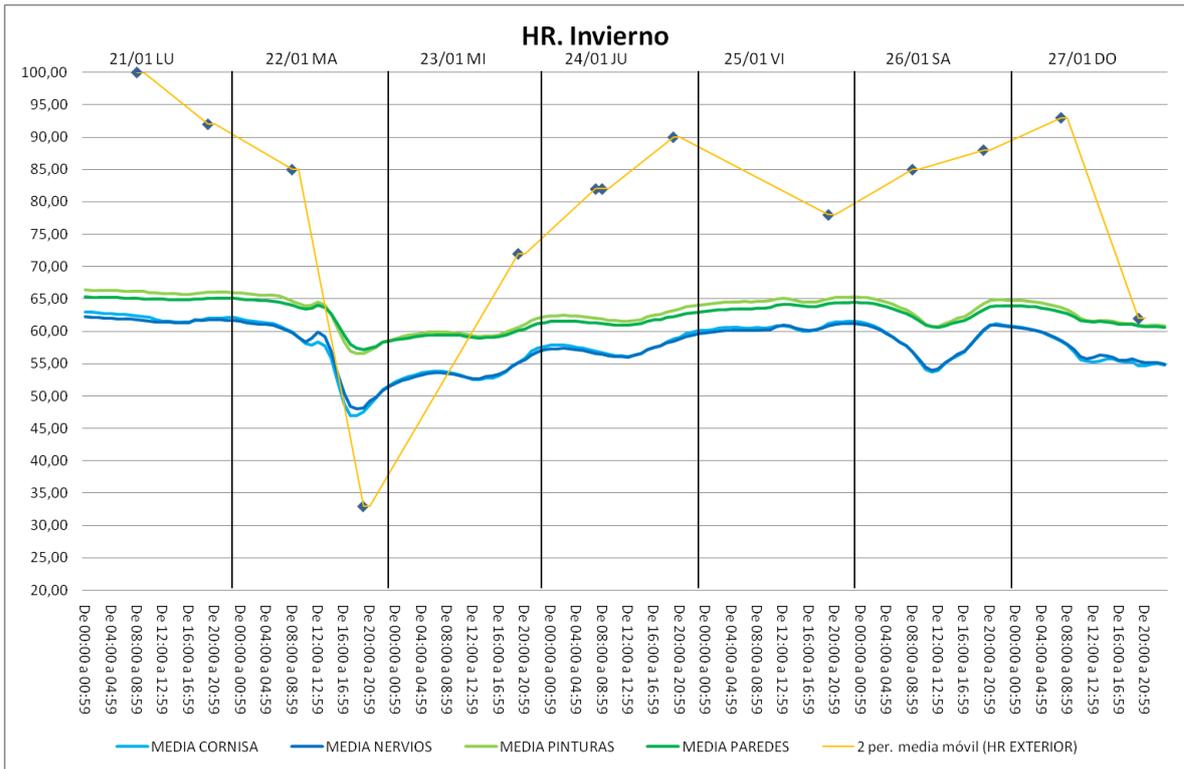


Figura 4.8: Variación HR horaria. Semana de invierno.

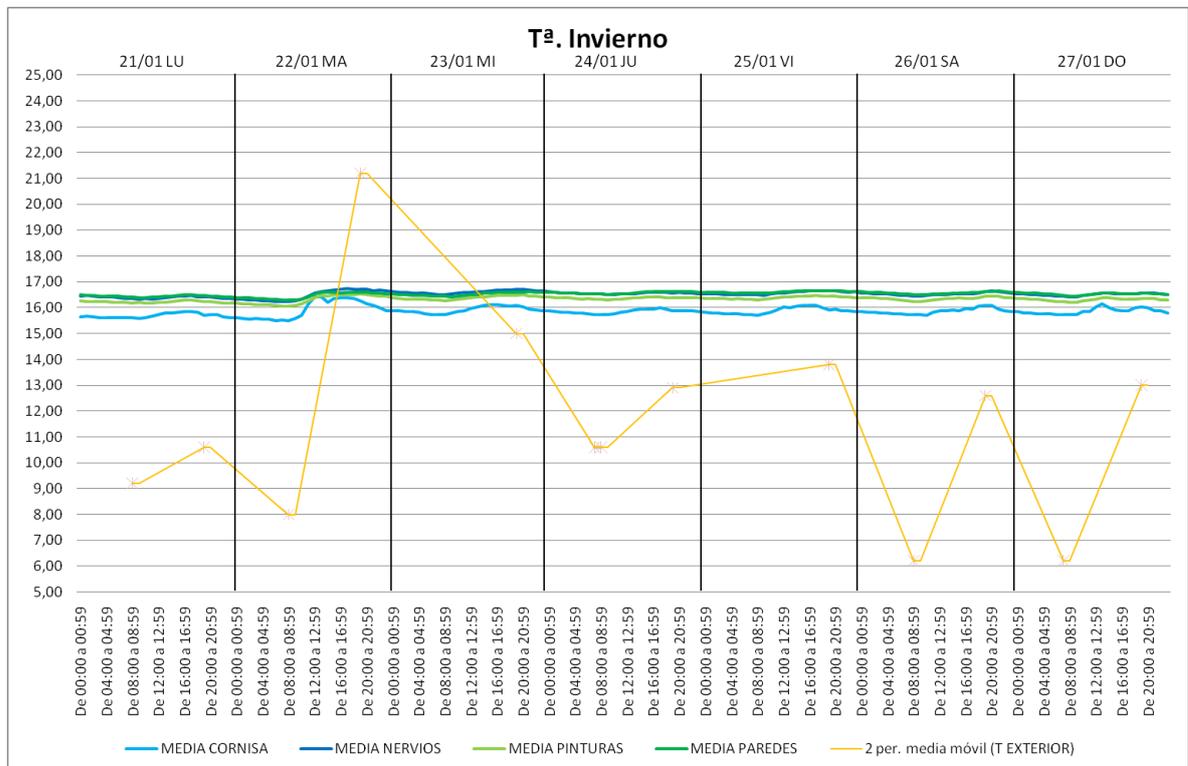


Figura 4.9: Variación Tª horaria. Semana de invierno.

Si analizamos los datos de la gráfica para HR, vemos que la humedad en el interior de la Catedral es mucho más constante que en el exterior, adoptando un valor medio de las marcadas variaciones externas. Además, estas variaciones externas tienen su reflejo en el interior del templo, como puede apreciarse claramente el martes día 22 de enero, en el que una caída vespertina de la HR externa produce una caída interna, pero mucho menos marcada, como corresponde al efecto “colchón” de los gruesos muros del edificio.

En cuanto a la distribución diaria de la HR en el interior, parece haber una tendencia a incrementarse por la noche y disminuir en las horas centrales del día, como apuntamos antes, pero esta tendencia es muy ligera y habrá que confirmarla a lo largo del año.

En cuanto a la T^a, se mantiene prácticamente constante a lo largo de todo el día y en las distintas líneas de sensores, dando un valor ligeramente inferior del aire de la cornisa. Aquí se aprecia claramente el efecto amortiguador de los muros respecto del exterior.

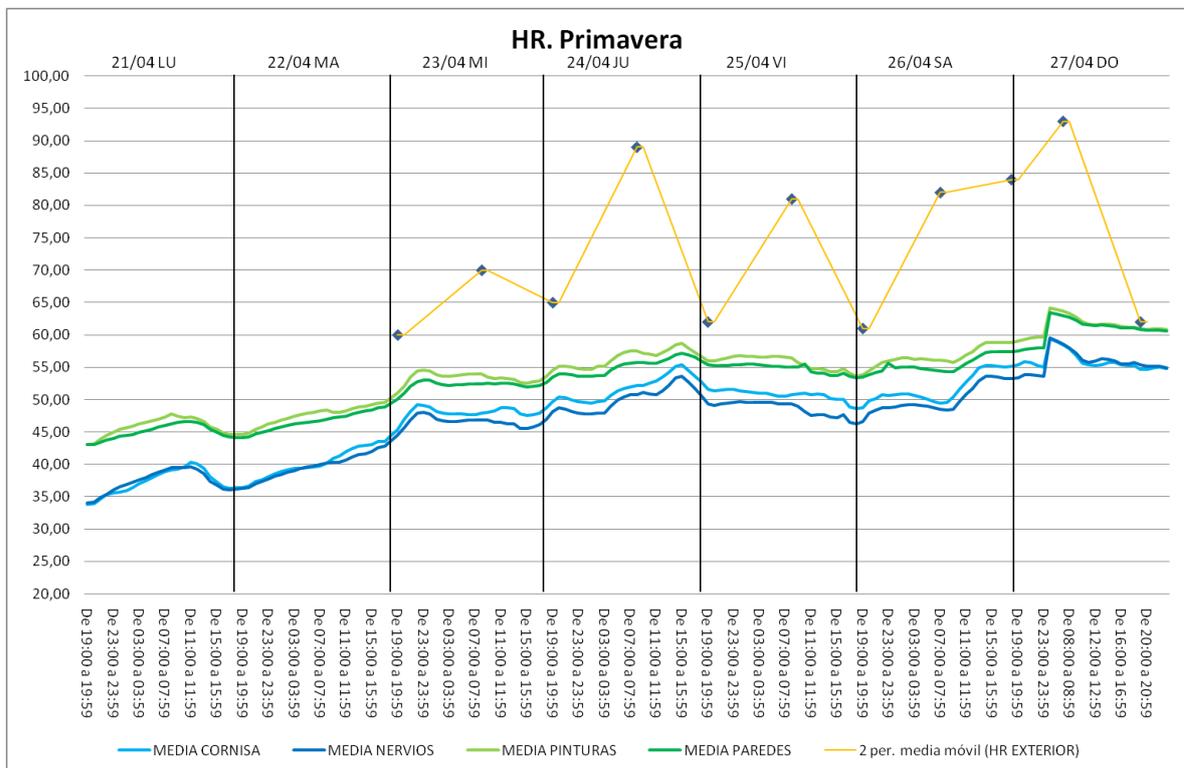


Figura 4.10: Variación HR horaria. Semana de primavera.

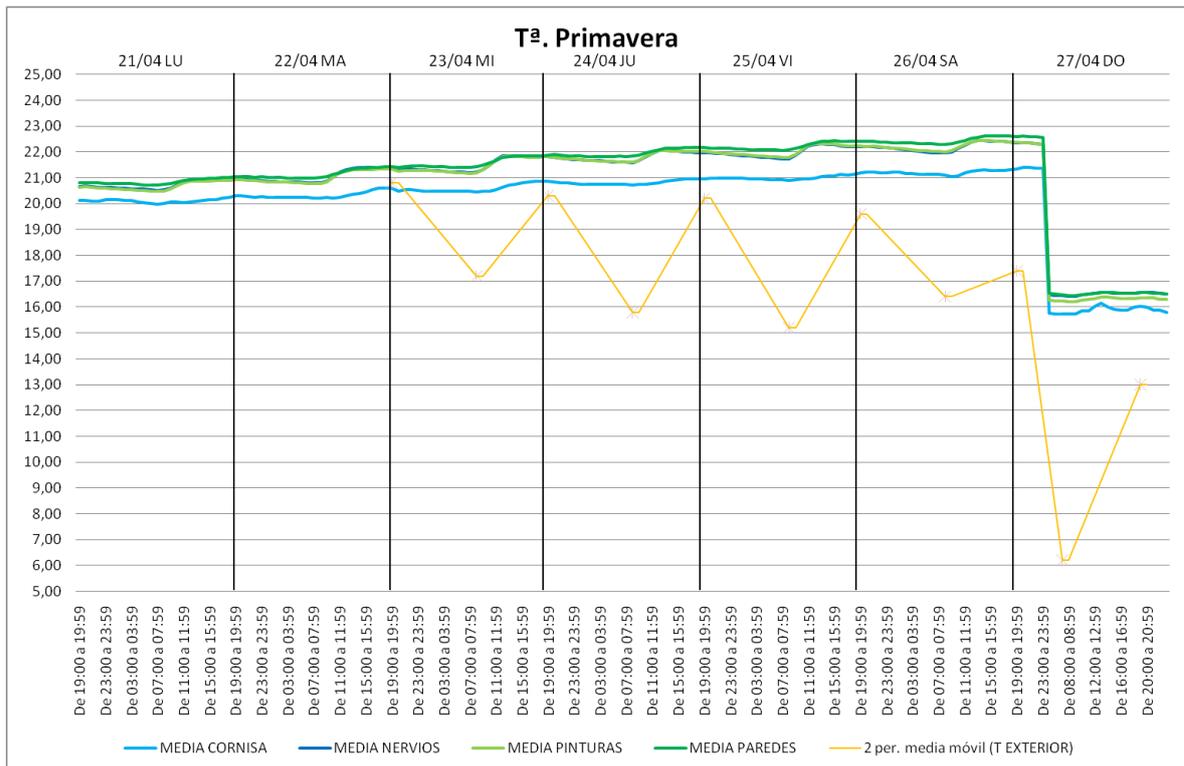


Figura 4.11: Variación Tª horaria. Semana de primavera.

En primavera, se observa el mismo patrón de amortiguación de las variaciones de HR externas. Vemos que variaciones diarias de hasta un 20% en la humedad, apenas producen cambios en el interior. Cuando estas variaciones son del 30% o superiores sí que producen variaciones en el interior, pero siempre suavizadas.

En cuanto a la hipotética tendencia de aumentar durante la noche y disminuir por el día, no se aprecia en ninguno de los días.

Algo similar podría decirse de las temperaturas; en este caso el aislamiento térmico de los muros parece funcionar mejor ya que la temperatura en el interior es prácticamente constante. Es necesaria una brusca variación de temperatura en el exterior (más de 10 °C en un día) para que influya en el interior, como puede apreciarse claramente el día 27 de abril.

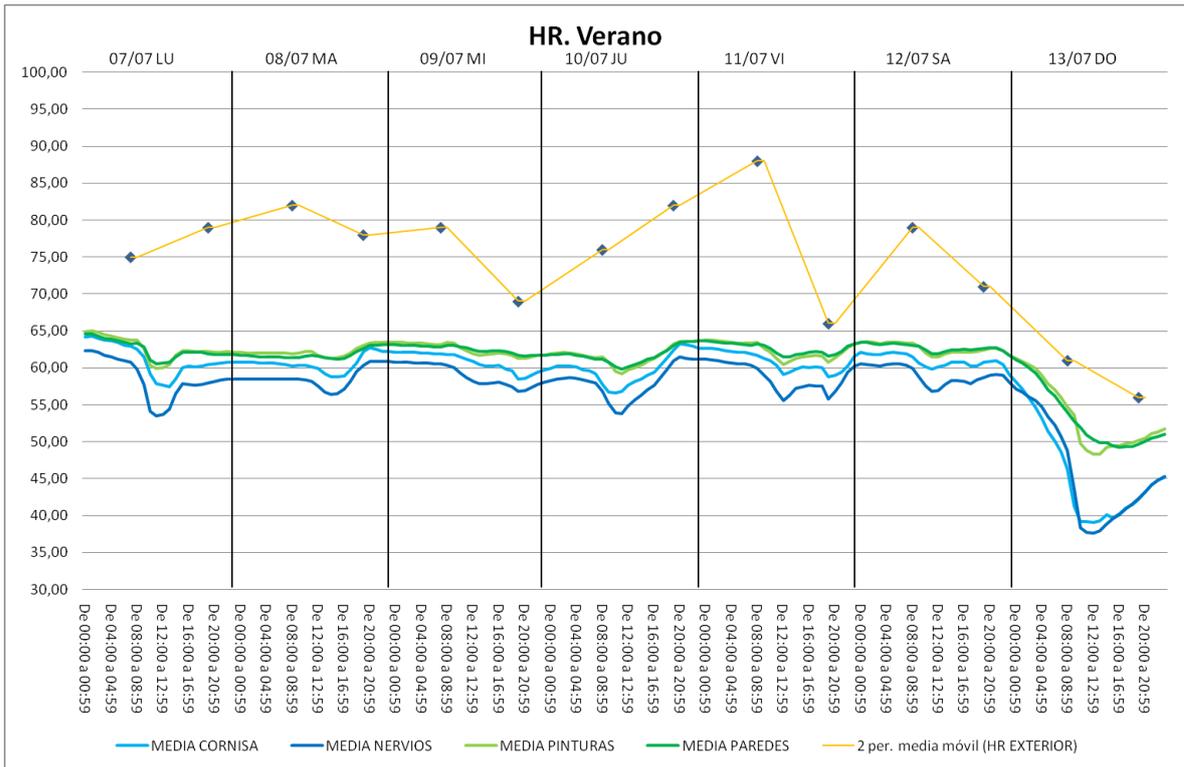


Figura 4.12: Variación HR horaria. Semana de verano.

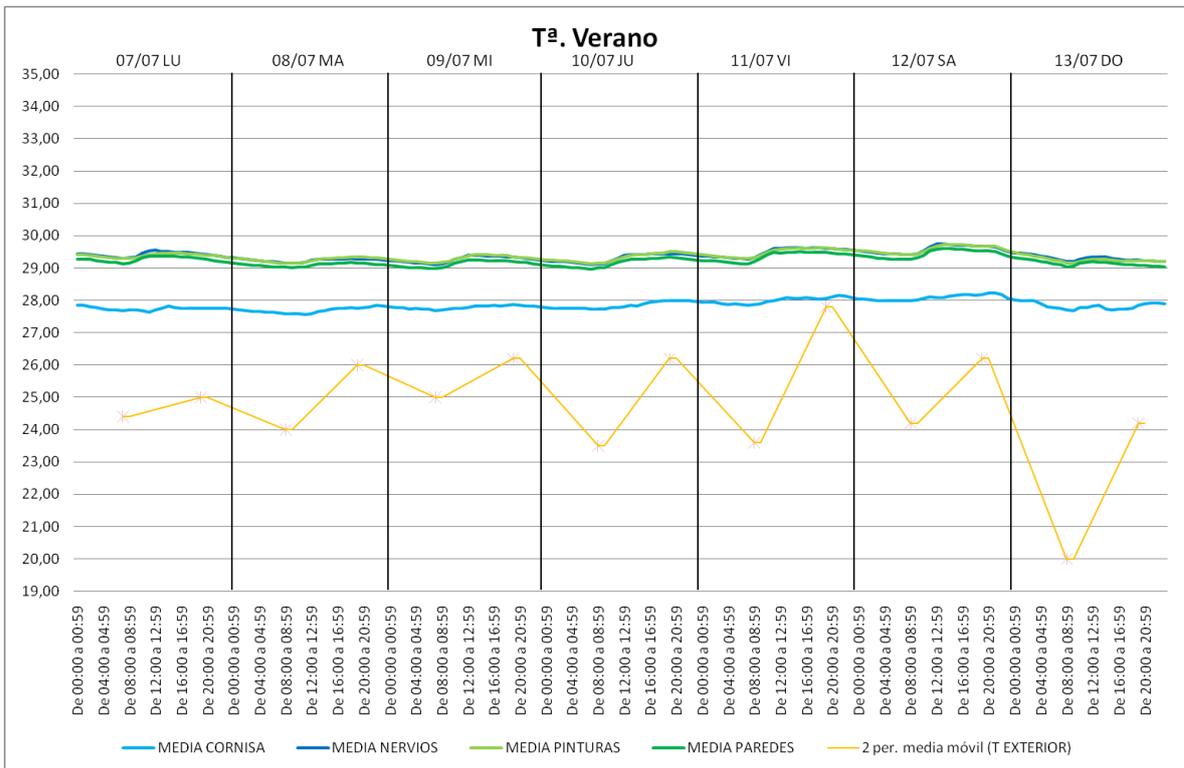


Figura 4.13: Variación Tª horaria. Semana de verano.

Tanto en HR como en T^a se mantiene el mismo patrón que describíamos para primavera e invierno. Quizá destacar que en humedad relativa se aprecia ligeramente la tendencia diaria de disminuir durante las horas centrales del día.

Destaca en el gráfico de T^a cómo se desmarca la línea del aire a nivel de la cornisa, marcando valores 1,5 °C por debajo del resto de las líneas. Veremos este fenómeno con un poco más de detalle en apartados siguientes.

Remarcar también que la T^a a la que se encuentran los frescos es superior a 29 °C, lo que puede favorecer, en principio, el crecimiento de microorganismos perjudiciales para los frescos.

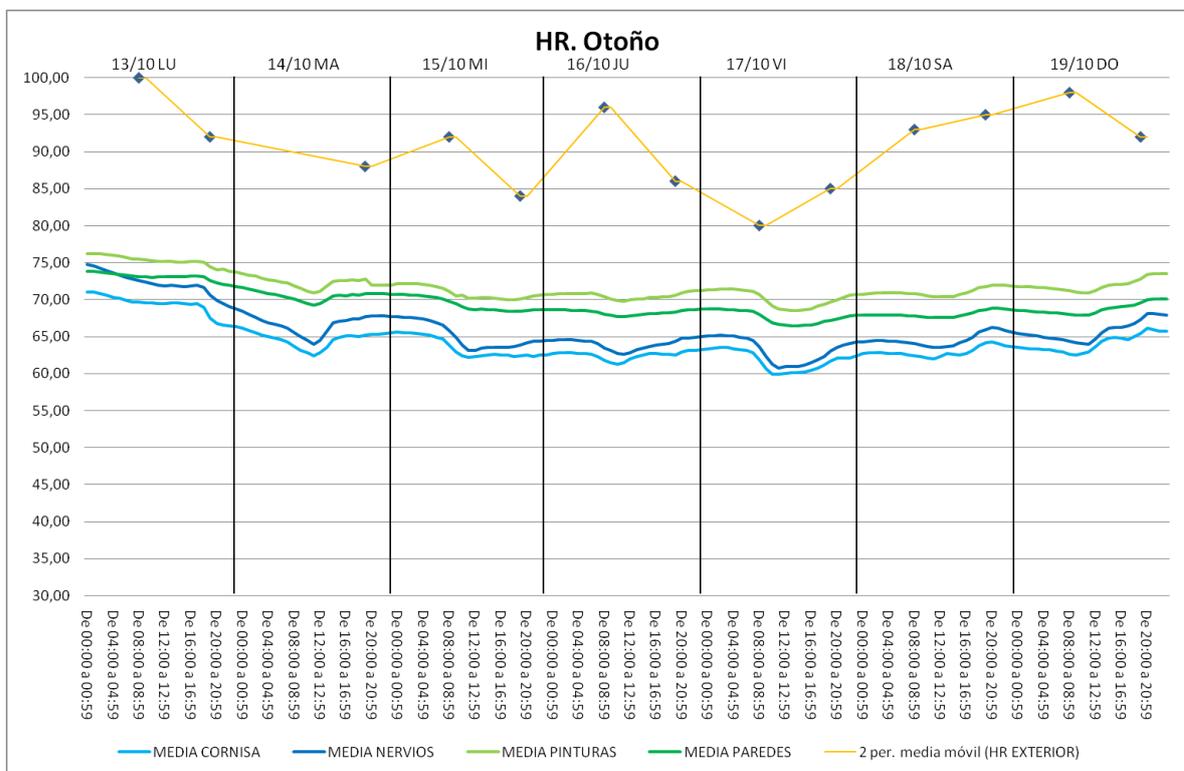


Figura 4.14: Variación HR horaria. Semana de otoño.

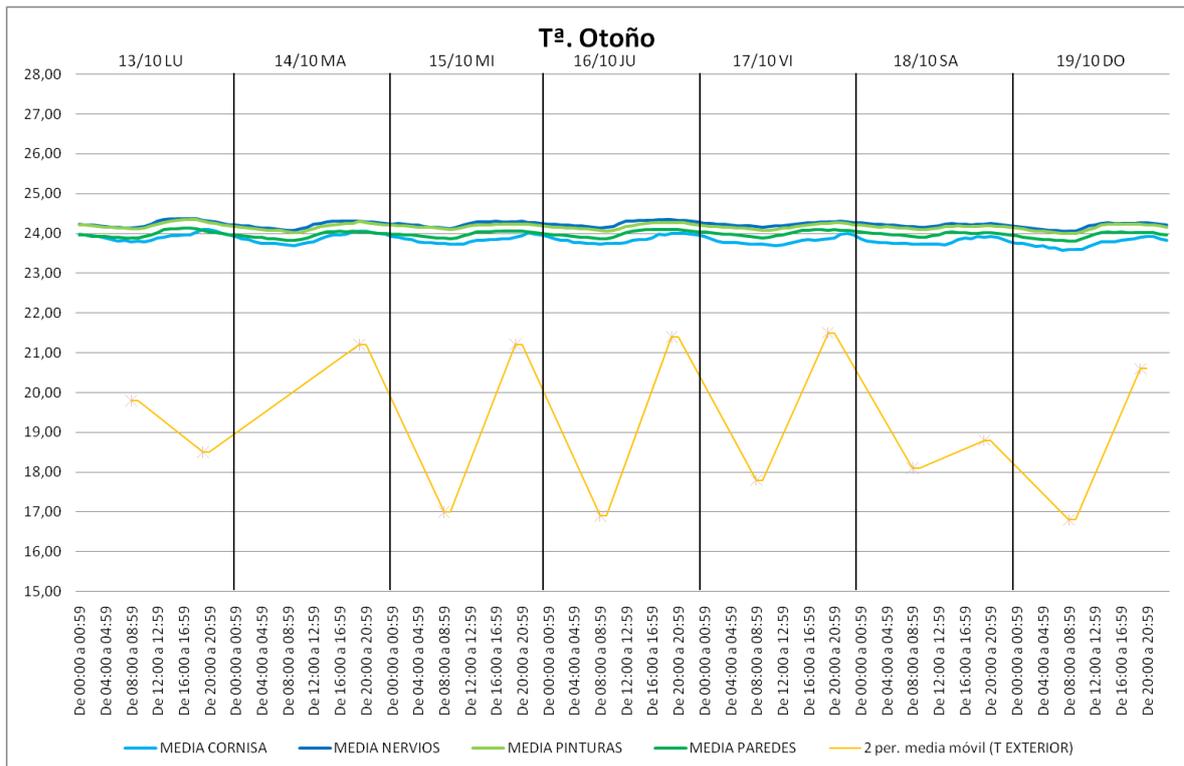


Figura 4.15: Variación Tª horaria. Semana de otoño.

Nada nuevo que añadir a lo dicho en cuanto a los gráficos de otoño.

A continuación vamos a poner los datos más relevantes en una tabla que nos muestre el valor medio, el mínimo y el máximo para cada parámetro en cada estación del año. También vamos a apuntar la distancia relativa que hay entre cada línea para tratar de sacar conclusiones.

Las tablas resultantes pueden consultarse en las siguientes páginas:

	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR PAREDES	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR PAREDES	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR PAREDES	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR PAREDES
	Invierno				Primavera				Verano				Otoño			
HR Mínima	46,91	48,06	56,57	57,18	33,86	34,10	43,10	43,00	39,06	37,65	48,29	49,26	59,88	60,73	68,50	66,44
HR Media	57,92	57,86	63,03	62,41	47,96	46,89	53,87	52,87	58,54	56,82	61,03	60,99	64,09	65,92	71,72	69,37
HR Máxima	63,03	62,28	66,39	65,30	59,44	59,49	64,21	63,47	64,33	62,33	65,01	64,61	71,02	74,80	76,25	73,81
Distancia entre líneas	0,06	0,00	5,17	4,55	1,07	0,00	6,98	5,98	1,72	0,00	4,20	4,17	0,00	1,83	7,63	5,28

Tabla 4.4: Valores de medias horarias de HR.

	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR PAREDES	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR PAREDES	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR PAREDES	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR PAREDES
	Invierno				Primavera				Verano				Otoño			
T Mínima	15,49	16,23	16,07	16,30	15,73	16,40	16,20	16,45	27,57	29,11	29,14	28,97	23,58	24,06	23,99	23,81
T Media	15,86	16,52	16,33	16,53	20,14	20,98	20,96	21,13	27,85	29,37	29,37	29,23	23,84	24,23	24,17	23,98
T Máxima	16,42	16,73	16,53	16,66	21,39	22,44	22,45	22,62	28,23	29,76	29,72	29,60	24,11	24,37	24,35	24,13
Distancia entre líneas	0,00	0,67	0,48	0,67	0,00	0,84	0,81	0,98	0,00	1,52	1,52	1,37	0,00	0,39	0,34	0,14

Tabla 4.5: Valores de medias horarias en T^a.

De la observación de estos datos podemos sacar las siguientes conclusiones:

En humedad relativa:

- No aparece de forma clara la hipotética tendencia de que la HR aumente por la noche y disminuya durante el día por el efecto de la T^a . Sí se produce esta tendencia los días en que la HR exterior se mantiene constante, pero de forma muy suave. Predomina claramente el efecto de la variación de la HR exterior, que se ve reflejada de forma amortiguada en el interior del templo.
- Cambios suaves o moderados de HR exterior no producen apenas efecto en el interior. Cambios severos o muy severos en el exterior producen cambios suaves o moderados en el interior. Claramente se aprecia el efecto amortiguador de los elementos constructivos.
- Se observó que la HR del interior no guarda una relación lineal con el paso de las estaciones y por tanto, con la T^a . Así, la humedad más elevada se observó en otoño, seguida del invierno, luego el verano y por último la primavera, lo cual no indica ningún patrón de estacionalidad. Dado que la Catedral no cuenta con ningún sistema de climatización, las variaciones de HR del interior son producidas por las variaciones del exterior y éstas se producen, en Valencia, por la orientación de los vientos predominantes como componente fundamental (vientos de levante producen incrementos de la humedad, vientos de poniente producen descensos acusados de la humedad).
- Se observa claramente que los sensores colocados en el interior de los elementos constructivos (paredes y bóveda con las pinturas) marcan humedades relativas más elevadas que los sensores que miden la HR del aire. Además, los sensores del interior de las pinturas son los que más altas medidas producen a lo largo de todo el año. Parece haber, por tanto, un aporte de humedad de los elementos constructivos de la bóveda.

En cuanto a la T^a :

- La diferencia de T^a entre el día y la noche en el interior del templo, no aparece en nuestras observaciones, manteniéndose en valores casi constantes.
- Se aprecia de forma clara el efecto estacional con temperaturas en el interior mucho más altas en verano (media de casi 30 °C) que en invierno (media de 16 °C). Las altas temperaturas estivales en el interior, unidas a elevadas humedades, son propicias para el desarrollo de microorganismos perjudiciales para la conservación de los frescos.

- A excepción de la época estival, en la que se aprecia un temperatura de 1,5 °C de media inferior en la línea de sensores del aire de la cornisa respecto al resto de líneas de sensores, la T^a se mantiene en los mismos valores en todas las líneas de sensores, a lo largo de todo el año.
- Salvo que se produzcan variaciones muy severas de la T^a exterior (al menos 10 °C de variación en un día), las T^a en el interior se mantienen prácticamente constantes. Aquí se observa claramente el efecto aislante de los muros del templo. Estos muros son mejores aislantes térmicos que higroscópicos.

Variaciones a lo largo del año de las condiciones microclimáticas.

Trataremos ahora de establecer patrones de comportamiento del microclima de la bóveda a lo largo de todo el año. Para ello vamos a estudiar los datos por trimestres, a lo largo de todo el año 2008. Los trimestres naturales coinciden de forma muy aproximada con las estaciones del año, lo que nos permitirá también extraer conclusiones respecto a la variación estacional de HR y T.

Empezaremos por el primer trimestre, que coincide con invierno. Vemos las gráficas a continuación:

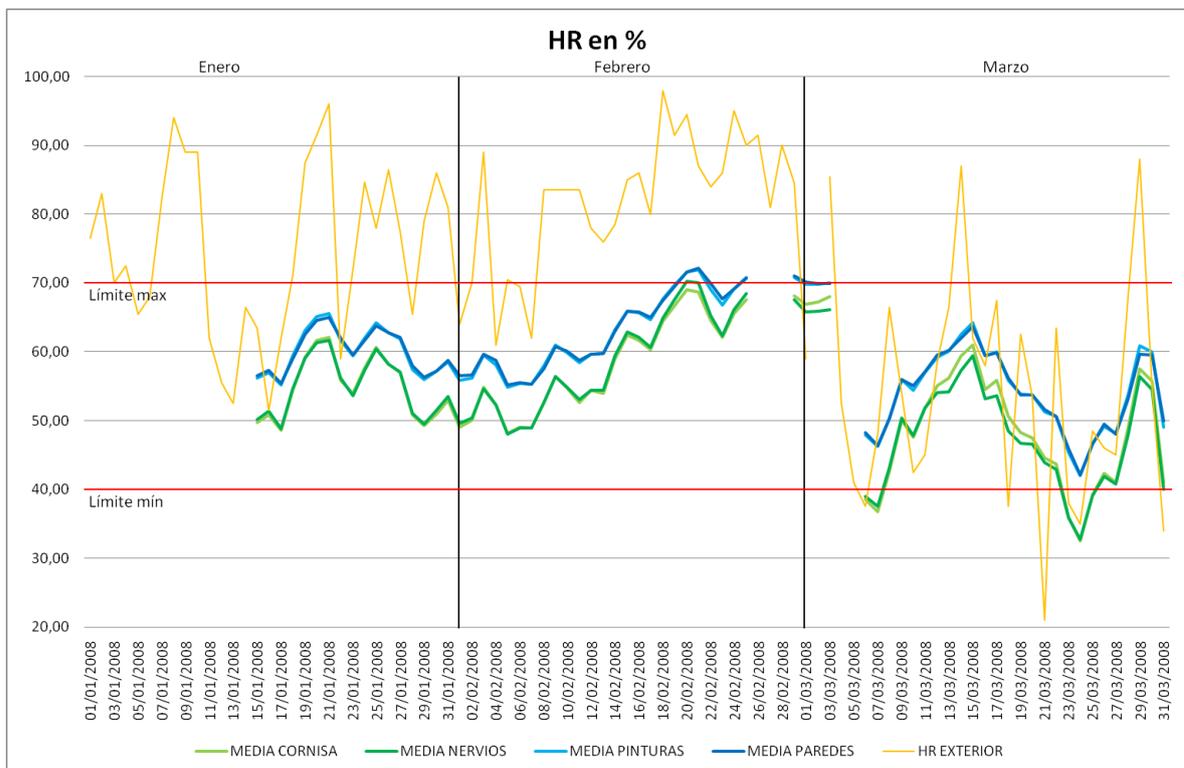


Figura 4.16: Media diaria HR. Primer trimestre 2008.

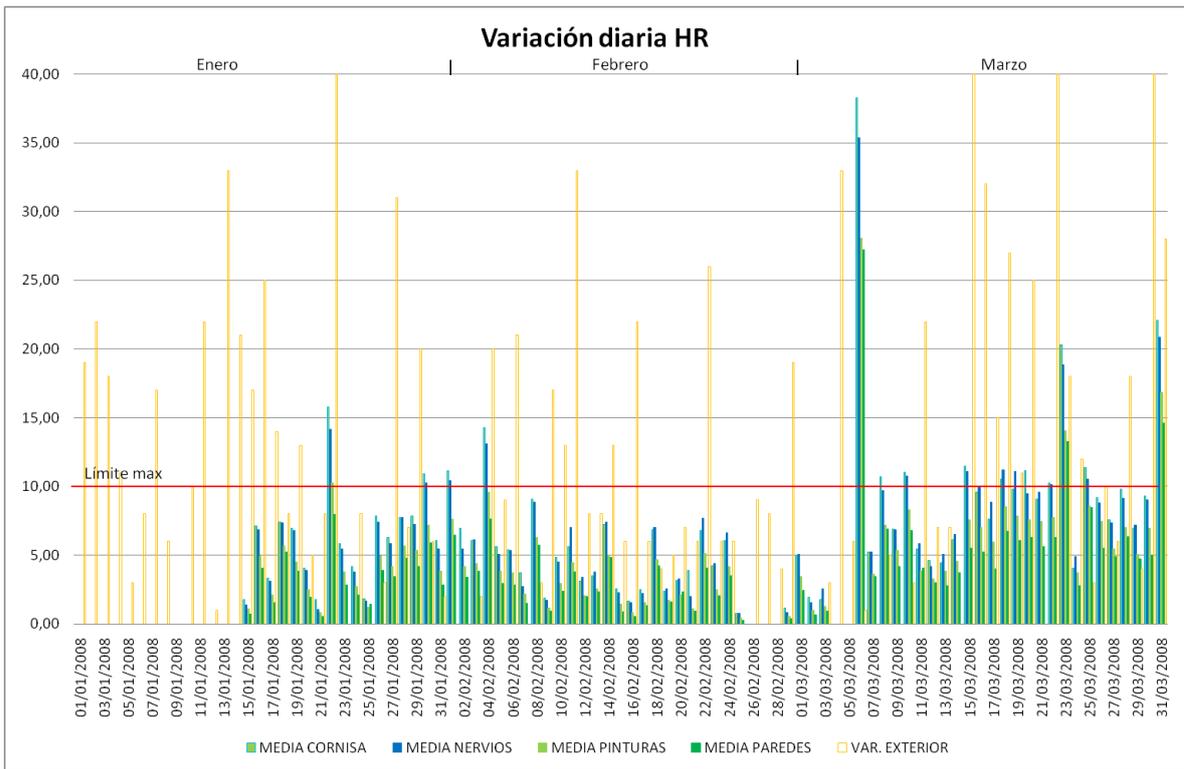


Figura 4.17: Variación diaria HR. Primer trimestre.

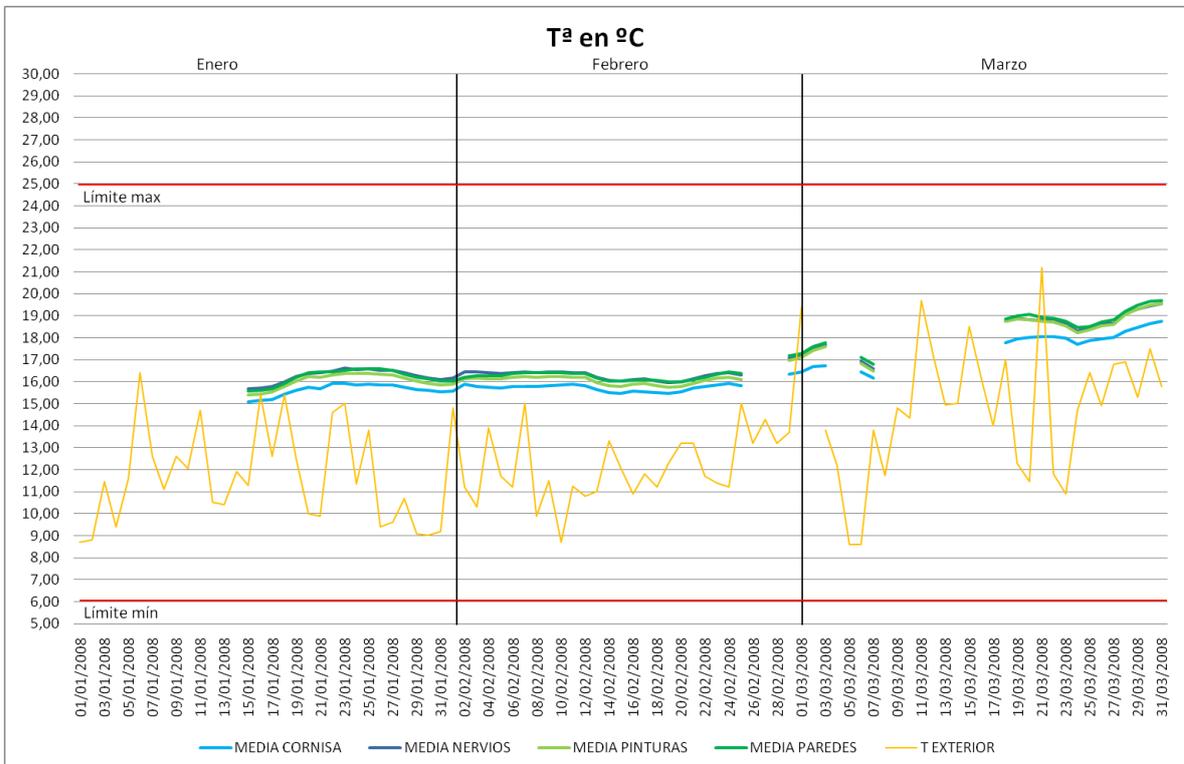


Figura 4.18: Media diaria Tª. Primer trimestre 2008.

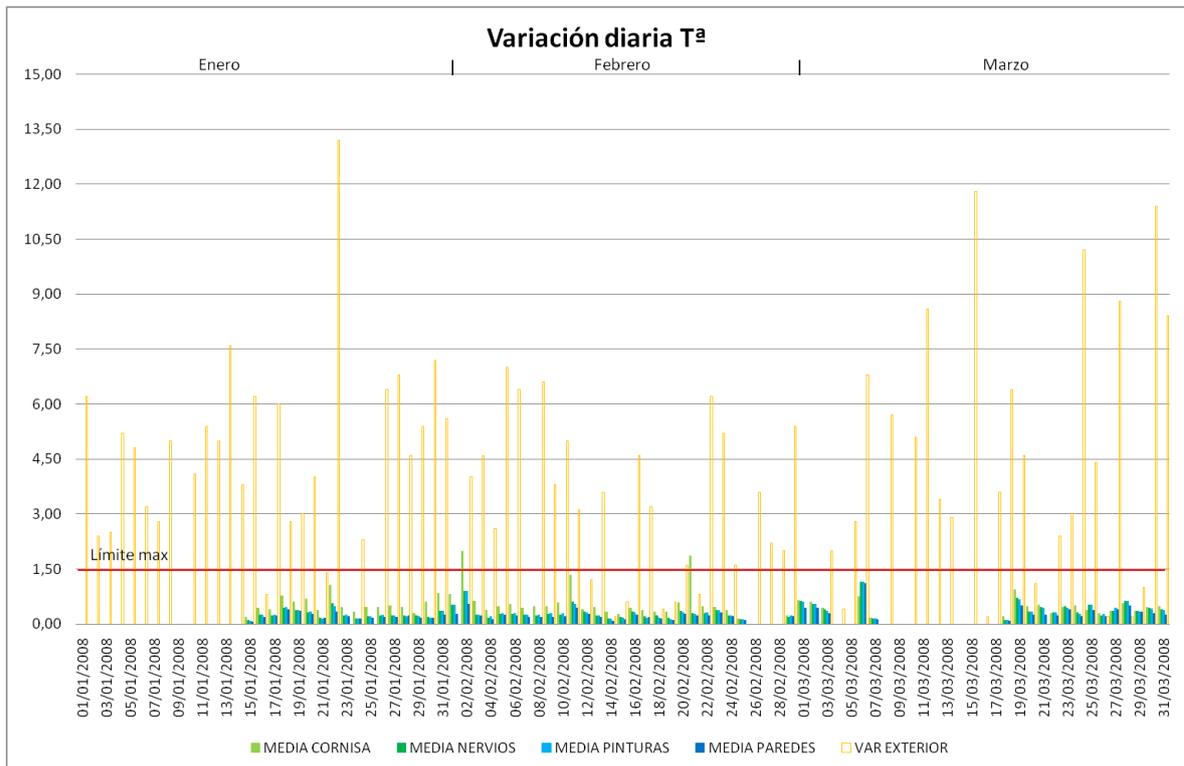


Figura 4.19: Variación diaria Tª. Primer trimestre.

Datos de HR, primer trimestre:

	EXTERIOR	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR MUROS
Media	70.24	54.05	53.87	59.28	59.35
Mínima	21.00	32.56	32.76	41.96	45.78
Máxima	98.00	69.02	70.23	71.93	72.76
HR > 70% *	51	0	3	7	7
HR < 40% *	7	7	7	0	0
Distancia entre líneas (medias)	--	+0.18	0	+5.41	+5.48
Var. media	12.87	7.20	6.96	5.06	4.26
Var. mínima	0.00	0.74	0.74	0.41	0.23
Var. máxima	72.00	38.26	35.36	28.04	27.23
Var. HR > 5% *	69	64	67	40	29
Var. HR > 10%*	42	19	18	6	4

Datos de T^a, primer trimestre:

	EXTERIOR	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR MUROS
Media	12.88	16.38	16.95	16.77	16.96
Mínima	8.60	15.10	15.67	15.40	15.57
Máxima	21.20	18.75	19.55	19.57	19.68
T > 25 °C *	0	0	0	0	0
T < 6 °C *	0	0	0	0	0
Distancia entre líneas (medias)	--	0	+0.57	+0.39	+0.58
Var. media	3.72	0.53	0.32	0.32	0.25
Var. mínima	0.00	0.14	0.09	0.08	0.05
Var. máxima	13.20	1.98	1.15	1.14	1.10
Var.T ^a >1.5°C *		3	0	0	0

Respecto a la HR, observamos que la mayoría de las veces se mantiene entre los límites máximo y mínimo que fijamos como patrón de idoneidad para la conservación, si bien es cierto que se supera el límite máximo un 3% de las veces en el aire a la altura de los nervios y un 7% de las veces en el interior de las pinturas y en el interior de los muros. No parece problemática esta superación de los límites, porque se produce en muy pocas ocasiones y además, la temperatura en las fechas en las que se producen estos incrementos (entre el 18/02 y el 3/03 según la Figura 4.16) no alcanza los 20 °C. Recordemos que, para que se produzcan condiciones favorables para el crecimiento de agentes biológicos patógenos, debe de superarse el 70% de HR y la T^a ser mayor de 20 °C.

En cuanto a los límites inferiores de HR, no se superan en ningún momento en el interior de las pinturas y en el interior de los muros, aunque sí lo hace en un 7% de las veces en el aire.

En cuanto a la variación de HR diaria, sí que se detectan bruscas variaciones que pueden influir negativamente en los materiales sobre los que se asientan los frescos. En la tabla de la página anterior y en la Figura 4.17, se observa la fuerte variación diaria del aire a la altura de la cornisa y de los nervios donde el 19% y el 18% de las veces se supera, respectivamente, la variación máxima diaria re-

comendada del 10%. Vemos sin embargo, que en los materiales donde se asientan las pinturas y en el interior de los muros, las variaciones son mucho más suaves (sólo se supera el 10% de variación diaria el 6% y el 4% de las veces, respectivamente), lo que corrobora el efecto “colchón” que tienen los muros sobre las variaciones bruscas de humedad relativa. Este efecto de amortiguación es, sin duda, positivo para conseguir una HR lo más constante posible.

Llama poderosamente la atención las bruscas caídas de la HR en el interior los días 6 y 23 de marzo, ya que se aprecia un descenso paralelo a la caída de la HR del exterior del templo. Parece como si esos días el aire del exterior hubiera penetrado en el interior y el efecto amortiguador de los elementos constructivos no hubiese funcionado en absoluto.

Estas caídas bruscas pueden ser resultado de una apertura de puertas y/o ventanas durante largos períodos de tiempo que hayan propiciado la renovación del aire del interior de la catedral y que estamos estudiando.

Respecto a la T^a, durante este primer trimestre no se observan anomalías de ningún tipo, ya que la temperatura del interior se mantiene casi constante en torno a 19 °C de media con menos de medio grado de variación media, lo que asegura, respecto a este parámetro, unas condiciones óptimas de conservación.

La distancia entre líneas, en cuanto a la temperatura se refiere, es casi inexistente, lo que indica también un buen funcionamiento de los materiales constructivos, que se mantienen a la misma temperatura que el aire que los rodea.

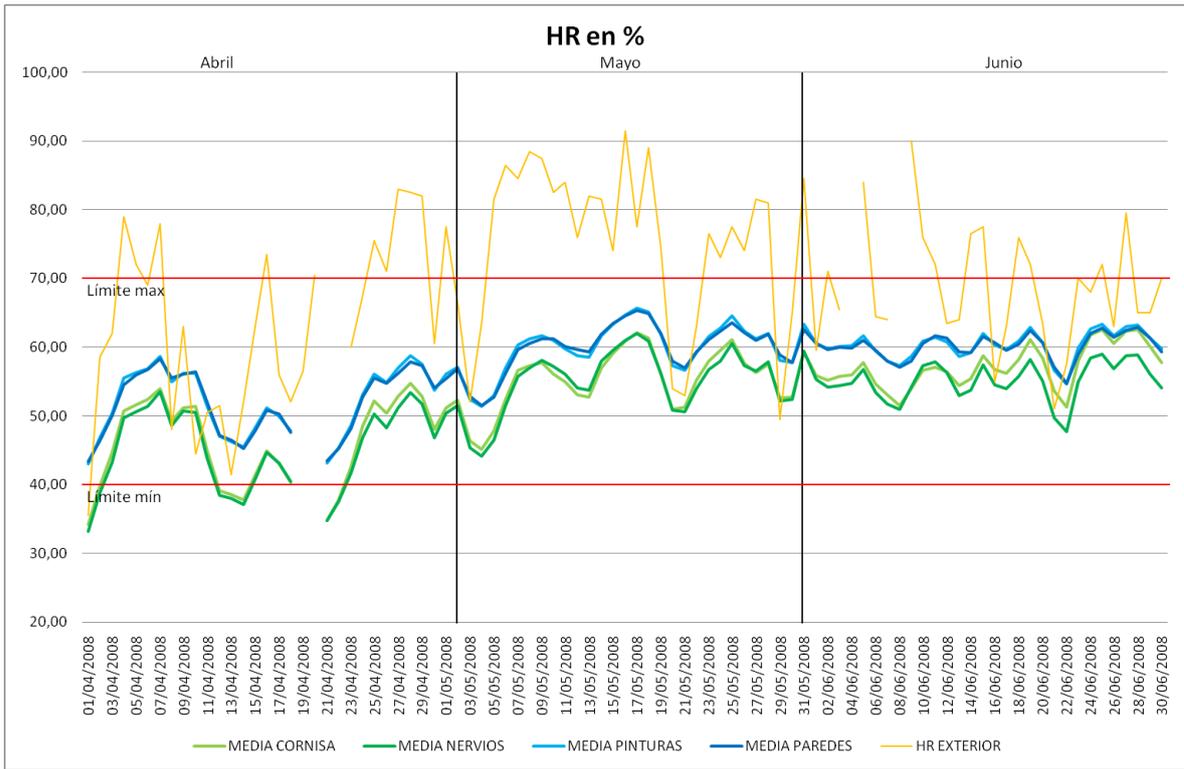


Figura 4.20: Media diaria HR. Segundo trimestre.

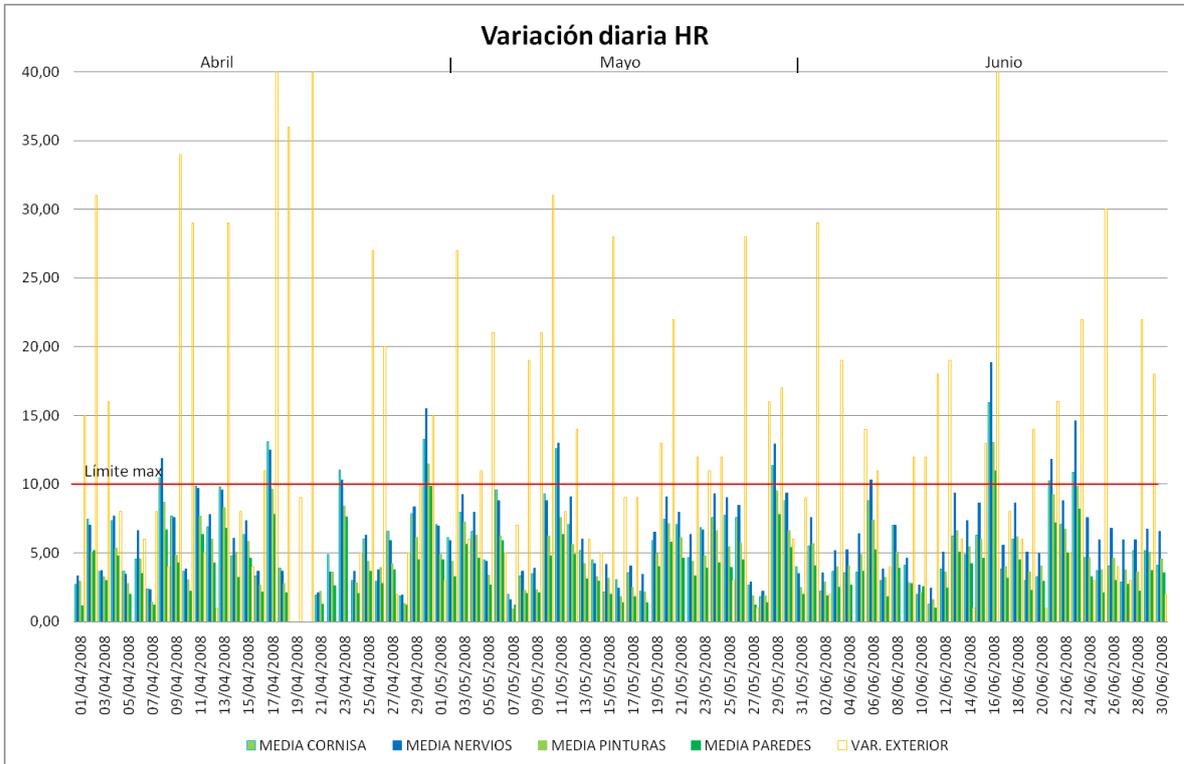


Figura 4.21: Variación diaria HR. Segundo trimestre.

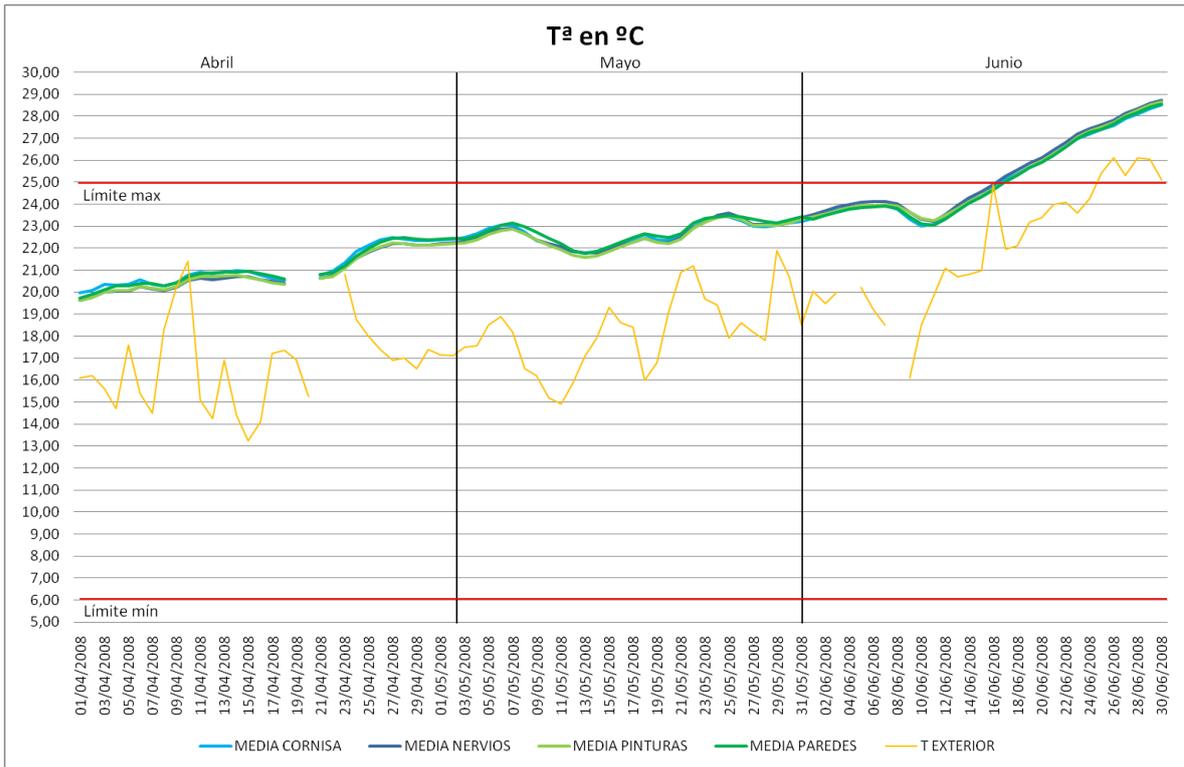


Figura 4.22: Media diaria Tª. Segundo trimestre.

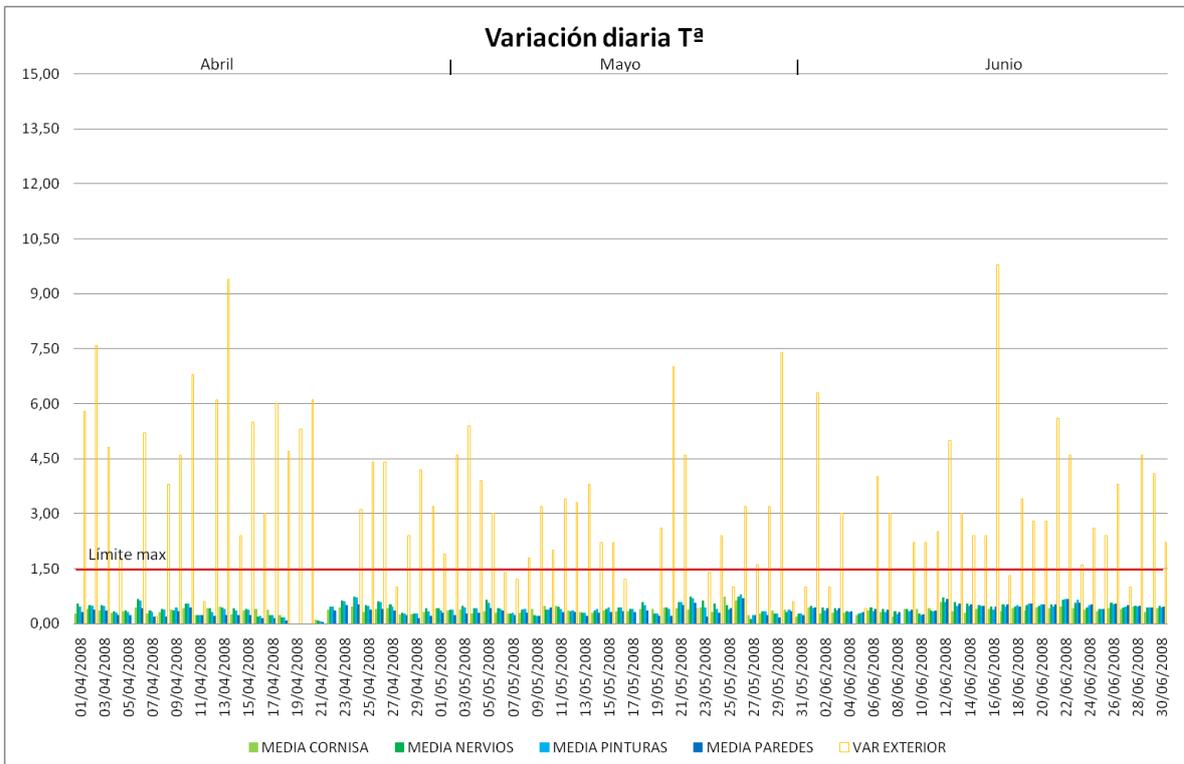


Figura 4.23: Variación diaria Tª. Segundo trimestre.

Datos de HR, segundo trimestre:

	EXTERIOR	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR MUROS
Media	69.08	52.91	51.87	57.49	57.35
Mínima	35.50	34.23	33.13	42.96	43.34
Máxima	91.50	62.56	61.98	65.63	65.31
HR > 70% *	51	0	0	0	0
HR < 40% *	1	8	8	0	0
Distancia entre líneas (medias)	--	+1.04	0	+5.62	+5.48
Var. media	13.53	5.73	6.67	4.86	3.77
Var. mínima	0.00	1.28	1.61	0.92	0.98
Var. máxima	50.00	15.94	18.82	13.03	10.96
Var. HR > 5% *	71	49	66	42	20
Var. HR > 10%*	52	10	11	2	1

Datos de T^a, segundo trimestre:

	EXTERIOR	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR MUROS
Media	18.97	22.02	22.98	22.93	23.03
Mínima	13.25	18.79	19.62	19.63	19.73
Máxima	26.10	26.86	28.74	28.67	28.57
T > 25 °C *	7	10	16	16	16
T < 6 °C *	0	0	0	0	0
Distancia entre líneas (medias)	--	0	+0.96	+0.91	+1.01
Var. media	3.26	0.35	0.42	0.40	0.34
Var. mínima	0.00	0.10	0.08	0.06	0.04
Var. máxima	9.80	0.72	0.73	0.79	0.69
Var. T ^a > 1.5°C *	78	0	0	0	0

En cuanto a la HR, en este segundo trimestre se observa unos niveles sensiblemente inferiores al primer trimestre de tal modo que nunca se supera la HR máxima del 70% y se baja por debajo del 40% en muy pocas ocasiones y nunca en el interior de muros y bóveda.

También se aprecia que las variaciones son menores, sin caídas bruscas como en el primer trimestre, siendo superiores al 10 % en menos del 3% de las veces tanto en muros como en el interior de la bóveda.

Son, por tanto, condiciones favorables para la conservación de los frescos.

Nuevamente, la HR en el interior de muros y pinturas es superior en más de un 5% al aire que las envuelve, como en el trimestre anterior.

Respecto a la T^a, se observa un paulatino incremento conforme las fechas se acercan al verano, llegando a superar los 25 °C de media a partir del 18 de junio, de forma constante. Aquí se aprecia el efecto “calefactor” de los muros que, hace que durante todo el año, las temperaturas sean superiores en el interior del templo a la altura de la bóveda, que en el exterior.

Esto produce el efecto indeseable de crear condiciones favorables para el crecimiento de organismos patógenos que pueden deteriorar, con el tiempo, los frescos. Si bien es cierto que la situación no es preocupante porque la HR del interior es inferior al 70% todos los días, sí que supone una cuestión a tener en cuenta ya que, si se produjera una entrada de aire del exterior (por apertura de puertas para afluencia de público por ejemplo), mucho más húmedo, se darían las condiciones idóneas para la proliferación de microorganismos.

Las variaciones de T^a son muy suaves y nunca se supera los 1,5 °C de variación diaria.

La distancia entre líneas es prácticamente nula, a excepción del aire a la altura de la cornisa que es casi 1 °C inferior al resto de líneas, quizá por el efecto de ascenso del aire caliente.

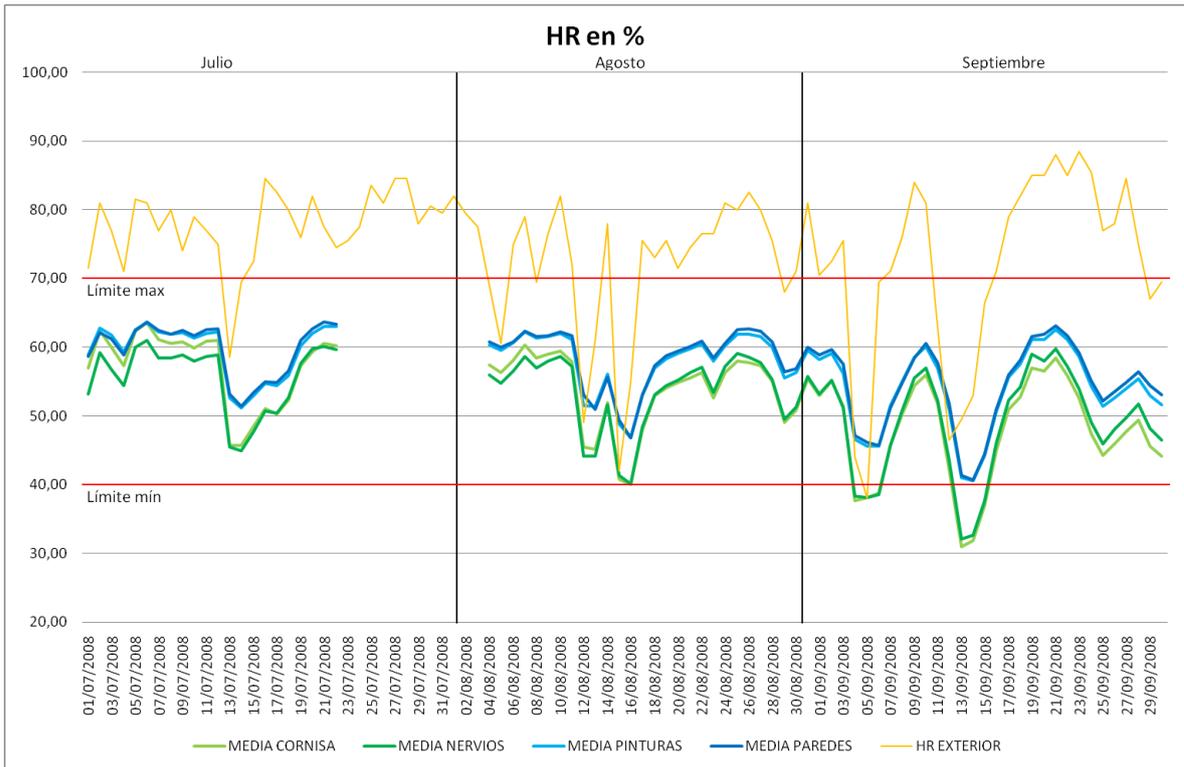


Figura 4.24: Media diaria HR. Tercer trimestre.

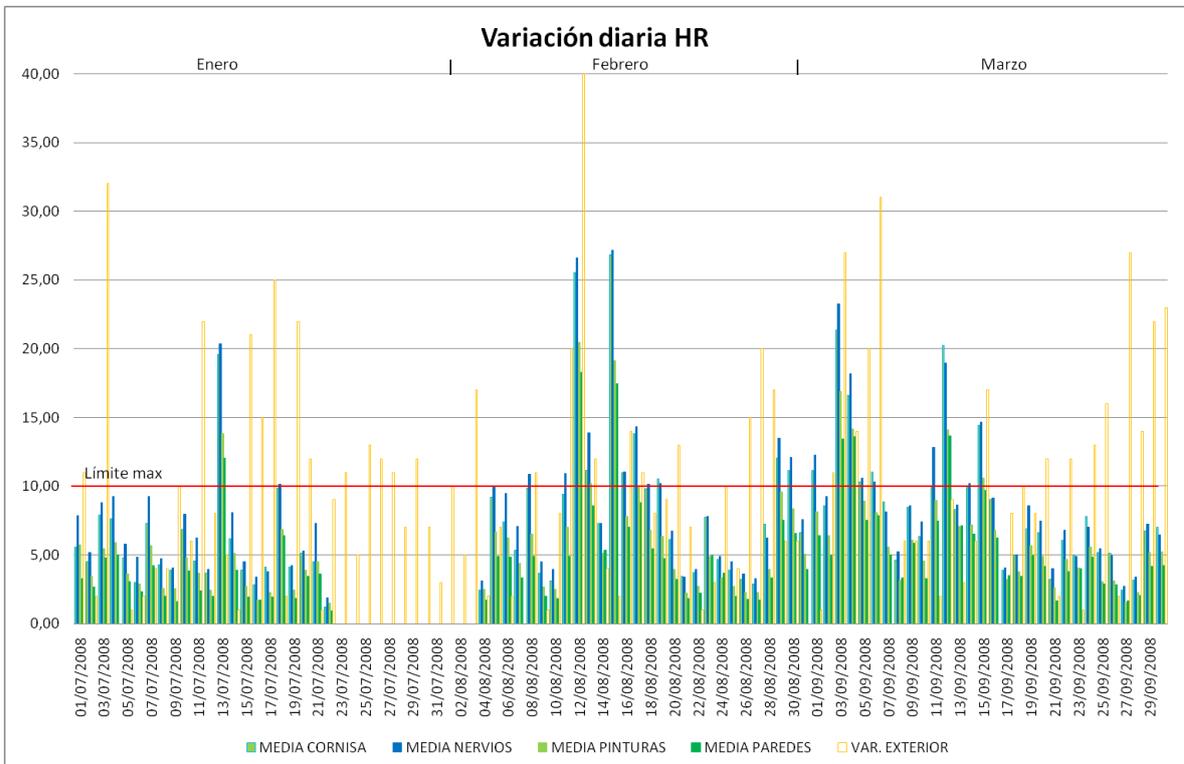


Figura 4.25: Variación diaria HR. Tercer trimestre.

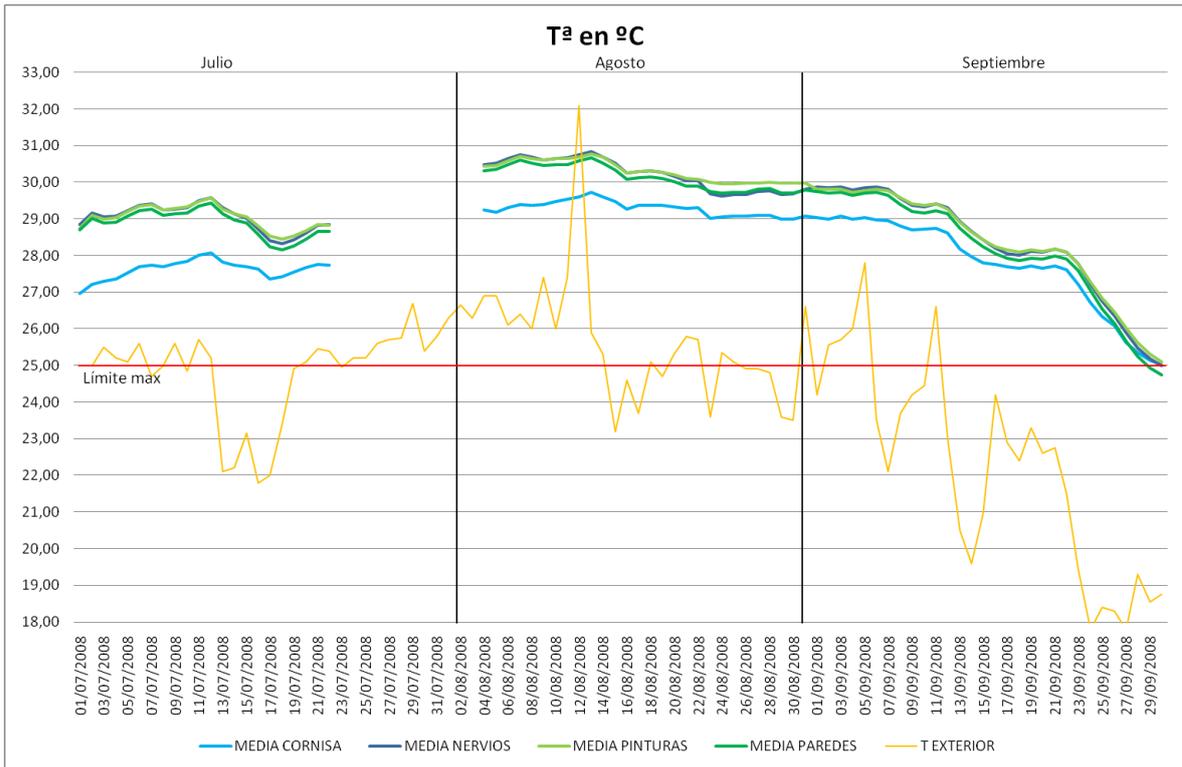


Figura 4.26: Media diaria Tª. Tercer trimestre.

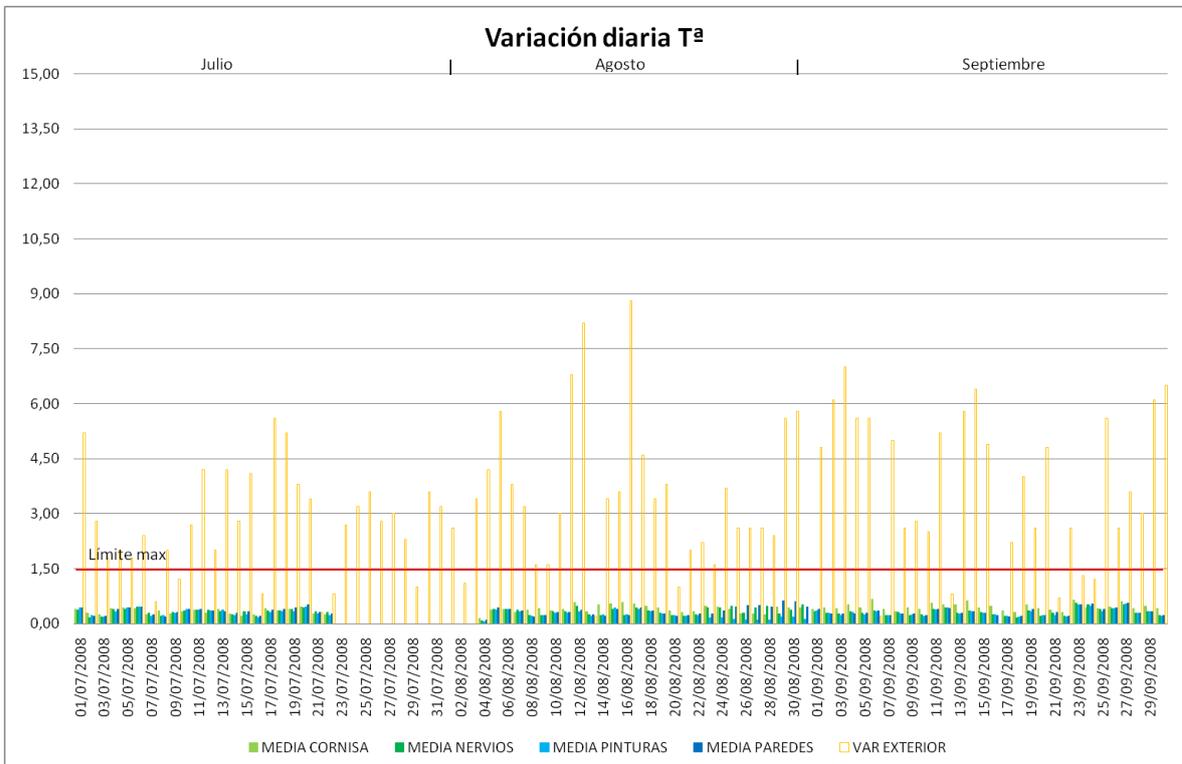


Figura 4.27: Variación diaria Tª. Tercer trimestre.

Datos de HR, tercer trimestre:

	EXTERIOR	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR MUROS
Media	74.10	52.36	52.32	56.83	57.25
Mínima	38.00	30.92	32.07	40.54	40.66
Máxima	88.50	63.54	60.95	63.61	63.68
HR > 70% *	78	0	0	0	0
HR < 40% *	1	9	8	0	0
Distancia entre líneas (medias)	--	+0.04	0	+4.51	+4.93
Var. media	9.98	7.72	8.37	5.75	4.89
Var. mínima	0.00	1.19	1.86	1.47	0.94
Var. máxima	48.00	26.83	27.16	20.44	18.29
Var. HR > 5% *	66	64	70	50	29
Var. HR > 10%*	41	21	28	10	8

Datos de T^a, tercer trimestre:

	EXTERIOR	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR MUROS
Media	24.24	28.25	29.17	29.21	29.02
Mínima	17.80	25.01	24.99	25.09	24.75
Máxima	32.10	29.72	30.84	30.78	30.66
T > 25 °C *	48	100	99	100	98
T < 6 °C *	0	0	0	0	
Distancia entre líneas (medias)	--	0	+0.92	+0.96	+0.77
Var. media	3.29	0.40	0.32	0.28	0.33
Var. mínima	0.00	0.14	0.07	0.06	0.09
Var. máxima	8.80	0.65	0.56	0.53	0.61
Var. T ^a > 1.5 °C *	0	0	0	0	0

En este tercer trimestre, la HR sigue en un nivel similar al anterior trimestre, con máximos que nunca alcanzar el 65%. Los mínimos en el interior de muros y bóveda también se mantienen siempre por encima del nivel mínimo del 40%, aunque el aire del interior sí que desciende por debajo de este límite en algo menos del 10% de los datos recogidos. Buenas condiciones, por tanto, para el mantenimiento de los frescos.

Sin embargo, respecto a las variaciones de HR, vuelven a producirse caídas bruscas (aunque no tanto como las del primer trimestre, porque la caída del aire exterior es más suave) que acompañan a las caídas del aire exterior. Vuelven a darse aquí las condiciones de entrada de aire del exterior en los días 13 y 15 de agosto y 5 y 12 de septiembre (ver Figura 4.25) quizá coincidiendo con una mayor afluencia de público a los oficios, lo que se traduce en un mayor tiempo de apertura de las puertas. Advertir no obstante, que esto es una hipótesis y habría que comprobarla.

Las líneas que miden en el interior de los muros y la bóveda indican una humedad relativa superior en casi un 5 % al aire que las rodea.

En cuanto a las T^a, durante todo este trimestre (época estival) se supera el límite máximo de los 25 °C recomendados. Decir aquí lo mismo que el anterior trimestre: no es una situación preocupante, pero hay que vigilar el nivel de HR para que no supere el 70% y tengamos crecimientos de hongos u otros organismos patógenos.

Las variaciones de T^a son siempre suaves, sin superar nunca los 1,5 °C de variación.

La distancia entre líneas es también casi nula, a excepción de la línea que mide la T^a del aire de la cornisa que marca aproximadamente 1 °C menos que el resto de líneas.

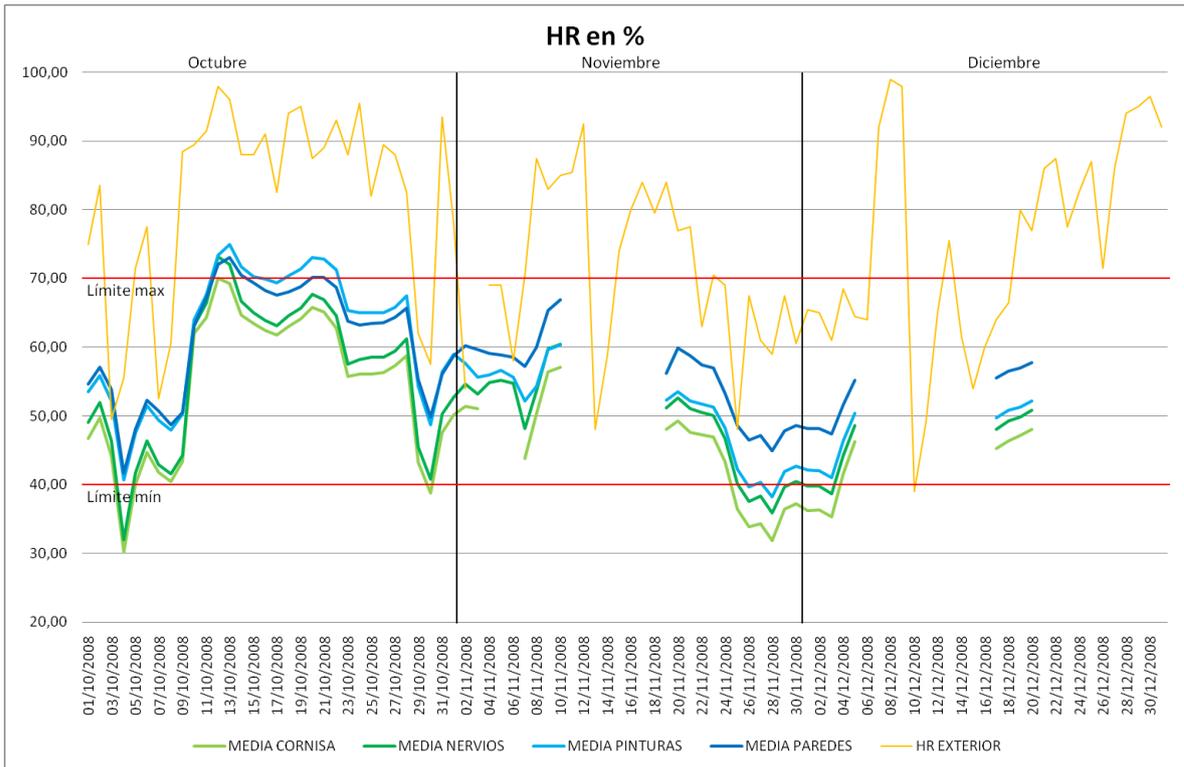


Figura 4.28: Media diaria HR. Cuarto trimestre.

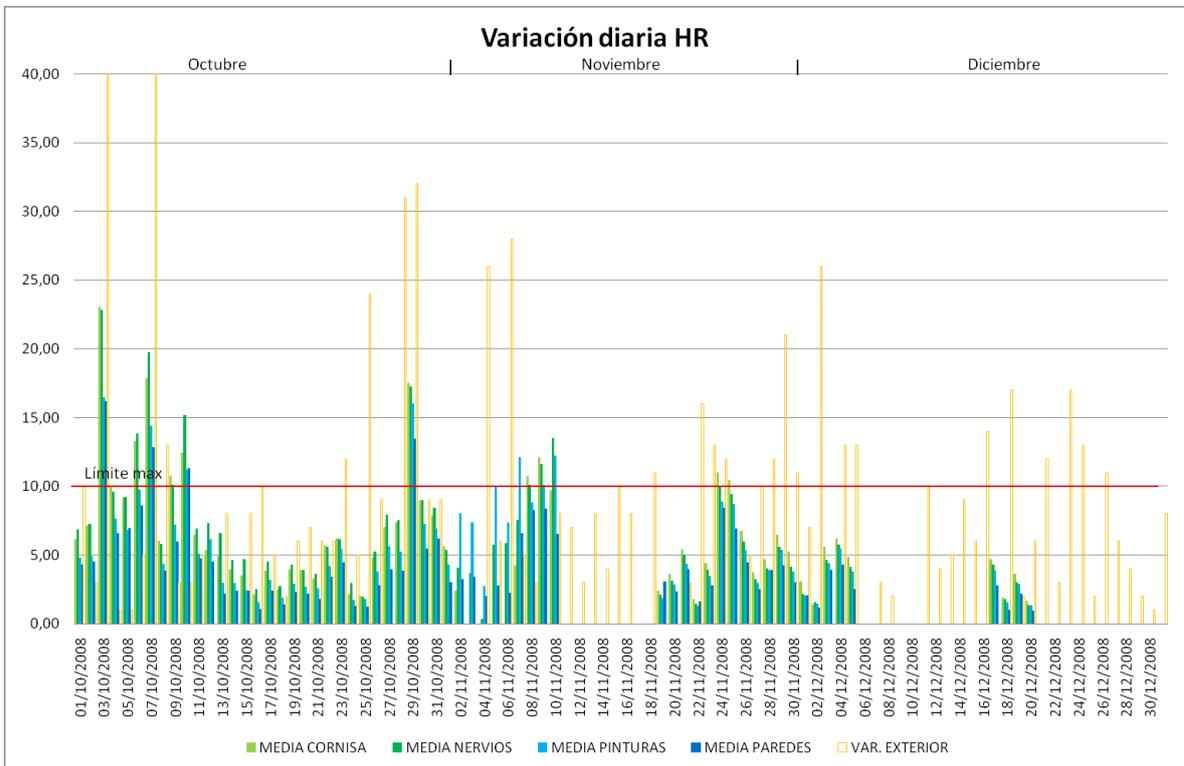


Figura 4.29: Variación diaria HR. Cuarto trimestre.

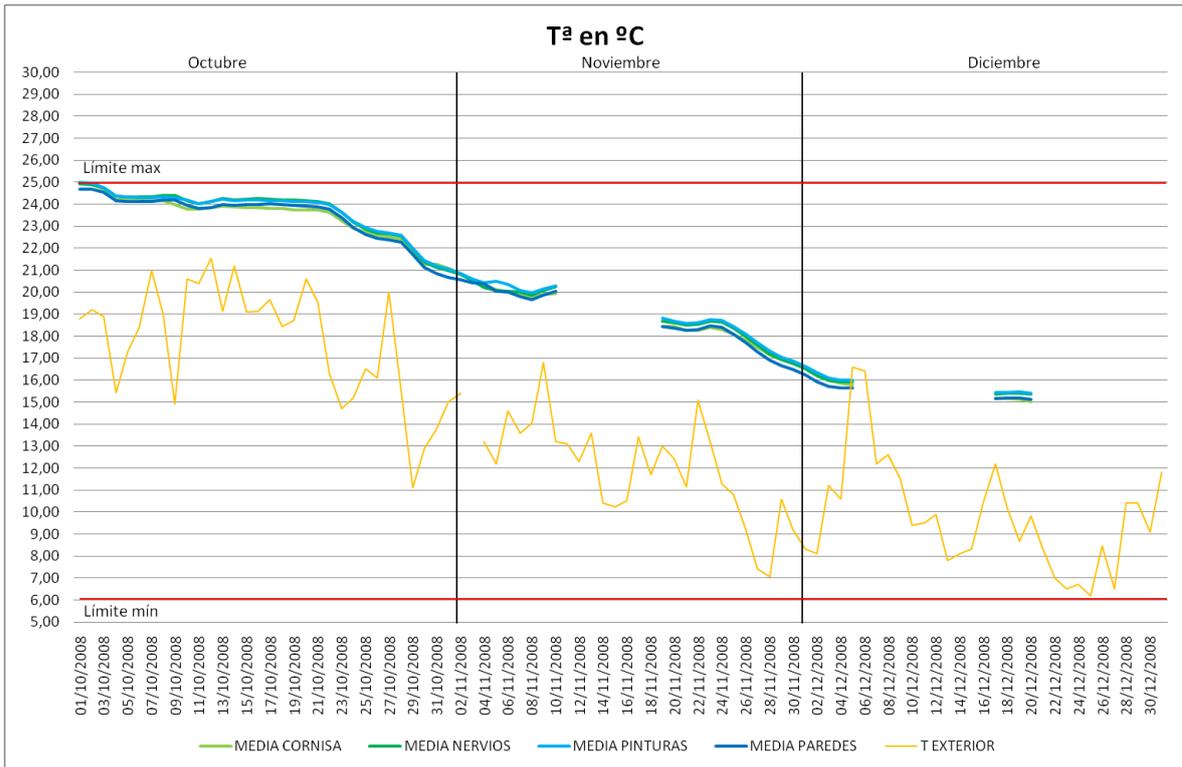


Figura 4.30: Media diaria Tª. Cuarto trimestre.

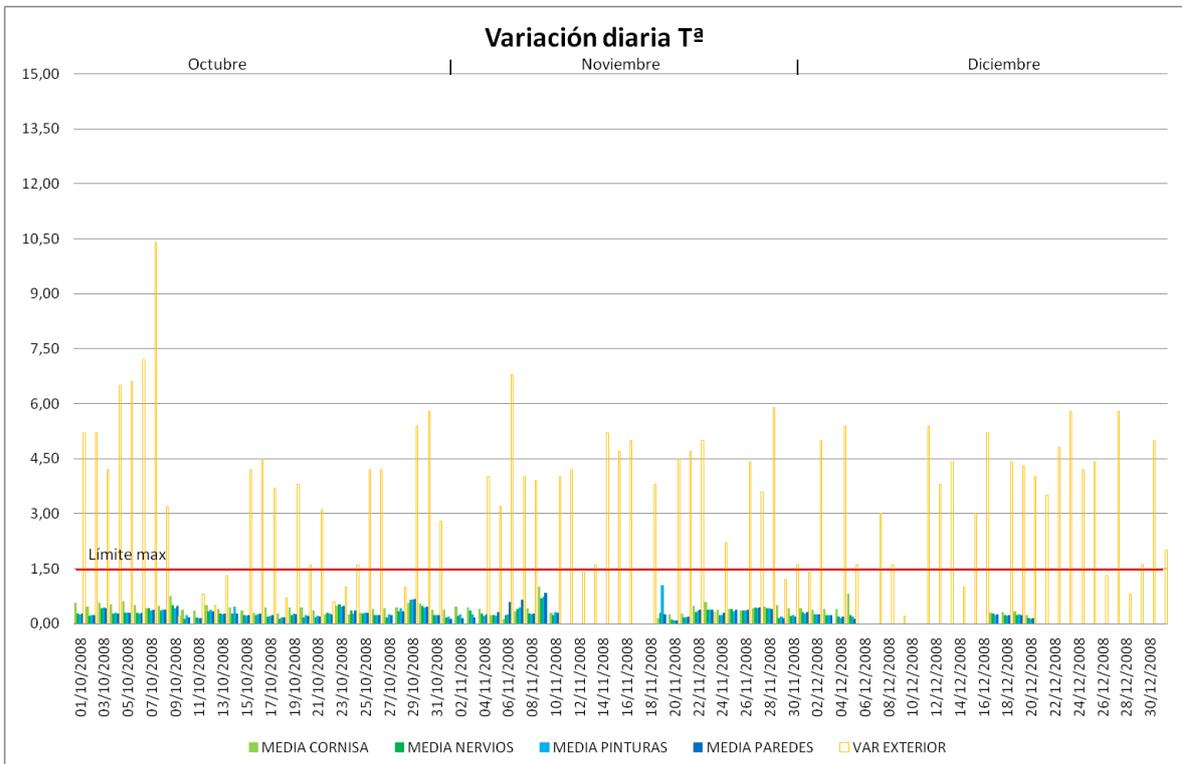


Figura 4.31: Variación diaria Tª. Cuarto trimestre.

Datos de HR, cuarto trimestre:

	EXTERIOR	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR MUROS
Media	76.05	49.56	52.23	55.95	58.18
Mínima	39.00	30.20	31.96	38.17	41.64
Máxima	99.00	69.99	73.13	74.90	73.05
HR > 70% *	63	0	3	15	8
HR < 40% *	1	19	13	3	0
Distancia entre líneas (medias)	--	0	+2.67	+6.39	+8.62
Var. media	8.43	6.30	6.41	5.50	4.32
Var. mínima	0.00	0.00	0.33	1.23	0.93
Var. máxima	45.00	23.03	22.80	16.46	16.17
Var. HR > 5% *	55	53	53	45	26
Var. HR > 10% *	27	19	16	11	6

Datos de T^a, cuarto trimestre:

	EXTERIOR	CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR MUROS
Media	13.30	20.76	20.94	20.99	20.71
Mínima	6.20	15.03	15.37	15.41	15.13
Máxima	21.55	24.95	24.94	25.00	24.70
T > 25 °C *	0	0	0	0	0
T < 6 °C *	0	0	0	0	0
Distancia entre líneas (medias)	--	+0.05	+0.23	+0.28	0
Var. media	3.05	0.41	0.27	0.29	0.29
Var. mínima	0.00	0.11	0.10	0.08	0.07
Var. máxima	10.40	1.00	0.69	1.04	0.82
Var. T ^a > 1.5 °C *	68	0	0	0	0

Vemos que a principios y a finales de octubre y a menor escala a finales de noviembre, se producen variaciones bruscas de HR, lo que hace que los niveles máximo y mínimo se superen. Esta situación no es alarmante porque, al pasar el verano, la T^a media ha bajado por debajo de los 25 °C de media lo que hace que las condiciones para el crecimiento de microorganismos ya no sean las idóneas.

En cualquier caso, las variaciones bruscas de HR pueden provocar dilataciones y compresiones indeseables en los materiales y, con el tiempo, grietas o deformaciones negativas para la conservación.

Se mantienen e incluso se incrementan las diferencias entre la HR del interior de los muros y de la bóveda y el aire que las rodea.

Las variaciones de T^a , por el contrario, se mantienen siempre por debajo de los límites fijados.

Concluyendo, y a modo de resumen, vamos a realizar una tabla con las incidencias observadas y que pueden tener una influencia negativa en la conservación de los frescos de la bóveda:

Época	Incidencias observadas en HR	Incidencias observadas en T^a
Primer trimestre (invierno)	Superación de niveles máximos. Variaciones bruscas. Niveles superiores en el interior de paredes e interior de la bóveda respecto al aire un 5%.	Ninguna
Segundo trimestre (primavera)	Variaciones bruscas. Niveles superiores en el interior de paredes e interior de la bóveda respecto al aire un 5%.	Superación de nivel máximo a partir del 15 de junio.
Tercer trimestre (verano)	Variaciones bruscas Niveles superiores en el interior de paredes e interior de la bóveda respecto al aire un 5%.	Siempre por encima de nivel máximo de 25 °C
Cuarto trimestre (otoño)	Superación de niveles máximos y mínimos. Variaciones bruscas. Niveles superiores en el interior de paredes e interior de la bóveda respecto al aire un 7%.	Ninguna.

Tabla 4.6: Resumen de incidencias observadas.

Diferencias de HR entre líneas a lo largo del año.

Dado que hemos encontrado diferencias significativas entre las distintas líneas de sensores, y siendo más específicos, entre las líneas del interior de los materiales constructivos (paredes y del interior de la bóveda) y las líneas del aire (a nivel de la cornisa y a nivel de los nervios), vamos a profundizar un poco más en este aspecto.

Para ello, vamos a realizar un gráfico y una tabla comparativa con los valores medios de cada línea a lo largo del año.

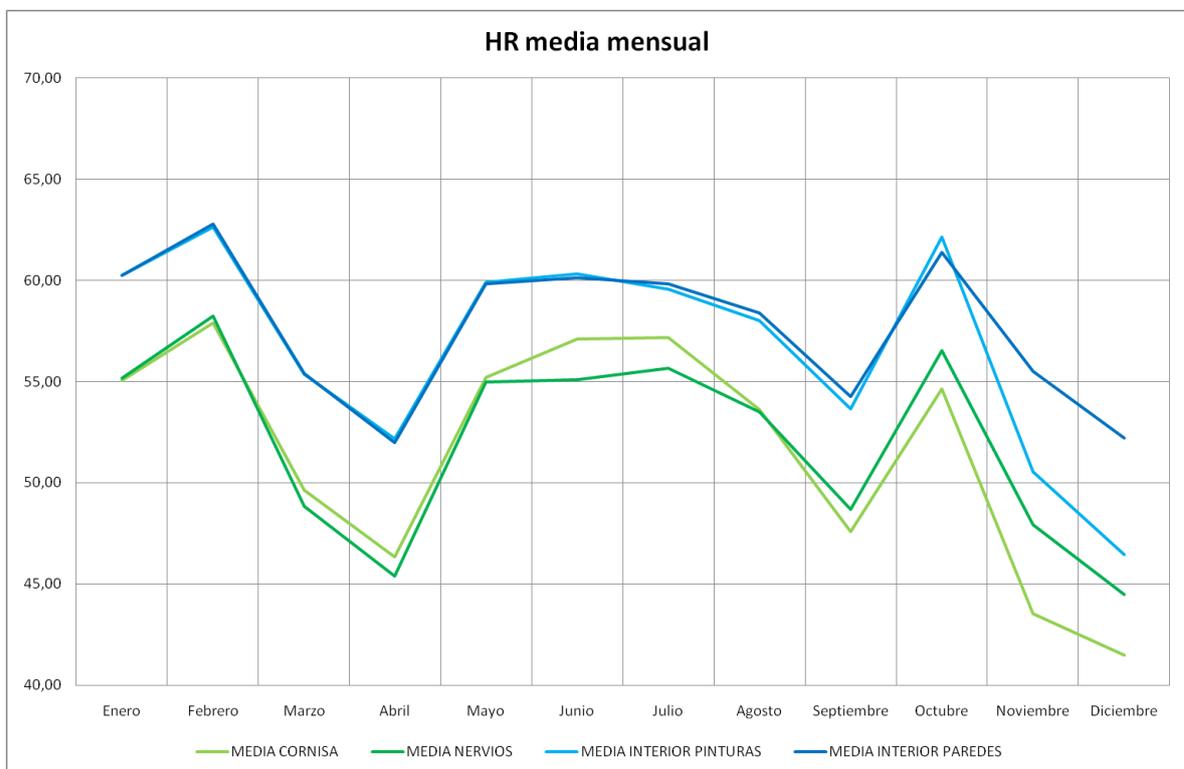


Figura 4.32: HR media mensual entre líneas.

Mes		CORNISA	NERVIOS	INTERIOR PINTURAS	INTERIOR PAREDES
Enero	Media	55,06	55,15	60,26	60,23
	Distancia	0,00	0,09	5,20	5,17
Febrero	Media	57,88	58,23	62,64	62,80
	Distancia	0,00	0,35	4,76	4,92
Marzo	Media	49,65	48,84	55,37	55,40
	Distancia	0,81	0,00	6,53	6,56
Abril	Media	46,32	45,39	52,16	52,00
	Distancia	0,93	0,00	6,77	6,61
Mayo	Media	55,22	54,99	59,90	59,83
	Distancia	0,23	0,00	4,91	4,84
Junio	Media	57,11	55,09	60,31	60,12
	Distancia	2,02	0,00	5,22	5,03
Julio	Media	57,16	55,67	59,57	59,82
	Distancia	1,49	0,00	3,90	4,15
Agosto	Media	53,62	53,51	58,00	58,39
	Distancia	0,11	0,00	4,49	4,88
Septiembre	Media	47,57	48,70	53,67	54,25
	Distancia	0,00	1,13	6,10	6,68
Octubre	Media	54,63	56,54	62,13	61,39
	Distancia	0,00	1,91	7,50	6,76
Noviembre	Media	43,52	47,91	50,53	55,52
	Distancia	0,00	4,39	7,01	12,00
Diciembre	Media	41,47	44,49	46,45	52,22
	Distancia	0,00	3,02	4,98	10,75

Tabla 4.7: HR media mensual y distancia entre líneas.

Se aprecia claramente que las líneas que miden el aire (en la cornisa y a la altura de los nervios) dan siempre valores muy próximos entre ellas y sensiblemente inferiores a las líneas que están colocadas en el interior de las pinturas y en el interior de las paredes. También los valores de estas dos últimas líneas son muy próximos, lo que indica que los sensores se comportan de forma similar dentro del mismo medio en el que midan la Hr: el aire o los materiales.

La diferencia entre líneas, lo que en la tabla 4.7 aparece como “distancia”, no adopta un valor constante, sino que oscila entre 4,5 y 6,5% aproximadamente, alcanzándose diferencias máximas de más de 10 e incluso del 12%.

En condiciones óptimas, la humedad del interior de los muros y del interior de la bóveda debería ser similar a la del aire. Si bien se produce una fluctuación del contenido de humedad relativa en el interior de los materiales paralela a la del aire, siempre se mantiene por encima, lo que indica que los materiales constructivos intercambian humedad con el aire pero retienen una parte importante.

Este fenómeno no es necesariamente negativo para la conservación de las pinturas, siempre que los niveles de HR se mantengan dentro de los límites de idoneidad.

Diferencias de HR entre los sensores de una misma línea.

Como en una línea hay varios sensores, pudiera darse la circunstancia de que no todos los sensores de la misma línea den el mismo valor, sino que haya diferencias entre ellos.

Para tratar de establecer diferencias entre los sensores de una misma línea, vamos a realizar las correspondientes gráficas para T^a y HR con medias mensuales, para cada sensor y con la media de cada línea.

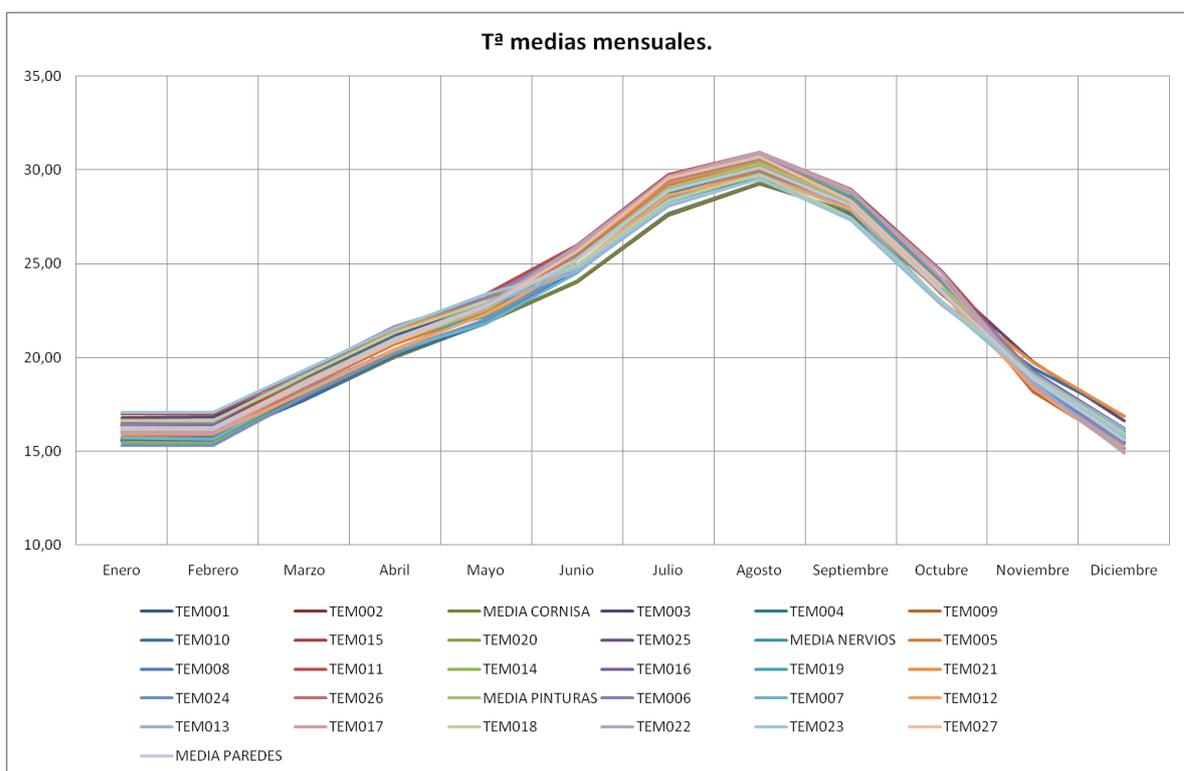


Figura 4.33: T^a medias mensuales para todos los sensores y la media por líneas.

Puede apreciarse que, en el caso de la T^a, todos los sensores, incluso los de distintas líneas, están midiendo valores con muy poca diferencia entre sí (unos 0,5 °C de diferencia), lo que indica que no existen dentro de la cúpula gradientes de temperatura y que tanto los materiales de los muros como los de la bóveda, están a la misma temperatura que el aire.

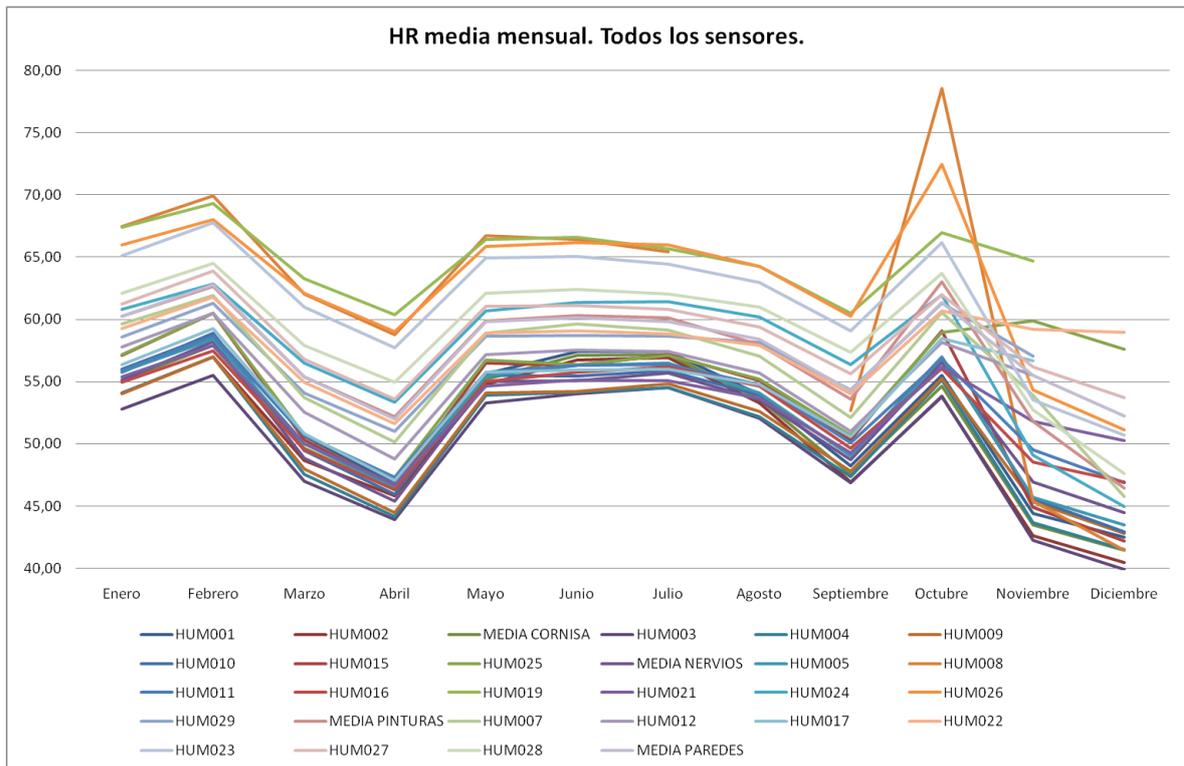


Figura 4.34: HR media mensual. Todos los sensores.

No ocurre lo mismo, como podemos comprobar en la anterior Figura, con la humedad relativa. Vemos que no todos los sensores, ni aún los de una misma línea, dan los mismos valores de HR, lo que indica diferencias en este parámetro de un punto a otro de la bóveda.

Para verlo en detalle, vamos a representar unas gráficas con los sensores divididos por líneas.

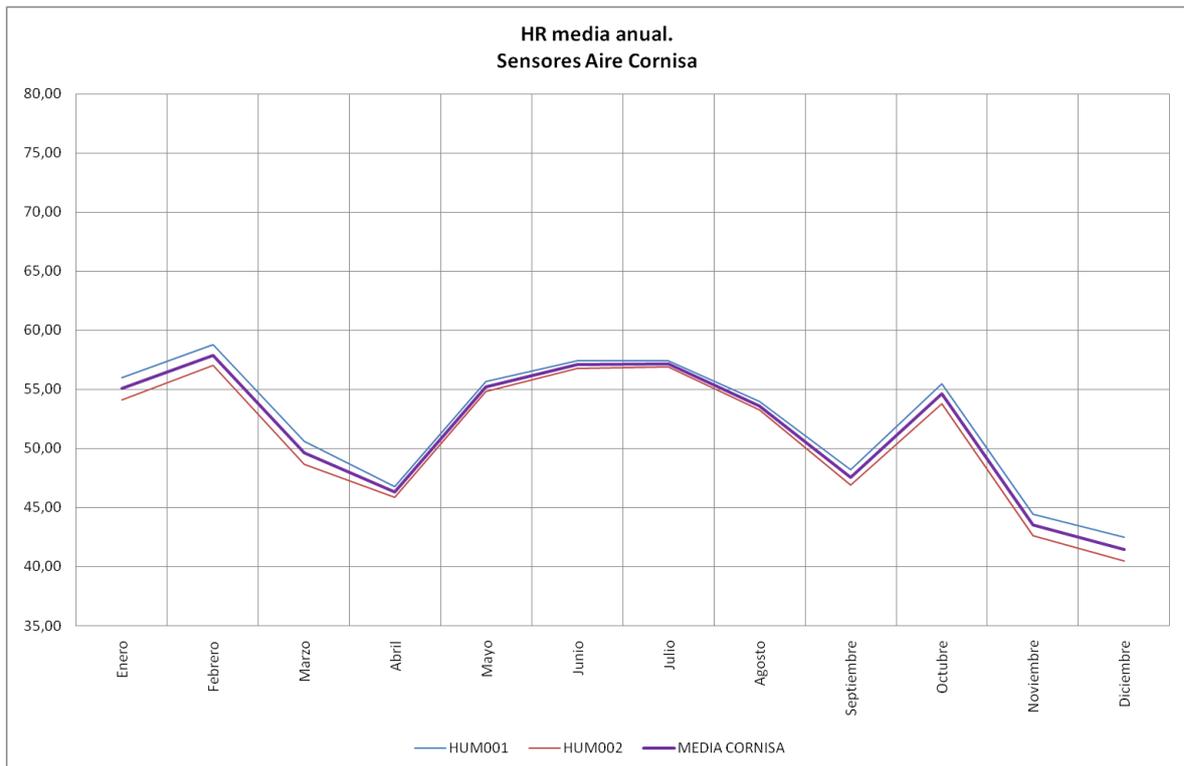


Figura 4.35: HR media mensual. Sensores que miden el aire a la altura de la cornisa.

Vemos en el caso de los sensores colocados en la cornisa, que no hay diferencias significativas entre los distintos valores, con lo que podemos decir que no hay gradientes de HR en el aire a esa altura.

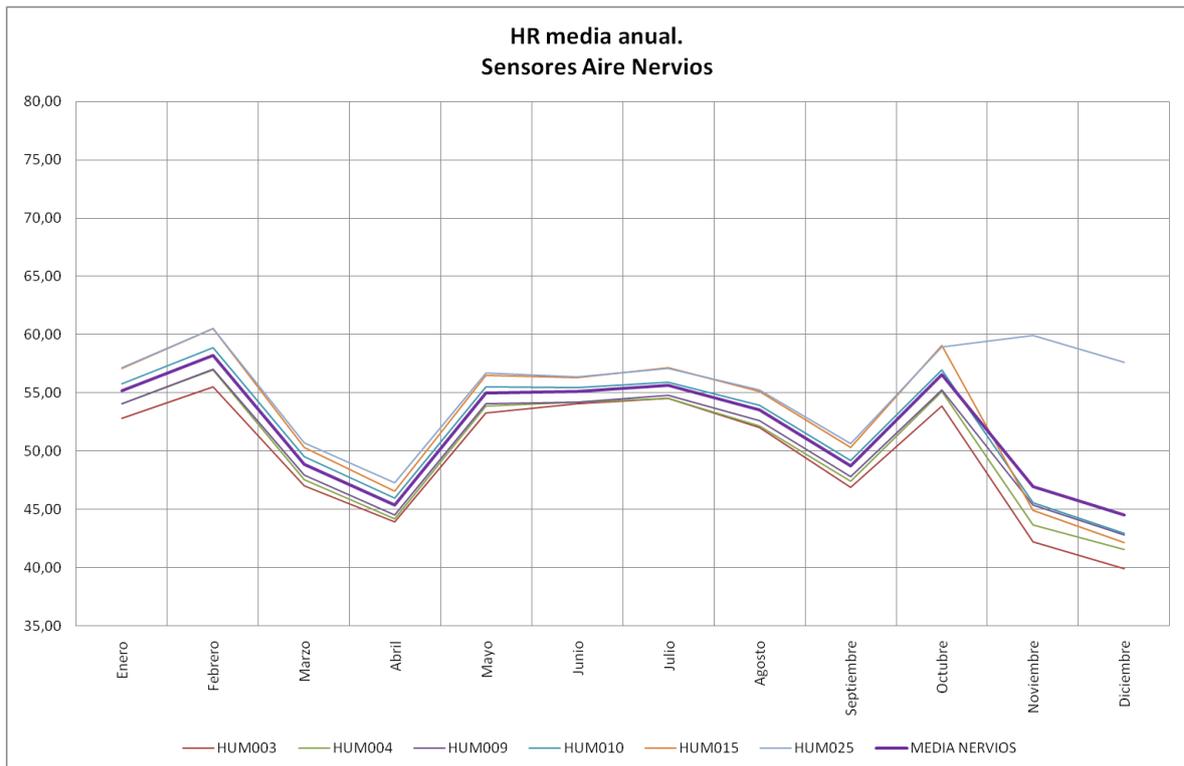


Figura 4.36: HR media anual. Sensores que miden la HR del aire a la altura de los nervios.

Lo mismo podríamos decir de los sensores que miden la HR del aire a la altura de los nervios, no se observan diferencias significativas a excepción del sensor 25 que, a partir de octubre, da unos valores anormalmente elevados. Habrá que comprobar con más datos si estos valores más altos del sensor 25 son erróneos o por el contrario hay un aumento real de humedad en esa zona.

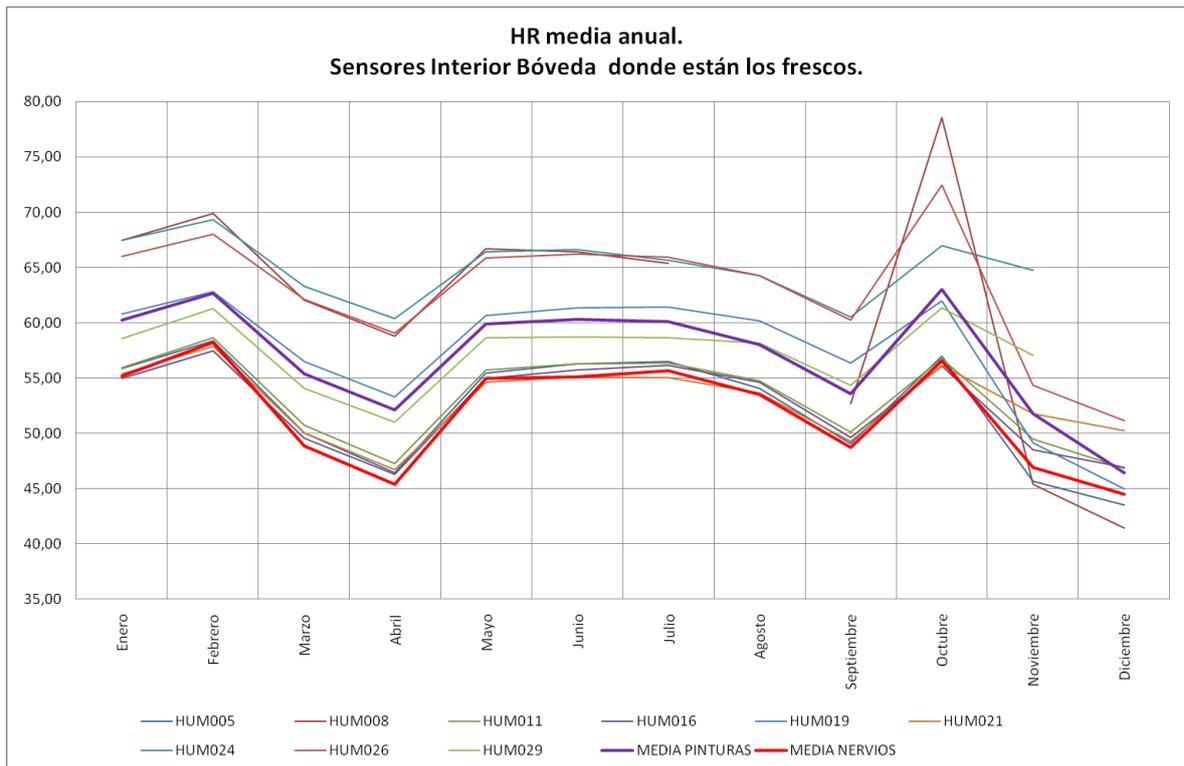


Figura 4.37: HR media mensual. Sensores del interior de las pinturas.

En esta gráfica puede comprobarse que las diferencias entre los distintos sensores de la línea del interior de la bóveda, donde están pintados los frescos, sí son importantes, lo que indica humedades localizadas en algunos puntos de la bóveda. En la gráfica se representan en trazo más grueso, la media de toda la línea de sensores (color morado oscuro) y la media del aire a la altura de los nervios (color rojo). Con la gráfica siguiente podemos comprobar cómo hay unos sensores cuya humedad es muy próxima a la humedad del aire que los rodea (sensores 5, 11, 16 y 21), mientras otros tienen humedades muy por encima (sensores 8, 19 y 24).

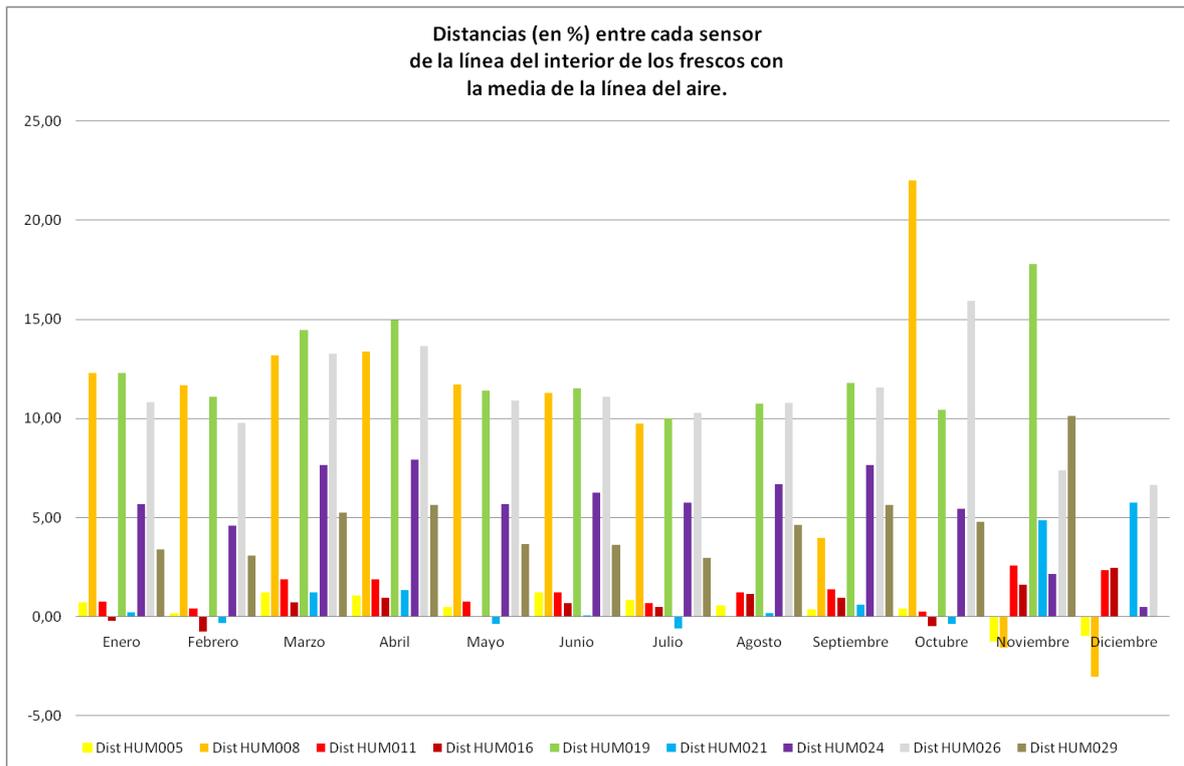


Figura 4.38: Diferencias de humedad entre cada sensor de la línea del interior de los frescos con la media de la línea del aire a la altura de los nervios.

Estas diferencias nos indican problemas localizados de humedades, no en toda la bóveda, sino únicamente en aquellos puntos donde se encuentran los sensores citados.

Veamos si ocurre lo mismo con los sensores de la línea del interior de los muros:

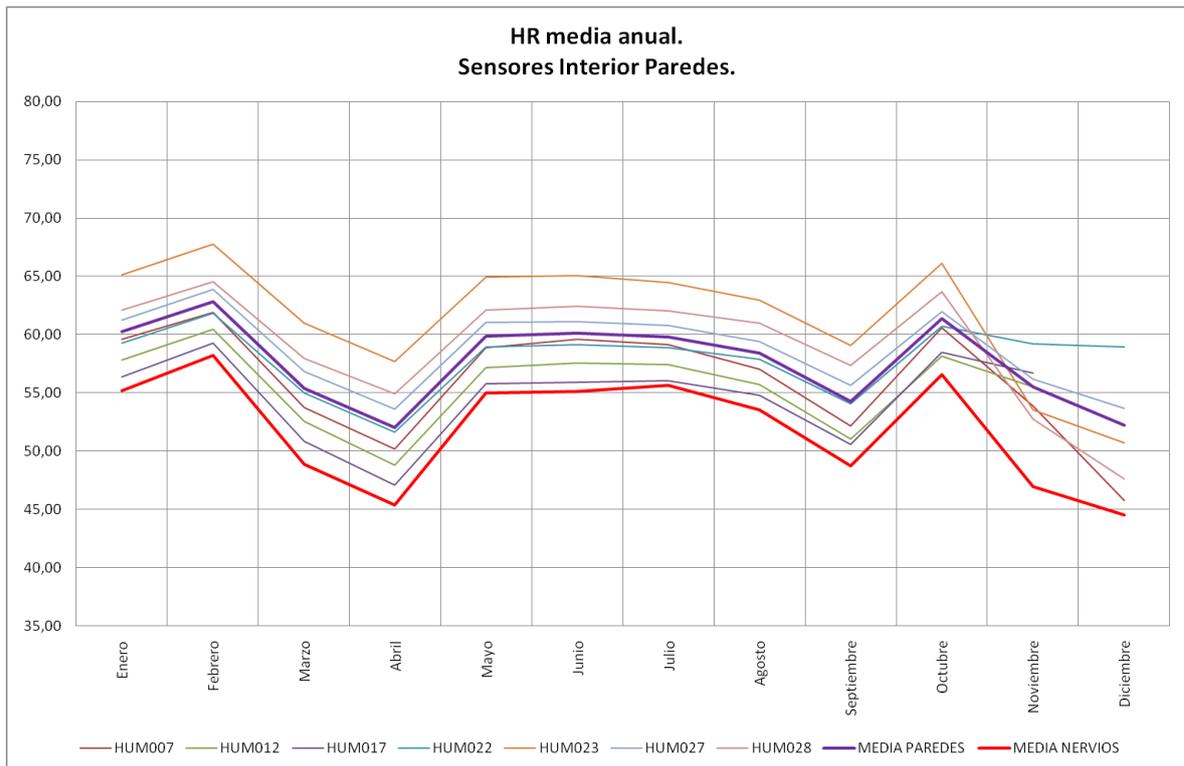


Figura 4.39: HR media mensual de los sensores del interior de las paredes.

Efectivamente, se produce el mismo efecto, mientras unos sensores están por encima de la media (sensores 23, 27 y 28), otros están por debajo (sensores 12 y 17) siendo los valores de éstos últimos muy próximos a la HR del aire.

Sin embargo, en las paredes este efecto de humedades localizadas es menos acusado que en el caso de la bóveda, donde las diferencias eran más marcadas.

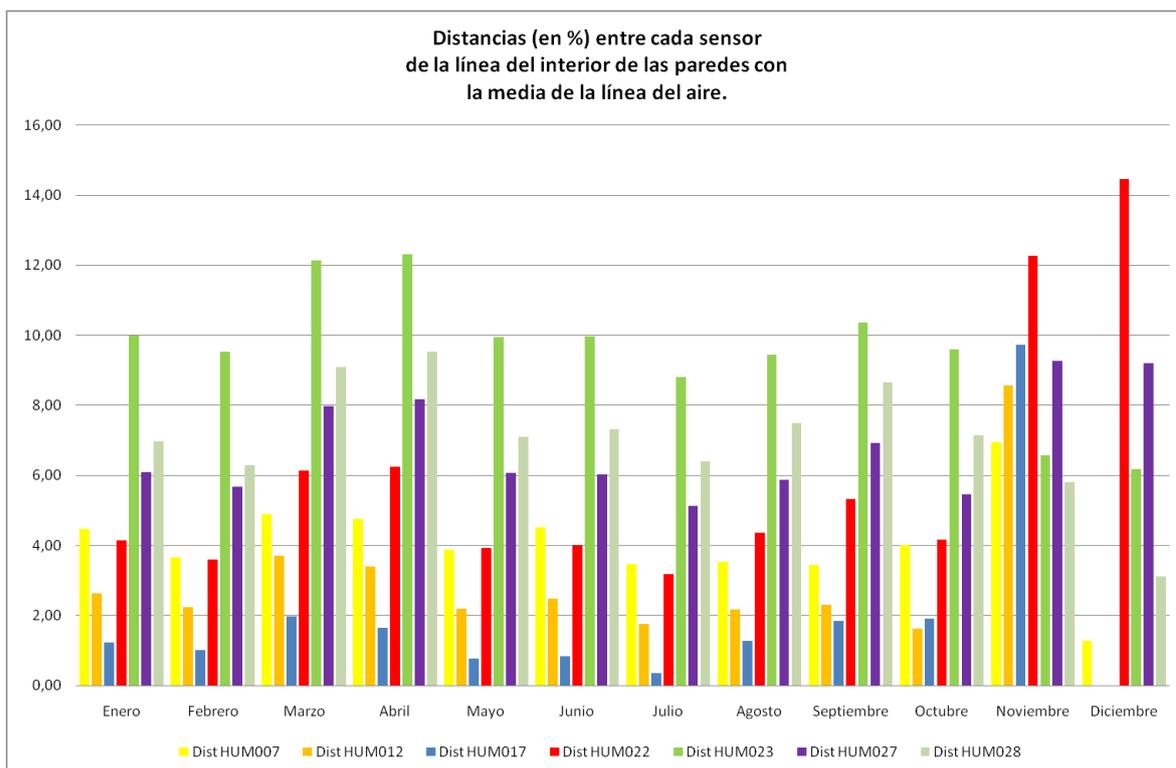


Figura 4.40: Diferencias entre cada sensor de la línea del interior de las paredes con la media de la línea del aire.

Dado que estas humedades localizadas que hemos descubierto, son un claro indicio de un problema de cara a la conservación de los frescos, vamos a localizar en un mapa de los frescos dónde se producen estas humedades. Así, vamos a representar para cada mes del año, un esquema de gradientes de humedad relativa sobre un diagrama de la bóveda, distinguiendo entre humedad en el interior de los materiales constructivos (muros y bóveda) y humedad del aire.

En estos diagramas, vamos a representar en color azul de distintas intensidades (más claro menos humedad, más oscuro mayor humedad) las zonas donde se ubican los distintos sensores. Si para un sensor no tenemos dato (recordemos que hay sensores que no funcionan), le pondremos el color de la HR de la media de su línea. A la izquierda del diagrama, representaremos la humedad relativa del aire tanto a la altura de la cornisa como a la altura de los nervios. De esta forma, con un código de colores, veremos rápidamente las humedades localizadas.

Veamos los diagramas:

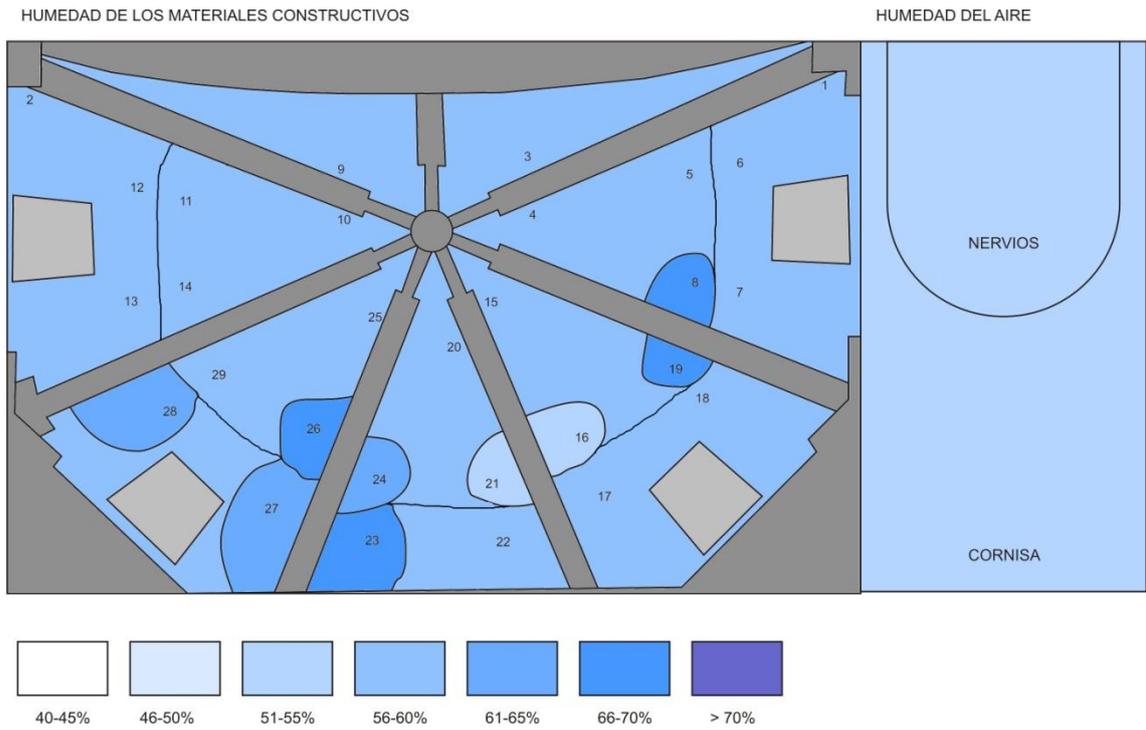


Figura 4.41: Diagrama de humedades. Enero 2008.

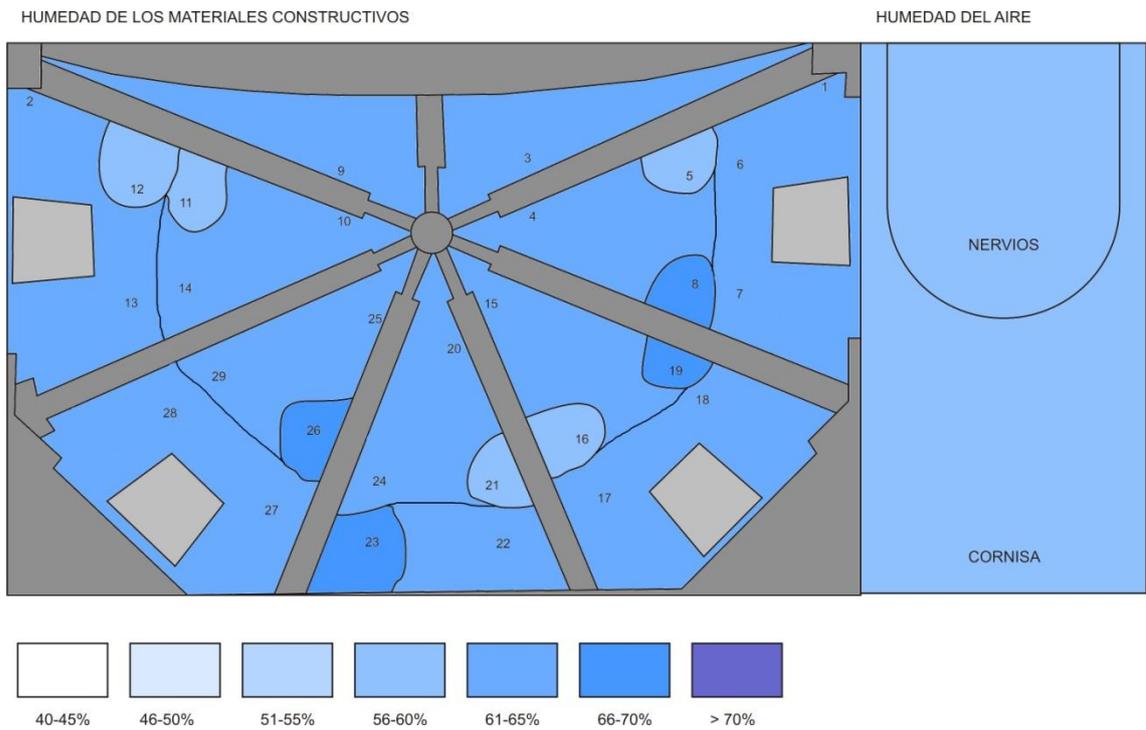


Figura 4.42: Diagrama de humedades. Febrero 2008.

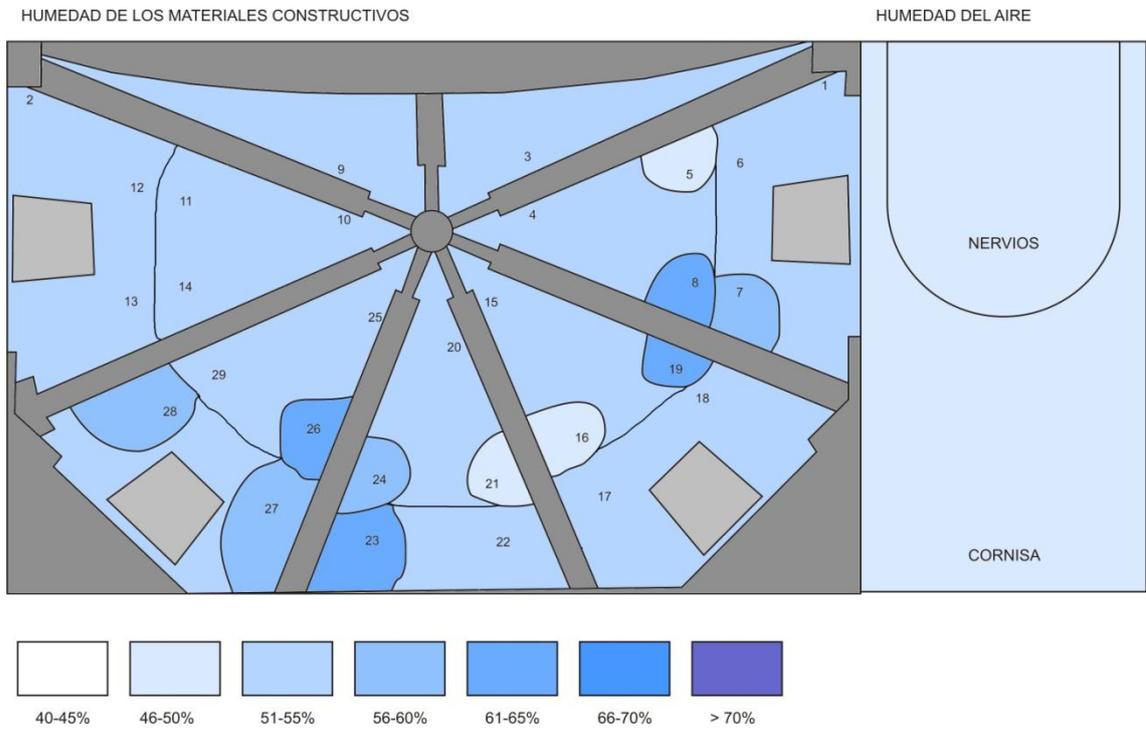


Figura 4.43: Diagrama de humedades. Marzo 2008.

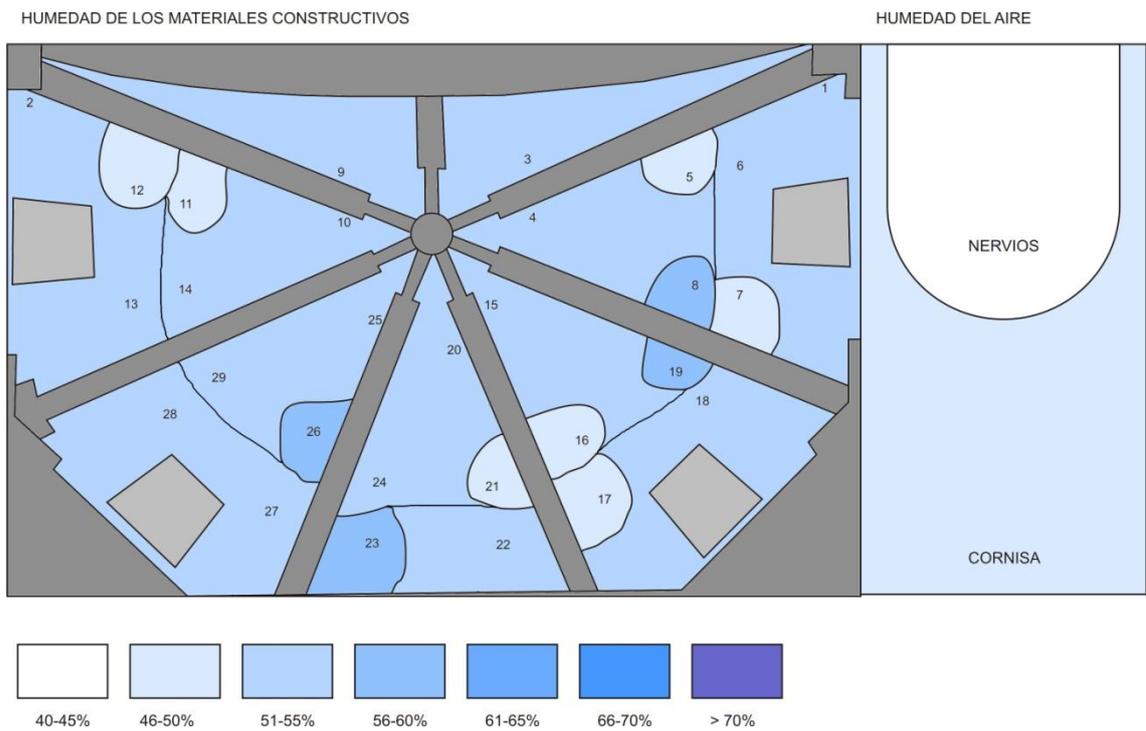


Figura 4.44: Diagrama de humedades. Abril 2008.

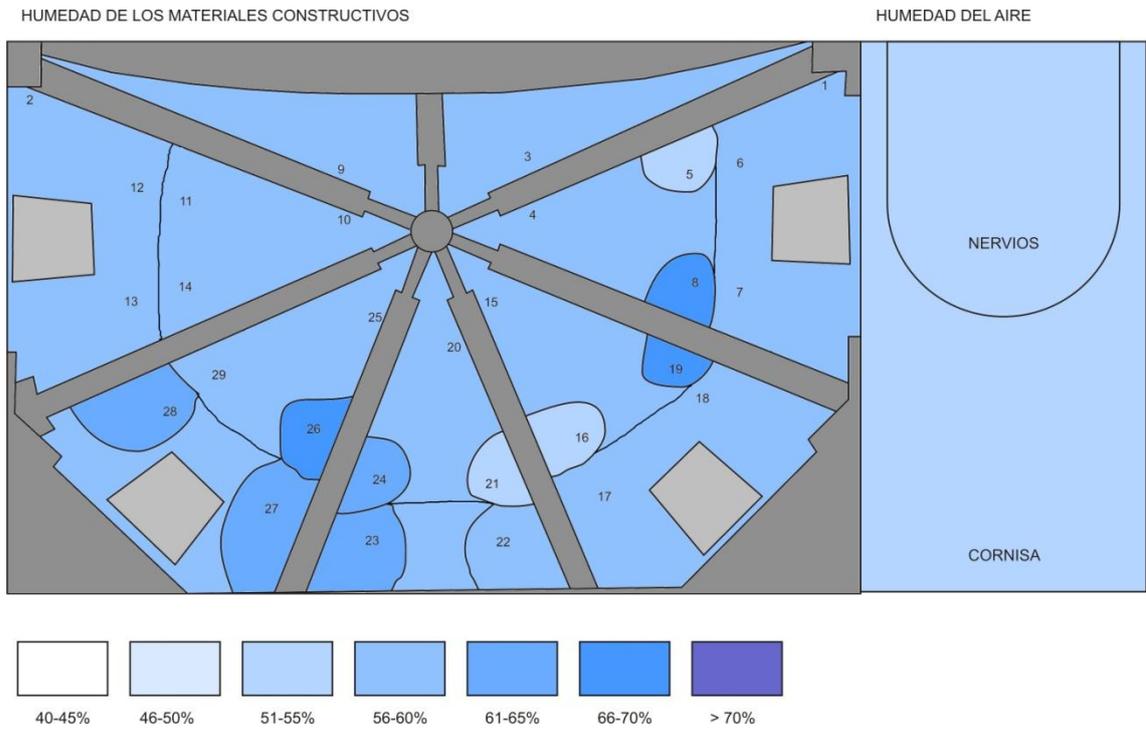


Figura 4.45: Diagrama de humedades. Mayo 2008.

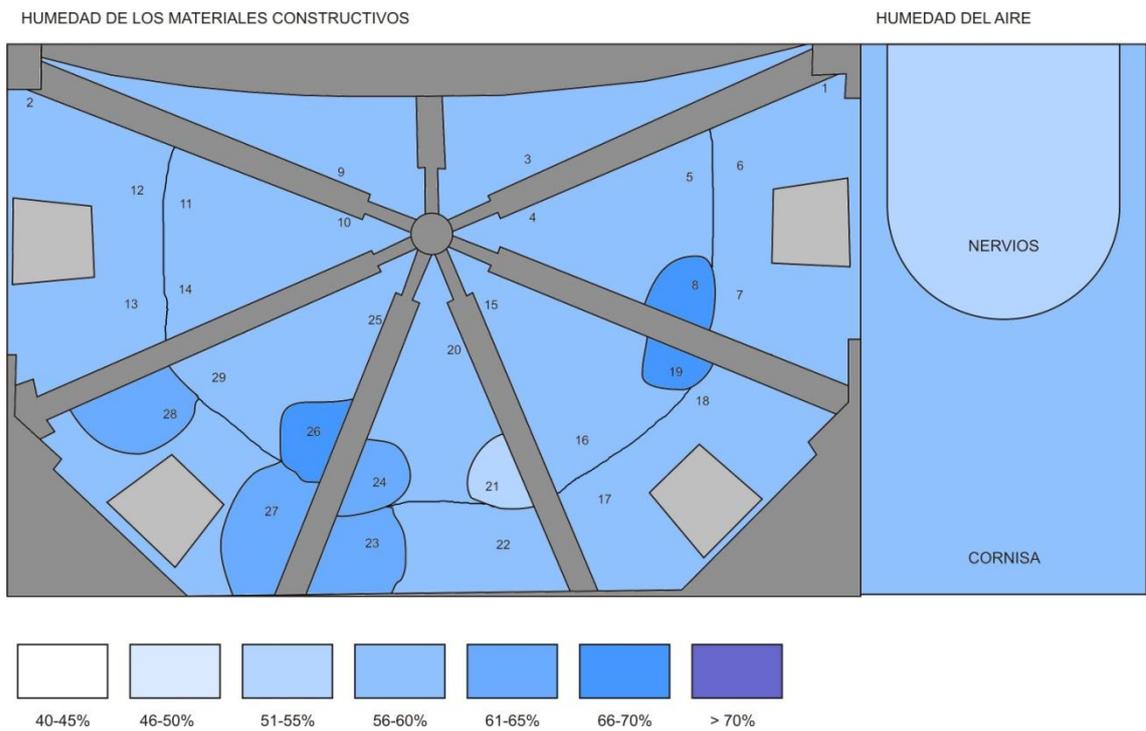


Figura 4.46: Diagrama de humedades. Junio 2008.

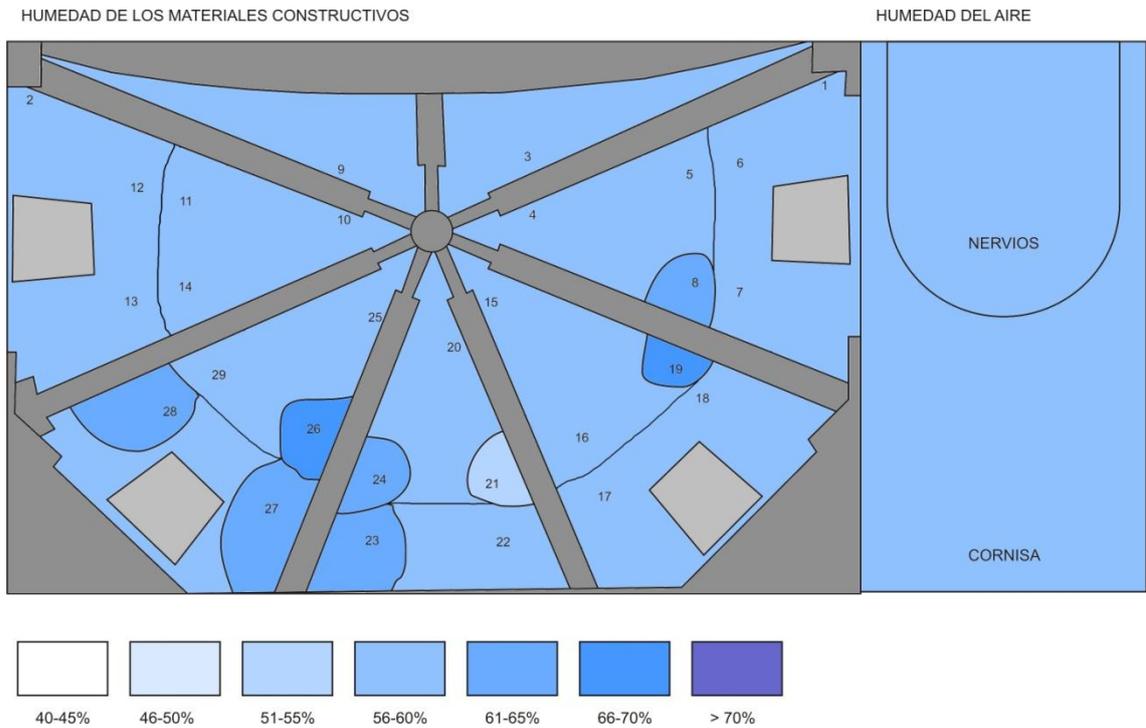


Figura 4.47: Diagrama de humedades. Julio 2008.

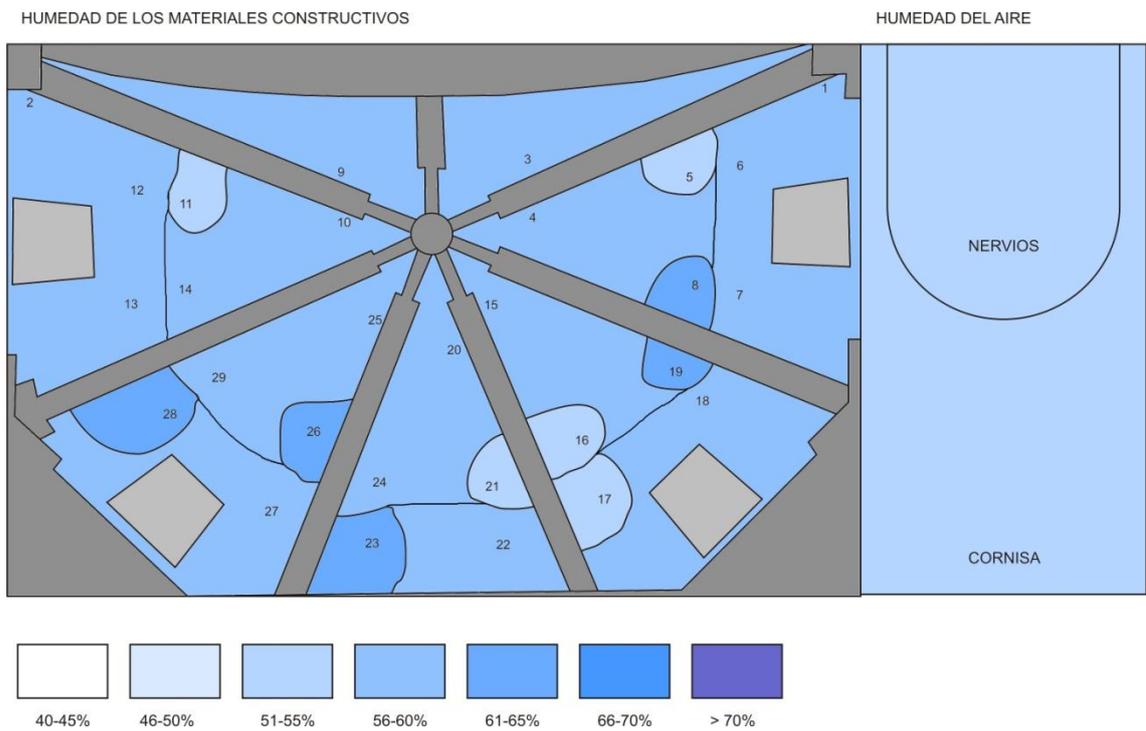


Figura 4.48: Diagrama de humedades. Agosto 2008.

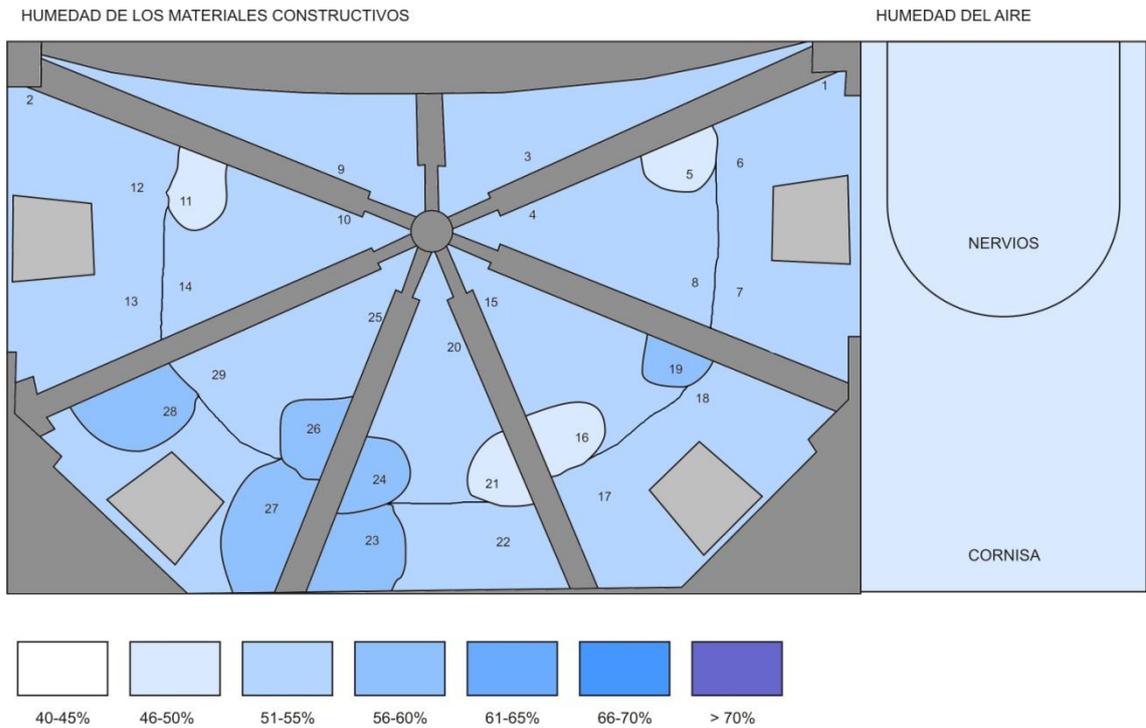


Figura 4.49: Diagrama de humedades. Septiembre 2008.

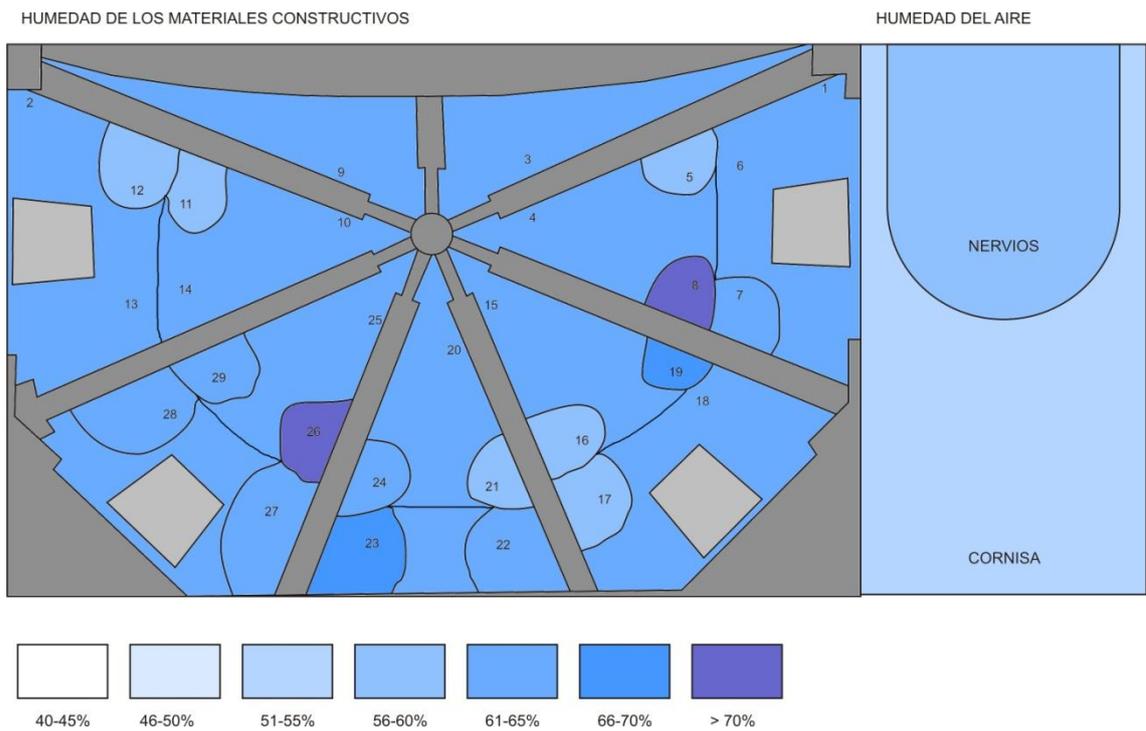


Figura 4.50: Diagrama de humedades. Octubre 2008.

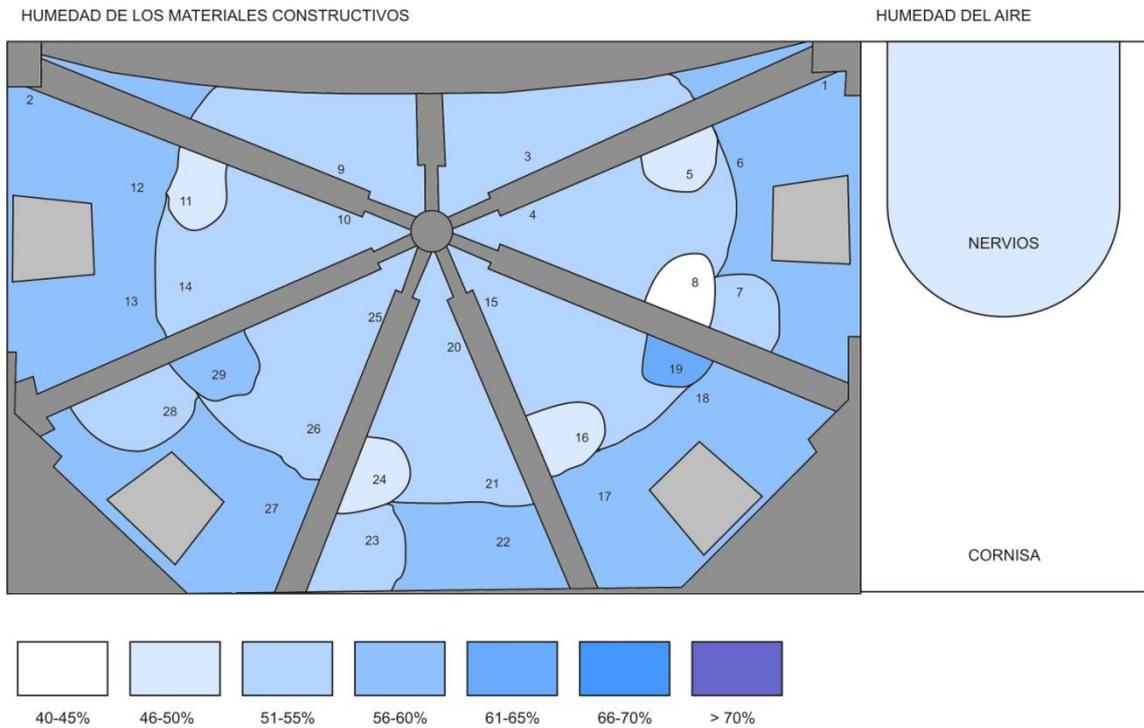


Figura 4.51: Diagrama de humedades. Noviembre 2008.

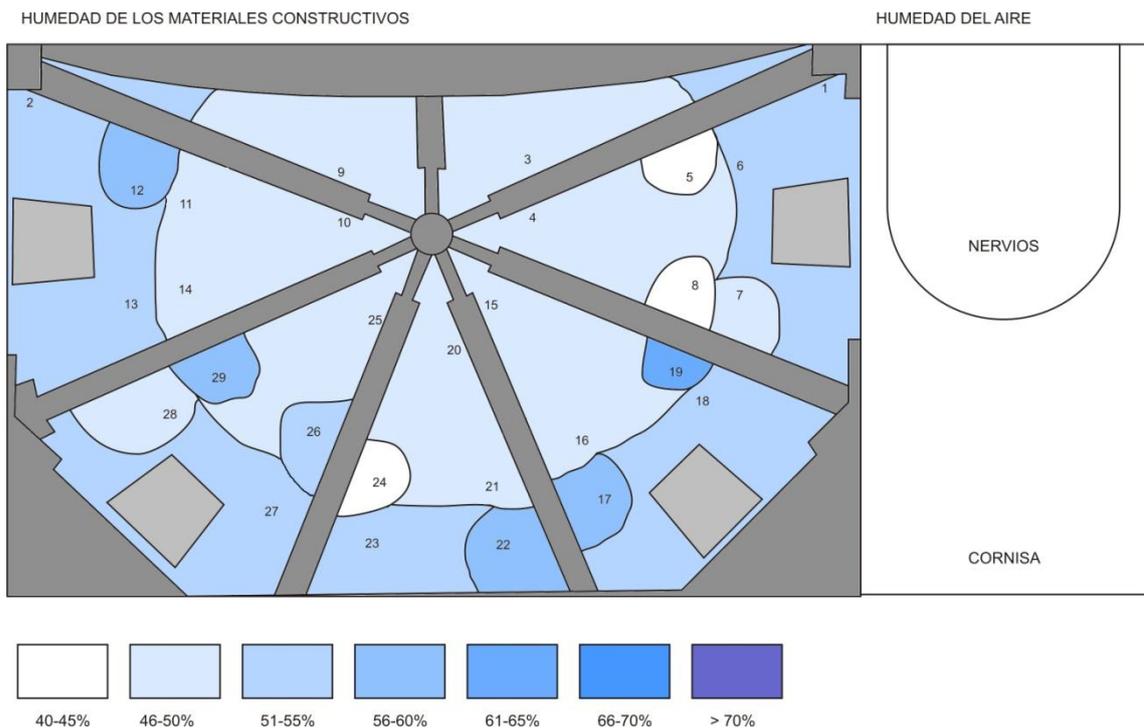


Figura 4.52: Diagrama de humedades. Diciembre 2008.

Se aprecia claramente la distribución de humedades de forma desigual por toda la cúpula. Así, hay zonas con humedades significativamente por encima del resto, como es el caso de las zonas donde están situados los sensores 8, 19, 26 y 23. En algunas de estas zonas, llega incluso a superarse el límite máximo fijado de 70% de humedad relativa. Si a ello le añadimos que

durante todo el verano la T^a está por encima de los 25°C, límite máximo marcado en los patrones de idoneidad, podemos asegurar que vamos a tener presencia de microorganismos nocivos para la conservación de los frescos, al menos en estas zonas.

También hay zonas con humedades ligeramente por encima de la media, caso de las zonas donde están los sensores 24 y 28.

Y también, en otras zonas, la humedad es la misma que la del aire, indicando un buen comportamiento de los materiales; es el caso de las zonas donde están los sensores 5, 11, 12 y 16.

4.3. Resultados obtenidos en 2010 y discusión.

En el momento en que se redacta este punto, ya se tienen disponibles los datos del año 2010 y con ellos se podría realizar nuevamente un análisis descriptivo. Sin embargo, se considera que sería extender en exceso y de forma poco útil este documento, por lo que los datos de 2010 se describirán por encima, únicamente para comprobar que los patrones detectados para el año 2008 se siguen cumpliendo con los datos de 2010.

4.3.1. Generalidades.

Durante el año 2010 se recogieron los siguientes datos:

Mes	Cantidad de datos obtenidos
Enero de 2010	8.879
Febrero de 2010	437.853
Marzo de 2010	1.967.487
Abril de 2010	1.993.294
Mayo de 2010	2.085.373
Junio de 2010	1.965.642
Julio de 2010	1.397.203
Agosto de 2010	2.068.421
Septiembre de 2010	1.797.431
Octubre de 2010	2.048.482
Noviembre de 2010	1.994.321
Diciembre de 2010	2.051.641

Los datos se tomaron con una frecuencia de un dato por minuto para cada sensor.

Adicionalmente, se obtuvieron los datos de HR y T^a del Instituto Metereológico para la estación del Campus de la Universidad Politécnica de Valencia en el mismo periodo de tiempo. Estos datos proporcionados por el I.M. están tomados con una frecuencia de un dato cada 10 minutos.

Estado de los frescos en el año 2010.

Las eflorescencias de sales minerales que se observaron durante el año 2008 han aumentado su presencia, haciéndose en algunos casos más marcadas. Esto indica que el problema que origina estas manchas salinas sigue presente o incluso se ha agravado en el transcurso de estos dos años.

Condiciones ambientales en el interior del templo.

En la gráfica siguiente puede apreciarse la diferencia entre la HR del exterior del templo y las variaciones del interior. Sigue observándose claramente el efecto de amortiguación que producen los muros, ya que las variaciones en el interior son mucho más suaves que en el exterior.

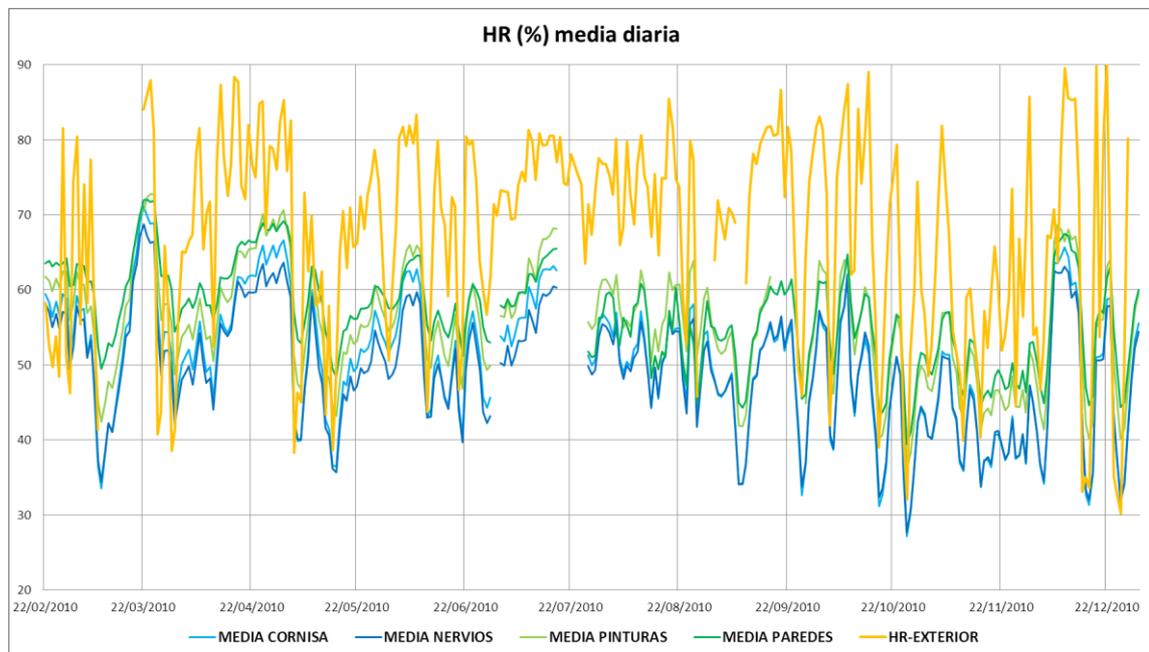


Figura 4.53: HR media diaria. Año 2010.

En cuanto a T^a, en el interior de la catedral también se suavizan los cambios del exterior, aunque se incrementa sensiblemente como puede apreciarse en la figura siguiente.

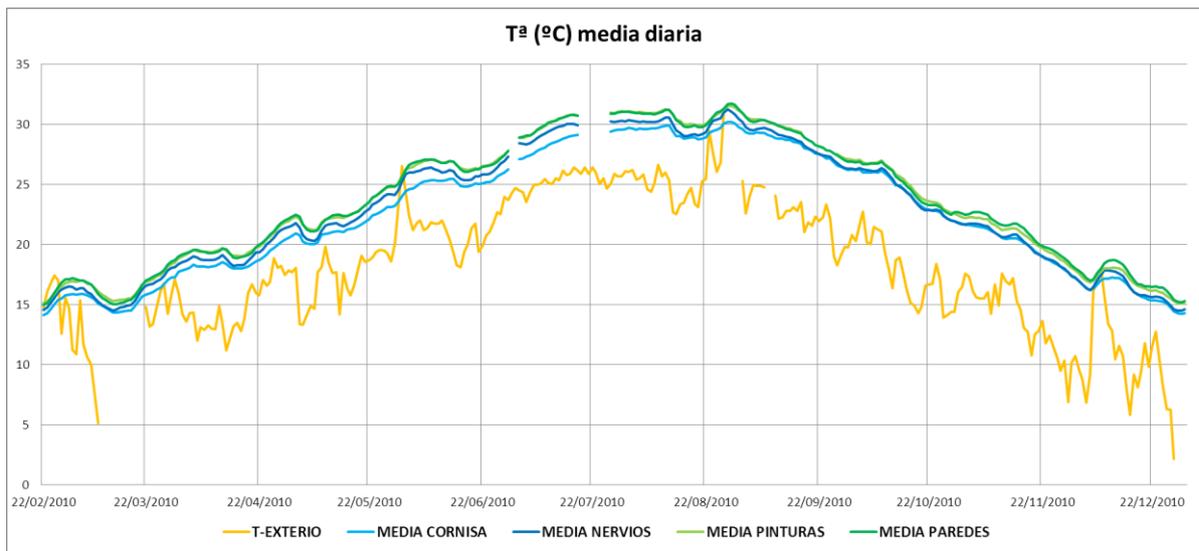


Figura 4.54: Tª media diaria. Año 2010.

Diferencias entre líneas.

Es también interesante comprobar con estos datos si las importantes diferencias observadas en 2008 entre los sensores de una misma línea se mantienen o por el contrario se atenúan o desaparecen.

Vemos en las siguientes figuras las diferencias entre las líneas de Tª y HR.

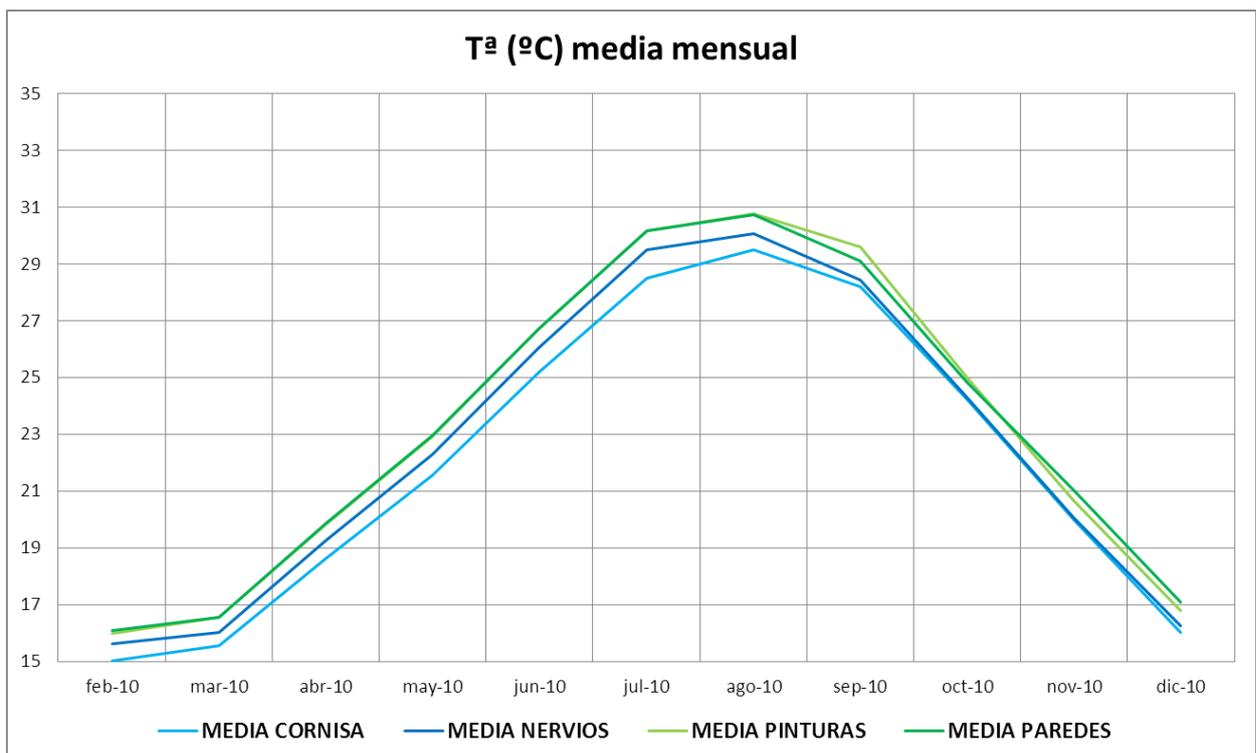


Figura 4.55: Tª media mensual. Año 2010.

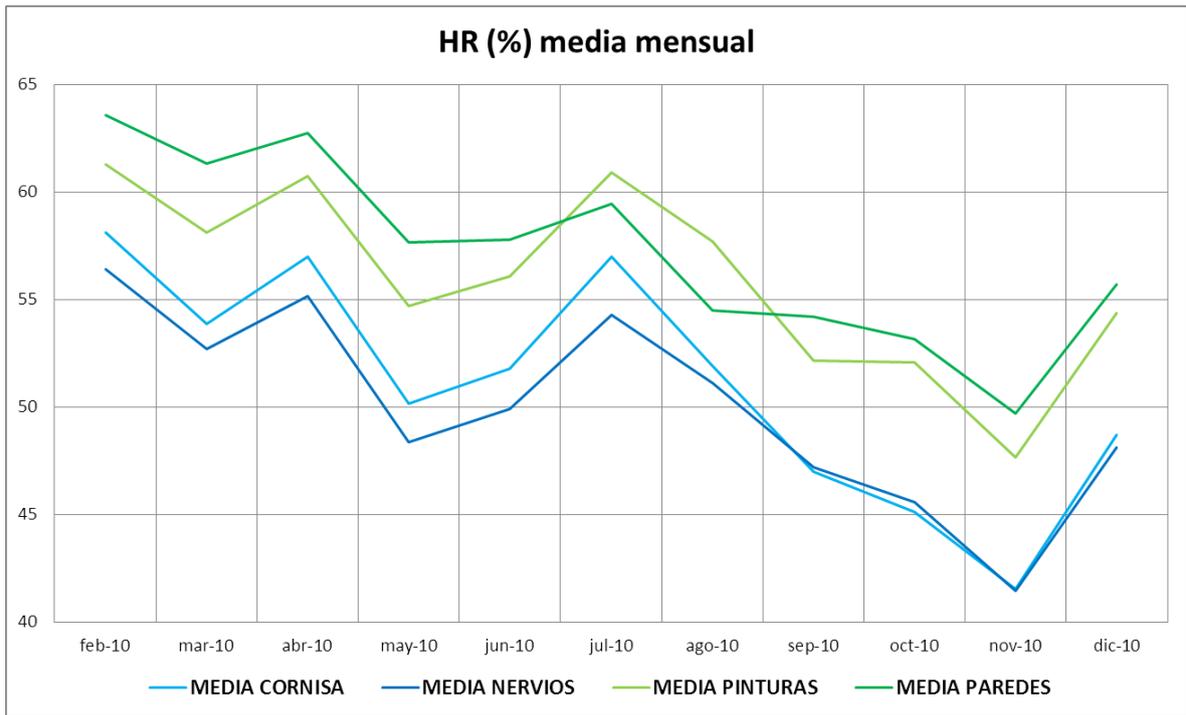


Figura 4.56: HR media mensual. Año 2010.

Se aprecia en T^a una diferencia entre líneas de unos 1 ó 2°C excepto entre las líneas de pinturas y paredes, donde la temperatura es prácticamente la misma. Es lógico que los sensores de pinturas y paredes, al estar a mayor altura, tengan una temperatura un poco mayor, por el efecto que produce la elevación del calor del interior templo. Estas diferencias son, no obstante, poco importantes.

En HR, sin embargo, se observan unas diferencias mayores entre las líneas que miden HR en el aire (cornisa y nervios) y las líneas del interior de los materiales (pinturas y paredes), en torno a 5%. La diferencia entre las líneas de cornisa y nervios es pequeña, en torno a 1% y la diferencia entre las líneas de pintura y paredes también es pequeña, 1-2%.

Estas diferencias se ponen de manifiesto de una forma más evidente si analizamos los datos de todos los sensores de cada línea.

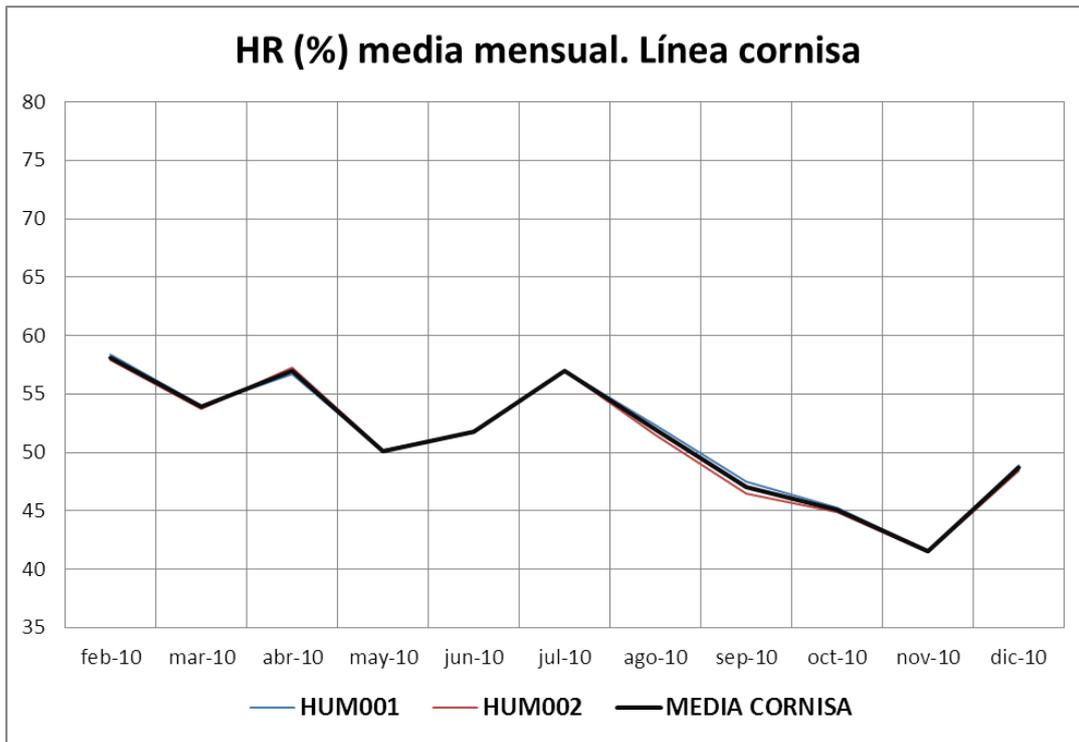


Figura 4.57: HR % de los sensores de la línea de cornisa. Año 2010.

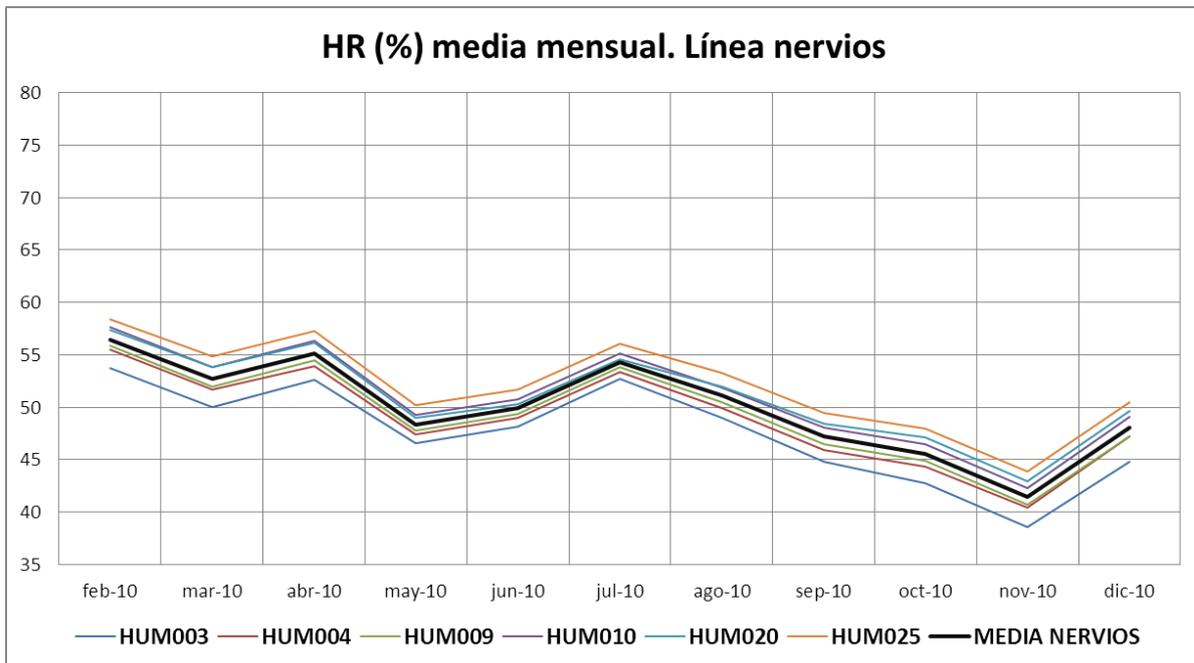


Figura 4.58: HR % de los sensores de la línea de nervios. Año 2010.

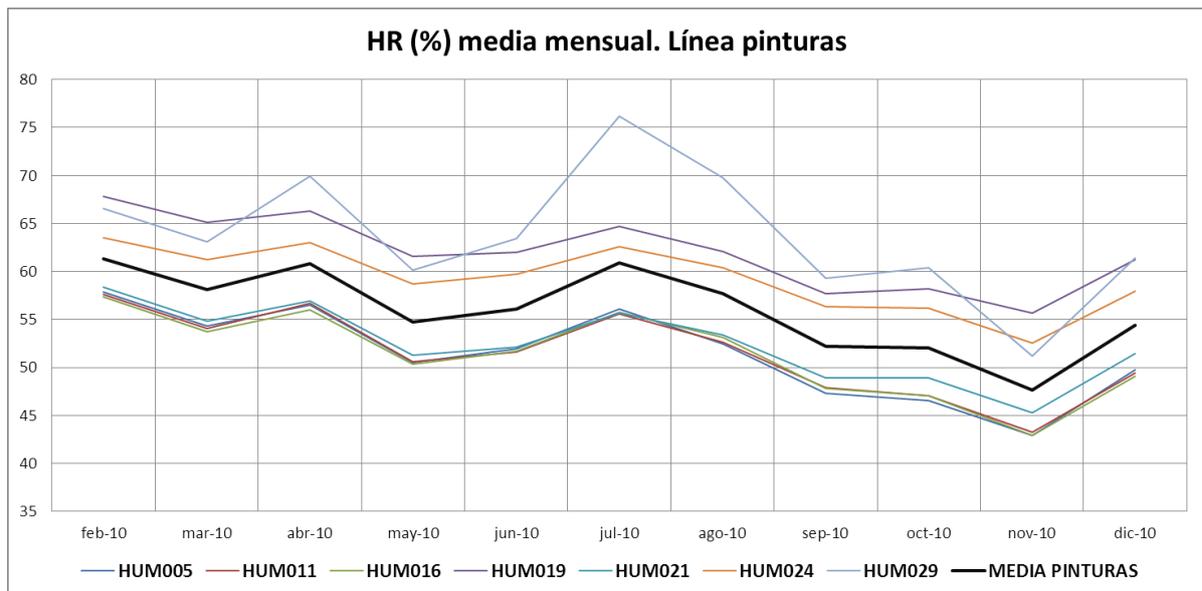


Figura 4.59: HR % de los sensores de la línea de pinturas. Año 2010.

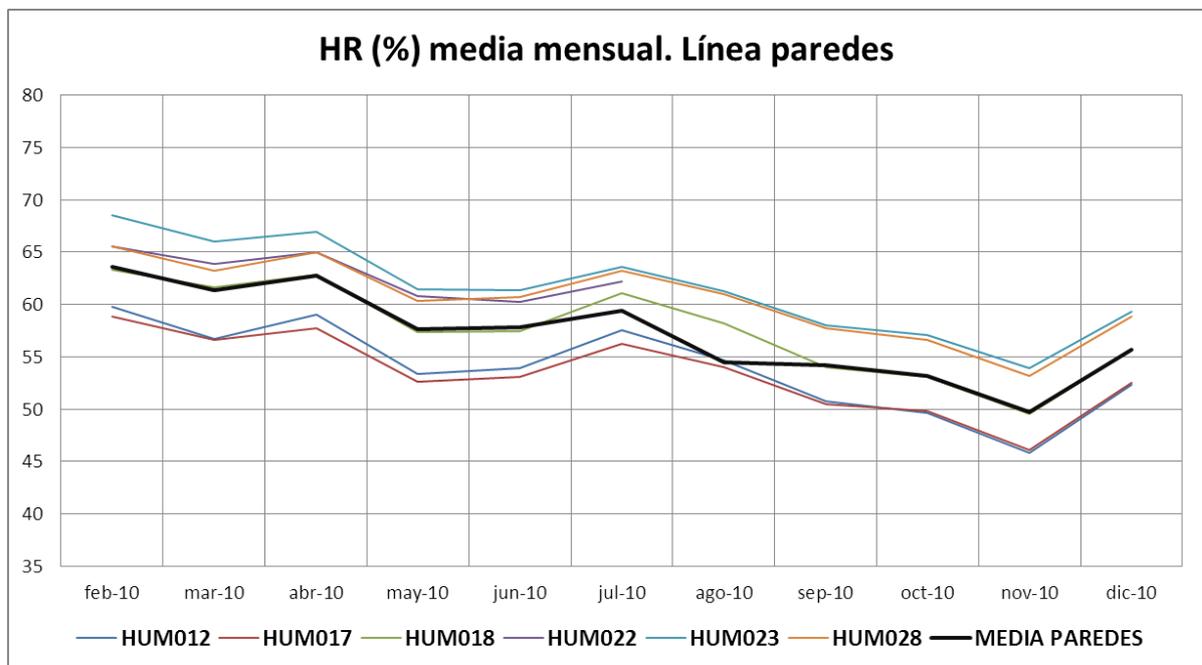


Figura 4.60: HR % de los sensores de la línea de paredes. Año 2010.

Se aprecia claramente que no todas las líneas presentan el mismo comportamiento: mientras en las líneas de cornisa y nervios, los distintos sensores recogen datos muy similares, en las líneas de paredes y especialmente de pinturas, las diferencias entre los sensores de la misma línea son importantes.

Por tanto, es importante profundizar en el estudio de los datos de HR, especialmente en las líneas de pinturas y paredes porque es donde se encuentran las mayores diferencias que quizá expliquen la aparición de sales en unos puntos de la bóveda y no en otros.

4.4. Datos recogidos en 2011.

En el momento en que se escriben estas líneas (septiembre de 2011) el sistema de monitorización sigue funcionando y recogiendo datos que esperamos sean de utilidad para estudios futuros. Los datos recogidos en 2011 no se incluyen en este trabajo porque es necesario realizar diversos análisis sobre estos datos antes de poder extraer conclusiones.

Sin embargo, es importante reseñar que en Agosto de 2011 se ha realizado una nueva calibración de algunos sensores para asegurar que el funcionamiento del sistema sigue siendo correcto y que por lo tanto, los datos recogidos son fiables.

Para ello, ha sido necesario acceder al lugar donde se encontraban instalados estos sensores, desmontarlos e introducirlos en una cámara climática de HR donde se incrementa la humedad desde el 15% hasta el 80% en 9 pasos. En esta cámara se introducen también 4 sensores calibrados por el fabricante, cuyos datos sirven como control del proceso.

El problema que entraña esta operación es que el acceso a los sensores está condicionado a la colocación de andamios o escaleras, lo cual es complicado porque puede interferir con los oficios religiosos y hay que contar con los permisos necesarios. Por esta razón, únicamente se han desmontado los sensores de la línea de cornisa, sensores 1 y 2, los cuales son accesibles desde la plataforma de acceso, sin la intervención de otros medios auxiliares.

Los resultados de la calibración se muestran en la tabla siguiente:

Paso	Sensores calibrados por el fabricante				Sensores para recalibrar	
	S1	S2	S3	S4	1	2
1	16.95	16.89	17.14	17.16	17.82	17.85
2	26.80	26.50	26.79	26.87	27.12	27.34
3	36.82	37.03	36.92	37.00	37.16	37.62
4	42.36	42.52	42.74	42.50	42.37	42.86
5	53.29	53.60	53.44	53.60	53.40	53.41
6	59.40	59.21	59.31	59.48	58.81	59.22
7	69.83	70.24	70.10	70.43	69.58	69.87

8	75.18	75.30	75.94	75.88	75.44	75.40
9	80.01	80.61	81.69	81.68	80.83	80.92
Media HR	51.18	51.32	51.56	51.62	51.39	51.61
Media HR— 51.42%	-0.24	-0.10	0.14	0.20	-0.03	0.19

Tabla 4.8.A Datos de la prueba de calibración de HR de varios sensores en Agosto de 2011.

El valor 51.42% que se indica en la última fila es el valor medio obtenido para los sensores calibrados por el fabricante. Para estos sensores, el sesgo está en torno de $\pm 0.2\%$, mientras que para los sensores que se están recalibrando este valor es muy similar. Los sesgos son mucho menores que la deriva indicada por el fabricante que es de $\pm 0.5\%$ por año, en condiciones normales de almacenamiento, lo cual supondría un $\pm 2\%$ después de cuatro años de monitorización.

Según la tabla, vemos que el sesgo es negativo para el sensor 1 y positivo para el sensor 2. Teniendo en cuenta que los sensores han estado funcionando durante cuatro años, los bajos valores de desviación obtenidos, sugieren que la deriva del sistema de monitorización es despreciable en cuanto a humedad relativa.

Por otra parte, en el mismo experimento también se controló la temperatura y se obtuvieron los siguientes resultados:

	Sensores calibrados por el fabricante				Sensores para recalibrar	
	S1	S2	S3	S4	1	2
T ^a media	20.46	19.86	19.98	20.14	20.25	20.34
T ^a media -20.11	0.35	-0.25	-0.13	0.03	0.14	0.23

Tabla 4.8.B Datos de la prueba de calibración de T^a de varios sensores en Agosto de 2011.

La T^a media registrada por los sensores calibrados por el fabricante fue de 20.11 °C, dando como resultado un sesgo medio aproximado de ± 0.3 °C. De forma similar, el sesgo medio de los sensores 1 y 2 fue de +0.19 °C, un valor que indica que la deriva de los sensores de temperatura es también muy pequeña.

Para terminar con este punto es interesante reseñar que la precisión dada por el fabricante para este sensor de temperatura es de ± 2 °C, muy superior a la obtenida en los resultados de laboratorio. Esto quizá responda a una estrategia comercial del fabricante que trate de vender los mismos sensores, con distinto encapsulado, como un producto distinto de mayor precisión a un precio superior.

5. ESTUDIO DE LOS DATOS MEDIANTE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA).

5.1. Generalidades.

Los análisis de estadística descriptiva realizados en los puntos 4.2 y 4.3 no sirven para determinar si las diferencias entre los datos de unos sensores y otros son significativas, ya que los distintos sensores pueden interpretarse como variables dependientes entre sí: la HR medida en el sensor 1 no es independiente de la HR medida en el sensor 2, ya que ambos sensores están próximos, y lo mismo ocurre con cualquier otro sensor.

Sí sirve, aquella estadística descriptiva para establecer un marco general de comportamiento de la T^a y HR en la bóveda y extraer algunas conclusiones útiles como por ejemplo, predecir que los datos de Temperatura son todos muy similares, con diferencias mínimas entre sensores y que por lo tanto, la Temperatura no es un factor que condicione las diferencias de conservación que se aprecian en distintos puntos de la cúpula.

En cambio, sí parece probable que las diferencias de Humedad Relativa encontradas entre los distintos sensores de HR estén relacionadas con la aparición de sales en algunos puntos de los frescos. Sería muy interesante relacionar los sensores de mayor (o menor) HR con la aparición de eflorescencias, ya que esto nos indicaría que la génesis de estas sales estaría relacionada con la HR y daría a los conservadores una guía para encontrar estrategias correctas de conservación preventiva de los frescos.

Por tanto, en los puntos siguientes se va a realizar un análisis estadístico en profundidad sobre los datos de HR únicamente, dejando el estudio de la Temperatura para futuros trabajos.

5.2. Aspectos cuantitativos de los datos de HR obtenidos.

Los datos sobre los que se va a realizar el PCA son los correspondientes a los años 2007, 2008 y 2010.

Los datos recogidos durante el **año 2007** fueron tomados con la primera instalación del sistema con una frecuencia de un dato por sensor cada hora. El total de datos recogidos puede verse resumido en la siguiente tabla:

Mes	Datos recogidos HR (aprox.)
Febrero de 2007	2.583
Septiembre de 2007	1.940
Octubre de 2007	3.368
Noviembre de 2007	5.344

Tabla 5.1: Datos de HR recogidos en el año 2007.

La escasa cantidad de datos recogidos responde a los problemas surgidos al tratarse de un sistema nuevo sobre el que no se tenía ninguna experiencia.

Por el contrario, en este primer año de recogida de datos, casi todos los sensores colocados funcionaban correctamente, a excepción de los sensores de Humedad Relativa 6, 13, 14, 20, 30, 31 y 32, que no funcionaban. El sensor de HR 32 que nunca se consiguió hacer funcionar de un modo correcto, estaba colocado en la azotea y servía para detectar la humedad relativa del exterior de la Catedral.

A principios de **2008** se mejoró el sistema y se aumentó la frecuencia de los datos recogidos a un dato por sensor cada minuto. Esto supuso un incremento muy importante en la cantidad de datos recogidos como refleja la siguiente tabla:

Mes	Cantidad de datos obtenidos HR (aprox.)
Enero de 2008	727.089
Febrero de 2008	1.102.918
Marzo de 2008	982.606
Abril de 2008	1.130.770
Mayo de 2008	1.335.450
Junio de 2008	1.293.262
Julio de 2008	836.359
Agosto de 2008	1.148.250
Septiembre de 2008	1.287.988
Octubre de 2008	1.318.622
Noviembre de 2008	757.732
Diciembre de 2008	304.249

Tabla 5.2: Datos de HR recogidos en el año 2008.

En este año, sin embargo, dejaron de funcionar algunos sensores: de la línea de nervios el sensor 20 y de la línea de paredes el sensor 18.

Hay que tener en cuenta que, una vez colocados los sensores, para acceder a ellos era necesario montar un complejo andamio, cosa inviable fuera de la época de los trabajos de restauración.

Esta situación se agravó a finales del año 2008 cuando dejó de funcionar el microcontrolador. Por diversas circunstancias, no pudo repararse hasta principios de 2010, momento en que se cambió el sistema de recogida de datos con un nuevo microcontrolador y una distribución en cuatro líneas de los sensores, como ya se explicó en el punto 3.2. Esta configuración (Figura 3.1.A) es la que en la actualidad (Mayo de 2011) sigue funcionando y recogiendo datos.

Los datos recogidos durante el año 2010, con una frecuencia de un dato por sensor cada minuto, fueron los siguientes:

Mes	Cantidad de datos Obtenidos HR (aprox.)
Enero de 2010	4.440
Febrero de 2010	218.926
Marzo de 2010	983.743
Abril de 2010	996.647
Mayo de 2010	1.042.686
Junio de 2010	982.517
Julio de 2010	698.601
Agosto de 2010	1.034.210
Septiembre de 2010	898.712
Octubre de 2010	1.024.241
Noviembre de 2010	997.160
Diciembre de 2010	1.025.820

Tabla 5.3: Datos de HR recogidos en el año 2010.

Las diferencias de datos recogidos entre los distintos meses se deben a fallos en la transmisión entre el sensor y el micro. Se ha podido comprobar que el microcontrolador que se está utilizando es bastante sensible a interferencias, especialmente a variaciones de tensión de la corriente de alimentación. En estos casos, el micro recoge una información incongruente (números negativos o valores superiores al 100% de HR) que hay que filtrar y desechar con el software Burrito.

Desgraciadamente, a pesar de las mejoras realizadas en el sistema, se encontró que nuevamente dejaban de funcionar algunos sensores, aunque por el contrario, algunos que no funcionaron en años anteriores, volvieron a enviar datos.

En la siguiente tabla, se indica de forma resumida los sensores de HR que funcionan y los que no, por años.

Posición	Sensor	Año ¹		
		2007	2008	2010
Cornisa	1, 2	OK	OK	OK
Nervios	3, 4, 9, 10, 25	OK	OK	OK
	20	OK	X	OK
Paredes	12, 17, 23, 28	OK	OK	OK
	6, 13	X	X	X
	7, 27	OK	OK	X
	22	OK	OK	OK/X ²
	18	OK	X	OK
Pinturas	5, 11, 16, 19, 21, 24	OK	OK	OK
	8, 26	OK	OK	X
	14	X	X	X
	29	OK	OK	X ³

Tabla 5.4: Tabla indicando el funcionamiento de los sensores de HR durante los tres años del estudio.

1: OK significa funcionamiento correcto. X significa mal funcionamiento. El mal funcionamiento se detecta por la recogida de datos incongruentes (números negativos o continuamente superiores al 100% de HR).

2: El sensor 22 estuvo operativo hasta el 18 de Julio de 2010. A partir de ese momento, los datos registrados fueron siempre valores negativos entre -17 y -23. Obviamente, estos valores anómalos fueron desechados.

3: El sensor 29 tuvo un comportamiento “extraño” a lo largo del año 2010. Este comportamiento del sensor 29 se estudia detalladamente más adelante en este trabajo.

5.3. Justificación del método de análisis empleado.

Para el estudio estadístico de los datos de HR se va a utilizar un Análisis de Componentes Principales (en adelante, PCA por sus siglas en inglés).

PCA es una técnica útil para explicar la variabilidad de los datos de una matriz, así como para la interpretación de las relaciones entre las observaciones y variables. En este caso, las observaciones serán los instantes de tiempo que son las filas de la matriz y las variables serán los distintos sensores que se colocarán en las columnas [110].

Sobre los datos hay que aplicar diferentes métodos de tratamiento previo antes de realizar un PCA. Si el interés se basa en la identificación de las estructuras de correlación entre las variables, que suele ser el caso, los datos deben estar centrados por columnas antes de realizar el PCA, restando el valor medio de cada columna, de modo que todos los datos centrados tienen un promedio nulo para cada columna o variable. Este tratamiento previo, a priori, parece apropiado en este caso porque el objetivo es comprender las similitudes y diferencias entre los sensores [46].

La idea de aplicar PCA con el tratamiento previo descrito, se obtiene de la literatura sobre el control estadístico multivariable utilizado en química en procesos por lotes [14, 19]. En una reacción química por lotes, las variables del proceso como la temperatura o la presión siguen un patrón específico a lo largo del curso de la reacción, siendo el objetivo controlar adecuadamente el proceso de tal modo que las desviaciones respecto del patrón sean lo más bajas posibles. En estos casos, el PCA puede ser utilizado para diagnosticar si el proceso se desvía de las condiciones normales de operación. Sin embargo, antes de aplicar el PCA se realiza habitualmente el centrado de los datos con el propósito de eliminar la variabilidad causada por el tiempo. Esta metodología se ha aplicado satisfactoriamente en numerosas ocasiones [15, 62].

5.4. Metodología para la realización de los PCA.

Todos los análisis de PCA se realizaron con el software SIMCA-P 10.0 [117] y se estudiaron las 5 primeras componentes, PC1, PC2, PC3, PC4 y PC5.

La primera componente, PC1, puede ser interpretada como la combinación lineal de las variables originales que explica la mayor cantidad de la variabilidad total de los datos. Del mismo modo, PC2 o segunda componente, es la combinación lineal de las variables que explica la mayor parte de la variabilidad restante, la no descrita por PC1. El resto de componentes, PC3, PC4, PC5 etc. explican por tanto, la variabilidad que va quedando y que no se explica por las componentes anteriores.

Las contribuciones de las variables en la formación de una componente dada, se llaman *pesos específicos* siendo $p[1]$ el peso específico correspondiente a PC1, $p[2]$ el peso específico correspondiente a PC2 y así sucesivamente.

Obviamente, las componentes que más información aportan sobre la variabilidad son PC1 y PC2. Es por ello que los resultados del PCA se suelen representar en un diagrama cartesiano en dos dimensiones, siendo el eje horizontal el correspondiente a $p[1]$ y el eje vertical el correspondiente a $p[2]$. Es también conveniente estudiar el resto de componentes PC3, PC4, etc. hasta llegar a una componente que ya no explique nada de variabilidad.

Para entender mejor las ventajas de la utilización del método PCA sobre los datos, se llevó a cabo un estudio previo como se explica en [46]: se simularon datos de HR para 8 sensores (figura 5.1. izquierda) dando como resultado una matriz de 8 variables con 170 observaciones para cada sensor. La evolución de HR frente al tiempo es casi paralela para todos los sensores con la única diferencia de que los valles de la señal son más redondeados para los sensores S2, S4, S6 y S8, y más planos para el resto.

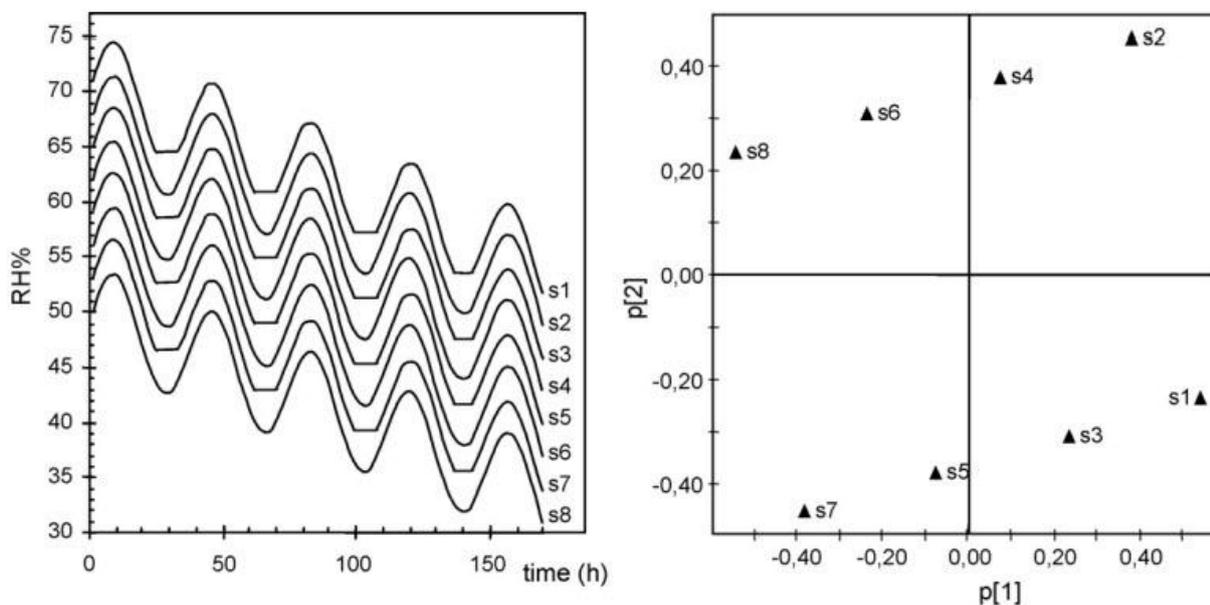


Figura 5.1. Datos simulados de HR para aplicar PCA.

Izquierda: Evolución con datos simulados de HR frente al tiempo correspondiente a 8 sensores (S1 a S8). Derecha: Gráfico $p[2]$ frente a $p[1]$ obtenido mediante la aplicación de PCA a la matriz de los datos simulados de HR. Los datos fueron centrados por columnas antes de realizar el PCA.

Al aplicar PCA sobre estos datos, después de realizar el tratamiento previo de centrado por columnas, se obtuvo el resultado que puede observarse en la figura 5.1. derecha, donde se representa el gráfico PC1 frente a PC2. Claramente se aprecia que $p[1]$ discrimina los sensores

por el valor promedio de su señal, mientras que $p[2]$ lo hace de acuerdo a una forma distinta de la señal.

Este ejemplo ilustra la potencia de este método de análisis estadístico que sirve para poner de manifiesto ligeras diferencias respecto a un patrón de comportamiento bastante similar entre los distintos sensores, como ocurre en este caso.

5.5. PCA de los datos de 2008 y 2010.

Sobre los datos de 2007 se realizó previamente un PCA como se describe en [110]. Consecuentemente, un objetivo muy importante de este trabajo es realizar nuevamente un PCA sobre los datos de 2008 y otro PCA sobre los datos de 2010 y determinar si el sistema de monitorización trabaja de forma similar a lo largo de los tres años.

Hay que tener en cuenta que los datos fueron recogidos con una frecuencia horaria en 2007, pero esta frecuencia se aumentó en 2008 y 2010 a un dato cada minuto. Por tanto, surgía la incógnita de aplicar el PCA sobre todos los datos de 2008 y 2010 o por el contrario, aplicar PCA sobre los datos de 2008 y 2010 promediados por hora para que la frecuencia coincidiera con la de los datos de 2007. Para salir de dudas, se hizo de las dos formas, sobre los datos tomados cada minuto y sobre los datos promediados horariamente, aplicando en cada caso el centrado previo de los datos por columnas. Se encontró que los resultados obtenidos en ambos casos eran muy similares porque los valores de HR recogidos en cada minuto son muy similares a los recogidos en los minutos siguientes, y la presencia de datos redundantes no es un problema para el análisis PCA. En consecuencia, se decidió trabajar con datos promediados horariamente en 2008 y 2010 porque la cantidad de datos es más manejable, sobre todo teniendo en cuenta que el sistema de monitorización está previsto que funcione durante varios años.

La opción elegida para la toma de datos y posterior almacenamiento y gestión fue la de recoger un dato cada minuto, filtrar los datos erróneos, calcular la media horaria (con el software Burrito) y almacenar sólo el dato promediado lo que da como resultado un sistema de adquisición de datos muy eficiente y unas bases de datos manejables por equipos informáticos domésticos.

Así pues, siguiendo la misma metodología que se utilizó para los datos del año 2007, se obtienen los PCA de los años 2008 y 2010, teniendo en total tres modelos, que puestos en un gráfico $p[1]$ frente a $p[2]$ nos indicarán las similitudes entre los diferentes años.

Este gráfico puede verse en la figura siguiente:

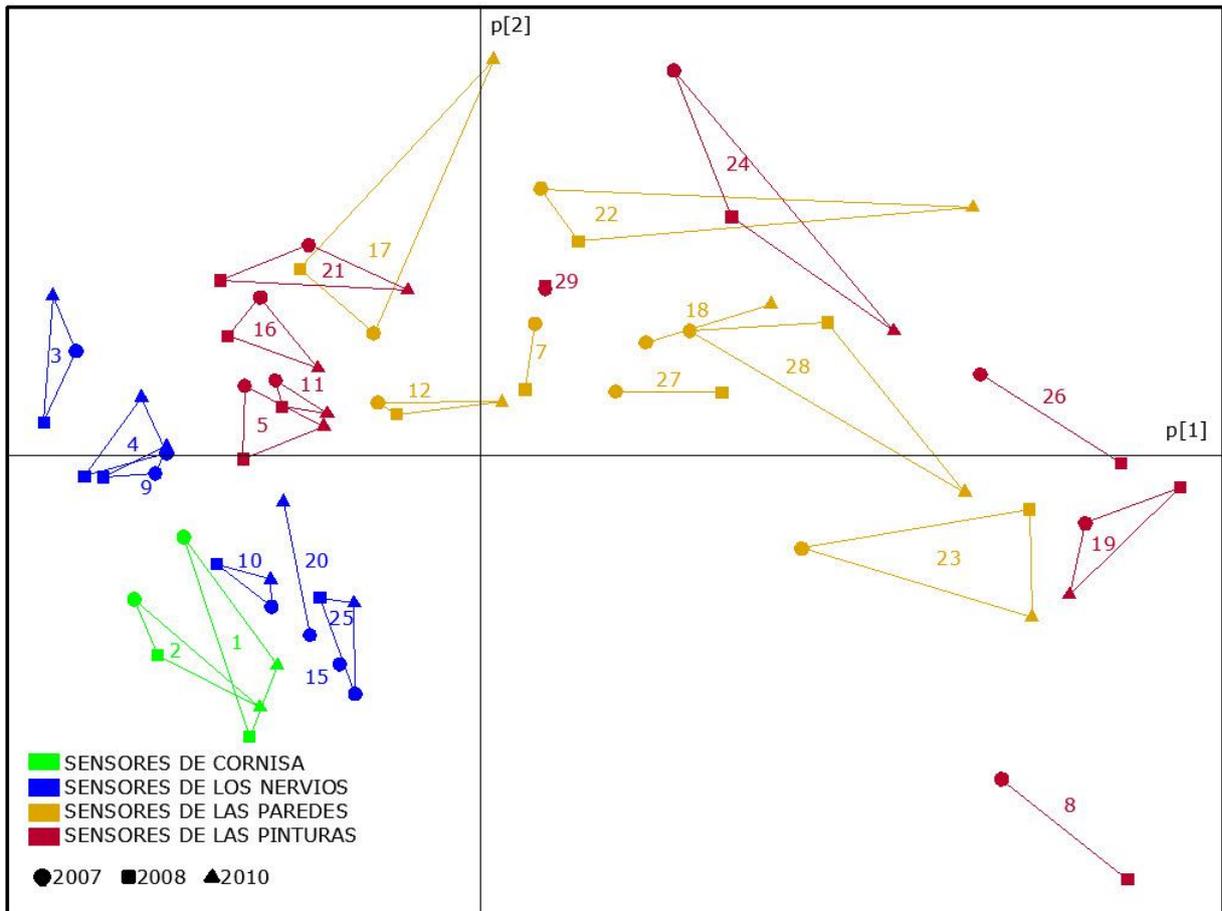


Figura 5.2: $p[1]$ frente a $p[2]$ de los años 2007, 2008 y 2010.

En esta figura aparece cada sensor representado por uno, dos o tres puntos, correspondiendo cada punto al dato obtenido por el PCA para el año 2007 (representado por un círculo), 2008 (cuadrado) y 2010 (triángulo) respectivamente. Recordemos que el motivo para que no haya datos de todos los años para cada sensor es el mal funcionamiento de algunos de ellos a lo largo del tiempo, información que puede verse resumida en la tabla 5.4.

Uniendo los puntos para un mismo sensor se obtiene una figura cuya área indica la similitud de los datos obtenidos a lo largo de los tres años. Un área pequeña indica que el comportamiento del sensor es muy estable ya que los datos recogidos son muy similares a lo largo de los tres años. Un área más grande indica que los datos recogidos han ido diferenciándose con el paso del tiempo.

Pero además, la situación de los puntos en el gráfico nos indica si su comportamiento es similar a los sensores situados en la cornisa y los nervios, los sensores que miden HR del aire. Vemos en la gráfica que los sensores de la cornisa (en verde) aparecen juntos en la zona inferior izquierda. Junto a ellos, un poco más arriba, están los sensores de los nervios (color azul) próximos entre sí. Dado que estos sensores aparecen próximos en el gráfico, parecen un buen indicador para establecer un patrón de funcionamiento correcto.

Si nos fijamos en el resto de los sensores, los de las líneas de paredes y pinturas, vemos que ya no aparecen próximos entre sí, sino que se reparten a lo largo y alto del gráfico. Algunos sensores aparecen próximos a los de la cornisa y nervios; otros aparecen muy alejados. Si esta proximidad (o lejanía) a lo que hemos llamado patrón de funcionamiento correcto pudiéramos relacionarla con las humedades aparecidas en algunos puntos de la bóveda, estaríamos consiguiendo un importante objetivo: el de poder determinar mediante un modelo estadístico zonas de los frescos en estado de deterioro.

Pero antes, vamos a tratar de dar una interpretación física a los resultados obtenidos porque: ¿Cuál es el significado físico de $p[1]$, si lo hay? ¿Y el de $p[2]$? ¿Y el del resto de componentes?

5.6. Estudio de las componentes principales más relevantes.

Estudio de la primera componente.

Como se ha tratado antes, en el trabajo previo [110] se estableció que los valores de $p[1]$ estaban correlacionados con el valor de la HR media, es decir, con el promedio de todos los datos recogidos de HR para un mismo sensor.

Con el propósito de comprobar esta correlación para los datos de 2008 y 2010, se realizó un promedio de todos los datos de cada sensor a lo largo del año 2008 y otro promedio para el año 2010, que se llamaron respectivamente, \overline{RH}_{2008} y \overline{RH}_{2010} . La correlación entre \overline{RH}_{2008} y $p[1]_{2008}$ se vió que era estadísticamente relevante ($r = 0,997, p < 0,0001$) así como la correlación entre \overline{RH}_{2010} y $p[1]_{2010}$ ($r = 0,994, p < 0,0001$). Dado que esta correlación es muy alta, es posible reemplazar los valores de $p[1]$ del gráfico de $p[2]$ frente a $p[1]$ por el valor medio de HR, como se muestra en la figura siguiente. Obviamente, esta figura es muy similar a la de la figura 5.2, pero usando el valor promedio de HR obtenemos una interpretación física más intuitiva.

Nota: los valores de r y p son indicadores de la bondad de la relación obtenida. El coeficiente de correlación r es una medida de la dependencia lineal de las dos variables que se estudian y varía entre -1 y 1. Si r está próximo a 1 ó a -1 las variables están fuertemente relacionadas y si está próximo a 0 no lo están. p o también llamado **valor p** (o p-value en inglés) se define como la probabilidad de que las dos variables estuvieran relacionadas por azar. Cuanto más pequeño sea este valor, menor es la probabilidad de que intervenga el azar en la correlación entre ambas variables: si $p = 0$, no interviene el azar. Como es un valor de probabilidad, toma valores entre 0 y 1. Habitualmente, en estadística, se considera suficiente un nivel de confianza del 95%, (lo que corresponde a $p = 0,05$) y por tanto, se considera estadísticamente significativa la relación entre dos variables cuando p es menor que 0,05. Para más información sobre estos valores y su cálculo consultar la bibliografía [116].

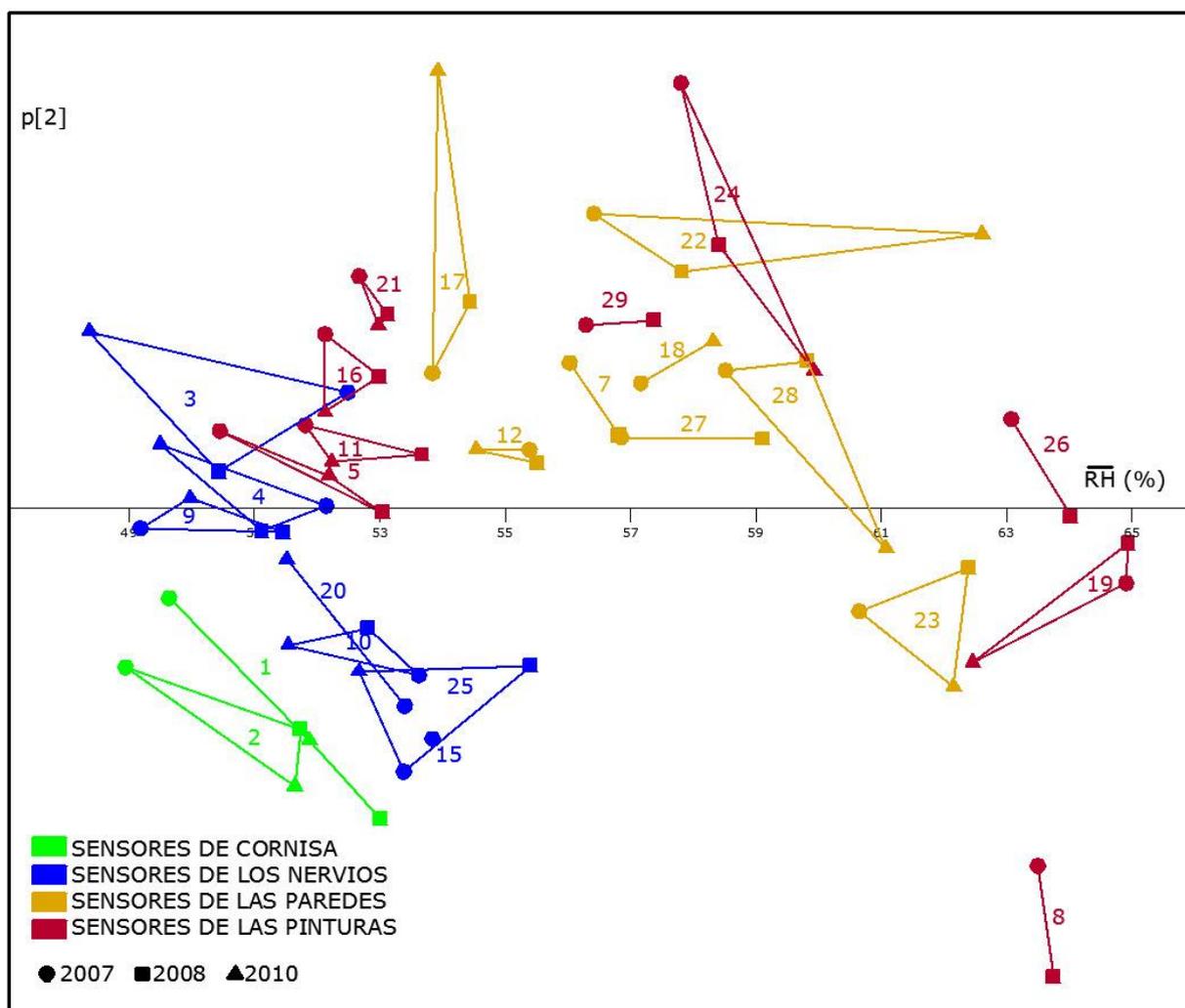


Figura 5.3: RH media frente a $p[2]$ de los años 2007, 2008 y 2010.

La componente horizontal de este gráfico es entonces más fácil de comprender: un valor situado más a la derecha significa que su HR media es superior, y situado más hacia la izquierda significa un valor de HR media inferior.

Vemos que los sensores de cornisa y nervios tienen todos unos valores de HR media próximos, en la zona de la izquierda, la de menor HR media. Esto nos indica que la mayoría del resto de los sensores tienen HR superiores a la de los nervios y cornisa.

Estudio de la segunda componente.

En el trabajo previo [110] también se estableció que $p[2]$ discriminaba los sensores de acuerdo a la “forma” de la señal. Sería pues interesante caracterizar estas diferencias de forma y encontrar una interpretación física para $p[2]$.

Para ello, se intentó relacionar $p[2]$ con varios parámetros físicos que se describen a continuación.

El primer parámetro con el que se intentó correlacionar $p[2]$ fue con la **HR media horaria**, calculada como se indica en la ecuación 5.1. siendo RH_{min} el dato de HR recogido cada minuto por el sensor.

$$\overline{RH}_h = \frac{\sum_{min=0}^{min=59} RH_{min}}{60} \quad (5.1)$$

La **variación media horaria** (HMH) es otro parámetro que se calcula como la media de la diferencia en valor absoluto entre dos datos consecutivos de HR media horaria (ecuación 5.2)

$$HMH = \frac{\sum_{h=2}^H |\overline{RH}_h - \overline{RH}_{h-1}|}{H - 1} \quad (5.2)$$

Por ejemplo, si se han recogido datos de 7200 horas a lo largo de un año, $H=7200$, RH_1 =promedio de HR recogido en la primera hora, RH_h = promedio de HR recogido en la hora h.

El valor absoluto se usa para obtener la variación entre una hora y la anterior sin importar si la diferencia es positiva o negativa. Este cálculo de HMH es equivalente a calcular la primera derivada del primer parámetro, \overline{RH}_h .

La **variación media diaria** (DMV) se calculó del mismo modo, como la media de las diferencias en valor absoluto entre dos valores consecutivos de **HR media diaria** \overline{RH}_d . Estos parámetros se calculan utilizando las ecuaciones siguientes, siendo D el número total de días en los que se recogieron datos.

$$\overline{RH}_d = \frac{\sum_{h=0}^{h=23} \overline{RH}_h}{24} \quad (5.3)$$

$$DMV = \frac{\sum_{d=2}^D |\overline{RH}_d - \overline{RH}_{d-1}|}{D - 1} \quad (5.4)$$

De forma similar, se calculó la **variación media mensual** (MMV) asumiendo 30 días por mes y la **HR media mensual** (\overline{RH}_m), obtenidas según las ecuaciones siguientes:

$$\overline{RH}_m = \frac{\sum_{d=1}^{d=30} \overline{RH}_d}{30} \quad (5.5)$$

$$MMV = \frac{\sum_{m=2}^M |\overline{RH}_m - \overline{RH}_{m-1}|}{M - 1} \quad (5.6)$$

A continuación, con el software Statgraphics 5.1., se realizaron varias regresiones lineales múltiples con la finalidad de determinar si $p[2]$ podía ser predicho como una función de los parámetros descritos (ecuaciones 5.1 a 5.6).

Se realizaron los siguientes intentos de relación:

- Relación $p[2]$ con HR media horaria únicamente.
- Relación $p[2]$ con HR media horaria y HVM.
- Relación $p[2]$ con HR media horaria, HVM y DMV.
- Relación $p[2]$ con HR media horaria, HVM, DMV y MMV.
- Relación $p[2]$ con HR media horaria y DMV.
- Relación $p[2]$ con HR media horaria y MMV.
- Relación $p[2]$ con DMV únicamente.
- Relación $p[2]$ con HVM y DMV.
- Etc.

De todos estos intentos, el mejor resultado (como se explica más adelante, el que obtenía el valor de R^2 más próximo a 1) se obtuvo con la HR media (\overline{RH}) y la variación media diaria (DMV). Las ecuaciones 5.7 y 5.8 son los modelos de regresión resultantes, obtenidos mediante Statgraphics 5.1, para los valores de $p[2]$ correspondientes al año 2008 y 2010 respectivamente.

$$p[2]_{2008} = 232.88 - 2.695 \cdot \overline{RH} - 32.395 \cdot DMV \quad (5.7)$$

$$p[2]_{2010} = 297.03 - 3.869 \cdot \overline{RH} - 32.122 \cdot DMV \quad (5.8)$$

En un primer vistazo, estas dos ecuaciones son bastante similares, por lo que sería interesante obtener un único modelo que sirviera para predecir $p[2]$ en los dos años. Para determinar si los dos modelos son estadísticamente iguales o lo que es lo mismo, las diferencias entre ambos son despreciables, se realizó una regresión lineal entre ambos y el resultado obtenido fue que los dos modelos son diferentes por lo que no puede obtenerse un único modelo válido de $p[2]$ para los dos años. Las razones son desconocidas y sería necesario estudiar el asunto más a fondo, pero una posible causa que podría explicar estas diferencias sería que dos años

distintos no tienen por qué tener la misma HR, máxime cuando los años no son consecutivos (2008 y 2010).

Teniendo en cuenta que el coeficiente de determinación de la ecuación 5.8 ($R^2=0,942$) es mayor que el coeficiente de la ecuación 5.7 ($R^2=0,839$), se decidió adoptar este modelo 5.8 para predecir $p[2]$ en los dos años.

Así pues, con el modelo de la ecuación 5.8 es posible predecir $p[2]$ en función de dos parámetros con significado físico extraídos de los datos: la HR promedio de todos los datos y la Variación Diaria Media (DMV). Para determinar el peso específico de cada uno de estos parámetros en la segunda componente, se realizaron dos nuevos análisis de regresión simples entre $p[2]$ frente a HR promedio y $p[2]$ frente DMV sobre los datos de 2010. Los resultados de estos análisis muestran que no existe correlación significativa $p[2]$ frente HR promedio ($R^2 = 0,0004$ y $P\text{-Value} = 0,80$) ni $p[2]$ frente DMV ($R^2 = 0,30$ y $P\text{-Value} = 0,01$). Sin embargo, sí existe una correlación significativa y negativa RH frente DMV ($R^2 = 0,734$ y $P\text{-Value} < 0,05$) lo que físicamente puede interpretarse como que la variación media diaria es mayor cuanto menor es la RH. Esta correlación puede apreciarse claramente en la figura siguiente.

Nota: el coeficiente de correlación R^2 mide la bondad del ajuste realizado. Toma valores entre 0 y 1, siendo mejor el ajuste cuanto más cercano sea R^2 a 1. El valor de p-value se explicó anteriormente. Para una información exhaustiva sobre el significado y cálculo de estos valores, se recomienda consultar la bibliografía [116].

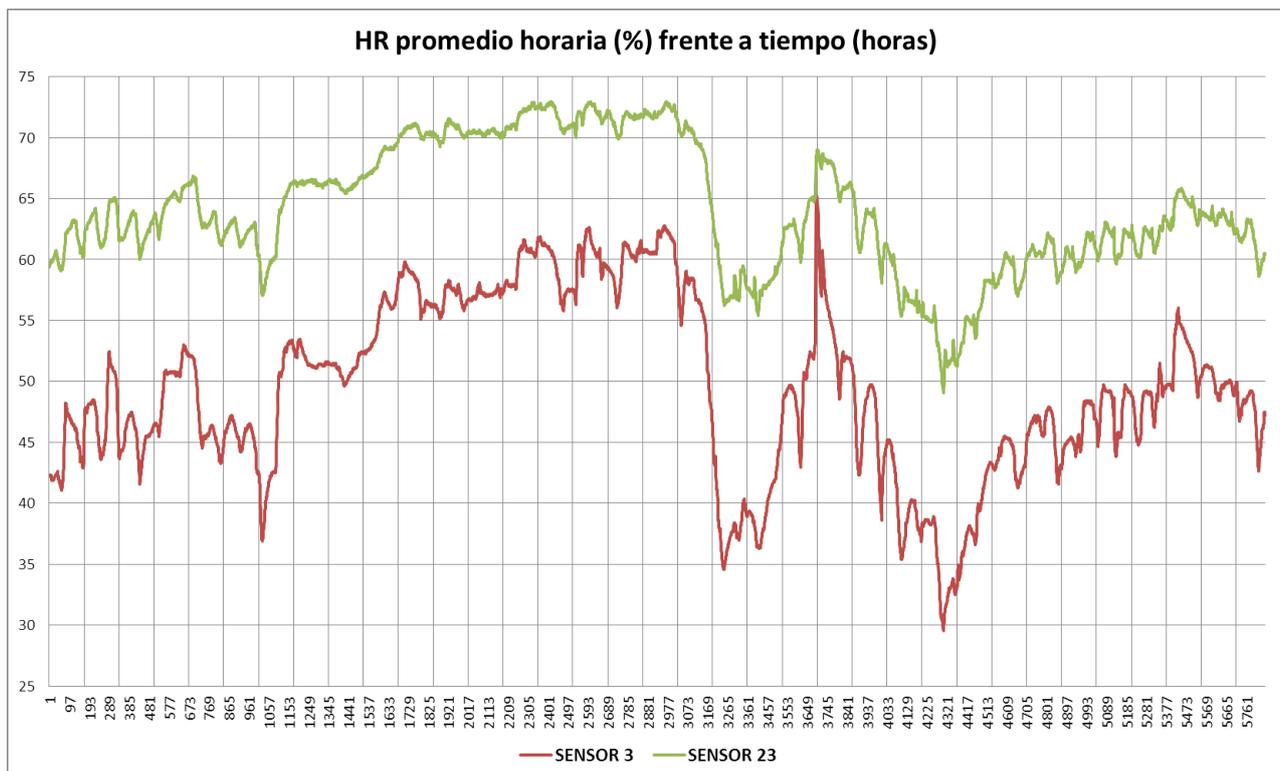


Figura 5.4: Evolución de HR frente al tiempo para los sensores de HR 3 y 23.

La escala horizontal corresponde a intervalos horarios empezando el 1 de abril de 2010 hasta el 31 de mayo de 2010.

Estudio de otras componentes principales: p[3], p[4], etc.

Ya se ha indicado que p[1] y p[2] son las componentes del PCA que más información aportan sobre la variabilidad de los datos y por lo tanto su estudio es inevitable. Aparte de estas componentes, es también interesante comprobar si p[3] y otras componentes aportan información relevante a la monitorización de microclimas.

A este respecto, se encontró que había una correlación estadísticamente significativa entre p[3]₂₀₀₈ y p[3]₂₀₁₀ ($R^2 = 0,5664$, P-Value < 0,05). Sin embargo, esta correlación resultó ser no significativa si la comparación se hacía entre p[4]₂₀₀₈ y p[4]₂₀₁₀ ($R^2 = 0,2114$, P-Value = 0,055).

Estos resultados sugieren que p[3] proporciona información relevante que se mantiene después de dos años de monitorización. En los PCA de 2008 y 2010 se comprobó que los sensores 1 y 2 situados en la cornisa son los que mayor contribución hacen en PC3. Ambos sensores son los que están situados a menor altura desde el suelo y consecuentemente, no es sorprendente que el análisis PCA encuentre sus patrones de HR ligeramente diferentes.

A partir de p[4], la información encontrada es irrelevante.

En este trabajo no se van a estudiar los resultados de p[3], puesto que esto sería objeto de un trabajo de mayor profundidad que necesitaría datos de más años.

Resumen: interpretación de las componentes principales p[1] y p[2].

En resumen, p[1] puede ser interpretada como la HR promedio anual, mientras que p[2] proporciona básicamente información sobre la variación media diaria (DMV) como se refleja en la ecuación 5.8. Con el objeto de simplificar al máximo esta ecuación, se dividen todos los términos por 32.122 y se despeja el lado derecho dando como resultado la ecuación 5.9, más sencilla, lo que redundará en una más fácil interpretación física.

$$0.0311 \cdot p[2] - 9.2469 = -DMV - 0.12 \cdot \overline{RH} \quad (5.9)$$

Por tanto, como HR promedio y DMV tienen una interpretación física, el parámetro $-DMV - 0,12 \cdot \overline{RH}$ puede ser utilizado en vez de $p[2]$ en la figura 5.5. Esta figura 5.5 es muy similar a las figuras 5.2 y 5.3 y puede ser útil para el estudio y diagnóstico de la evolución año tras año de los datos recogidos por los sensores.

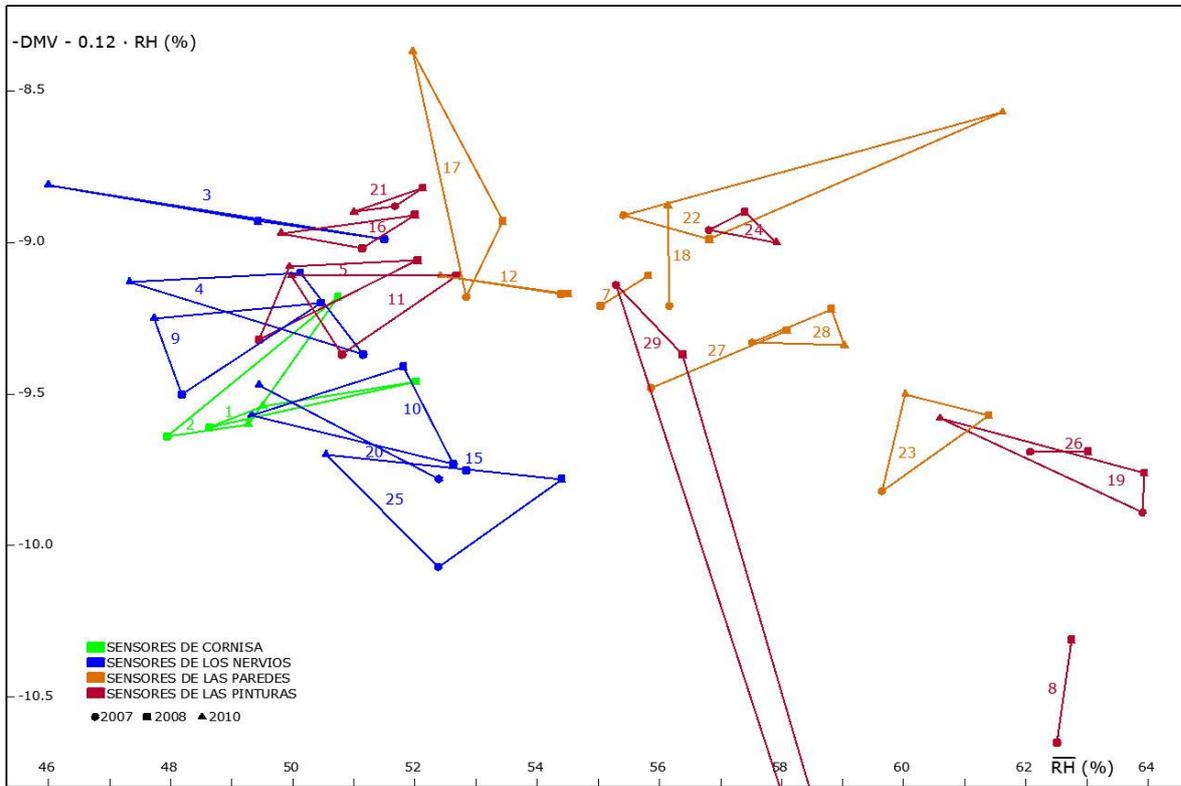


Figura 5.5: Interpretación física de $p[2]$ ($-DMV - 0,12 \cdot \overline{RH}$) frente a HR promedio para los años 2007, 2008 y 2010. El punto para 2010 del sensor 29 está fuera del gráfico, en la intersección de las dos rectas.

La correcta interpretación del gráfico anterior es esencial para entender qué es lo que está pasando en la cúpula con la humedad relativa y con la aparición de sales en algunos puntos. Para profundizar un poco en la comprensión del gráfico, se van a tomar cuatro puntos de distintos sensores, que estén distantes entre sí para que las diferencias sean pronunciadas y se va a comparar su posición en el gráfico con las gráficas de los datos de estos puntos.

Se toman los puntos que se indican en la siguiente figura, todos pertenecientes al año 2010 pero de distintos sensores.

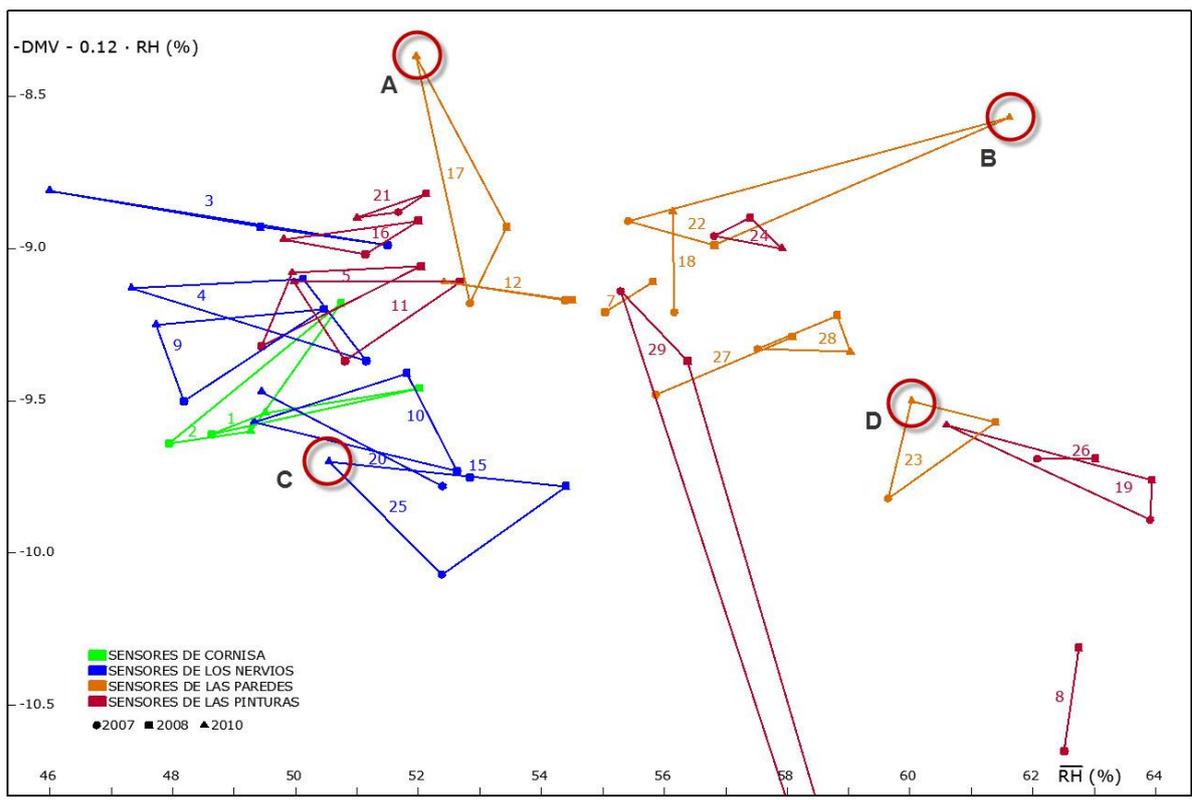


Figura 5.6: Puntos para estudiar en el gráfico de interpretación física de p[2] frente a HR promedio.

Y a continuación se presenta la gráfica con los datos de cada uno de ellos.

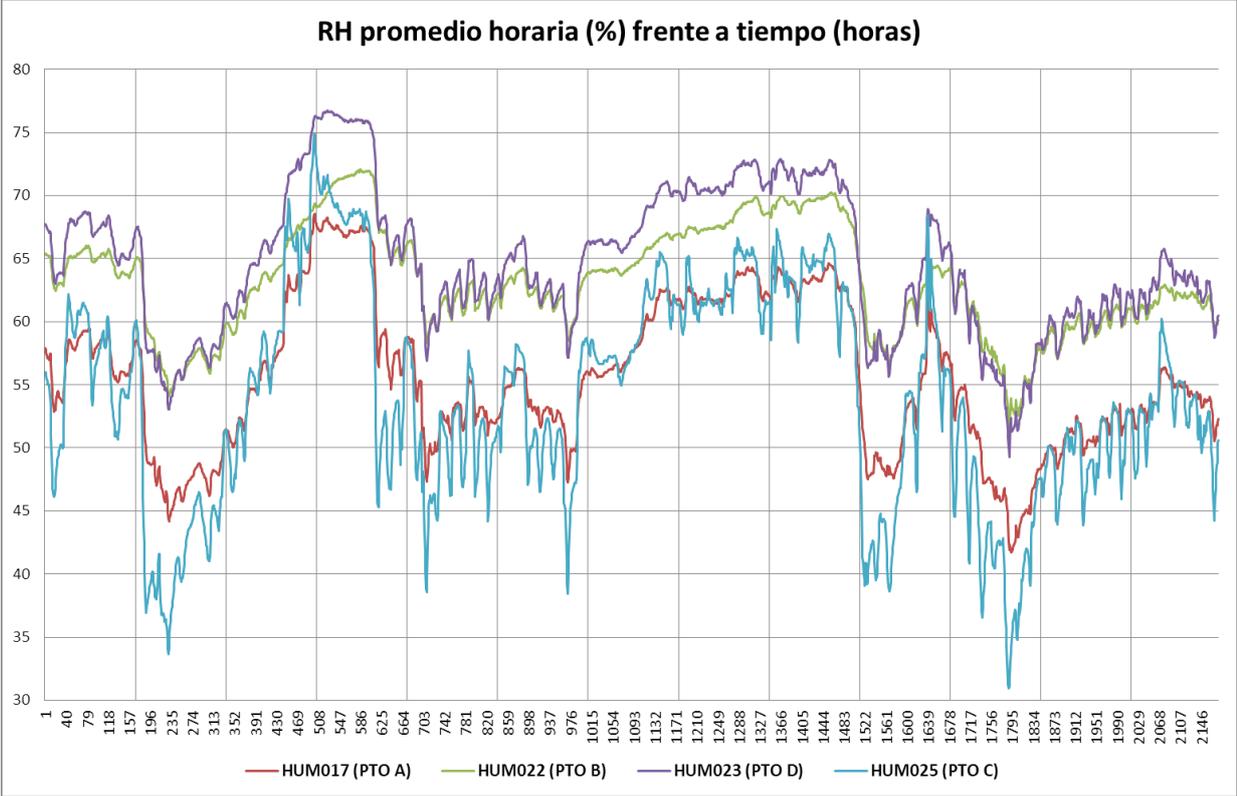


Figura 5.7: Gráfica HR promedio horaria (%) frente a tiempo en horas de cada uno de los puntos de la figura 5.5. Punto A = Sensor HUM017, Punto B = Sensor HUM022, Punto C = Sensor HUM025 y Punto D = Sensor HUM023.

Nota: el eje horizontal corresponde a un dato cada hora entre el 1/3/2010 y el 31/5/2010, sólo un trimestre para simplificar el gráfico, aunque en la figura 5.6 cada punto se obtiene su coordenada en X con el promedio anual.

La interpretación del eje horizontal de la figura 5.6 es obvia: un punto situado a la izquierda tiene menor HR media que un punto situado a la derecha. En la figura 5.7 puede observarse que el sensor 17 y el 25 (puntos A y C, respectivamente de la figura 5.6) tienen una HR media similar, lo cual puede verse mejor en la figura 5.6 ya que ambos están aproximadamente en la misma línea vertical (un poco mayor el sensor 17). Los sensores 22 y 23 están claramente por encima en la figura 5.7, lo que se corresponde con la figura 5.6 donde se aprecia claramente que los puntos B y D están muy a la derecha del punto A y C.

Más interesante es la interpretación del eje vertical de la figura 5.6 donde, por ejemplo, los puntos A y B tienen aproximadamente la misma componente en Y. Si esto lo relacionamos con la figura 5.7 vemos que estos sensores tienen trayectorias casi paralelas, es decir coinciden los picos y los valles y son, de forma aproximada, de la misma magnitud. Por otra parte, los puntos C y D están muy por debajo en la figura 5.6 lo que se corresponde en la figura 5.7 con trayectorias donde los picos y los valles están mucho más marcados que los puntos A y B.

Por tanto, subiendo en el eje vertical de la figura 5.6 están los sensores (puntos A y B) cuyas trayectorias tienden a ser más planas, más horizontales, mientras que bajando en este eje, aparecen los sensores (puntos C y D) cuyas trayectorias tienen picos y valles más pronunciados, lo que indica que las variaciones de HR son más bruscas. Esto se corresponde a lo descrito en el punto 5.4 para la figura 5.1 donde se utilizaron datos simulados de HR.

6. UTILIZACIÓN DE LOS MODELOS OBTENIDOS PARA EXPLICAR LOS PROBLEMAS DE CONSERVACIÓN.

El objetivo principal de todo el sistema de monitorización es determinar patrones de comportamiento anómalos a partir de los datos obtenidos por los sensores. Para ello, se va a tratar de relacionar los modelos obtenidos en el punto anterior con las zonas en las que se han detectado problemas de conservación, fundamentalmente aparición de sales en los frescos, que es el fenómeno más fácilmente observable.

Sobre la figura 5.9 se va a dibujar la zona de “patrón correcto” que ya se determinó que era la zona donde están situados los sensores de la cornisa y los sensores de los nervios porque estos sensores se comportan de un modo estable a lo largo de los años. Los sensores cuyos puntos caigan dentro de la zona de *patrón correcto* o cercano a ella, deberán ser sensores donde no se observen problemas de eflorescencias. Sobre esta figura también se van a dibujar las zonas donde se observan eflorescencias salinas: la aparición de sales deberá ser en zonas donde están los sensores alejados de la zona de *patrón correcto*. Si se cumplen estas condiciones, se podrá afirmar que el modelo encontrado explica el comportamiento de las humedades en el interior de la bóveda y servirá para detectar problemas actuales y futuros conservación.

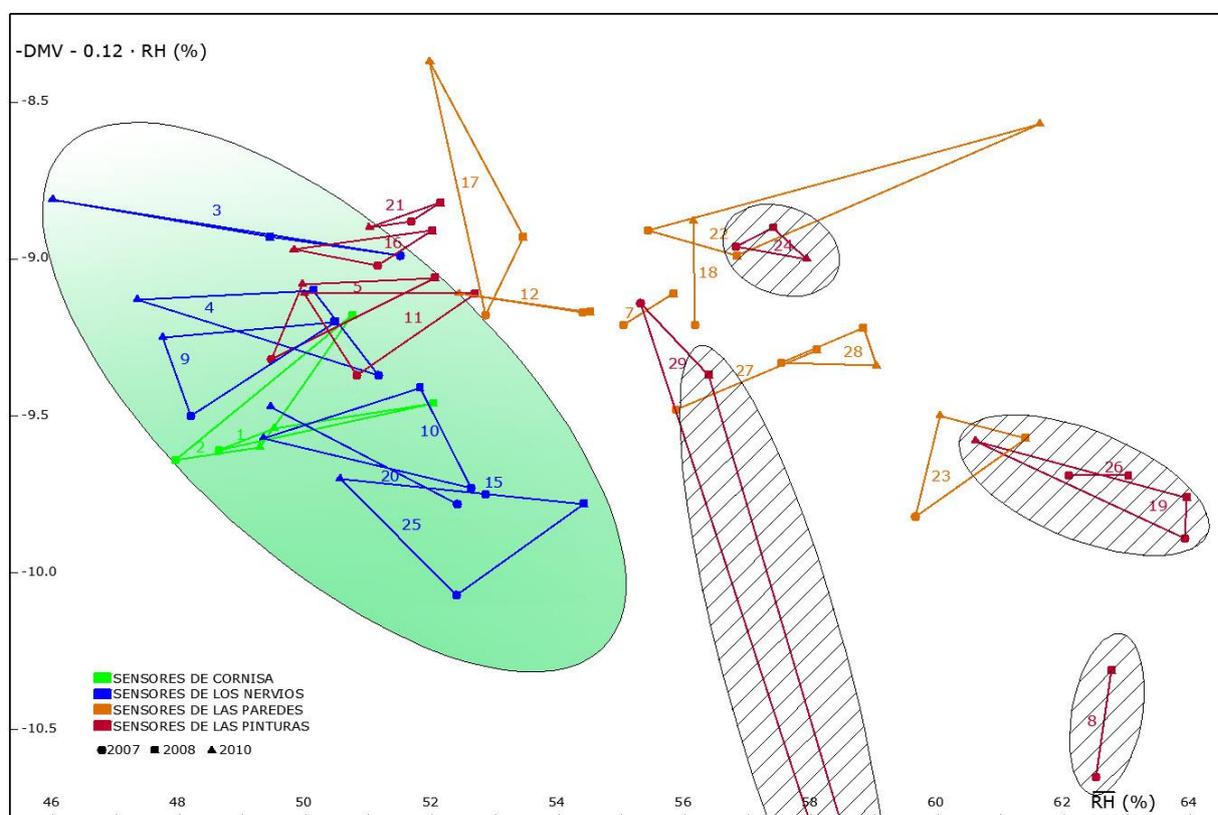


Figura 6.1: Gráfico de la interpretación física de $p[2]$ frente a la HR promedio.

En verde se representa la zona de patrón correcto o buen comportamiento de los sensores. En fondo rallado se representan los sensores donde se observa aparición de sales en los frescos.

De la observación de la figura anterior, se puede concluir que se obtienen resultados congruentes: en la zona de la izquierda del gráfico se encuentran los sensores donde no se han observado problemas de sales, y a la derecha, se encuentran todos los sensores con problemas. Hay que indicar en este punto que durante la restauración se retiró la bóveda barroca que cubría los frescos, y también los ornamentos de las paredes, pero al finalizar los trabajos, se volvieron a instalar los ornamentos barrocos. Por este motivo, desde el punto de vista de un espectador que esté situado a cota cero en el interior del templo, las eflorescencias salinas son visibles en los frescos - en forma de manchas blanquecinas -, pero no en las paredes, ya que quedan ocultos por los ornamentos. Por lo tanto, a nivel del suelo, no pueden observarse problemas en los sensores de las paredes, aunque con el modelo y las gráficas de HR promedio, pueden relacionarse con infiltraciones de humedad.

Atendiendo pues al fenómeno observable que es la aparición de manchas salinas en los frescos, y teniendo en cuenta que los sensores de la cornisa y de los nervios son tomados como patrón de buen funcionamiento, se pueden trazar varias zonas en el modelo: por una parte, la **zona correcta** o de buen funcionamiento, en color verde, que nos indicará la zona donde no hay problemas de humedad ni de afloramientos salinos; por otra parte, la **zona con problemas** o la zona del modelo donde están los sensores con aparición de sales en los frescos, en color rojo. Por último, en amarillo, una **zona intermedia** entre ambas zonas que nos marcará la frontera (Figura 6.2.A).

Otra forma de representar este modelo es en un gráfico de la cúpula donde se representen las apariciones de sales con los sensores de pinturas y de pared (Figura 6.2.B.). En esta figura, puede observarse cómo los sensores marcados en rojo están situados cerca o dentro de las zonas de los frescos manchadas con sales, por lo que el modelo se ajusta a la realidad observada, lo que le da validez y lo convierte en una herramienta válida para interpretar los datos obtenidos.

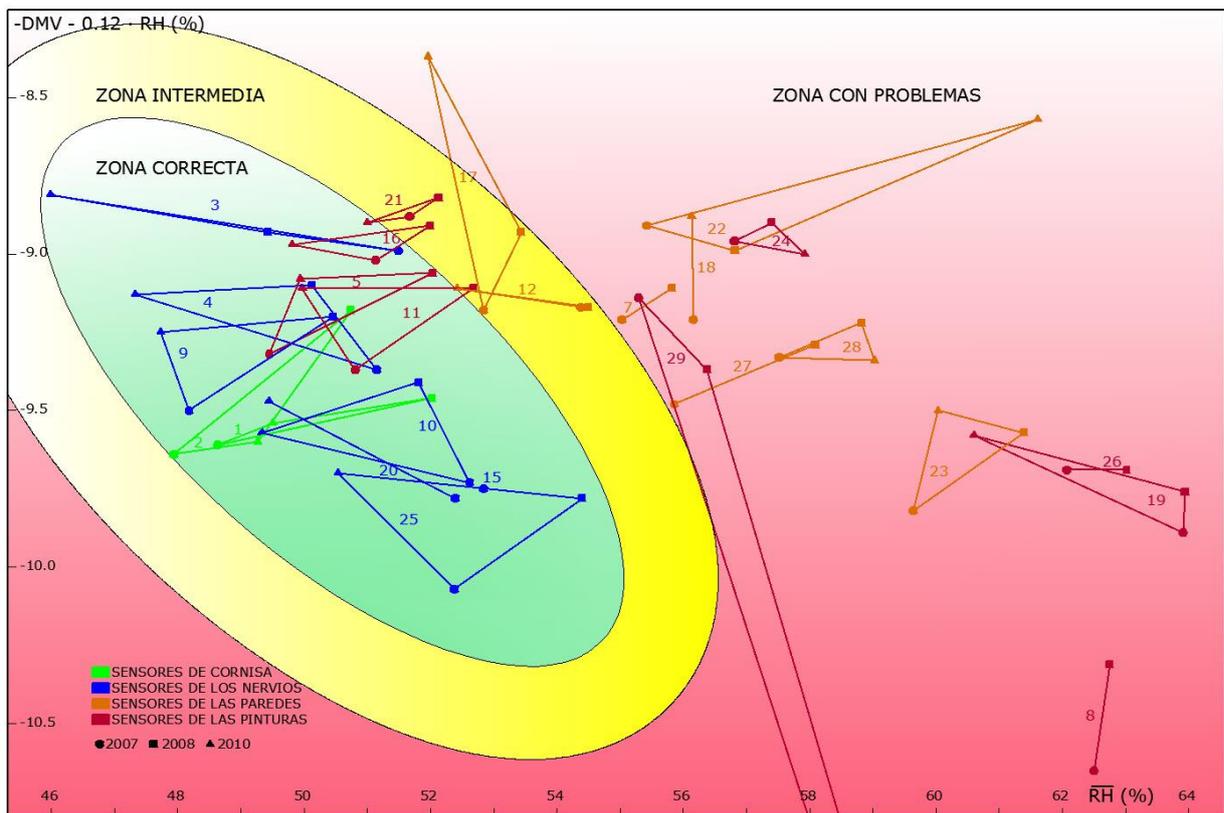


Figura 6.2.A: Modelo con el código de colores.

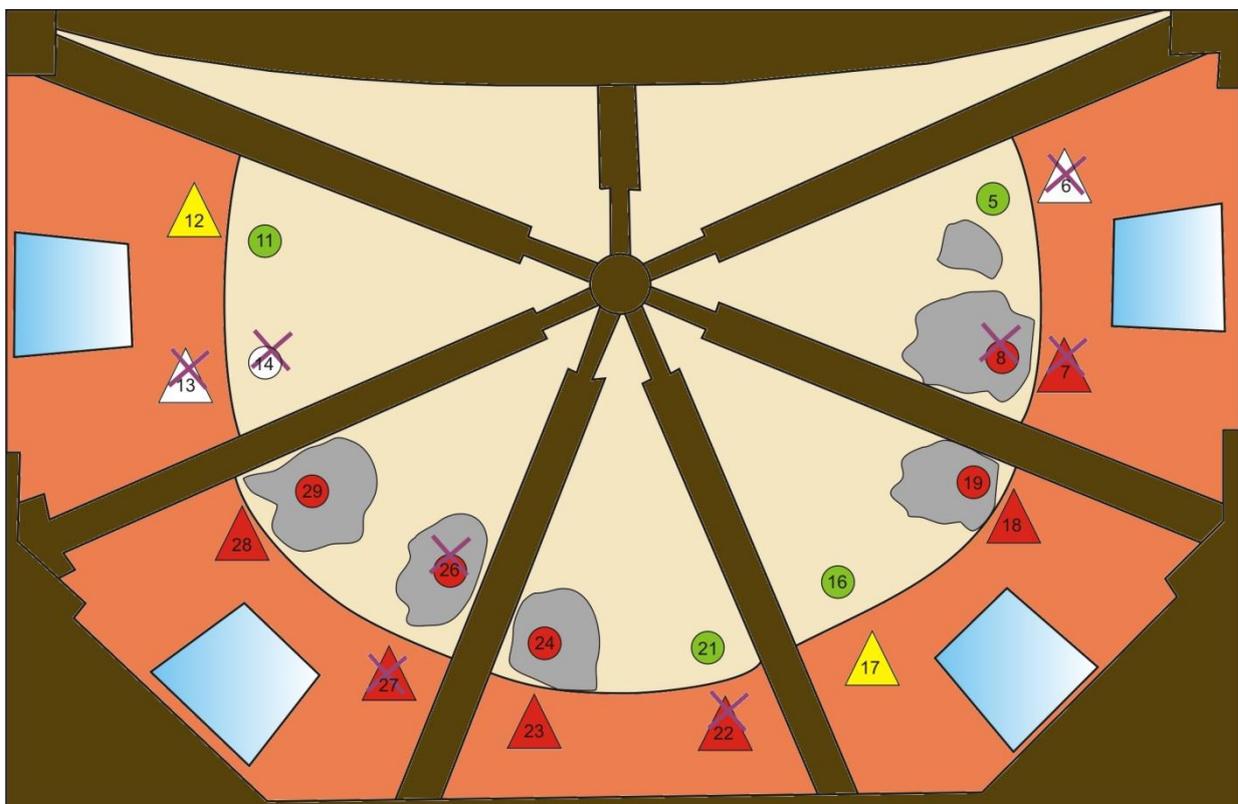


Figura 6.2.B: Cúpula con código de colores.

Notas: En color naranja se representa la zona de paredes. En color ocre claro se representa la zona de pinturas. Los sensores de paredes están marcados con un triángulo y los de las pinturas con un círculo. En color verde, amarillo y rojo se indica respectivamente la pertenencia a la zona correcta, zona intermedia o zona con problemas del modelo. El color blanco indica que no hay datos disponibles de

ese sensor, ni en 2008 ni en 2010. Con un aspa magenta, se indican los sensores que no funcionan a fecha de enero de 2010. En color gris oscuro se representan las zonas con eflorescencias salinas.

Utilizando este modelo se va a tratar de explicar el comportamiento de todos los sensores colocados en las pinturas, relacionando los puntos del modelo con las gráficas de las señales de HR promedio y con la aparición de sales en los frescos.

6.1. Sensores de las pinturas en la “zona correcta” del modelo.

Observando el modelo de la figura 6.2 se ve que los sensores de las pinturas situados en la zona correcta son los sensores 5, 11, 16 y 21. A continuación se muestran las gráficas de HR promedio diario frente al tiempo para cada uno de estos sensores, junto con la foto de la zona de los frescos donde está situado el sensor. En estas gráficas se incluyen los datos de la media de los sensores de la cornisa y de la Humedad Relativa exterior para que sirvan como referencia. Los datos de HR exterior proceden del Instituto Meteorológico de Levante que tiene una estación de recogida de datos en el campus de la Universidad Politécnica de Valencia. Esta estación está situada a unos 4 km. al este de la Catedral.

En las fotos se indica con una elipse de color naranja, la zona de los frescos afectada por la aparición de sales y con un cuadrado naranja el punto donde está localizado el sensor.

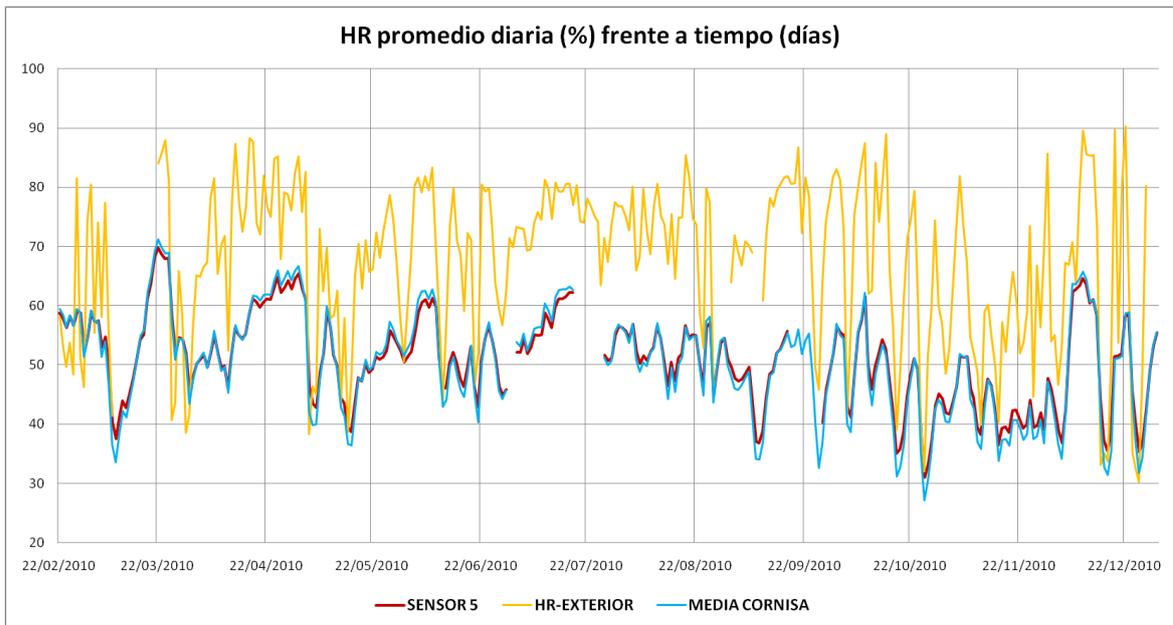


Figura 6.3.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 5. Año 2010.

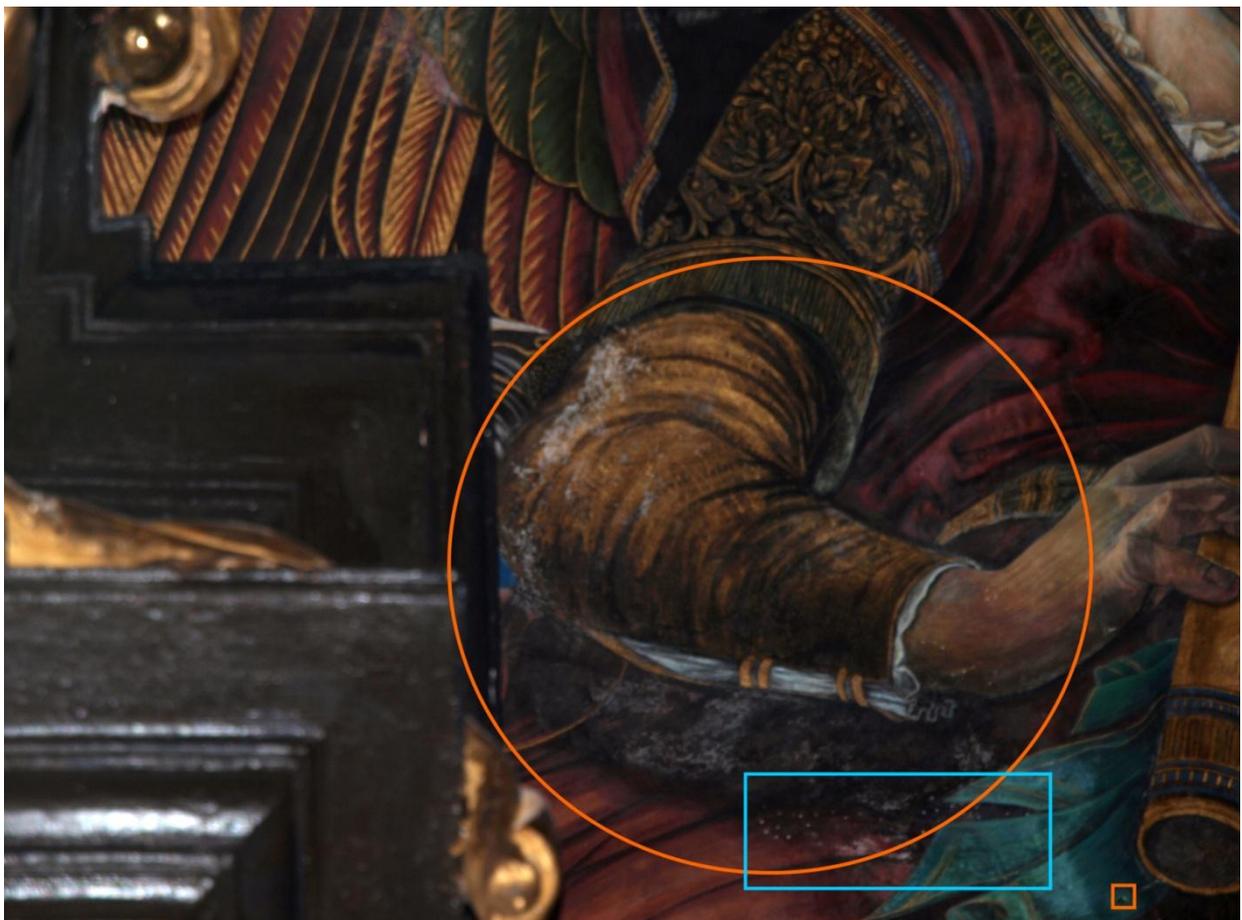


Figura 6.3.B. Zona del sensor 5. Foto tomada en Abril de 2011.

Nota: obsérvese como el sensor está cerca de una eflorescencia salina pero no dentro, por lo que su comportamiento es correcto. Entre el sensor y la eflorescencia hay una zona, marcada con un rectángulo azul, donde se practicaron agujeros de ventilación en la pared, que probablemente impidieron que la humedad alcanzara la zona del sensor.

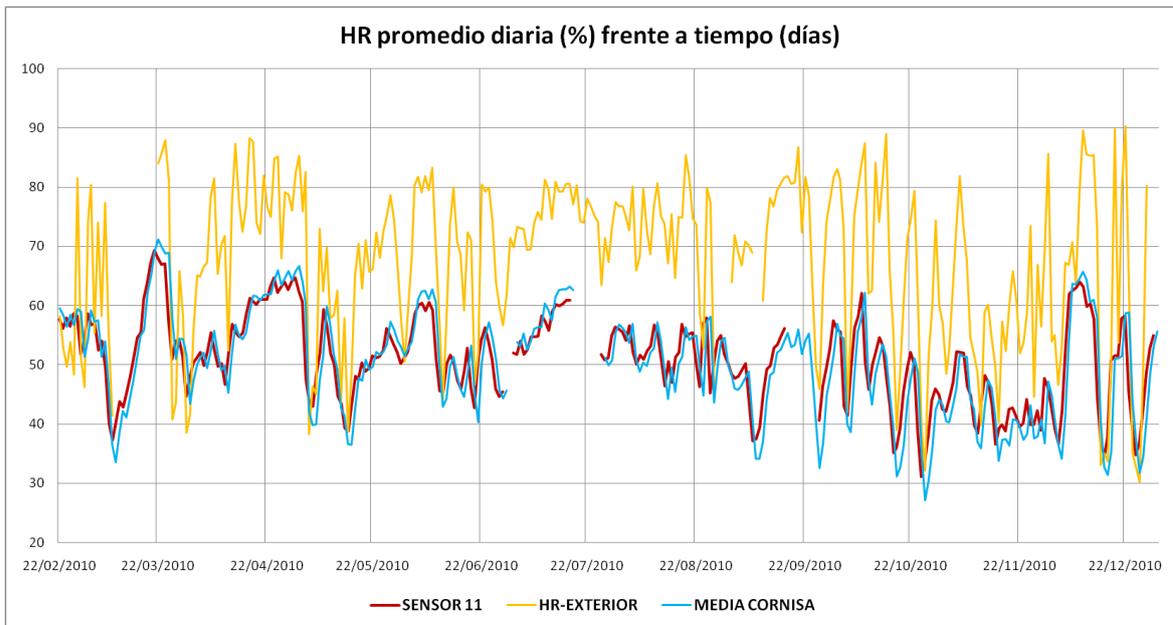


Figura 6.4.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 11.
Año 2010.

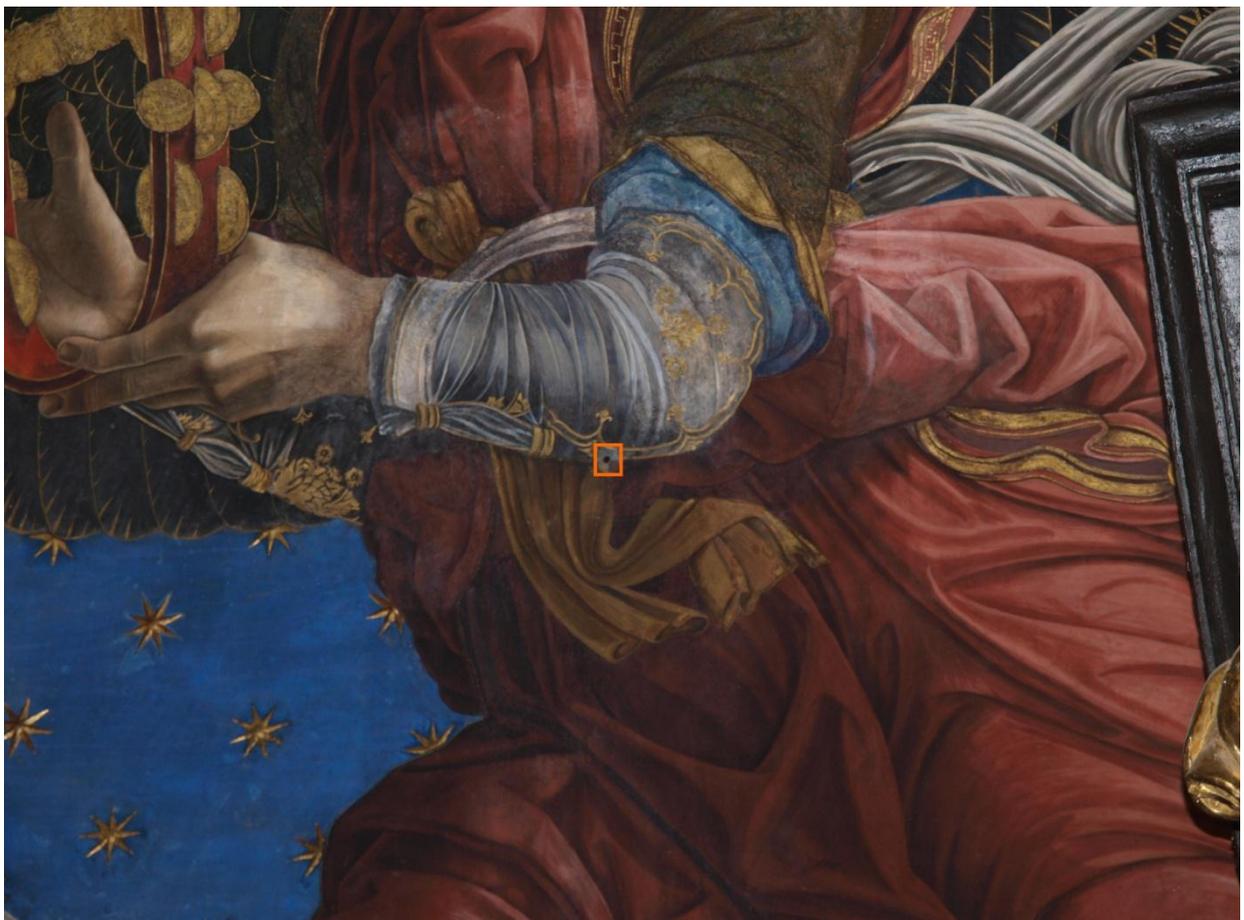


Figura 6.4.B. Zona del sensor 11. Foto tomada en Abril de 2011.

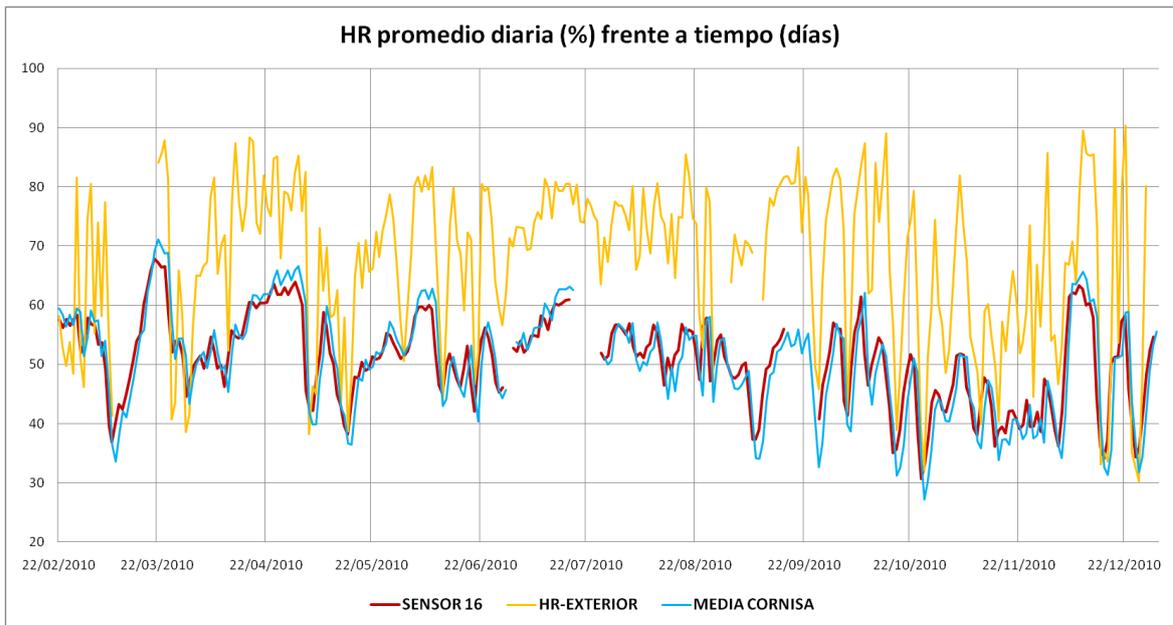


Figura 6.5.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 16. Año 2010.

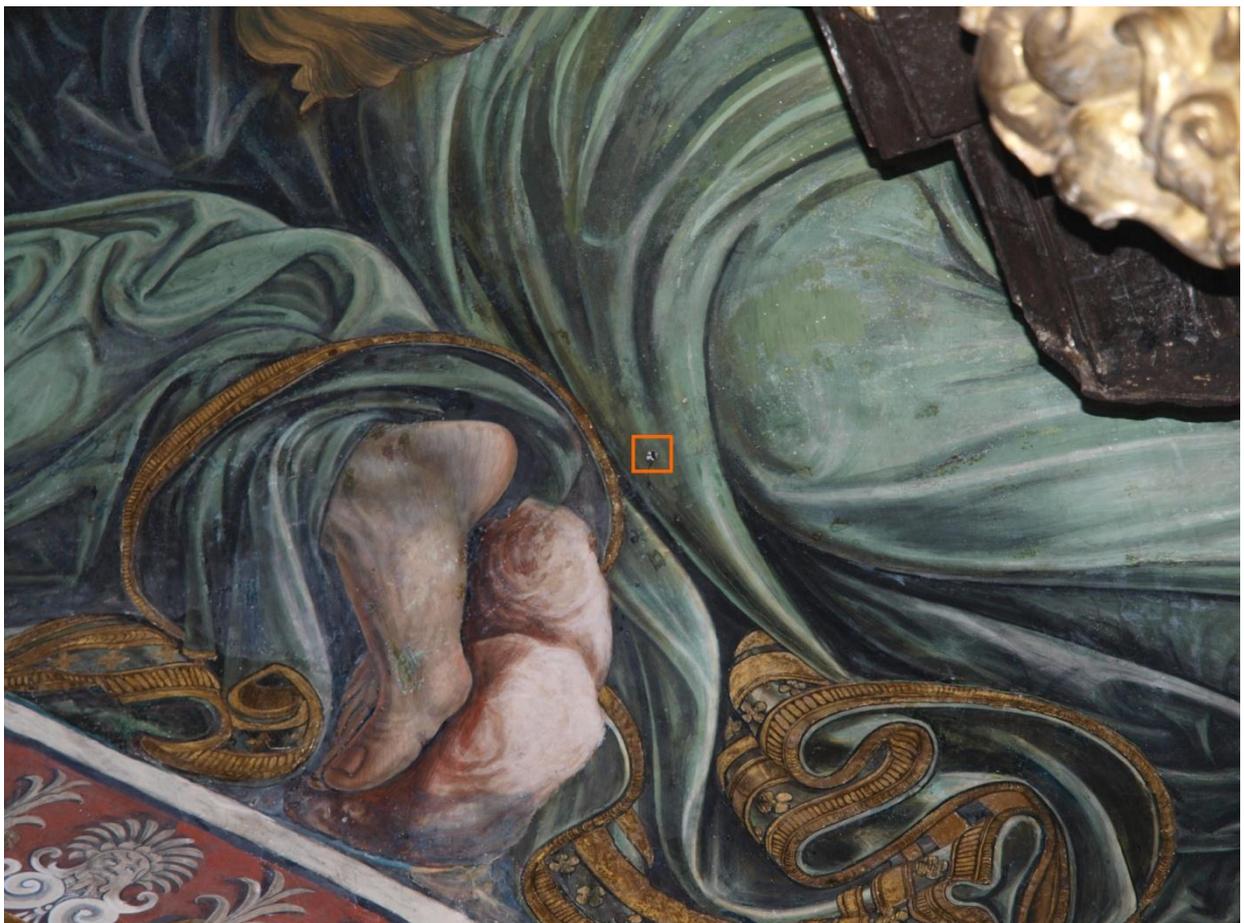


Figura 6.5.B. Zona del sensor 16. Foto tomada en Abril de 2011.

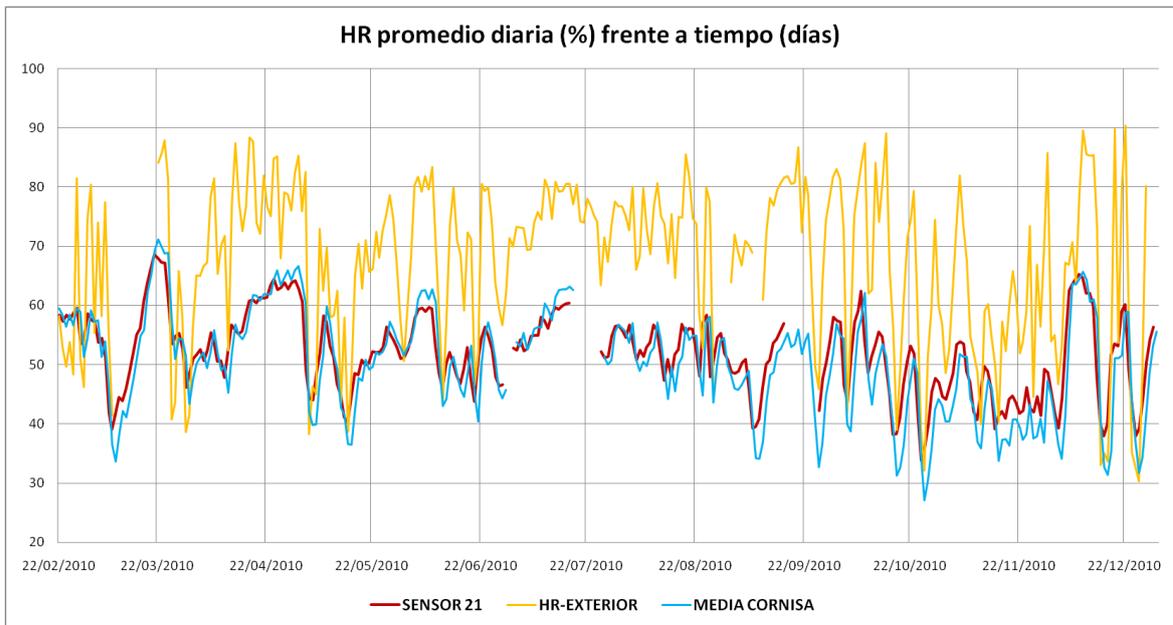


Figura 6.6.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 21. Año 2010.



Figura 6.6.B. Zona del sensor 21. Foto tomada en Abril de 2011.

En todos estos sensores, en sus gráficas de HR promedio diario, puede apreciarse como sus señales son prácticamente coincidentes con la media de los sensores de la cornisa, que se utilizan como referencia. Como consecuencia de esto, no se aprecian problemas de aparición de sales en estos sensores.

6.2. Sensores de las pinturas en la “zona con problemas” del modelo.

Los sensores de las pinturas situados en la “zona con problemas” o zona de peligro del modelo son: sensores 8, 19, 24, 26 y 29.

Las gráficas de HR promedio y las fotos donde están localizados estos sensores pueden verse a continuación:

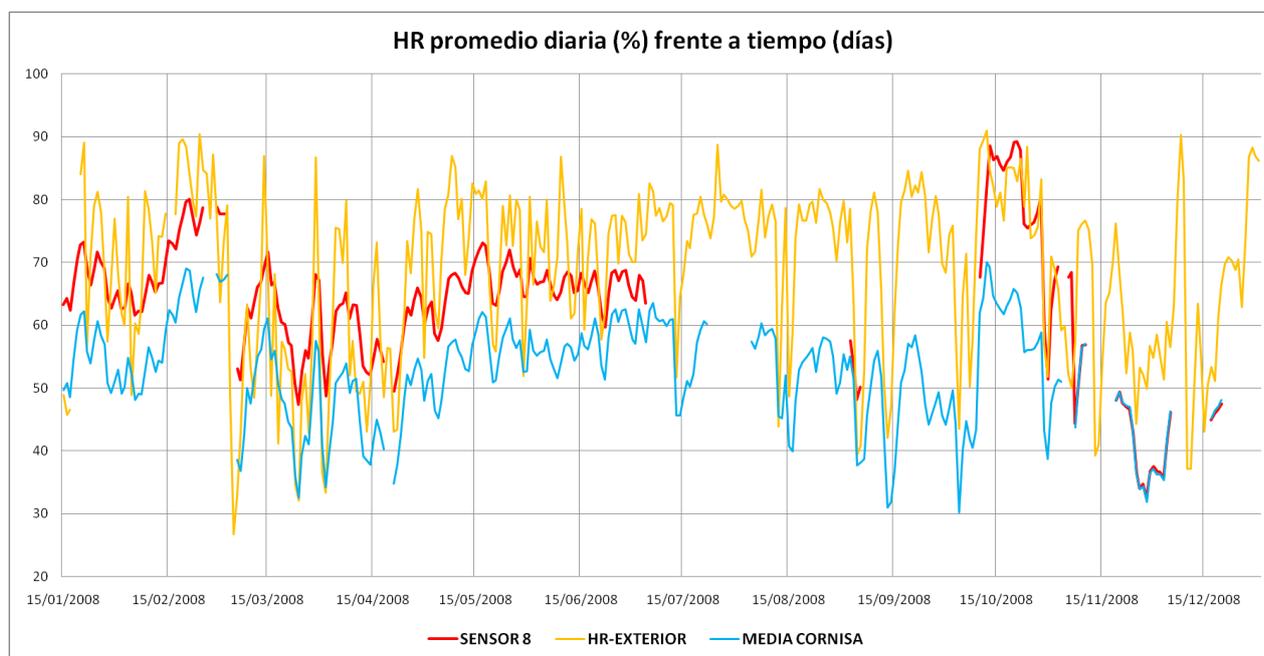


Figura 6.7.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 8.

Año 2008.

Nota: se representan aquí los datos del año 2008 porque este sensor dejó de funcionar en 2009.

Puede observarse cómo la señal de este sensor es paralela a la media de la cornisa pero bastante por encima de ella, lo que denota una HR promedio superior. Esto se corresponde con aparición de sales en la zona donde se encuentra el sensor, tal y como puede apreciarse en la fotografía siguiente.



Figura 6.7.B. Zona del sensor 8. Fotografía tomada en Abril de 2011.

Lo mismo puede afirmarse de los sensores 19, 24 y 26 cuyas gráficas y fotografías de ubicación se muestran a continuación:

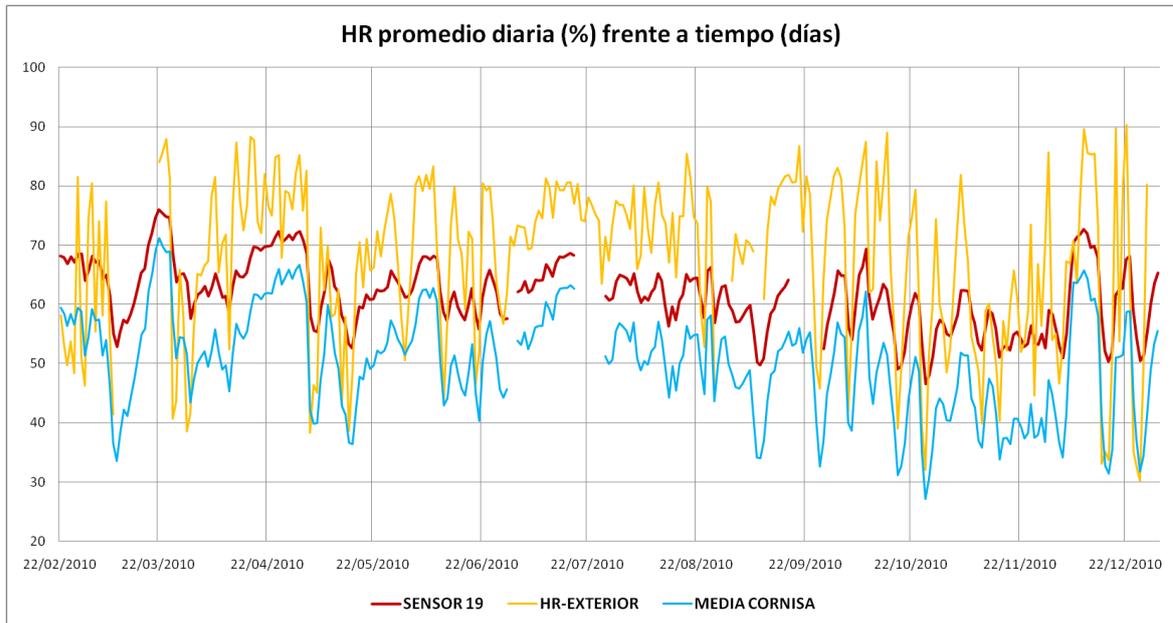


Figura 6.8.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 19.

Año 2010.



Figura 6.8.B. Zona del sensor 19. Fotografía tomada en Abril de 2011.

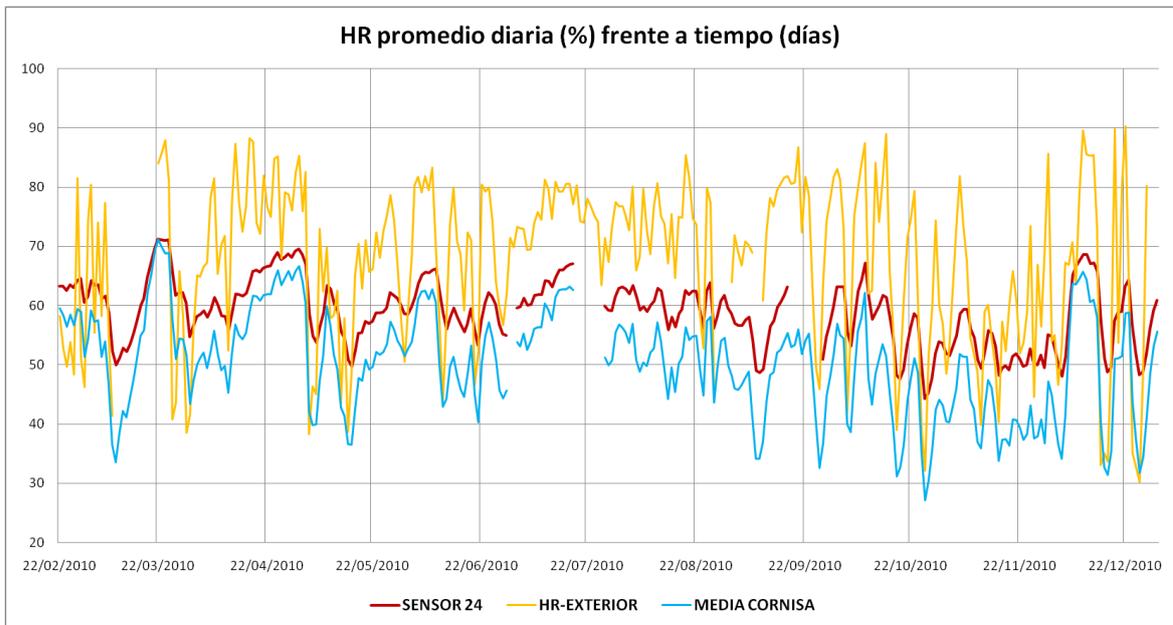


Figura 6.9.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 24. Año 2010.

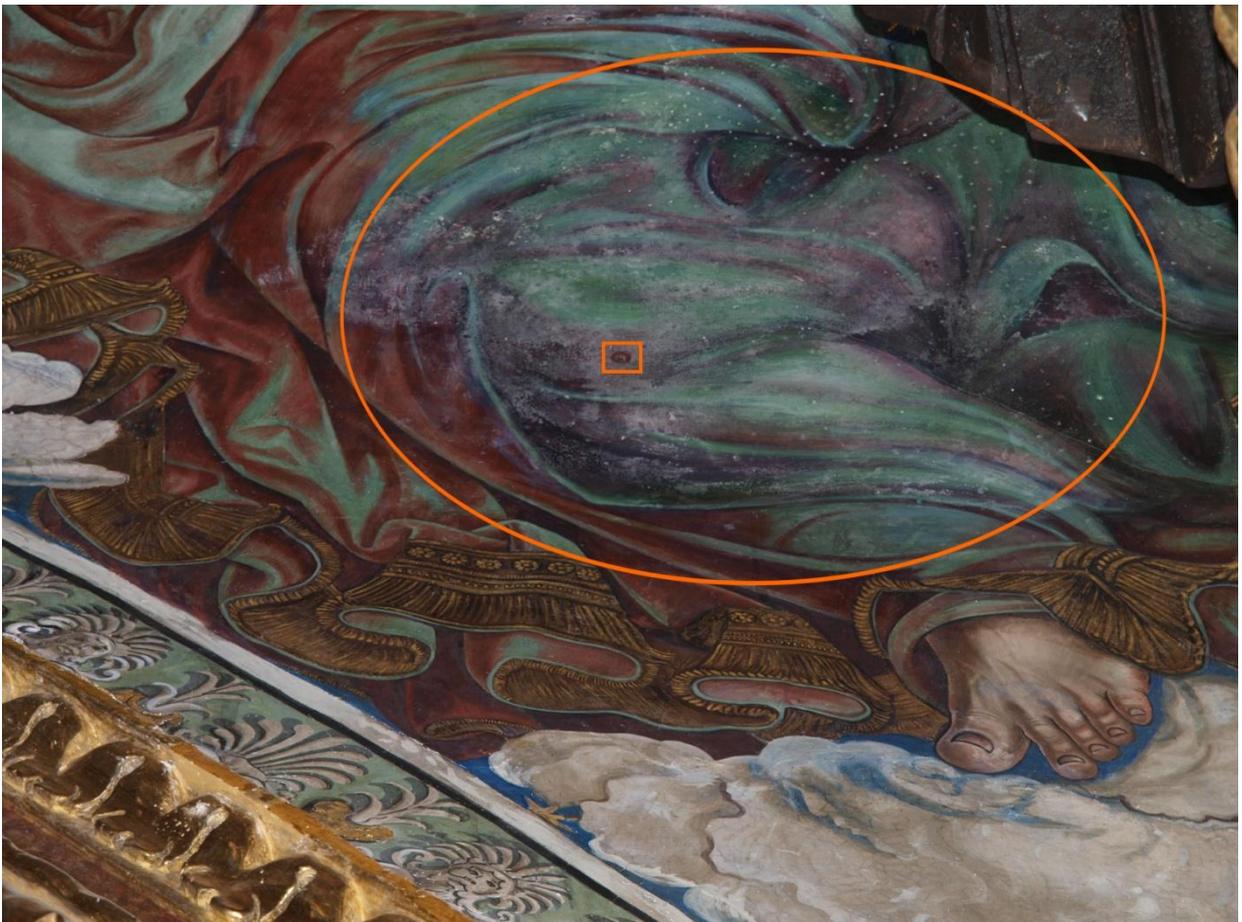


Figura 6.9.B. Zona del sensor 24. Fotografía tomada en Abril de 2011.

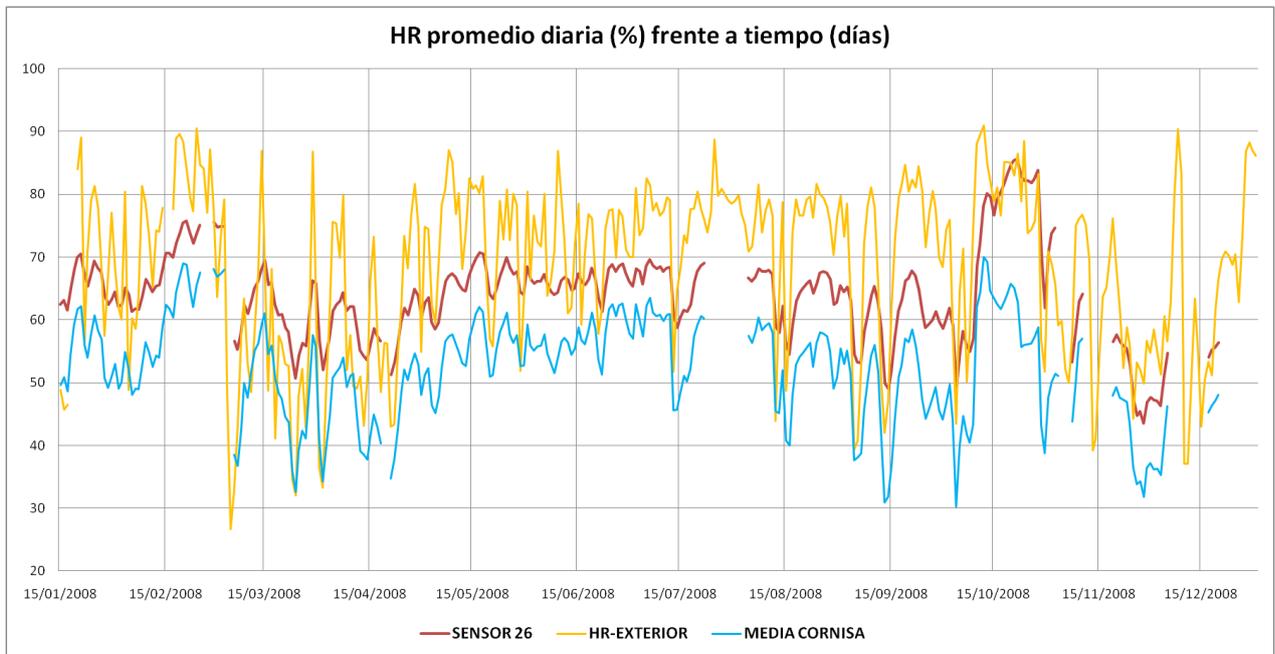


Figura 6.10.A. Gráfica HR promedio diario frente al tiempo para el sensor 26. Año 2010.

Nota: se representan aquí los datos del año 2008 por que este sensor dejó de funcionar en 2009.

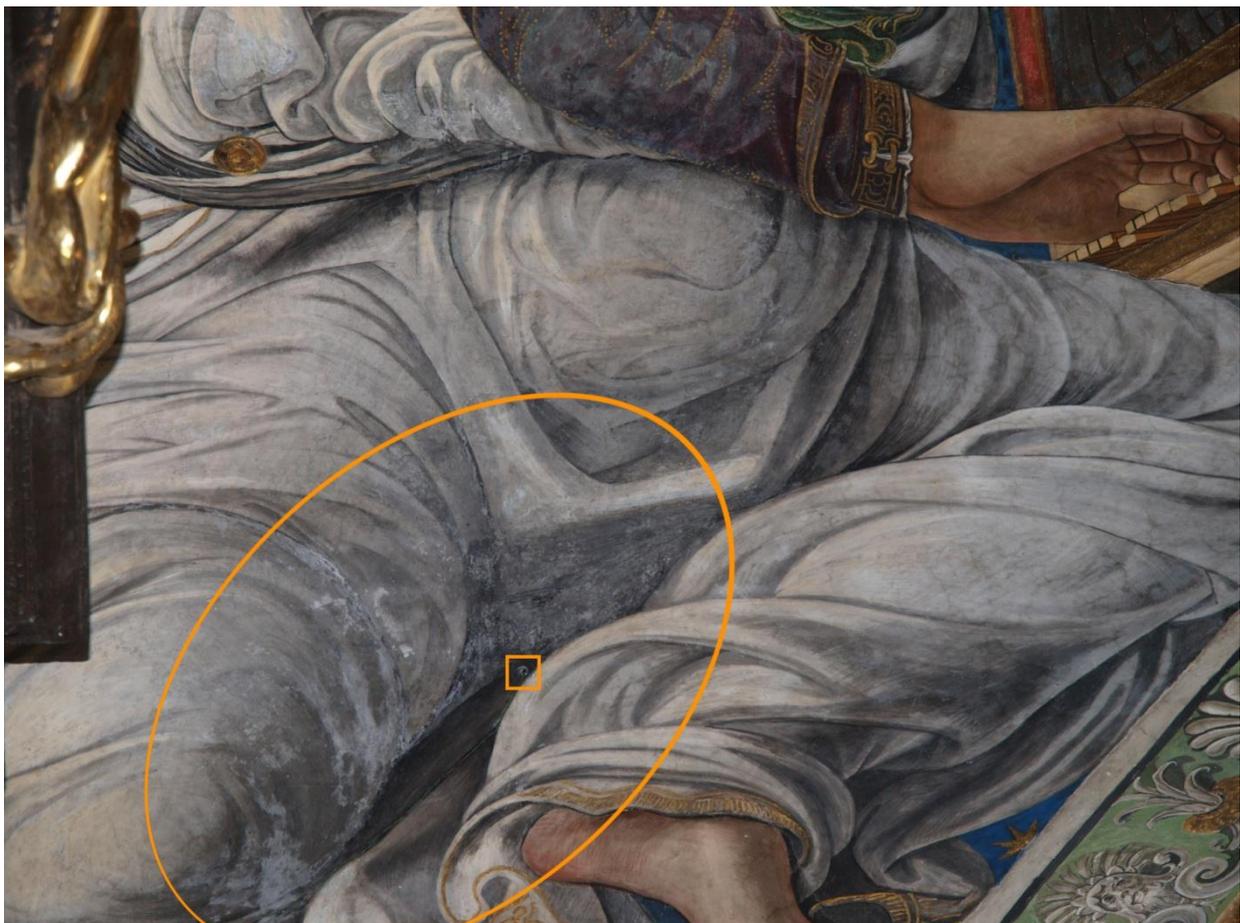


Figura 6.10.B. Zona del sensor 26. Fotografía tomada en Abril de 2011.

Estos sensores que se acaba de ver, están todos situados, a excepción del sensor 8, a una misma altura en el eje Y respecto de los sensores de la cornisa, lo que indica que sus formas

son comparables a la de los sensores de referencia. El sensor 8 queda un poco por debajo de las coordenadas en Y de los sensores de la cornisa lo que indica que sus variaciones diarias son más acusadas.

El sensor 29 representa un caso singular por su comportamiento: los puntos correspondientes a los años 2007 y 2008 quedan situados a la derecha de los sensores de referencia, como corresponde a una mayor HR promedio, pero su coordenada en Y está situada a la misma altura que los sensores de la cornisa. En cambio, el punto del año 2010 se dispara hacia abajo en el gráfico, saliéndose totalmente de escala, lo que indica una situación de emergencia.

Para estudiar lo ocurrido se van a utilizar las gráficas de los años 2008 y 2010 para comparar los resultados y fotografías de la zona de los frescos donde está ubicado el sensor tomadas antes de 2008 y en 2011.

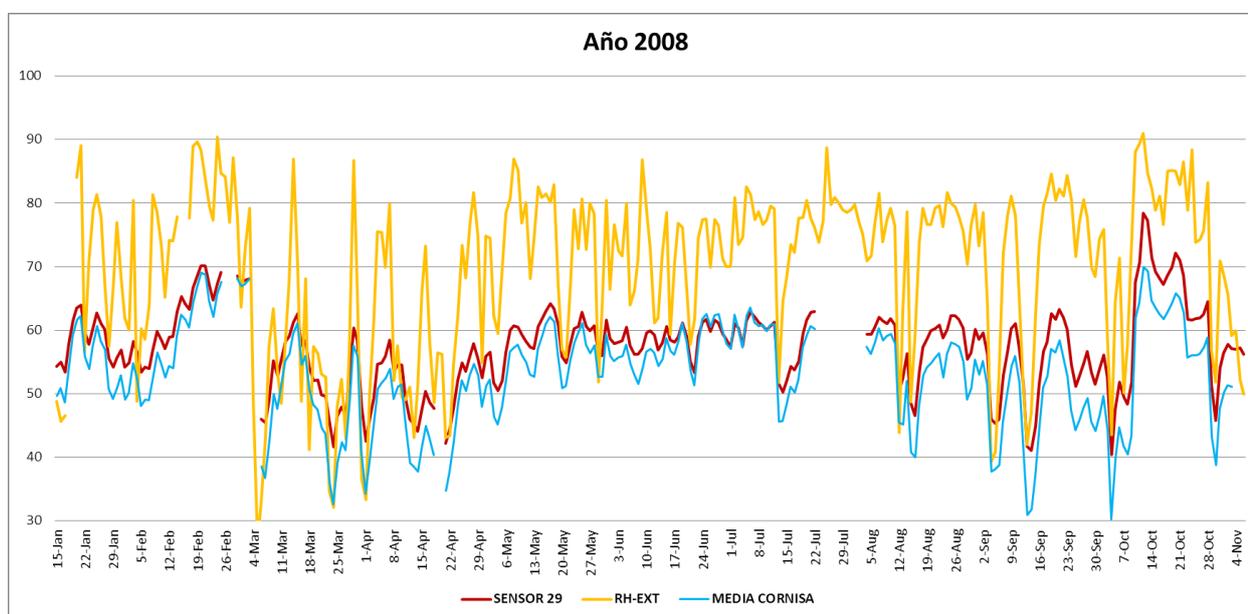


Figura 6.11.A: Gráfica HR promedio diario (%) frente a tiempo para el sensor 29. Año 2008.

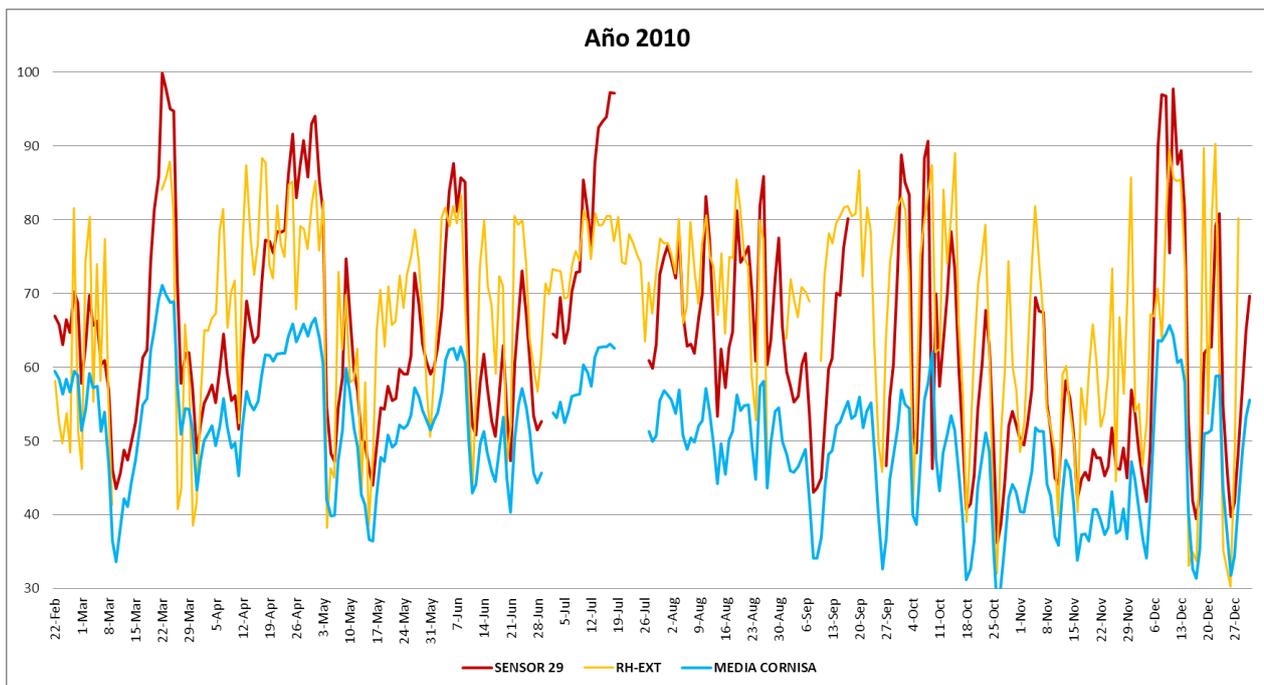


Figura 6.11.B: Gráfica HR promedio diario (%) frente a tiempo para el sensor 29. Año 2010.

Puede verse claramente que durante el año 2008, la señal del sensor 29 se comporta de forma muy similar a la media de los sensores de la cornisa, ligeramente superior a estos, por lo que debería estar en una zona sin problemas de conservación. Sin embargo, durante el año 2010, el comportamiento del sensor cambia notablemente: las variaciones de HR se disparan, incluso por encima de los niveles de la HR del exterior.

Este comportamiento excepcional, hizo que los datos de 2010 para este sensor, hubiera que dejarlos fuera del análisis PCA puesto que de lo contrario, distorsionaban los resultados del resto de sensores. Por este motivo, el dato de 2010 del sensor 29 no aparece en las figuras 5.2 y 5.3.



Figura 6.11.C: Fotografía del estado de los frescos en abril de 2007 en la zona del sensor 29.

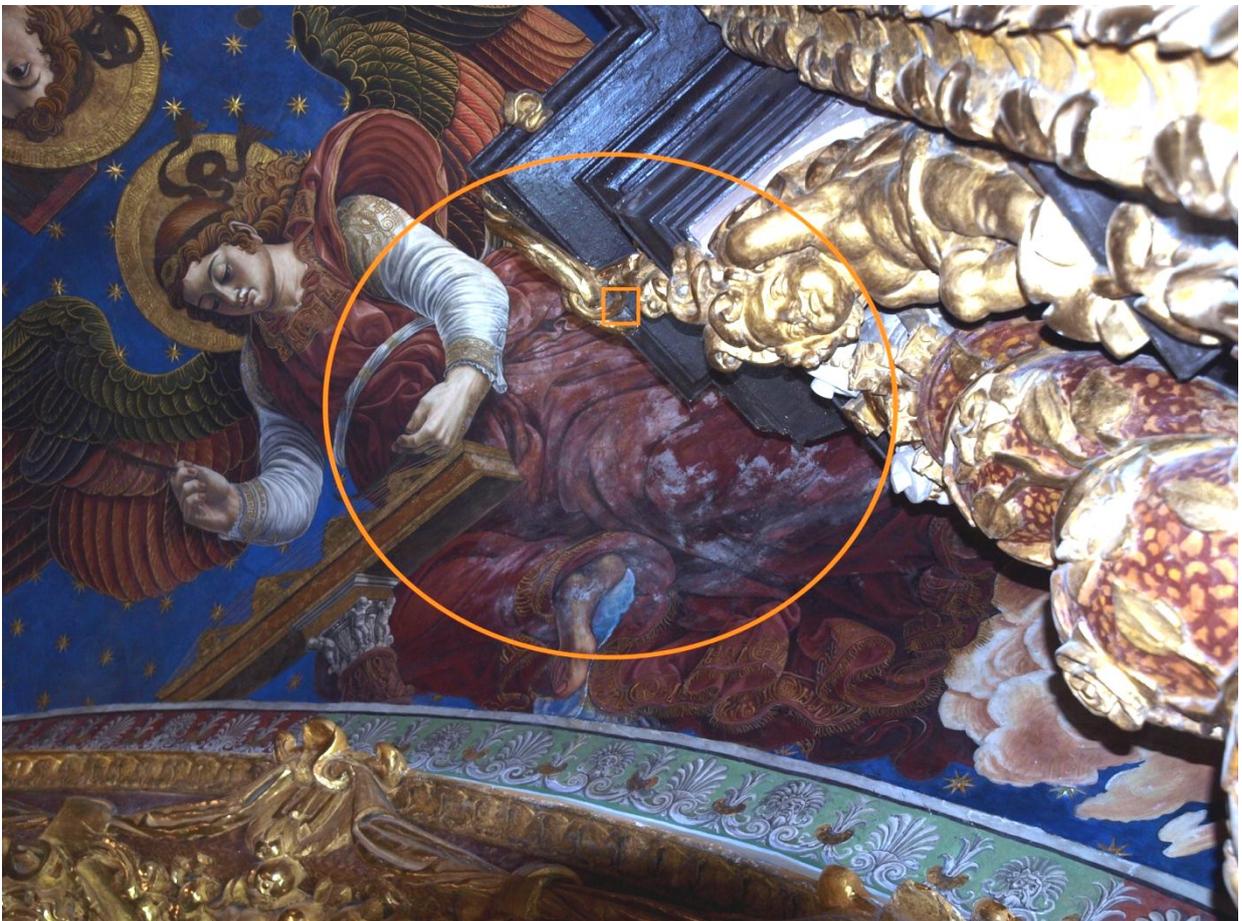


Figura 6.11.D: Fotografía del estado de los frescos en marzo de 2011, en la zona del sensor 29.

Nota: El sensor no se aprecia desde esta perspectiva ya que está oculto por la columna barroca que aparece en primer plano. Estaría situado en el cuadrado naranja.

Si ahora se observan las fotografías de la zona de los frescos donde está ubicado el sensor 29, puede apreciarse claramente la aparición de eflorescencias salinas en la figura 6.11.D que no estaban en 2007 cuando se tomó la fotografía 6.11.C lo que indica el avance del deterioro de esta zona.

Por tanto, el dato de 2010 del sensor 29 que se sale del gráfico 6.1 es claramente una llamada de atención sobre una zona que se está deteriorando de forma muy rápida y que precisa de una intervención urgente por parte de los especialistas encargados de su conservación.

Una vez más, el modelo obtenido nos sirve para interpretar la realidad y nos sirve de indicador de situaciones anómalas.

7. CONCLUSIONES.

Para extraer conclusiones finales que nos permitan evaluar en su totalidad el sistema propuesto y su funcionamiento vamos tomar como base de examen los objetivos que nos fijamos en el punto 2 que, recordemos, eran:

1. Obtención de datos sobre las condiciones ambientales que rodean a la obra.
2. Almacenamiento, tratamiento y gestión adecuados de los datos obtenidos.
3. Detección temprana de situaciones de emergencia (infiltraciones de agua, inundación de la terraza, etc.)
4. Análisis estadístico de los datos. Obtención de un modelo que permita interpretar futuros datos.
5. Conclusiones finales : idoneidad de la ubicación de la obra desde el punto de vista ambiental.

7.1. Obtención de datos sobre el microclima de la obra.

El primer objetivo debe ser cubierto por el sistema de monitorización formado por los sensores, el cableado y el microcontrolador. De la evaluación de los resultados obtenidos podemos afirmar que cumple el objetivo con solvencia, destacando sus principales virtudes que son:

- La sencillez de instalación.
- La versatilidad: puede ser instalado en cualquier obra. En obras que puedan ser trasladadas, puede ser transportado con ella.
- La economía: al ser un desarrollo propio, es muy barato producirlos.
- La capacidad de ampliación del sistema, colocando cuantos sensores sean necesarios y del tipo que sean necesarios (en detrimento de la economía, obviamente).
- Capacidad para recoger enormes cantidades de datos. En nuestras pruebas se han recogido un dato cada minuto de 70 sensores a lo largo de años.

Todas estas ventajas hacen de este sistema de monitorización una herramienta muy útil que proporciona mucha información sobre el ambiente en el que se encuentran los objetos y adaptable a casi cualquier necesidad de control de obras artísticas.

Como contrapartida, al ser un sistema de monitorización electrónico, aparecen una serie de inconvenientes inherentes a estos sistemas, como son:

- Aparición de datos anómalos por varias causas, fundamentalmente, por pequeñas caídas de tensión. El sistema es muy sensible a las variaciones de tensión.

- Necesidad de un mantenimiento periódico, lo que obliga a acceder al lugar donde se recogen los datos de forma regular. Necesidad de equipos especiales para acceder a los sensores en algunos casos (andamios, arneses, etc.)
- Gran sensibilidad a posibles averías producidas por trabajos de restauración, animales, insectos, etc.
- La incertidumbre de los sensores utilizados es de ± 2 °C en el caso de los sensores de Temperatura y $\pm 3,5$ % HR para los sensores de Humedad Relativa. En el caso de los sensores de temperatura es una incertidumbre elevada aunque, como contrapartida, tienen una gran repetitividad de los datos obtenidos [110]. Para los sensores de HR, habitualmente se trabaja con incertidumbres en torno a 5 %, por lo que la incertidumbre es baja.

Sin embargo, es importante reseñar que pruebas de calibración realizadas a los sensores de temperatura (veáse el punto 4.4 de este documento), indican que la incertidumbre indicada por el fabricante de ± 2 °C es exageradamente elevada, habiéndose obtenido en laboratorio incertidumbres de $\pm 0,19$ °C, menos de la décima parte. Como se indica en el punto 4.4, el dar una incertidumbre tan elevada quizá responda a una estrategia comercial del fabricante que trate de vender los mismos sensores, con distinto encapsulado, como un producto distinto de mayor precisión a un precio superior.

Aún en el caso de que la incertidumbre de los sensores de T^a fuera tan elevada no supone ningún problema, ya que los datos con los que se trabaja son datos promediados lo que hace que las incertidumbres se compensen. Además, la repetitividad e intercambiabilidad de estos sensores es muy buena, por lo que un sensor puede ser sustituido por otro de la misma serie o puede ser cambiado de ubicación, sin que el sistema se resienta.

7.2. Almacenamiento y gestión de los datos obtenidos.

El segundo objetivo es la finalidad del software creado para el almacenamiento y la gestión de los datos obtenidos por el sistema de monitorización. Este software, bautizado como **Burrito** por la gran cantidad de datos que puede procesar, puede almacenar en una base de datos formada por un único fichero informático, millones de datos y realizar consultas y gráficos sobre los datos guardados.

En pruebas realizadas, se ha elaborado un fichero de base de datos que contiene más de 13 millones de registros y que puede realizar consultas y extraer síntesis de los datos recogidos.

El software se ha mostrado fiable, robusto (no provoca “cuelgues” ni aún en ordenadores modestos con Windows XP y 1 GB de memoria RAM), eficaz y muy útil para obtener datos resumidos que permitan su posterior análisis para extraer conclusiones.

Como principales ventajas de Burrito, podemos destacar:

- Puede manejar millones de datos.
- Está perfectamente adaptado a las necesidades de almacenamiento de datos procedentes de sensores.
- Utiliza como motor de datos software libre, no propietario (no hay que pagar licencias por su uso o distribución) y de código abierto (cualquier persona con los conocimientos suficientes, puede modificarlo y adaptarlo a sus necesidades).
- Como consecuencia del punto anterior, las bases de datos creadas por Burrito, caso de dejar de funcionar el programa por cualquier circunstancia, pueden ser “rescatadas” por otros programas.
- No consume excesivos recursos del sistema: Corre con soltura en un ordenador mono-núcleo con Windows XP y 1 GB de RAM.
- Funciona perfectamente con Windows Vista y Windows 7.
- Realiza gráficos, tablas, promedios, etc.
- Exporta los resultados de las consultas a formato MS Excel y Calc de Open Office.

Inconvenientes de este software:

- Sólo funciona en sistemas operativos basados en Microsoft Windows.
- Aún está en fase beta, lo que significa que no se han realizado las pruebas suficientes para garantizar su correcto funcionamiento en el caso de que se deseara comercializarlo.
- Para exportar a formato de MS Excel o de Calc, hay que tener instalados y configurados estos programas.

En definitiva, inconvenientes propios de cualquier software con pocos años en el mercado y muy específicos. En futuras versiones se irá desarrollando el software, creciendo en funcionalidad.

Por consiguiente, aunque tanto el sistema de monitorización como el software de almacenamiento de datos tienen carencias, han demostrado ser suficientemente válidos para poder obtener información fiable del microclima al que están sometidas las obras de arte, y capaces de dar esa información de forma inteligible para la toma de decisiones que redunden en una conservación preventiva adecuada.

7.3. Detección temprana de situaciones de emergencia.

Aunque el sistema de monitorización está diseñado para obtener resultados y controlar la evolución a largo plazo del microclima de los frescos, también puede servir como indicador de situaciones de emergencia como el encharcamiento de la terraza superior o la entrada de agua de lluvia por alguna grieta.

Los sensores de encharcamiento situados en la terraza, nunca han detectado situaciones de acumulación de agua, lo que indica que los desagües han funcionado correctamente y no se han producido inundaciones que hubiesen tenido consecuencias desastrosas para los frescos, situados en un nivel inferior.

Por otra parte, los sensores de las pinturas y los de las paredes, aún los situados en la zona con problemas (Figura 6.2.A), tampoco han dado señales de grandes infiltraciones de agua, lo que se hubiese reflejado en unas gráficas de HR promedio con un valor constante muy elevado.

Por tanto, afortunadamente, el sistema no ha detectado situaciones de alarma que hicieran necesaria la actuación urgente de los técnicos.

7.4. Análisis estadístico de los datos y obtención de modelos.

En este trabajo se han analizado estadísticamente sólo los datos de HR ya que de su estudio se han extraído importantes conclusiones. Sobre los datos de T^a , después de unos estudios completos, no se ha podido extraer ninguna conclusión que nos permita afirmar que tienen relevancia desde el punto de vista de la conservación preventiva. Por lo tanto, estos datos se dejarán aparte, para futuros análisis.

Las condiciones en HR de referencia para la conservación de frescos son las siguientes:

	Máximo	Óptimo
Límites	40 – 70 %	45 – 65 %
Variación diaria	1,5 %	5 %

Se ha detectado claramente que la HR en el interior del templo es inferior a la exterior y además las variaciones diarias son mucho más suaves, efecto positivo sobre los frescos.

Sin embargo, existen varios problemas con posibles repercusiones sobre la conservación de los frescos que se intuyen al estudiar los datos de HR.

El primer problema es que, a pesar de que las variaciones de HR en el interior del templo son mucho más suaves que en el exterior, en momentos puntuales se observan caídas bruscas de humedad a lo largo de todo el año, haciendo que las variaciones superen el límite teórico máximo del 10% en varias ocasiones.

Además, en las zonas más húmedas de la cúpula, donde se supera a menudo el límite máximo de idoneidad del 65%, coincide en el verano con temperaturas superiores a 25 °C. Estas condiciones son propicias para el crecimiento de microorganismos patógenos cuyo desarrollo afecta negativamente a la conservación de los frescos.

Pero el problema más importante detectado es la diferencia de humedad que hay entre unas zonas y otras de la cúpula. En las figuras 4.32 y 4.56 puede apreciarse la diferencia entre las distintas líneas de sensores (cornisa y nervios, que miden HR del aire, y pinturas y paredes que miden HR en el interior de los materiales constructivos). Se observa claramente la mayor HR de las líneas del interior de las pinturas y del interior de las paredes, respecto a la HR del aire.

Por otra parte, los sensores de la línea de la cornisa que miden la HR del aire a la altura de la cornisa dan unos valores muy similares entre ellos (figuras 4.35 y 4.57) y lo mismo ocurre con los sensores de la línea de los nervios que miden la HR del aire a la altura de los nervios (figuras 4.36 y 4.58). Por tanto, la humedad relativa del aire que se encuentra dentro de la bóveda es uniforme (la media anual del 2010 para los sensores de la cornisa es de 50,4 °C y para los sensores de los nervios de 49,4°C).

No ocurre lo mismo con los sensores que miden HR dentro de los materiales constructivos, es decir, los sensores de la línea de paredes y los sensores de la línea de las pinturas: se aprecian diferencias importantes de HR de unos sensores a otros, aún dentro de la misma línea. Esto indica que la humedad que retienen los materiales de la bóveda y de las paredes no es uniforme, habiendo zonas muy húmedas frente a otras con una humedad muy inferior, similar a la del aire. Estas diferencias quedan reflejadas en las figuras 4.41 a 4.52, donde con un código de colores se observan claramente las diferentes humedades en cada una de las zonas de la cúpula.

Con los datos recogidos durante el año 2008 y el año 2010 y utilizando las técnicas descritas en el punto 5 de análisis de componentes principales (conocido por PCA por sus siglas en inglés), se ha logrado obtener un modelo estadístico que discrimina los sensores por buen o mal funcionamiento respecto a los datos que recogen y a la forma de la señal que emiten. Con este modelo que es probablemente la mayor aportación de este trabajo y que puede observarse en

las figuras 6.1 y 6.2, quedan localizadas en una zona restringida del gráfico las áreas de la cúpula donde se han observado eflorescencias salinas y en otra zona del gráfico, las áreas donde las pinturas no han sufrido ningún deterioro visible.

Con la utilización de este modelo es posible predecir si un área de los frescos va a sufrir afloramientos salinos, por ejemplo, si los puntos del sensor de esa área empiezan a acercarse a la zona considerada de riesgo, y permite la utilización de medidas de conservación con carácter preventivo, antes de que se inicien los procesos de deterioro.

7.5. Conclusiones finales: idoneidad de la ubicación de la obra desde el punto de vista ambiental.

Con todo lo expuesto, puede concluirse que las condiciones de humedad relativa a la que se encuentran sometidos los frescos, sin ser en absoluto condiciones malas, permiten margen de mejora: fundamentalmente, como medida urgente, habría que tratar la aparición de manchas de sales en algunas zonas.

Decir que en el momento de redactar esto, se están consensuando entre los técnicos algunas medidas para tratar de impedir físicamente que el agua de lluvia incida directamente sobre la zona exterior más cercana a la ubicación del sensor 29 que es el área de la cúpula donde mayores problemas se están detectando. Gracias al sistema de monitorización, se podrá comprobar si estas medidas dan resultado y se consigue bajar la HR de la zona.

Sería deseable monitorizar un periodo mayor de tiempo para afianzar la validez de los modelos de comportamiento obtenidos. En este sentido hay que indicar que actualmente se siguen recogiendo datos del año 2011 por lo que se espera que un futuro próximo, los nuevos datos sirvan para corroborar el modelo obtenido y quizá ayuden a mejorarlo.

Es de esperar que en el futuro, con nuevos sensores que se van a instalar y la reparación de otros ya instalados, se obtengan nuevos datos que permitan actuar de forma preventiva y conseguir preservar un legado artístico tan valioso para el disfrute de las próximas generaciones.

08. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

[1] - Koller, M.(1994): Learning from the History of Preventive Conservation. Preventive Conservation, Practice, Theory and Research. IIC Ottawa Congress, 12-16 September 1994.

[2] - Staniforth, Sarah. 1997. Today's work for tomorrow's enjoyment: The role of preventive conservation. In The Victoria Memorial Hall, Calcutta: Conception, Collections, Conservation, Philippa Vaughan, 120-128. Bombay, Punjab: Marg Publications.

[3] - Waller, Robert, and Stefan Michalski. 2005. A paradigm shift for preventive conservation, and a software tool to facilitate the transition. In ICOM Committee for Conservation : 14th Triennial Meeting, The Hague, 12-16 September 2005: Preprints , Isabelle Sourbés-Verger, 733-38. London: James & James: Earthscan.

[4] - La Conservación Preventiva de las Obras de Arte. Juan A. Herráez, Miguel A. Rguez. Lorite. Instituto del Patrimonio Histórico Español (IPHE). Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. Septiembre 1999, nº CLXIV, 645.

[5] - Camuffo, Dario. 1997. Modern technology: A new opportunity or a new challenge for the indoor conservation of the cultural heritage? European Cultural Heritage Newsletter on Research 10: 77-83.

[6] - Conrad, Ernest. 1999. The realistic preservation environment (Presented at NARA 14th Annual Preservation Conference: Alternative archival facilities). Web page, [accessed 8 June 2011]

[7] - The microclimate inside the Pollaiolo and Botticelli rooms in the Uffizi Gallery, Florence. Dario Camuffo, Adriana Bernardi, Giovanni Sturaro, Antonio Valentino. Journal of Cultural Heritage 3 (2002) 155-161

[8] - Kerschner, K. Richard. 2006. Providing safe and practical environments for cultural properties in historic buildings...and beyond. (Presented at 20th Annual National Archives Preservation Conference. Beyond the Numbers: Specifying and Achieving an Efficient Preservation Environment. March 16, 2006).

[9] - Kerschner, Richard L. 2000. Implementation of practical climate control strategies at the Shelburne Museum. In *The Conservation of Heritage Interiors: Preprints of a Conference Symposium 2000*, Ottawa, Canada May 17 to 20, 2000/*La Conservation Des Intérieurs Patrimoniaux: Les Prétirages De La Conférence Symposium 2000*, Ottawa, Canada Du 17 Au 20 Mai 2000 , 161-66. Ottawa, Canada: Canadian Conservation Institute. Available at <http://www.archives.gov/preservation/storage/realistic-preservation-environment.html>.

[10] - Koestler, R. J., P. Brimblecombe, D. Camuffo, W. S. Ginell, T. E. Graedel, P. Leavengood, J. Petushkova, M. Steiger, C. Urzi, V. Verges-Belmin, and T. Warscheid. 1994 . Group report: how do external environmental factors accelerate change? In *Durability and Change: The Science, Responsibility, and Cost of Sustaining Cultural Heritage*, December 6-11, 1992, 149-63. Environmental Sciences Research Report. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc.

[11] - Roy, Ashok, Perry Smith, and International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, eds. 1994. *Preventive Conservation Practice, Theory and Research: Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September 1994*. London: International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works.

[12] - Aportaciones de la ciencia al estudio de los bienes culturales en la restauración. Examen científico aplicado a la conservación de obras de arte". Gómez, M^a Luisa. 1998. Ed Cuadernos de arte. Cátedra. Instituto del patrimonio histórico español. Madrid.

[13] - Environmental parameters in museums. *Building and Environment* 38 (12): 1457-1462 Dec 2003. Pavlogeorgatos, G. y otros.

[14] - Staniforth, S., W. M. Ballard, E. N. Caner-Saltik, R. Drewello, I.-L. Eckmann, W. E. Krumbein, T. Padfield, and et al. 1994. Group report: what are appropriate strategies to evaluate change and to sustain cultural heritage? In *Durability and Change: The Science, Responsibility, and Cost of Sustaining Cultural Heritage*, December 6-11, 1992, ed. W. E. Krumbein, and P. Brimblecombe, 217-24. Environmental Sciences Research Report ES 15. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc.

[15] - Staniforth, Sarah. 1990. Benefit versus costs in environmental control. In *Managing Conservation: Papers Given at a Conference Held Jointly by the United Kingdom Institute for Conservation and the Museum of London*, October 1990, ed. Suzanne Keene, 28-30. London, UK: The United Kingdom Institute for Conservation.

[16] - Staniforth, Sarah, and Isobel Griffin. 2000. Damp problems in the Chapel at Cliveden. In *The Conservation of Heritage Interiors: Preprints of a Conference Symposium 2000*, Ottawa, Canada May 17 to 20, 2000/*La Conservation Des Intérieurs Patrimoniaux: Les Prétirages De La Conférence Symposium 2000*, Ottawa, Canada Du 17 Au 20 Mai 2000 , 177-84. Ottawa, Canada: Canadian Conservation Institute.

[17] - Stewart, John, Sophie Julien, and Sarah Staniforth. 2004. An integrated monitoring strategy at Chedworth Roman Villa (Gloucestershire). In *Preserving Archaeological Remains in Situ? Proceedings of the 2nd Conference*, 12-14 September 2001, ed. Taryn J. P. Nixon, 179-87. London: Museum of London Archaeology Service.

[18] - Indoor measurements of microclimate variables and ozone in the church of San Vincenzo (Monastery of Bassano Romano – Italy): A pilot study. E. Vuerich, F. Malaspina, M. Barazutti, T. Georgiadis, M. Nardino. *Microchemical Journal* 88 (2008) 218-223.

Norma UNI 10829:1999. <http://store.uni.com/magento-1.4.0.1/index.php/uni-10829-1999.html>

[19] - Spolnik, Z., A. Worobiec, J. Injuk, D. Neilen, H. Schellen, and R. Van Grieken. 2004. Chemical characterization of airborne particles in St. Martinus Cathedral in Weert, The Netherlands. *Microchimica Acta* 145(1-4): 223-27.

[20] - An advanced church heating system favourable to artworks: A contribution to European standardization. Dario Camuffo, Emanuela Pagan, Sirkka Risänen, Lukasz Bratasz, Roman Kozlowski, Marco Camuffo, Antonio della Valle. *Journal of Cultural Heritage* 11 (2010) 205–219.

[21] - Friendly Heating: a holistic study of synergism between microclimate, air pollution and cultural heritage. Dario Camuffo, Emanuela Pagan, Antonella Maraner and the whole Partnership Consortium of this Project.

[22] - The Indoor Environment of a Modern Museum Building, The Sainsbury Centre for Visual Arts, Norwich, UK. P. Brimblecombe, n. Blades, d. Camuffo, g. Sturaro, a. Valentino, k. Gysels, r. Van grieken, h.-j. Busse, o. Kim, u. Ulrych and m. Wieser. *Indoor Air* 1999; 9: 146-164.

[23] - Camuffo D., G. Sturaro, A. Bernardi, E. Pagan, and F. Becherini. 2001. Microclimate: A difficult variable in museums (presentation at 4th meeting of the Indoor Air Pollution Working Group. IAP Copenhagen 2001).

[24] - Indoor measurements of microclimate variables and ozone in the church of San Vincenzo (Monastery of Bassano Romano — Italy): A pilot study. E. Vuerich, F. Malaspina, M. Barazutti, T. Georgiadis, M. Nardino. *Microchemical Journal* 88 (2008) 218–223

[25] - Foster, Michelle, and Tadj Oreszczyn. 2001. Occupant control of passive systems: The use of Venetian blinds. *Building and Environment* 36(2): 149-55.

[26] - Maekawa, Shin. 1994. Preventive strategies for reducing the impact of visitors on the microenvironment of caves at the Mogao Grottoes. In *Preventive Conservation: Practice, Theory and Research: Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September 1994, 76-79*. London: International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works.

[27] - Environmental monitoring in four European museums. Dario Camuffo, ReneH Van Grieken, Hans-JuKrgen Busse Giovanni Sturaro, Antonio Valentino, Adriana Bernardi, Nigel Blades, David Shooter, Kristin Gysels, Felix Deutsch, Monika Wieser, Oliver Kim, Ursula Ulrych. *Atmospheric Environment* 35 Supplement No. 1 (2001) S127-S140

[28] - Camuffo, D., J. Leissner, H. Schellen, Van Grieken. R., R. Kozowski, S. Rissanen, A. Busà, E. G. Consonni, J. Zajaczkowska - Kloda, and M. Kozarzewski. 2002-2005. Friendly heating: Both comfortable for people and compatible with conservation of artworks in churches (Contract No : EVK4-CT-2001-00067).

[29] - Camuffo, D., and G. Sturaro. 2002. Church heating: A challenge looking for solutions. In *Research for Protection, Conservation and Enhancement of Cultural Heritage: Opportunities for European Enterprises/La recherche pour la protection, la conservation et la mise en valeur du patrimoine culturel: Oppor-*

tunite's pour les entreprises europe'ennes, ed. Astrid Brandt-Grau, 128–36. Luxembourg: European Commission.

[30] - Camuffo, Dario, and Emanuela Pagan. 2004. Heating churches: An innovative solution to preserve cultural heritage and to provide comfort. In *Influences of the Environment and Defense of the Territory on Recovery of Cultural Heritage: Lectures and Proceedings of the 6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Lisbon, Portugal, 7-10 April 2004, 103-6. Lisbon: International Group for the Protection and Conservation of the Cultural Heritage.

[31] - Camuffo, Dario, Giovanni Sturaro, Emanuela Pagan, Adriana Bernardi, and Francesca Becherini. 2002. Heating in historical buildings: A manifold problem. In *Art 2002: 7th International Conference on Non-Destructive Testing and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage: 2-6 June 2002*, Congress Centre Elzenveld, Antwerp, Belgium.

[32] - Kozlowski, Roman. 2004. Novel heating strategy of historic churches: The Friendly Heating (presented at 6th European Commission Conference on Sustaining Europe's Cultural Heritage: from Research to Policy Queen Elizabeth II Conference Centre, London, UK, 13 September 2004).

[33] - Kozlowski, Roman and ukasz Bratasz. 2003. Impact of heating system on the dimensional change of wood: A case study of the church in Rocca Pietore, Italy (presented at 4th Indoor Air Quality Meeting, 2003).

[34] - Limpens-Neilen, Dionne, Mariëlle Schoffelen, and Henk Schellen. Measurements and simulation results of a local bench heating system (presentation at 6th Indoor Air Quality 2004 Meeting (IAQ2004) Padova, Italy, 10-12 November 2004).

[35] - Maekawa, Shin, and Nieves Valentín. 2003. Ventilation and heating-based microbial controls for cultural institutions. In *Moulds, Health and Heritage: Braunschweig, 2003*, Braunschweig: Braunschweigisches Landesmuseum.

Available at <http://www.archives.gov/preservation/conferences/2006/kerschner.pdf>.

[36] - Neilen, D, M. E. A. Schoffelen, and H. L. Schellen. 2004. Design Study of a local bench heating system for churches, performed by computer simulation. In *Built Environments and Environmental Buildings: 21st International Conference on Passive and Low-Energy Architecture: 19 - 22 September 2004*, Eindhoven, The Netherlands, ed. M. H. de Wit, 799-803. Eindhoven, The Netherlands: TU/e.

[37] - Neilen, D, M. E. A. Schoffelen, and H. L. Schellen. 2004. Thermal performance of a local bench heating system for churches. In *ROOMVENT 2004: 9th International Conference on Air Distribution in Rooms: 5-8 September 2004*, University of Coimbra, Portugal, ed. Manuel C. Gameiro da Silva.

[38] - Neuhaus E., and Schellen H. Conservation Heating to Control Relative Humidity and Create Museum Indoor Conditions in a Monumental Building. In *Techologies & Sustainable Policies for a Radical Decrease of the Energy Consumption in Buildings: EPIC 2002 AIVC: Proceedings--Actes: The 4th European Conference on Energy Performance & Indoor Climate in Buildings: The 27th Conference of the Air Infiltration & Ventilation Centre: Conference of the IEA Programme on Energy Conservation in Buildings and Community Systems*, ed G. Guarracino, Vol. 1, 45-50.

[39] - Oreszczyn, T., M. Cassar, and K. Fernandez. 1994. Comparative study of air-conditioned and non air-conditioned museums. In *Preventive Conservation: Practice, Theory and Research: Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September 1994*, 144-48. London: IIC.

[40] - Padfield, Tim. 1987. The dangers of installing air conditioning in historic buildings. In *Old Cultures in New Worlds: Washington, District of Columbia, United States of America, October 10-15, 1987: Symposium Papers/Cultures Anciennes Dans Les Mondes Nouveaux: Washington, District of Columbia, Etats-Unis D'Amerique, 10-15 Octobre 1987: Communications Du Colloque*, 432-39. Washington, DC: ICOMOS United States Committee.

[41] - Blades, Nigel, and Tadj Oreszczyn. 2000. *Guidelines on Pollution Control in Museum Buildings*. London, UK: Museum Association.

[42] - Samek, L., A. De Maeyer-Worobiec, Z. Spolnik, L. Bencs, V. Kontozova, L. Bratasz, R. Kozłowski, and R. Van Grieken. 2007. The impact of electric overhead radiant heating on the indoor environment of historic churches. *Journal of Cultural Heritage* 8(4): 361-69.

[43] - Schellen, H. L. 2004. Tools to evaluate and or design heating systems for (monumental) churches. In *Built Environments and Environmental Buildings: 21st International Conference on Passive and Low-Energy Architecture: 19 - 22 September 2004*, Eindhoven, The Netherlands, ed. M.H. de Wit, 789-94. Eindhoven, The Netherlands: TU/e. Available at <http://alexandria.tue.nl/openaccess/635611/p088ofinal.pdf>. [Accessed 8 June 2011]

[44] - Schellen, H. L. Schijndel A. W. M. van & Aarle M. A. P. Hot air church heating and damage to the monumental interior (presentation at 6th Indoor Air Quality 2004 Meeting (IAQ2004) Padova, Italy, 10-12 November 2004).

[45] - Schijndel, A. W. M. van, and H. L. Schellen. 2006. Application of an integrated indoor climate & HVAC model for the indoor climate performance of a museum. *Internationale Zeitschrift Für Bauinstandsetzen/ International Journal for Restoration of Buildings and Monuments* 12(3): 219-28.

[46] - Schoffelen, M. E. A., D Neilen, and H. L. Schellen. 2004. Measurement Set-up for the Verification of CFD Modeling Used in a Design Study for a Local Bench Heating System for Churches. In *Built Environments and Environmental Buildings: 21st International Conference on Passive and Low-Energy Architecture: 19-22 September 2004*, Eindhoven, The Netherlands, ed. M.H. de Wit, 821-26. Eindhoven, The Netherlands: TU/e. <http://alexandria.tue.nl/openaccess/635611/p0898final.pdf>. [Accessed 8 June 2011]

[47] - Schellen, H. L., D. Neilen, A. W. M. van Schijndel, and M. A. P. Aarle. [2008]

[48] - Bernardi, A. Microclimate in the British Museum, London. *Museum Management and Curatorship* 1990, 9, 169-182.

[49] - Bernardi, A. and Camuffo, D. Microclimate in the Chiericati Palace Municipal Museum, Vicenza. *Museum Management and Curatorship* 1995, 14(1), 5-18.

[50] - Camuffo, D., Adriana Bernardi, F. Becherini, E. Pagan, and R. A. Lefèvre. 2005. Micro-climate measurements in the Cour Marly, Louvre Museum. In *Cul-*

tural Heritage Conservation and Environmental Impact Assessment by Non-Destructive Testing and Micro-Analysis, eds. René van Grieken, and Koen H. A. Janssens , 127–33. Rotterdam: A.A. Balkema.

[51] - Lloyd, Helen, and Sarah Staniforth. 2000. Preventive conservation and "'A madness to gaze at trifles'": A sustainable future for historic houses. In Tradition and Innovation: Advances in Conservation: Contributions to the Melbourne Congress, 10-14 October 2000, eds. Ashok Roy, and Perry Smith, 118-23. London: International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works.

[52] - Maekawa, S., and F. Toledo. 2003. Sustainable climate control for historic buildings in subtropical climates. Management of Environmental Quality: An International Journal 14(3): 369-82.

[53] - Maekawa, Shin. 1993. Environmental monitoring of the tomb of Nefertari. In Art and Eternity: The Nefertari Wall Paintings Conservation Project, 1986-1992, Miguel Angel Corzo, and Mahasti Afshar, 105-21. Los Angeles, California: The Getty Conservation Institute.

[54] - Maekawa, Shin, and Vincent Beltran. 2004. Climate controls for historic buildings: A new strategy. Conservation: The Getty Conservation Institute Newsletter 19(1): 21-24.

[55] - Maekawa, Shin, and Franciza Toledo. 2003. Sustainable climate control for historic buildings in subtropical climates. Management of Environmental Quality: An International Journal 14(3): 369-82.

[56] - Maekawa, Shin, Yongjun Zhang, Baoyi Wang, Wenli Fu, and Ping Xue. 1996. Climate and micro-climate at the Mogao Grottoes. In The Conservation of Dunhuang Mogao Grot-toes and the Related Studies: International Symposium on the Conservation and Restoration of Cultural Property, Nara, February 1-3, 1996 , 53-73. International Symposium on the Conservation and Restoration of Cultural Property (19) . Tokyo, Japan: National Research Institute of Cultural Properties .

[57] - Michalski, Stefan. 1998. Climate control priorities and solutions for collections in historic buildings. Historic Preservation Forum 12(4): 8-14 .

[58] - Rode, C., A. Holm, and T. Padfield. 2004. A review of humidity buffering in the interior spaces. *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 27(3): 221-26.

[59] - Ryhl-Svendsen, Morten, Tim Padfield, Victoria A. Smith, and Franco De Santis. The indoor climate in historic buildings without mechanical ventilation systems. Web page, [accessed 8 June 2011]

[60] - Schellen, H. L., and M. A. P. van Aarle. 2006. Contamination of a church ceiling due to the burning of candles in combination with floor heating. *WTA Journal* 2: 223-37. http://www.byv.kth.se/avd/byte/reykjavik/pdf/art_170.pdf. [Accedido 8 de Junio de 2012]

[61] - Staniforth, Sarah. 1995. Environmental control in historic buildings. *Transactions (Association for Studies in the Conservation of Historic Buildings)* 20: 33-42.

[62] - Staniforth, Sarah. 1995. Preventive conservation in National Trust houses. In *International Symposium on the Conservation and Restoration of Cultural Property: Cultural Property and Its Environment: October 11-October 13, 1990*, 145-66. Tokyo: Bunka-cho Tokyo Kokuritsu Bunkazai Kenkyujo Hozon Kagakubu.

[63] - Toledo, Franciza, and Clifford Price. 1998. A note on tropical, hot, and humid museums. *Journal of Conservation and Museum Studies* 4. <http://palimpsest.stanford.edu/jcms/issue4/toledo.html>. [Accessed 8 June 2011]

[64] - Oreszczyn, T., and S. E. C. Pretlove. 1999. Condensation Targeter II: Modelling surface relative humidity to predict mould growth in dwellings. *Building Services Engineering Re-search and Technology* 20(3): 143-53.

[65] - Schellen, Henk L., Dionne Neilen, Jos A. W. M. van Schijndel, and Marcel A. P. van Aarle. Indoor air humidity of monuments and hygrothermal surface conditions (presented at 6th Indoor Air Quality 2004 Meeting (IAQ2004) Padova, Italy, 10-12 November 2004).

[66] - Formaldehyde Activity on Historical Glass Objects in Museum Microclimate. Elizbieta Greiner-Wronowa, Anna Pusoska. The National Museum, Krakow, Poland. 2006.

[67] - Conrad, Ernest A. 1996. Balancing environmental needs of the building, the collection, and the user. In Abstracts of Papers Presented at the Twenty-Fourth Annual Meeting, Norfolk, Virginia, June 10-16, 1996, by the American Institute for Conservation, 15-18. Washington D.C. American Institute For Conservation.

[68] - Oreszczyn, Tadj, Ian Ridley, Sung H. Hong, and Paul Wilkinson. 2006. Mould and winter indoor relative humidity in low income households in England. *Indoor and Built Environment* 15(2): 125-35.

[69] - Pretlove, S. E. C., and T. Oreszczyn. 1998. Climate change: Impact on the environmental design of buildings. *Building Services Engineering Research and Technology* 19(1): 55-58.

[70] - Schellen, H. L., M. A. P. van Aarle, and A. W. M. van Schijndel. 2005. The use of FEMLAB models to protect a monumental church organ in case of hot air church heating.

[71] - Indoor air climate requirements for Russian Churches and Cathedrals. Y. Tabunschikov and M. Brodatch. *Indoor Air* 2004; 14 (Suppl 7): 168-174

[72] - Camuffo, D., Sturaro, G. and Valentino, A. Thermodynamic exchanges between the external boundary layer and the indoor microclimate at the basilica of Santa Maria Maggiore, Rome, Italy: the problem of conservation of ancient works of art. *Boundary-Layer Meteorology* 1999, 92, 243-262.

[73] - Loupa, G., Charpantidou, E., Kioutsioukis, I. and Rapsomanikis, S. Indoor microclimate, ozone and nitrogen oxides in two medieval churches in Cyprus. *Atmospheric Environment* 2006, 40, 7457-7466.

[74] - Camuffo, D., Brimblecombe, P., Van Grieken, R., Busse, H.J., Sturaro, G., Valentino, A., Bernardi, A., Blades, N., Shooter, D., De Bock, L., Gysels, K., Wieser, M. and Kim, O. Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy. *Science of the Total Environment* 1999, 236, 135-152.

[75] - Gysels, K., Delalieux, F., Deutsch, F. and Van Grieken, R. Indoor environment and conservation in the Royal Museum of Fine Arts, Antwerp, Belgium. *Journal of Cultural Heritage* 2004, 5, 221-230.

[76] - Sturaro, G., Camuffo, D., Brimblecombe, P., Van Grieken, R., Busse, H.J., Bernardi, A., Valentino, A., Blades, N., Gysels, K., Deutsch, F., Wieser, M. and Buczolits, S. Multidisciplinary environmental monitoring at the Kunsthistorisches Museum, Vienna. *Journal of Trace and Microprobe Techniques* 2005, 21(2), 273-294.

[77] - Indoor dynamic climatology: Investigations on the interactions between walls and indoor environment. Dario Camuffo.

[78] - Impact of daily and seasonal Temperature and Relative Humidity cycles on wooden artworks. Dario Camuffo, Emanuela Pagan. CNR, ISAC, Padova, Italy

[79] - RC Indoor air quality at Salarjung Museum Hyderabad, India. MK Suneela, M sumathi, M Reddy. *Environmental monitoring and assessment*. 105 (1-3): 359-367 Jun 2005.

[80] - Diagnostic of the conservation state in the crypt of the Abbey of Montecorona: biological, microclimatic and geophysical evaluations. Rosella Cataldo, Giovanni Leucci, Stefano Siviero, Rita Pagiotti and Paola Angelini. *Journal of Geophysics and Engineering*. May 2009.

[81] - Michalski, S. 1997. Humidity and temperature guidelines for digital media. In *Preservation of Digital Media Workshop*, 59-60. Ottawa: National Archives of Canada.

[82] - Michalski, Stefan. 1996. Environmental guidelines: Defining norms for large and varied collections. In *Preservation of Collections: Assessment, Evaluation, and Mitigation Strategies: Papers Presented at the Workshop*, Norfolk, Virginia, June 10-11, 1996, 28-33. Washington DC: American Institute for Conservation.

[83] - Michalski, Stefan. 1999. Setting standards for conservation: New temperature and relative humidity guidelines are now published/Normes de conserva-

tion: Publication de nouvelles directives sur la température et l'humidité relative. CCI Newsletter/ Bulletin de l'ICC (24): 3-4.

[84] - Michalski, Stefan. 2000. Guidelines for Humidity and Temperature for Canadian Archives. Technical Bulletin 23. Ottawa, Ontario: Canadian Conservation Institute.

[85] - Padfield, Tim, Henrietta Berg, Nina Dahlstrom, and Anna-Grethe Rischel. 2002. How to protect glazed pictures from climatic insult. In 13th Triennial Meeting, Rio De Janeiro, 22-27 September 2002: Preprints, eds. ICOM Committee for Conservation and Roy Vontobel, 80-85. London: James & James.

[86] - Padfield, Tim, and Jesper Stub Johnsen. 1996. The breath of Arrhenius: Air conditioning in photographic archives. In Research Techniques in Photographic Conservation: Proceedings of the Conference in Copenhagen, 14-19 May 1995, Mogens S. Koch, Tim Padfield, Jesper Stub Johnsen, and Ulla Bogvad Kjerser, 59-63. Copenhagen: Kongelige danske kunstakademi. Konservatorskolen.

[87] - Museum Microclimates, T. Padfield & K. Borchersen (eds.) National Museum of Denmark 2007. ISBN 978-87-7602-080-4. Pag 12-13.

[88] - Michalski, Stefan. 1996. Quantified risk reduction in the humidity dilemma. APT Bulletin 27(3): 25-29.

[89] - Brown, J. 'Hygrometric measurement in museums: calibration, accuracy, and the specification of relative humidity', in A. Roy & P. Smith (ed.s), Preventive Conservation: Practice, Theory and Research. Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, International Institute for the Conservation of Artistic and Historic Works (IIC), London (1994), 39-43.

[90] - Eshøj, Bent, and Tim Padfield. 1993. The use of porous building materials to provide a stable relative humidity. In ICOM Committee for Conservation 10th Triennial Meeting: Washington, DC, 22-27 August 1993: Preprints, Ed. Janet Bridgland, 605-9. ICOM Committee for Conservation.

[91] - Padfield, Tim. 1998. The Role of Absorbent Building Materials in Moderating Changes of Relative Humidity. Ph.D. thesis, The Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering and Materials. Available at <http://www.padfield.org/tim/cfys/phd/ch1a.pdf>.

[92] - Padfield, Tim. 1999. On the usefulness of water absorbent materials in museum walls. In 12th Triennial Meeting, Lyon, 29 August-3 September 1999: Preprints (ICOM Committee for Conservation), ed. Janet Bridgland, 83-87. London: James & James Ltd.

[93] - HVAC systems to control microclimate in the museums. Pietro Mazzei – Alfonso Capozzoli – Francesco Minichiello – Daniele Palma. DETEC, University of Naples “Federico II”, P.le Tecchio, 80, 80125 Naples, Italy

[94] - Camuffo, D., Pagan, E., Bernardi, A. and Becherini, F. The impact of heating, lighting and people in re-using historical buildings: a case study. *Journal of Cultural Heritag*, 2004, 5, 409-416.

[95] - Camuffo, D. and Bernardi, A. Study of the microclimate of the Hall of the Giants in the Carrara Palace in Padova. *Studies in Conservation* 1995, 40, 237-249.

[96] - Padfield, Tim. 2005. How to keep for a while what you want to keep forever. Web page, [accessed 8 June 2011]

[97] - Padfield, Tim, and Annabel Robinson. 1996. The climate behind pictures mounted against the outer walls of the chapel of Ledreborg, Denmark. In ICOM Committee for Conservation: 11th Triennial Meeting, Edinburgh, Scotland, 1-6 September, 1996: Preprints, ed. Janet Bridgland, 72-75. London: James & James.

[98] - Camuffo D. and Bernardi, A. The microclimate of Leonardo's Last Supper, *Bollettino Geofisico* 1991, 14(3), 1-75.

[99] - Camuffo, D. and Bernardi, A. The microclimate of the Sistine Chapel, *European Cultural Heritage Newsletter on Research* 1995, 9, 7-33.

[100] - *Revista Restauración y Rehabilitación - Revista internacional del patrimonio histórico*. nº 106. Enero 2008. Páginas 46 a 61. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.

[101] - Marías, F. (2007) “Frescoes of the cathedral of Valencia”, *FMR*, 22, 49-72.

[102] - Bernardi, A., Todorov, V. and Hristova, J. Microclimatic analysis in St. Stephan's church, Nessebar, Bulgaria after interventions for the conservation of frescoes. *Journal of Cultural Heritage* 2000, 1, 281-286.

[103] - Revista Mètode: Revista de difusió de la investigació de la Universitat de València. Hivern 2007/08. PUBLICACIONS UNIVERSITAT DE VALENCIA.

[104] - Libro: ""Los Ángeles Músicos de la Catedral de Valencia. Estudios previos". Editado por la Conselleria de Cultura i Esport de la Generalitat Valenciana y el Institut Valencià de Conservació i Restauració de Béns Culturals."

[105] - Application Note del fabricante: APP-4600, 25 septiembre 2009. También en la página web <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/27> (Visitada en Febrero de 2012).

[106] - Application Note del fabricante: APP-148, 22 septiembre 2008. También en la página web <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/148> (Visitada en Febrero de 2012).

[107] - Página web de la plataforma Arduino <http://arduino.cc/es/> (1 Julio de 2010)

[108] - Página web del entorno de desarrollo Delphi.
<http://www.embarcadero.com/products/delphi> (5 de Julio de 2010).

[109] - Página web del motor de Base de Datos FireBird.
<http://firebirdsql.org/> (5 de Julio de 2010).

[110] - Microclimate monitoring by multivariate statistical control: The renaissance frescoes of the Cathedral of Valencia (Spain). *Journal of Cultural Heritage*, In Press, Corrected Proof, Available online 23 March 2010. Fernando-Juan García-Diego, Manuel Zarzo.

[111] - P. Nomikos, J.F. MacGregor, Monitoring batch processes using multiway principal component analysis, *AIChE J.* 40 (1994) 1361–1375.

[112] - P. Nomikos, Detection and diagnosis of abnormal batch operations based on multi-way principal component analysis, *ISA Trans.* 35 (1996) 259–266.

[113] - N.B. Gallagher, B.M. Wise, C.W. Stewart, Application of multi-way principal components analysis to nuclear waste storage tank monitoring, *Comput. Chem. Eng.* 20 (1996) S739–S744.

[114] - S. Rännar, J.F. MacGregor, S. Wold, Adaptive batch monitoring using hierarchical PCA, *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 41 (1998) 73–81.

[115] - M. Zarzo, A. Ferrer, Batch process diagnosis: PLS with variable selection versus block-wise PCR, *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 73 (2004) 15–27.

[116] - Daniel Peña. 2002. Análisis de datos multivariantes. Editorial McGraw-Hill. ISBN: 96788448136109. Capítulo 3.

[117] - Página web del software SIMCA-P <http://www.umetrics.com> (20 de Mayo de 2011).

09. NOTAS FINALES.

Esta tesis ha sido cofinanciada por el Ministerio Español de Ciencia e Innovación bajo el auspicio de los proyectos HAR2010-21944-C02-01 y HAR2010-21944-C02-02.

En Valencia a 20 de Marzo de 2012.

Ángel Fernández Navajas.