

Estudio microclimático del Claustro del Monasterio de Silos

Ministerio
de Cultura



Estudio microclimático del Claustro del Monasterio de Silos

Juan A. Herráez

www.mcu.es

www.060.es

Subdirector General del IPCE
Alfonso Muñoz Cosme

Jefa del Área de Formación, Documentación y Difusión
María Domingo Fominaya

Jefe del Servicio de Documentación
Antonio J. Sánchez Luengo

Elaboración del estudio y realización de textos
Juan Antonio Herráez Ferreiro

Corrección de textos
Iolanda Muiña Álvarez
Lorenzo Martín Sánchez



MINISTERIO DE CULTURA

Edita:

© SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA
Subdirección General
de Publicaciones, Información y Documentación

© De los textos: Juan A. Herráez

NIPO: 551-10-060-8



MINISTERIO
DE CULTURA

Ángeles González-Sinde

Ministra de Cultura

Mercedes E. del Palacio Tascón

Subsecretaria de Cultura

Ángeles Albert

Directora General de Bellas Artes y Bienes Culturales

ÍNDICE

	Pág.
Prólogo	7
Introducción	11
Características generales del entorno	15
Situación.....	15
Medio físico.....	15
La vegetación.....	16
Medio humano.....	17
Características climáticas de la localidad	19
Clima de la región.....	19
Representatividad de los datos.....	20
Clima de Santo Domingo de Silos.....	21
Temperatura.....	21
Heladas.....	25
Precipitaciones.....	25
Lluvia.....	26
Nieve.....	26
Granizo.....	26
Tormentas.....	26
Humedad.....	26
Rocío y escarcha.....	27
Niebla.....	27
La insolación.....	27
El viento.....	28
Evolución del clima en la localidad.....	29
Conclusiones.....	31
Características microclimáticas del claustro	33
Descripción física del Claustro.....	33
Método de trabajo.....	36
Dinámica climática del claustro.....	36
Previsiones teóricas.....	36
Datos experimentales.....	39
Temperatura.....	39
Humedad relativa.....	44
Oscilaciones estacionales y diarias.....	51
Representatividad de los datos.....	55
Interacción del material pétreo con el medio.....	56
Metodología.....	56
Comportamiento térmico.....	57
Comportamiento hídrico.....	62
Representatividad de los datos.....	62
Conclusiones	65
Bibliografía y cartografía	69



Prólogo

La publicación del *Estudio Microclimático del Claustro del Monasterio de Santo Domingo de Silos* tiene, a pesar del tiempo transcurrido desde su realización, una pertinencia doblemente justificada. Por un lado, se trata de un estudio científico elaborado íntegramente por técnicos del IPCE, aunque realizado en equipo, de forma interdisciplinar, con otros grupos de trabajo de la Universidad de Oviedo, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), el Servei Geològic de la Generalitat de Catalunya, y los departamentos de Documentación y Monumentos del entonces Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (ICRBC), que se ocuparon del estudio de otros factores como son la caracterización y alteración del material pétreo del claustro, el biodeterioro, la dinámica hidrogeológica del subsuelo y la investigación histórica y documental, respectivamente. Todos estos estudios tenían por objetivo, como se menciona en la introducción, el analizar el estado de conservación y los fenómenos de deterioro para establecer un diagnóstico preciso y definir las intervenciones más adecuadas para eliminar o estabilizar estos fenómenos.

En muchos aspectos, este primer estudio microclimático fue un trabajo de investigación cuyo modelo metodológico ha servido de base a los técnicos de la actual Unidad de Conservación Preventiva del IPCE para desarrollar una línea de trabajo que ha dado lugar a un importante número de estudios, no sólo en monumentos y obras conservadas en condiciones de intemperie, sino también de estudios realizados en interiores. De ellos se pueden destacar los estudios microclimáticos de la Sacristía del Monasterio de Guadalupe, de la Capilla del Cristo de la Buena Muerte de la Universidad de Sevilla, de la Techumbre de la Catedral de Teruel, del Claustro del Monasterio de San Juan de Duero, y actualmente, del Claustro del Monasterio de Santa María de El Paular.

En todos estos, y otros muchos más, el objetivo de fondo, más allá del estudio concreto de cada caso, ha sido el investigar en métodos para mejorar la capacidad de análisis de la interacción entre los factores ambientales y los materiales constituyentes de cada bien cultural. En este sentido, el *Estudio Microclimático del Claustro del Monasterio de Santo Domingo de Silos*, cuyo texto original, con muy escasas revisiones posteriores, data de principios del año 1990, tiene todavía vigencia como modelo metodológico para este tipo de estudios. También, aunque realizado con medios técnicos muy modestos y muy diferentes a las sofisticaciones técnicas utilizadas actualmente en la Unidad, dicho estudio ha servido de pauta en los métodos de toma, organización y análisis de datos de factores del medio. Aún hoy en día, esta línea de trabajo constituye una base sólida en el enfoque de estudio de los bienes culturales y su medio circundante, y nos ha permitido profundizar y mejorar los métodos de seguimiento y control en los proyectos desarrollados con un enfoque de conservación preventiva.

Aspecto especialmente relevante de este estudio es la aplicación de la técnica de termografía de infrarrojo, que junto con las pruebas realizadas en la intervención de restauración de las pinturas murales de la Ermita de San Antonio de la Florida, fueron las primeras pruebas de aplicación de la técnica al estudio de conservación del patrimonio cultural. También por ello, el estudio del Claustro de Silos fue fundamental en la puesta a punto de la técnica y en la definición de un método trabajo que ha servido de base para su posterior aplicación en numerosos estudios realizados desde entonces. En estas pruebas es necesario destacar la colaboración imprescindible de nuestra compañera Araceli Gabaldón, físico de la Unidad de Estudios Físicos del Área de Laboratorios del IPCE, ahora al borde de la jubilación, culminando una brillante trayectoria profesional. Sirva también esta publicación como modesto homenaje.

Desde otro punto de vista, la imprescindible difusión de los trabajos que el IPCE lleva cabo es hoy, afortunadamente, una realidad que solventa graves deficiencias pasadas, gracias a la nueva Área de Formación, Documentación y Difusión impulsada por la dirección del IPCE. Hasta el momento la difusión de la metodología de estudio establecida en este antiguo trabajo había sido, lamentablemente, muy escasa y restringida a los técnicos y colaboradores de la Unidad, a las escasas publicaciones de intervenciones del IPCE o comunicaciones parciales aportadas a congresos, simposios y cursos, por lo



Figura 2. Vista panorámica de Santo Domingo de Silos. Fototeca Digital. IPCE.

que se consideraba necesario dar formato a una publicación que permitiese una mejor difusión, no ya de los datos concretos, sino de los valores como método de estudio que consideramos aún tiene dicho trabajo.

Aunque con otro objetivo, el método propuesto en el *Estudio Microclimático del Claustro del Monasterio de Santo Domingo de Silos* es el que actualmente está sirviendo de base para el actual estudio del Claustro del Monasterio de Santa María de El Paular, en el que además se está profundizando en otros aspectos como el análisis de la insolación y la iluminación natural. Además, con la base del estudio de Silos y el trabajo y la experiencia atesorada durante todos estos años, se pretende realizar para el próximo año unas Jornadas sobre la toma de datos y las técnicas de organización y análisis de datos de factores ambientales.

Por ello, con la publicación actual del *Estudio Microclimático del Claustro del Monasterio de Santo Domingo de Silos* se pretende desarrollar las funciones que el IPCE tiene encomendadas (R.D. 1132/2008) en cuanto a la investigación en criterios, métodos y técnicas de conservación y restauración, y la obligada difusión de sus trabajos. Esta publicación es una muestra de ello y de la dilatada trayectoria científica y profesional de la Institución.

Madrid, agosto de 2009





Introducción

11

El Estudio Microclimático del Claustro del Monasterio de Santo Domingo de Silos se enmarca dentro de una primera fase de estudios de investigación multidisciplinar que tienen por objeto dicho claustro, y se pretende sirva de base para conocer el estado de conservación, los fenómenos de degradación que sufren algunos de los elementos más importantes y la necesidad o no de tratamiento para eliminar o estabilizar estos fenómenos.

Considerando que los procesos degradativos son el resultado de la interacción de varios factores, las conclusiones a las que se llega en el presente estudio representan tendencias de los elementos microclimáticos que para ser correlacionadas de forma directa con dichos procesos necesitan contrastarse con los resultados a los que llegan los especialistas que han estudiado los demás factores, especialmente los relacionados con la naturaleza y alteración del material pétreo, y la dinámica hidrogeológica del subsuelo del claustro.

El punto de partida para el estudio ha sido el considerar el claustro como un subsistema más o menos abierto, dependiente de las condiciones en el exterior, y en el que el microclima no es más que el resultado de la interacción del comportamiento de la atmósfera en la localidad con el sustrato sólido que forma el claustro en su conjunto. Esta interacción consiste esencialmente en intercambios de materia y energía cuyo resultado, en un tiempo dado, se puede expresar en términos de los valores y fluctuaciones de ciertos parámetros de elementos microclimáticos como la humedad y la temperatura.

La observación de esta interacción, desde un punto de vista amplio de la dinámica ambiental, ha permitido un conocimiento bastante preciso del funcionamiento general del entorno, aunque el empleo de medios técnicos modestos y la falta de ciertos datos, que el período de tiempo del estudio no ha permitido obtener por el momento, impiden un cono-

cimiento exacto del comportamiento del material pétreo durante la estación invernal del ciclo anual.

Teniendo en cuenta esto último, junto con la naturaleza oscilante del clima, argumentos que aconsejan la prolongación de las observaciones durante varios años en estudios de este tipo, se reclama la conveniencia de continuar las observaciones. Esto supondría la disponibilidad de datos más ajustados que, junto a una profundización en las propiedades físicas de los ma-

teriales, permitiría un conocimiento más detallado de la interacción de la piedra con el medio en función de ciertas variables y del tiempo, con la posibilidad de efectuar predicciones sobre la influencia degradativa de los factores microclimáticos.

Paralelamente, para complementar los estudios actuales y ahondar en ese conocimiento más detallado se cree necesario abordar otras líneas de investigación, como la influencia humana en la degradación del claustro tanto en el aspecto de



los visitantes como en el uso cotidiano del mismo, y quizá un estudio más riguroso de la acción directa de la insolación sobre los capiteles, aspectos que sobrepasan el objetivo del presente estudio.

Esta profundización puede resultar imprescindible en el caso de la toma de decisiones sobre el tratamiento de conservación/restauración a aplicar en determinados elementos.

Por último, es obligatorio expresar el agradecimiento a los monjes del monaste-

rio por la atención prestada en todo momento, y en especial al padre Dionisio por su inestimable ayuda en la ubicación de los instrumentos de medición, y al padre Pedro Manzanal, observador del Instituto Nacional de Meteorología en la localidad, que amablemente ha suministrado cuantos datos le han sido requeridos y se ha encargado hasta el momento del mantenimiento y cuidado de los aparatos instalados en el claustro, sin cuya colaboración no hubiera sido posible este estudio.



Figura 4. Juan Antonio Herráez: detalle del deterioro de la basa de las columnas debida a la erosión de la lluvia.



Características generales del entorno

15

1. Situación

El Monasterio de Santo Domingo de Silos, enclavado en la población a la que da nombre, se encuentra en un pequeño valle de las estribaciones del Sistema Ibérico, en el extremo suroccidental de la Sierra de la Demanda, límite de las altas parameras de la Submeseta Norte en la provincia de Burgos. Sus coordenadas geográficas son 3°25'4" W y 41°57'48" N, a una altitud de 1.004 m.

Los accesos y vías de comunicación son por carreteras locales. Una con dirección W-E que discurre a lo largo del valle y que comunica la población con Covarrubias (18 km), Lerma (32 km) y Burgos (57 km) por el Oeste y Salas de los Infantes (21 km) por el Este; y otra que alcanzando el valle en su extremo suroeste, a través de unos túneles en el paraje conocido como La Yecla, comunica Silos con Caleruega (19 km) y Aranda de Duero (46 km) por el Sur.

2. Medio físico

El sustrato geológico de la zona está compuesto por materiales cretácicos producto de distintas fases de sedimentación y estructurados por plegamientos y fracturas ocurridas en distintas fases de actividad orogénica del Terciario. Así, el valle formado por estos movimientos y modelado por la erosión mantiene los materiales más antiguos (calcarenitas y margas) en las crestas que lo delimitan, con una gradación de materiales calizos y margosos de menor antigüedad hasta la boca del valle en la que empiezan a aparecer materiales del Terciario. El monasterio está situado sobre una banda de margocalizas y margas dolomíticas.

Los suelos, muy someros, como corresponde a los procedentes de la alteración de las rocas calizas, deben tener un excelente drenaje y permeabilidad, con una capa freática muy variable.

El valle, con orientación WNW-ESE, está delimitado por cresterías que tienen sus pendientes más fuertes en las laderas exteriores (ver Gráficos 1 y 2). La altura máxima, Águila (1.378 m), está situada en la cuerda sur, la de mayor altura media. La altura mínima, aproximadamente 1.000 m, se encuentra en la boca del valle, alrededor del cauce del río Mataviejas y próximo al monasterio. La superficie del valle constituye un área triangular de aproximadamente 12,3 km², cuyos vértices se sitúan en las alturas de El Pico (1.266 m), en el extremo Sureste, y la cota 1.323 m, próxima a los Cabezuelos y La Yecla (1.164 m), en la boca del valle.

El valle forma una cuenca de drenaje con una red de aguas superficiales poco densa. Las principales corrientes son el río Mataviejas y el río Peñacoba. Ambos nacen fuera del valle y acceden a él, de forma encajonada, a través de pequeños collados.

3. La vegetación

La vegetación es un bioindicador muy útil de las condiciones ambientales de la zona. En el valle, el sabinar (sabina albar, *Juniperus thurifera*) típico de las altas parameras de los alrededores está mezclado con matorral de pequeño porte dominado por la encina carrasca (*Quercus rotundifolia*). En el tercio inferior del valle el matorral es más abierto y con pequeños arbustillos de forma almohadillada de aulagas (*Genista sp.*), tomillos (*Thymus sp.*) y espliego (*Lavandula latifolia*). Todo ello hace prever un clima extremado, aunque la presencia esporádica de quejigos (*Quercus faginea*) y pinos (*Pinus sp.*), que requieren una mayor humedad, indica que precipitación superior a la de las llanuras de la meseta. En zonas puntuales de los accesos al valle existen formaciones de robles (*Quercus*

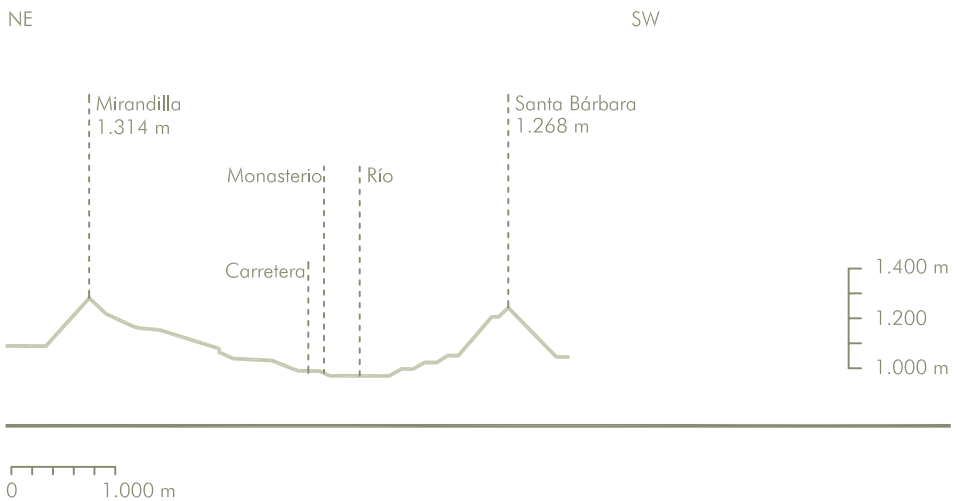


Gráfico 1. Perfil topográfico de un corte transversal del valle.

pyrenaica) próximas a las cresterías que sugieren la formación de precipitaciones de carácter orográfico, tanto en la cuerda norte como en la sur.

El paisaje resultante es un valle con el horizonte limitado por riscos de tonalidades ocres, en el que la vegetación tiene como máximo exponente el porte arbóreo típico de la sabina albar y un monte bajo, más o menos ralo, de una adustez sólo alterada por los bosquetes de galería que se alinean a lo largo del río.

guan los numerosos hallazgos arqueológicos. En la actualidad, la densidad de población es muy baja, con núcleos dispersos de estructura rural, no existiendo centros industriales próximos que pudieran generar riesgo de contaminación. La localidad de Santo Domingo de Silos, surgida al amparo del monasterio, parece prosperar en la actualidad con el impulso creciente del turismo generado por el monasterio y otros puntos de interés cultural de la zona.

4. Medio humano

El paraje, conocido en la Antigüedad como valle de Tabladillo¹, pertenece a una zona de extensa civilización desde épocas prehistóricas, como así lo atesti-

¹ Alano Martínez, C. del (1983): El Claustro Románico de Silos. Alianza Editorial. Madrid.

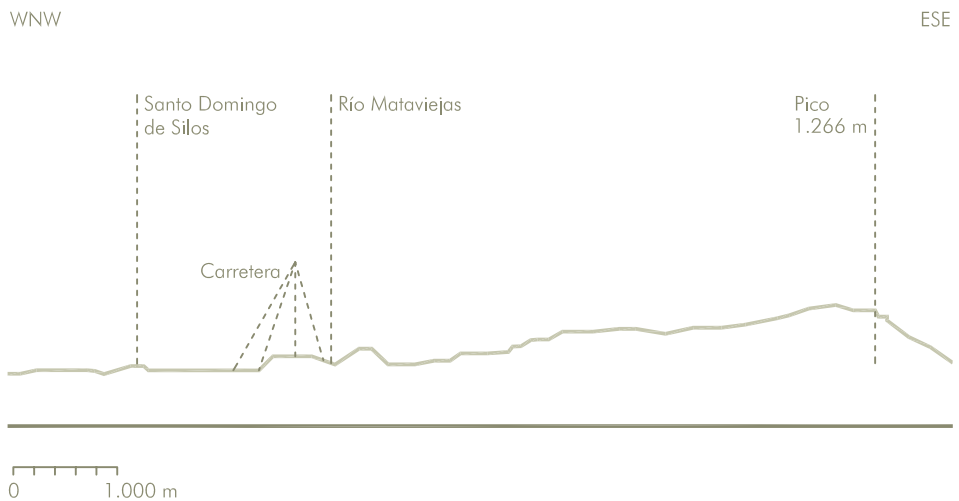


Gráfico 2. Perfil topográfico del eje longitudinal del valle.



Características climáticas de la localidad

19

Clima de la región

La localidad de Santo Domingo de Silos se encuentra enclavada, según los criterios del Instituto Nacional de Meteorología (INM)², en la región con clima mediterráneo continental y, dentro de ella, en la subregión continental extremada. Esta división comprende una amplia zona del centro peninsular y se distingue por su aislamiento orográfico. Sin embargo en tan amplio territorio existen ciertas áreas (Meseta Norte, Meseta Sur y Depresión del Ebro) con características climáticas definidas, separadas por zonas intermedias de gran complejidad. Silos está situada en este área intermedia en el que son determinantes las peculiaridades del relieve.

De esta forma, la localidad presenta unas características climáticas propias y diferentes a las de las áreas adyacentes.

Basándonos en los datos de temperatura y precipitaciones de la localidad durante el período 1973-1988, y siguiendo los criterios utilizados por el INM para la caracterización del área³, se puede apreciar que Santo Domingo de Silos refleja una mayor oscilación de las temperaturas, con una diferencia de 16,2°C entre las temperaturas medias de los meses extremos (Tabla 2), alcanzando un Índice de Continentalidad K (Gorezynski)⁴ de 24.6, mientras que el índice definido para la zona se sitúa entre 15 y 20.

$$K = 1.7 \frac{A}{\text{sen } \theta} - 20.4$$

Índice de Continentalidad K (Gorezynski), siendo A la variación anual de la temperatura y θ la latitud.

² Font Tullot, I. (1983): *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

³ Font Tullot, I. (1983): *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

⁴ Font Tullot, I. (1983): *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

Por otro lado, en cuanto a los criterios relacionados con las precipitaciones (régimen pluviométrico e Índice Hídrico) también se han observado diferencias significativas. El período de máxima precipitación se da, a diferencia de las zonas adyacentes, en el período invernal (diciembre, enero y febrero) y no en la primavera (Gráfico 3). Por otra parte, el valor del total medio del trimestre estival (junio, julio y agosto), 119,1 mm, se encuentra en el límite de los regímenes “algo lluviosos” ($>90 \leq 120$) y “lluvioso” ($>120 \leq 180$), y el valor del total medio anual, 705,6 mm, próximo al valor de la isohieta 700 mm que se sitúa cercana a la localidad, corresponden con los valores asignados a la zona⁵.

Sin embargo, la estimación del Índice Hídrico (IH), según el método del INM⁶, da valores más altos definiendo a la localidad como “húmeda”, con un $IH > 1,00$. Los valores de IH en Santo Domingo de Silos, tanto si se utiliza el valor aproximado asignado a la zona de la evapotranspiración potencial media anual E_p ⁷, como si se calcula por el método Thornthwaite⁸, a partir de los datos de temperatura, proporciona valores de IH superiores a 1 (1,008 – 1,086 y 1,251 respectivamente).

$$I_H = \frac{R}{E_p}$$

Índice Hídrico (INM) siendo R la precipitación media anual y E_p la evapotranspiración potencial media anual (Thornthwaite).

Por último hay que señalar que, a pesar del máximo invernal de precipitacio-

nes, también se observan en esta época períodos cortos dominados por el anticiclón peninsular con temperatura y humedad relativa muy bajas.

En resumen, se puede concluir que la localidad de Santo Domingo de Silos tiene un régimen termométrico más extremado que el que se le asigna teóricamente a su área, mientras que los índices relacionados con las precipitaciones son más semejantes a las zonas montañosas del Sistema Ibérico, en cuyas estribaciones se encuentra la localidad. Estas características particulares están, sin duda, determinadas por la geomorfología peculiar de la zona.

Representatividad de los datos

La representatividad de los datos de la serie estudiada, período 1973-1988, tiene claras limitaciones, ya que los períodos óptimos recomendados son de 25 años para la temperatura y 50 para las precipitaciones en las localidades de montaña. Para las localidades de llanuras los períodos necesarios son más cortos: 15 años para la temperatura y 40 para las precipitaciones⁹. La serie de Santo Domingo de Silos, 16 años, presenta una tendencia clara de un ligero aumento de los parámetros termográficos, mientras que el estadístico de las precipitaciones, de tamaño muy corto respecto al óptimo, presenta una tendencia no muy clara hacia una disminución, aunque alcanza una estabilización de la media a partir del año 1978 (Gráficos 3, 7 y 8).

⁵ Font Tullot, I. (1983): *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

⁶ Font Tullot, I. (1983): *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

⁷ Font Tullot, I. (1983): *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

⁸ Aguiló, M. y otros (1984): *Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico: Contenido y Metodología*. CEO-TMA. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid.

⁹ Aguiló, M. y otros (1984): *Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico: Contenido y Metodología*. CEO-TMA. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid.

Clima de Santo Domingo de Silos

Las características climáticas más importantes de la localidad se pueden extraer de los datos resumidos de la Tabla 2. Estos datos y los parámetros de ellos deducidos se han elaborado a partir de los registros de la estación termopluviométrica del INM en la localidad, situada en los terrenos del mismo monasterio, y por lo tanto muy próxima al claustro. El período de registros utilizado para el estudio es de 16 años, desde 1973 a 1988, único intervalo del que se tienen observaciones regulares. De estos datos cabe destacar ciertas características a tener en cuenta para evaluar la incidencia del clima en la conservación de los capiteles y el claustro del monasterio.

Temperatura

Las características más importantes del régimen termométrico de la localidad se resumen en el Gráfico 2.

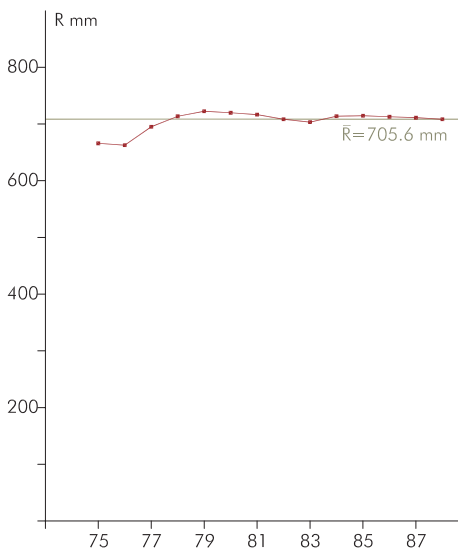


Gráfico 3. Estabilización de la media de las precipitaciones anuales de la serie.

La temperatura media anual es de 10,5°C, siendo los meses de julio y agosto los más calurosos con 19,2°C de temperatura media, y enero el mes más frío con 3°C. Las oscilaciones (diferencia entre la media de las máximas y la media de las mínimas) varía entre los 15,8°C de julio y los 8,7°C de enero. Aún así, el mes que registra unos cambios más extremados es agosto con extremos absolutos, en el período estudiado, de 37,4°C en el año 1987 y 2,2°C de mínima en 1977. Las temperaturas mínimas más extremadas se dan habitualmente en el mes de febrero.

El número medio al año de días “muy fríos” (máximas iguales o inferiores a 0°C) es de 1,6, mientras que el número de días “calurosos” (máximas iguales o superiores a 25°C) es de 73,9, siendo 23,6 de ellos “muy calurosos” (máximas iguales o superiores a 30°C). En cuanto a las noches “tropicales” (mínimas iguales o superiores a 20°C) se dan en número medio de 0,5 al año. El número medio mensual de estos parámetros se detalla en la Tabla 1.

21

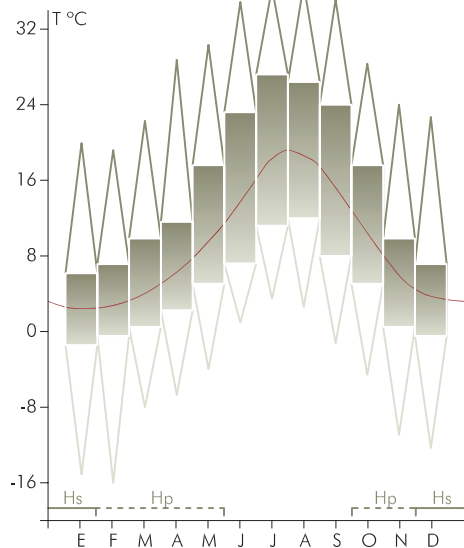


Gráfico 4. Termograma de Santo Domingo de Silos en el que se refleja la curva de temperaturas medias mensuales, las medias de máximas y mínimas mensuales, y las máximas y mínimas absolutas mensuales para el período 1973-1988.

	TM ≤ 0°C	TM ≥ 25°C	TM ≥ 30°C	Tm ≥ 20°C
Enero	1,17	0,00	0,00	0,00
Febrero	0,50	0,00	0,00	0,00
Marzo	0,00	0,00	0,00	0,00
Abril	0,00	0,06	0,00	0,00
Mayo	0,00	2,75	0,00	0,00
Junio	0,00	11,00	1,69	0,06
Julio	0,00	22,38	9,69	0,25
Agosto	0,00	21,56	8,12	0,19
Septiembre	0,00	14,06	3,88	0,00
Octubre	0,00	1,62	0,00	0,00
Noviembre	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	0,00	0,00	0,00	0,00
Año	1,67	73,93	23,60	0,47

* Los datos de TM ≤ 0°C se refieren únicamente al período 1983-1988

22

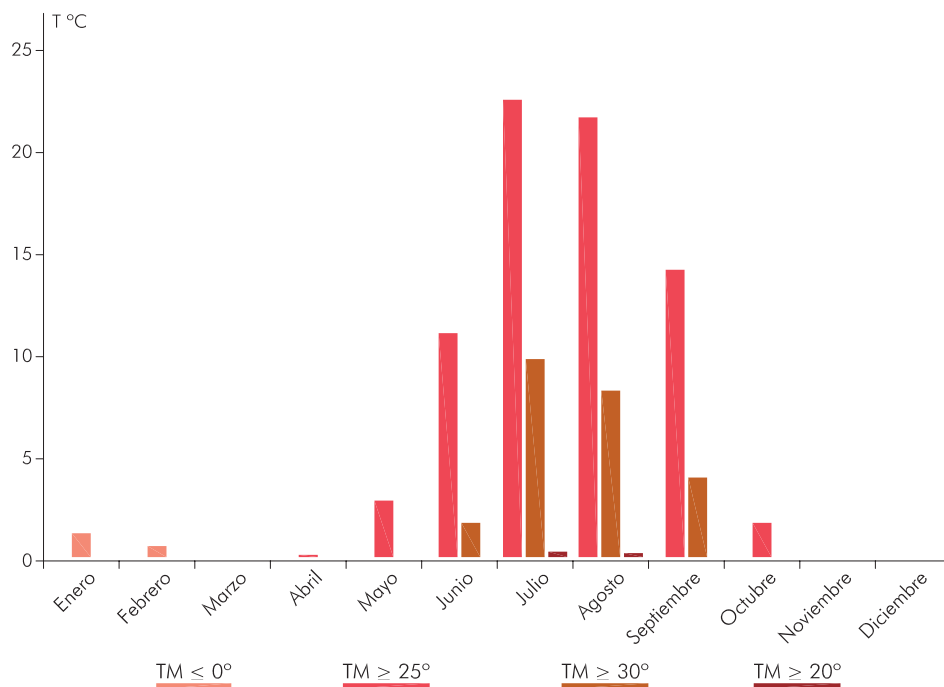


Tabla 1. Media mensual y anual de días con condiciones extremadas de temperatura. Período 1973 - 1988

Gráfico 5. Media mensual de días con condiciones extremadas de temperatura. Período 1973 - 1988

	\bar{T}	\bar{TM}	\bar{Tm}	TM	Tm	\bar{R}	RM	RD	\bar{DR}	\bar{DN}	\bar{DG}	\bar{DT}	\bar{Dn}	\bar{DH}
Ene	3,0	7,3	-1,4	18,9	-14,1	75	136	44	9,5	6,7	0,4	0,1	7,4	20,2
Feb	3,8	8,4	-0,7	18,5	-15,0	74	165	33	8,7	7,3	0,6	0,3	3,7	16,5
Mar	5,8	11,4	0,3	22,5	-8,0	46	125	24	7,5	5,4	1,4	0,4	2,4	15,3
Abr	8,1	13,6	2,6	26,5	-7,2	78	164	43	10,6	3,6	1,7	1,4	1,4	7,8
May	11,4	17,2	5,5	29,0	-3,0	69	142	34	13,7	0,8	1,4	3,8	1,9	2,0
Jun	16,0	22,9	9,1	34,0	0,8	56	134	88	9,8	0,0	0,9	4,6	1,0	0,0
Jul	19,2	27,1	11,3	36,4	3,2	40	109	63	6,4	0,0	0,6	4,7	0,7	0,0
Ago	19,2	26,8	11,6	37,4	2,2	24	56	36	5,7	0,0	0,4	3,3	0,6	0,0
Sep	16,7	23,9	9,6	36,5	-1,5	34	91	47	7,8	0,0	0,1	1,9	0,8	0,3
Oct	11,3	16,9	5,7	28,5	-3,8	59	151	36	10,6	0,6	0,3	0,4	2,6	2,4
Nov	6,4	11,6	1,6	24,3	-10,7	66	270	47	8,7	2,9	0,1	0,1	5,4	11,8
Dic	4,0	8,4	-0,4	23,0	-12,0	81	248	35	10,6	4,6	0,1	0,1	7,1	17,4
Año	10,4	16,3	4,6	37,4	-15,0	702	908	88	109,6	31,9	8,0	21,1	35,0	93,7

- \bar{T} : Temperatura media
- \bar{TM} : Temperatura media de las máximas
- \bar{Tm} : Temperatura media de las mínimas
- TM: Temperatura máxima absoluta
- Tm: Temperatura mínima absoluta
- \bar{R} : Precipitación media mensual (en mm)
- RM: Precipitación máxima en el mes o año
- RD: Precipitación máxima en 24 horas en el mes o año
- DR: Número medio de días de lluvia
- DN: Número medio de días de nieve
- DG: Número medio de días de granizo
- DT: Número medio de días de tormenta
- Dn: Número medio de días de niebla
- DH: Número medio de días de helada

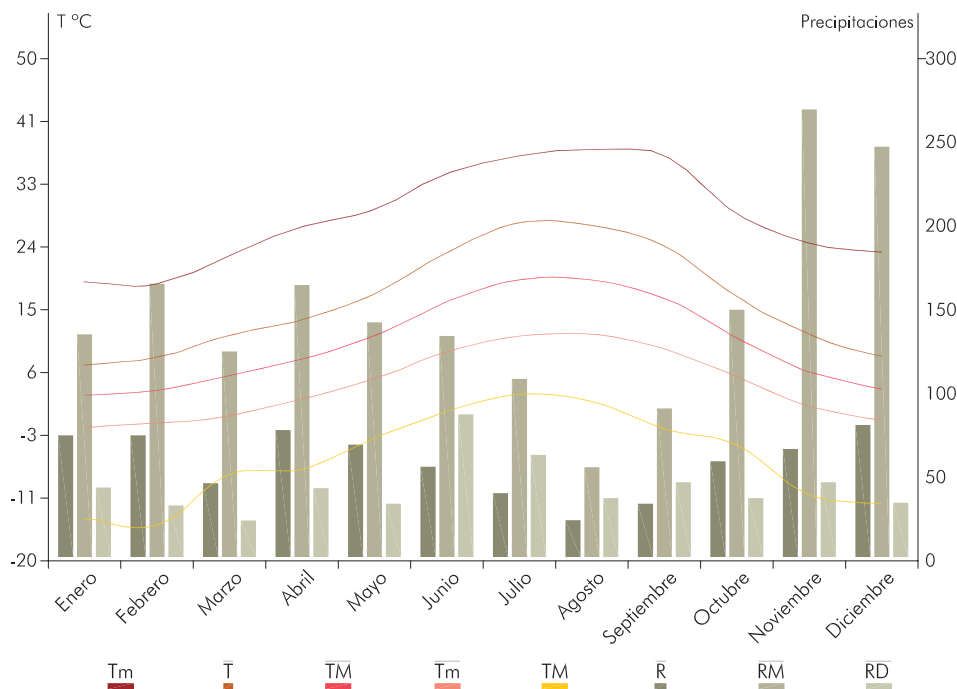


Tabla 2. Temperatura y precipitaciones. Período 1973 - 1988

Gráfico 6. Temperatura y precipitaciones. Período 1973 - 1988

	Rm / año	RM / año
Enero	1.9/83	136.4/77
Febrero	32.4/80	165.0/79
Marzo	14.6/82	125.3/79
Abril	14.4/73	164.4/88
Mayo	16.1/76	141.9/84
Junio	3.8/86	133.5/74
Julio	0/78	108.8/83
Agosto	0/85	56.4/73
Septiembre	4.4/83	91.3/82
Octubre	8.4/83	151.1/79
Noviembre	<0.1/81	269.8/84
Diciembre	6.7/88	248.3/78
Año	563.6/82	908.1/84

Datos de precipitaciones mínimas (Rm) y precipitaciones máximas (RM) por mes y año del período 1973-1988, indicando el año en el que se han registrado.

24

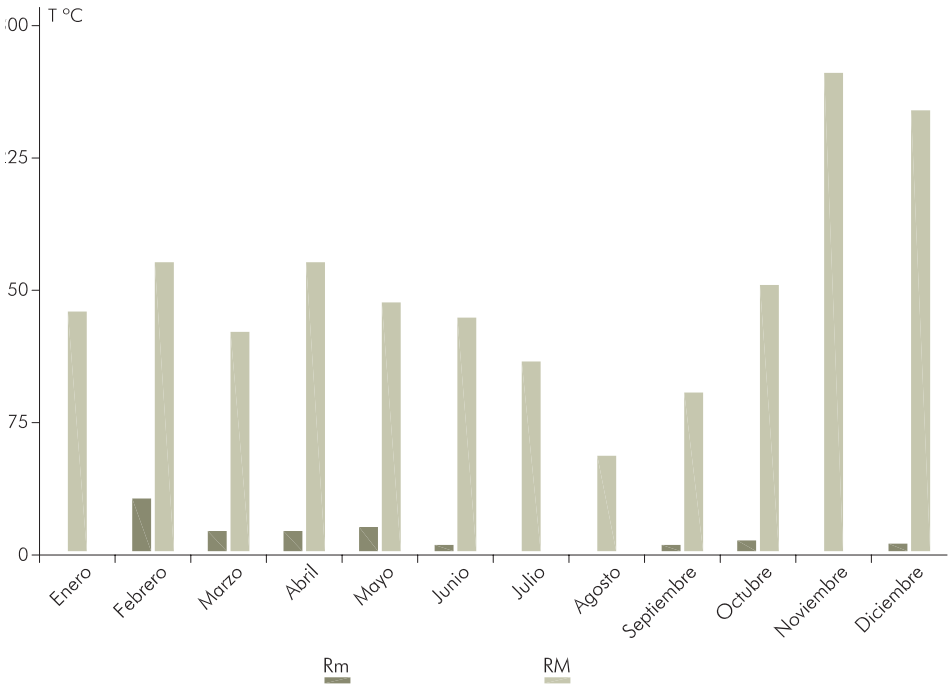


Tabla 3. Precipitaciones mínimas y máximas por mes y año. Período 1973 - 1988

Gráfico 7. Precipitaciones mínimas y máximas por mes. Período 1973 - 1988

Heladas

El período de “heladas seguras” se refiere a los meses en los que la media de temperaturas mínimas es igual o inferior a cero, como así ocurre en los meses de diciembre, enero y febrero que siempre registran heladas. Sin embargo la probabilidad de que la temperatura descienda por debajo de 0°C abarca un período más amplio, de octubre a mayo. Este es el período en el que la media de las temperaturas mínimas extremas es igual o inferior a 0°C, o de “heladas probables”¹⁰. Este período no incluye el mes de septiembre, aunque durante la serie estudiada se ha producido alguna helada en este mes.

El número medio de días al año en que se producen heladas (92,1) es importante en relación a otras zonas próximas, aún teniendo en cuenta la altitud de la localidad. La mayor frecuencia se da en el período de noviembre a abril con un máximo de 20,2 días en enero.

Precipitaciones

En el Gráfico 3 se han resumido los datos más importantes en relación al régimen de precipitaciones de la localidad, y en la Tabla 2 se encuentran los datos sobre el número medio mensual y anual de días en que se registran los distintos tipos de precipitaciones.

La cantidad media anual de precipitación es de 705,6 mm, pero este parámetro experimenta unas oscilaciones notables (Gráfico 6) aún manteniendo la media relativamente estable (Gráfico 1). Los valores medios anuales varían entre los 563,6 mm de 1982 y los 908,1 mm de 1984.

Como ya se ha indicado, el período de máxima precipitación es el invernal con 81,1 mm de media en diciembre. También se produce otro pico importante en el mes de abril, con 77,6 mm como media. En el otro extremo está el mes de agosto con unos escasos 23,5 mm de media.

La intensidad media anual de la precipitación, 5,6 mm/día, entra dentro de los valores considerados como máximos para la Península (de 4 a 10 mm). La máxima intensidad corresponde al mes de junio con 7,9 mm/día, y la menor al mes de marzo con 4 mm/día.

Los registros extremos del período 1973-1988 se resumen en la Tabla 3.

Como se puede apreciar, los máximos y mínimos mensuales son muy variables dentro de la serie, siendo los meses de julio y agosto los únicos que en alguna ocasión no han registrado precipitaciones, aunque en noviembre de 1981 se registró una precipitación “inapreciable” (IP<0,1 mm). Es este mes el más irregular de todos puesto que también registra la máxima cantidad mensual, 269,8 mm en 1984.

En cuanto a las cantidades caídas en un período diario (RD, Tabla 2), los mayores aguaceros se registraron en junio de 1974 con 87,8 mm, seguidos de enero de 1977 y abril de 1987 con 43,5 y 43,2 mm respectivamente.

Sin embargo, los días de precipitación muy abundante (RD \geq 30 mm), son muy poco frecuentes, 1,7 de media al año, siendo el mes de abril el que mayor frecuencia registra con 0,4 días de media.

Si se utiliza la relación entre la precipitación máxima en 24 horas y la media anual como índice del grado de importancia de las precipitaciones más intensas¹¹,

¹⁰ Aguiló, M. y otros (1984): *Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico: Contenido y Metodología*. CEO-TMA. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid.

¹¹ Font Tullot, I. (1983): *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

se observa que éstas no tienen gran importancia en el régimen pluviométrico ya que su porcentaje medio a lo largo de la serie es del 6,2%, variando desde el 3,4% de 1979 al 13,3 de 1974 (único año que supera el 10%), porcentajes todos ellos que son típicos de las zonas húmedas de la Península.

Lluvia

El número medio de días en que se producen precipitaciones en forma de lluvia es de 109,7 al año (R, Tabla 2), siendo la primavera la estación con mayor número de días, 31,8 como suma de la media de los tres meses (marzo, abril y mayo). El período invernal (diciembre, enero y febrero) también registra un número similar, 28,8. El mes de mayo es el de mayor número con 13,7 de media, y agosto el de menor con 5,7.

Nieve

Las precipitaciones en forma de nieve también son importantes en la localidad, registrándose un número medio anual de días de nieve de 32 que contrasta con la cantidad media asignada a la zona, 10-20 días¹². El mayor número de días se registra en febrero con 7,3 de media, con 5,3 días con el suelo cubierto de nieve. Le sigue enero con 6,7 nevadas, 4,8 de las cuales llegan a cubrir el suelo. La frecuencia anual de días con el suelo cubierto es de 19,7. El período libre de nevadas, en la serie estudiada, va de junio a septiembre.

Granizo

Las precipitaciones en forma de granizo tienen relativa importancia en Santo Domingo de Silos, siendo 8,3 el número medio de días al año, mientras que en gran parte del territorio peninsular es inferior a 5 y alcanzando los 10 únicamente en ciertos puntos montañosos y de la costa Noroeste. Este tipo de precipitaciones se registra principalmente en primavera, con una media de 1,7 días en el mes de abril, como mayor frecuencia. Sin embargo, en el período 1973-1988 se han registrado granizos en todos los meses, a pesar de ser poco frecuentes. Se carece de datos sobre el tamaño de los granos.

Tormentas

También es importante la frecuencia registrada de tormentas con 20,7 días al año como media, sólo superada por puntos montañosos entre los que se encuentra el Sistema Ibérico, cuya influencia, al igual que en los otros tipos de precipitaciones, afecta a la localidad. El relieve local debe jugar, asimismo, un papel importante en determinadas condiciones meteorológicas, favoreciendo las tormentas de tipo "orográfico".

La mayor frecuencia de días de tormenta se registra en el período de abril a septiembre, con un máximo en los meses de junio y julio con 4,6 y 4,7 días de media, respectivamente.

Humedad

Desafortunadamente, la localidad carece de cualquier registro que nos permita conocer la cantidad de vapor de agua del aire y su oscilación anual y diaria. Como valores aproximados se pueden estimar los que el INM asigna a la zona en sus publicaciones¹³.

¹² Instituto Nacional De Meteorología (1983): *Atlas Climático de España*. Madrid.

¹³ Font Tullot, I. (1983): *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid. Instituto Nacional De Meteorología (1983): *Atlas Climático de España*. Madrid.

Así, los valores medios estimados, expresados en forma de humedad relativa y referidas a las 7 y las 13 horas, son los siguientes:

	7 h	13 h
Enero	≈ 90%	75-80%
Febrero	75-80%	35-40%

La cantidad media anual de vapor de agua expresada como humedad absoluta se sitúa entre 6 y 7 gm³.

Rocío y escarcha

Aunque el rocío y la escarcha, entre otras, se consideran como precipitaciones “ocultas”, están ligadas estrechamente a la cantidad de vapor de agua del aire y a las oscilaciones de la temperatura. Ambos fenómenos de idéntica naturaleza, sólo diferenciados por el nivel de la temperatura saturante, tienen lógicamente una gran importancia para el material pétreo que constituye los capiteles y las partes más importantes del claustro que interesa conservar.

El número medio anual de días en los que se produce rocío en la localidad es de 83,5, siendo las épocas anterior y posterior al verano las que registran una mayor frecuencia con 12,9 días en octubre y 11 días en junio como medias máximas. La frecuencia menor se registra en invierno con 1,9 días como media en enero.

La distribución y frecuencia de las escarchas es de alguna manera complementaria a la del rocío, sirviendo ambas como índice de la frecuencia en la que se alcanza una saturación de vapor de agua en el aire. La frecuencia de escarchas anuales es de 63,2, registrándose en mayor número cuando las temperaturas son más bajas, es decir en el invierno. El mes de diciembre, con 12,4 días de

media, seguido de enero y noviembre con 11,9 y 10,8 días de media, respectivamente, son los que registran una frecuencia más alta. Julio es el único mes, durante el período estudiado, en el que no se ha producido ninguna escarcha. Este dato contrasta con los expuestos anteriormente respecto a las heladas, en los que se definía el período de junio a agosto como libre de heladas o período en el cual la temperatura del aire no es inferior a 0°C. Sin embargo, según estos registros, bajo ciertas condiciones límite, con la temperatura del aire próxima a los 0°C, puede producirse este fenómeno, al menos en los meses de junio y agosto, sobre superficies que se enfríen rápidamente por radiación.

Niebla

La formación de nieblas también está ligada a la humedad del aire y a la condensación de esta humedad, causando efectos similares al rocío pero generalizados en la capa de aire próxima a la superficie del suelo.

La frecuencia con la que se presenta este meteoro en la localidad es similar a la de estaciones próximas e inferior a la que se registra en zonas más cercanas al núcleo del Sistema Ibérico, con frecuencias medias alrededor de los 60 días. En Silos el número anual de días de niebla es de 35,7.

La insolación

Tampoco existen datos locales sobre la cantidad de radiación solar incidente, por lo que para evaluar la importancia de este

¹⁴ Font Tullot, I. (1983): *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid. Instituto Nacional De Meteorología (1983): *Atlas Climático de España*. Madrid.

elemento del clima hay que basarse en los valores estimados por el INM¹⁴ para la zona.

La frecuencia anual estimada de días despejados es de 90-120, al igual que la de días cubiertos que también es de 90-120, lo cual da una frecuencia de días nublados o parcialmente cubiertos, según los criterios meteorológicos, de 125-285.

Según estos datos, la duración media anual de la insolación directa o período de tiempo en que luce el sol es de 2.200-2.400 horas distribuidas de la siguiente forma:

	Número de horas
Enero	80-100
Abril	200
Julio	320-340
Octubre	160-180

El cálculo de la cantidad total de radiación es, sin embargo, más complejo, puesto que a la radiación directa habría que añadir la indirecta o difusa. De esta forma el valor medio global estimado para la zona es de 4,00-4,25 KWh/m²/día al año.

28

El viento

El viento es otro elemento importante del clima. Los datos disponibles de la localidad son escasos, ya que se limitan a la dirección del viento dominante en los días de lluvia y a la dirección del viento durante el día de precipitación máxima, sin especificar su velocidad. Sin embargo, estos datos son importantes puesto que nos darán una idea sobre los puntos más expuestos, teóricamente, a las precipitaciones del claustro del monasterio.

La circulación general del viento en la zona, según los observatorios más cercanos que poseen dichos datos, es del sector SW en invierno y del sector NE en verano¹⁵. En Santo Domingo de Silos la circulación de los vientos está especialmente condicionada por el relieve, al menos los vientos que traen las precipitaciones. Así, el viento dominante durante los días de precipitación es claramente del sector W, orientación por la que se abre el valle que encierra la localidad. La dirección dominante durante gran parte del año es W, con un porcentaje medio durante la serie estudiada del 34,6%. El viento de dirección SW también es frecuente, siendo dominante durante los meses de mayo y julio, y con un porcentaje medio de 23,6%.

La dirección del viento durante los días de máxima precipitación también es dominante en el sector W, siendo la dirección SW la más frecuente con 31,0% de porcentaje medio, seguida de los vientos del W con un 25,2%. Durante los meses de junio y julio se detecta un fenómeno curioso, ya que la dirección dominante durante las precipitaciones máximas en estos meses corresponde a la SE, dirección en la que se encuentran las mayores alturas que delimitan el valle. Es, por tanto, lógico pensar que un porcentaje importante de las precipita-

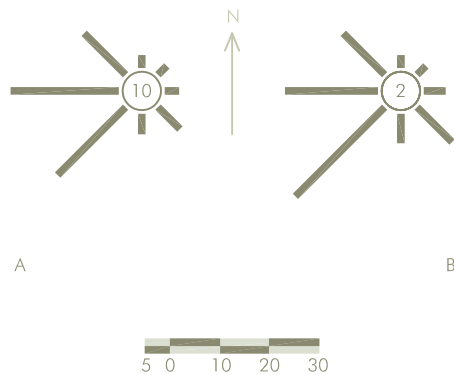


Gráfico 8. Rosas de las frecuencias anuales de los vientos durante las precipitaciones (A) y durante el día de máxima precipitación (B)

¹⁵ Font Tullot, I. (1983): *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid. Instituto Nacional De Meteorología (1983): *Atlas Climático de España*. Madrid.

ciones que recibe la localidad posee origen orográfico, o al menos la mayor cantidad recibida respecto a otros puntos más o menos cercanos de la zona, es favorecido por este factor. Esta última afirmación tiene más sentido si consideramos que al analizar la importancia relativa de las precipitaciones torrenciales se ha concluido que éstas no constituyen una característica predominante del régimen pluviométrico.

Evolución del clima en la localidad

Aunque, como ya se ha comentado, la serie de datos analizada es corta respecto al régimen termométrico y muy corta respecto a las precipitaciones, es interesante conocer la evolución que han seguido ciertos parámetros a lo largo del período con el fin de evaluar la existencia de posibles tendencias que nos permitirían hacer ciertas predicciones.

Es necesario, sin embargo, tener en cuenta que la validez de estas prediccio-

nes está seriamente comprometida por el pequeño tamaño de la serie que impide evaluar las oscilaciones periódicas que se dan habitualmente.

Para la estimación de la tendencia, a lo largo del período estudiado, de ciertos parámetros relativos a la temperatura y al régimen de precipitaciones se han ajustado los datos medios anuales a una recta de regresión, o de tendencia en este caso, obteniendo la ecuación de dicha recta por el método de mínimos cuadrados¹⁶.

Los tres parámetros siguen una tendencia ascendente durante el período a un ritmo de 0,08°C por año para \bar{T} , 0,1°C para \bar{T}_M y 0,05°C para \bar{T}_m .

Las ecuaciones obtenidas para cada caso son las siguientes:

$$T: y = 9.3 + 0.1 x$$

$$TM: y = 14.7 + 0.2 x$$

$$Tm: y = 3.9 + 0.1 x$$

Ecuaciones de la recta de tendencia para los distintos parámetros en función del tiempo, siendo y el parámetro a considerar y x el tiempo en número de años observados, como variable independiente.

Otro parámetro relacionado con la temperatura es el número medio anual de días de helada (\bar{D}_H) y la tendencia estimada para el mismo es descendente en concordancia con las tendencias observadas para la temperatura. La ecuación que define esta tendencia es $\bar{D}_H: y = 103,5 - 1,42 x$.

También se han considerado, parámetros relacionados asimismo con la humedad, el número medio anual de días de rocío (\bar{D}_r) y de niebla (\bar{D}_n) estimándose una tendencia ascendente para el primer parámetro ($\bar{D}_r: y = 52,64 + 3,85 x$) y descendente para el segundo ($\bar{D}_n: y = 45,18 - 1,19 x$).

En cuanto a la temperatura, como ya se ha comentado, se ha observado una tendencia clara de elevación de los tres parámetros estimados: temperatura media anual (T), media anual de las temperaturas máximas (TM) y media anual de las temperaturas mínimas (Tm).

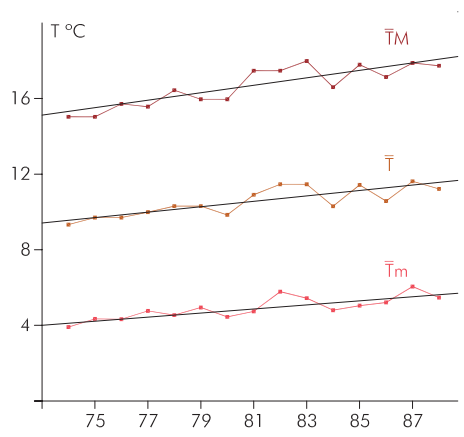


Gráfico 9. Rectas de tendencia de la temperatura media anual (T), media anual de las temperaturas máximas (\bar{T}_M) y media anual de las temperaturas mínimas (\bar{T}_m).

¹⁶ Spiegel, M. R. (1970): *Estadística*. McGraw-Hill, Ediciones de la Colina. Madrid.



Figura 7. Eustasio Villanueva: galería baja del claustro. A la izquierda el cura Adolfo Villanueva, hermano del fotógrafo. Archivo Villanueva. IPCE.

Otros parámetros relacionados con las precipitaciones como son el número medio anual de días de lluvia (\overline{DR}), de nieve (\overline{DN}) y de tormenta (\overline{DT}) también muestran tendencias descendentes, mientras que el número medio anual de días de granizo (\overline{DG}) parece tener una tendencia ligeramente ascendente. Las ecuaciones obtenidas en cada caso son las siguientes:

$$DR: y = 110.6 - 0.11 x$$

$$DN: y = 35.9 - 0.48 x$$

$$DT: y = 24.4 - 0.47 x$$

$$DG: y = 77 + 0.07 x$$

En cuanto a las precipitaciones, al necesitar una serie de datos más larga para poder observar su evolución, la tendencia estimada para la precipitación media anual (\overline{R}) no es muy clara debido a las amplias oscilaciones, a pesar de las cuales la media se estabiliza muy pronto en la serie (Gráfico 1). La ecuación obtenida para la recta de tendencia de este parámetro es $y = 725,2 - 2,45 x$, lo que significa una tendencia ligeramente descendente con un ritmo de 3,1 mm por año.

Conclusiones

En resumen, se puede decir que el clima local, condicionado sensiblemente por el relieve de la zona, tiene como factores más determinantes:

- Un régimen de precipitaciones irregular pero con valores importantes en el período invernal y la primavera.
- Un régimen termométrico extremado con oscilaciones considerables. Las máximas se alcanzan bruscamente en un período corto entre los meses de julio y agosto, mientras que las mínimas, menos extremadas respecto a la media, se registran durante un período más dilatado que abarca los meses de diciembre, enero y febrero.
- La evolución de algunos elementos del clima, durante la serie observada, muestra una tendencia a la elevación de los parámetros termométricos y una dudosa disminución de las precipitaciones. Sin embargo tal tendencia, dado el tamaño de la serie, puede incluirse en ciclos de variación de tamaño más amplio y cambiar paulatinamente.

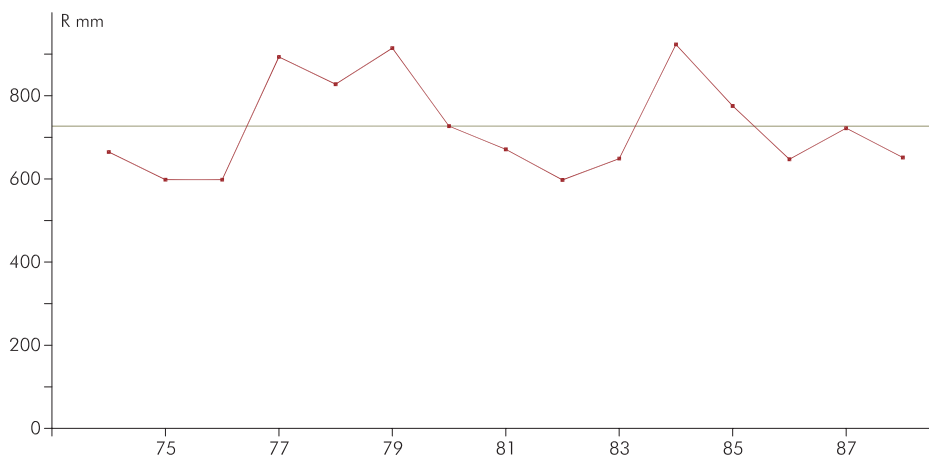


Gráfico 10. Recta de tendencia de la precipitación media anual (\overline{R}).



Características microclimáticas del claustro

Como ya se ha apuntado, el objetivo fundamental de este estudio es aportar datos que puedan ayudar a explicar la degradación que sufre el claustro del Monasterio en general y los capiteles y los relieves románicos de la planta inferior, como elementos más valiosos, en particular. Para ello, se pretende determinar la existencia o no de factores climáticos que, de forma directa o indirecta causen o favorezcan el deterioro observado actualmente en estos capiteles.

De forma general, las características microclimáticas que soportan el claustro y los capiteles tienen como factores determinantes por un lado, el régimen climático local, del que ya se ha intentado dar una visión amplia en el epígrafe anterior, y por otro los aspectos relacionados con el claustro en sí, tales como las características espaciales (orientación, forma y dimensiones) de sus elementos y la naturaleza de éstos.

Descripción física del claustro

El claustro románico del Monasterio de Santo Domingo de Silos tiene, en planta, forma de rectángulo irregular, (ver A4) con unas dimensiones aproximadas de 23, 26, 22 y 26,50 m de perímetro interior en las galerías este, norte, oeste y sur, respectivamente (en adelante E, N, O y S).

El rectángulo está orientado de manera que las galerías se encuentran, con ligeras desviaciones que afectan en mayor medida a la galería N, de forma perpendicular a los ejes de los cuatro puntos cardinales. Así la galería N está orientada al Sur, la S al Norte, la E al Oeste y la O al Este.

En alzado, el claustro está formado por dos plantas con las galerías abiertas al exterior por arquerías. Los arcos de medio punto tienen unas dimensiones un tanto irregulares, con 112 a 114 cm de luz y una altura, desde el zócalo que rodea al claustro y sobre el que se apoyan los

fustes, hasta la clave del arco, de 2 m. La altura del claustro hasta el alar de la cubierta es de 8 m aproximadamente.

Alrededor del mismo se encuentran las demás dependencias del monasterio, con alturas muy superiores adosadas a la galería N, donde se sitúa la iglesia, y parcialmente a la E, sobre la que se eleva la torre de la capilla. Sobre las otras galerías también se levanta la cubierta de las demás dependencias, de forma que desde el extremo superior de la fachada de las galerías del claustro hasta una altura libre de obstáculos hay al menos 5 m. Esto hace que el claustro se encuentre muy protegido respecto al exterior, siendo la galería S y parte de la E los puntos más accesibles para vientos y precipitaciones (ver A3).

Los capiteles son dobles, excepto en las columnas centrales de cada galería que son quintuples en las galerías E, N y S y sencillos pero de mayores dimensiones

en la O. La planta superior tiene pilastras en el centro de las galerías.

La piedra que compone los distintos elementos del claustro es de tipo carbonatado, porosa, de textura de grano fino y superficie irregular, de color pardo claro con tonalidades irregularmente distribuidas. La piedra de los capiteles, según las investigaciones realizadas por el grupo de especialistas de la Universidad de Oviedo¹⁷, es de naturaleza dolomítica.

El patio del claustro tiene una fuente o surtidor en el centro y el famoso ciprés (*Cupressus sempervirens*) centenario en el cuadrante suroeste. El ciprés en

¹⁷ Universidad de Oviedo. Área De Petrología Y Geoquímica. Departamento De Geología (1989): *Caracterización Petrofísica y Alterológica. Primer Avance. Proyecto de Conservación del Claustro de Santo Domingo de Silos*. Oviedo.



Figura 11. Eustasio Villanueva: una galería del claustro de Santo Domingo de Silos. Archivo Villanueva. IPCE.

los días soleados proyecta su sombra, no muy extensa, sobre las galerías O, N y E consecutivamente a lo largo del día. El suelo del patio es de tierra arcillosa, superpuesta sobre el sustrato original, en la que se ha dispuesto un jardín de escasa cobertura compuesto principalmente por cupresáceas rastreras y rosales, todo ello de pequeño porte.

El ciprés, que se eleva unos metros sobre el claustro, sirve de pajarera frecuentada principalmente por gorrión común (*Passer domesticus*) y estornino negro (*Sturnus unicolor*) en gran número. En el claustro también son habituales las palomas. Gorriones y palomas tienen cierta importancia para la conservación de los capiteles debido a las deyecciones que depositan en los ábacos que les sirven frecuentemente de posadero.

Método de trabajo

36

Teniendo en cuenta que la alteración de los materiales pétreos es un fenómeno complejo de naturaleza física, química y biológica, y que la interacción de los elementos microclimáticos va a influir principalmente en los mecanismos térmicos, hídricos y de erosión superficial implicados en la degradación de los capitales, el estudio se va a centrar en la distribución y oscilaciones de la temperatura y la humedad, así como en los distintos elementos que, de forma general, son capaces de causar la meteorización de los materiales.

En primer lugar se analizará la dinámica general del entorno para intentar determinar los puntos del claustro expuestos teóricamente, en función de la orientación, a la acción de los distintos meteoros. Después, se realizará un estudio comparativo de las cuatro galerías para analizar las diferencias existentes entre las distintas orientaciones. Por último, se analizarán los datos obtenidos de las mediciones puntuales sobre los mismos capiteles.

Los datos del claustro utilizados para el estudio son limitados en cuanto a su alcance y exactitud puesto que se basan en los registros continuos, desde abril de 1988, de la temperatura y humedad relativa del aire por medio de aparatos termohigrógrafos, con termómetro bimetálico e higrómetro de haces de cabello, situados aproximadamente en el punto medio de cada una de las cuatro galerías del claustro. La exactitud de los registros se estima en $\pm 1\%$ del rango de medición para la temperatura y $\pm 2-3\%$ para la humedad relativa. Los aparatos han sido comprobados periódicamente mediante un psicrómetro electrónico preciso. Las mediciones puntuales de la temperatura superficial de la piedra han sido realizadas mediante un termómetro con una sonda termopar de precisión $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Dinámica climática del claustro

Para determinar las características microclimáticas del claustro hay que tomar como referencia los datos del período observado (abril 1988-marzo 1989) cuya representatividad respecto a los datos que podemos considerar como normales (1973-1988), expuestos en el apartado anterior, se analizará más adelante.

Los datos de referencia son, por lo tanto, los resumidos en la Tabla 4 para las frecuencias de los vientos y en la Tabla 5 para los datos de temperatura y precipitaciones.

Previsiones teóricas para el claustro

A priori se pueden establecer ciertas previsiones teóricas teniendo en cuenta la naturaleza de los fenómenos termohigrométricos y la orientación de cada una de las galerías.

En primer lugar, la temperatura del aire dependerá de la insolación, del comportamiento térmico de los materiales

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	VDR	VRM
Abr	1	-	1	2	1	-	4	1	4	-	4	-	10	-	2	-	W	S, SW
May	1	-	-	-	-	-	2	3	-	1	5	1	4	1	2	-	SW	WNW
Jun	-	1	1	-	1	-	3	-	2	-	2	-	4	1	-	-	W	NNE
Jul	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	4	-	-	-	1	-	SE	E
Ago	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	2	-	-	-	W	S, W
Sep	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	NW	NW
Oct	-	-	-	-	-	1	4	1	-	-	1	-	3	1	-	-	SE	SSE
Nov	-	-	1	-	-	1	2	-	-	-	1	-	-	-	-	-	SE	SE
Dic	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	N	SW
Ene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	SW	SW
Feb	-	-	-	-	2	-	2	-	1	-	-	-	7	1	-	-	W	W
Mar	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	4	-	1	-	1	-	SW	SW
Año	5	1	4	2	5	2	17	6	9	1	26	1	31	4	9	-	W	SW

	\bar{T}	\bar{TM}	\bar{Tm}	TM	Tm	R	RD	DR	DN	DG	DT	Dn	DH	Dr
Abr	19,0	26,9	11,0	34,0	4,5	44	22	7	0	0	1	2	0	13
May	20,3	28,7	12,0	35,5	5,3	2	2	2	0	0	1	2	0	9
Jun	17,1	24,8	9,5	36,5	4,1	10	9	5	0	0	0	1	0	10
Jul	13,0	19,2	6,9	26,0	0,6	46	11	11	0	0	2	0	0	10
Ago	8,2	14,2	2,1	19,6	-10,7	26	12	5	0	0	0	2	11	9
Sep	4,2	10,3	-1,9	15,6	-6,6	7	5	5	0	0	0	5	20	4
Oct	4,2	11,1	-2,7	16,8	-7,0	13	12	1	2	0	0	3	29	1
Nov	5,5	11,9	-0,9	19,0	-6,7	60	14	8	3	1	0	0	18	5
Dic	8,9	15,8	2,1	23,4	-5,1	13	6	7	0	0	1	0	8	9
Ene	8,7	13,6	3,7	20,5	-2,8	164	25	20	0	5	5	1	4	11
Feb	12,5	18,0	7,0	23,4	2,9	46	8	20	0	1	3	3	0	22
Mar	15,0	20,8	9,1	29,1	2,7	94	39	13	0	1	7	2	0	13
Año	11,4	17,9	4,8	36,5	-10,7	525	39	104	5	8	20	21	90	116

\bar{T} : Temperatura media
 \bar{TM} : Temperatura media de las máximas
 \bar{Tm} : Temperatura media de las mínimas
TM: Temperatura máxima absoluta
Tm: Temperatura mínima absoluta
R: Precipitación mensual (en mm)
RD: Precipitación máxima en 24 h en el mes o año

DR: Número medio de días de lluvia
DN: Número medio de días de nieve
DG: Número medio de días de granizo
DT: Número medio de días de tormenta
Dn: Número medio de días de niebla
DH: Número medio de días de helada
Dr: Número de días de rocío

Tabla 4. Frecuencias mensuales y anuales de la dirección del viento durante los días de precipitación, indicando la dirección dominante (VDR) y la dirección dominante en el día de máxima precipitación (VRM) en el mes y año. Período abril 1988 - marzo 1989.

Tabla 5. Temperatura y precipitaciones. Período abril 1988 - marzo 1989.

pétreos del claustro y del intercambio de masas de aire con el exterior.

En segundo lugar, el material pétreo del claustro tiene un comportamiento térmico que depende principalmente de su conductividad térmica y capacidad calorífica, y absorbe o desprende calor según su masa, capacidad calorífica y la diferencia de temperatura respecto a su medioambiente. Este comportamiento es, sin embargo, modificado por el contenido en agua del material. Las propiedades térmicas de la piedra pueden provocar un desfase entre los valores extremos de la temperatura en el exterior y en el interior del claustro, tanto en el tiempo como en la magnitud, cuando la energía térmica acumulada es suficiente.

Además, la orientación condicionará los niveles de temperatura puesto que la galería N (orientada al Sur, solana) recibirá una mayor insolación, lo que provocará un mayor calentamiento a lo largo del ciclo anual, mientras que la galería S (orientada al Norte, umbría) recibirá únicamente radiación difusa y nunca directa, proveniente del sol. Las galerías E y O no se comportarán simétricamente puesto

que la orientada al este (galería O) recibe el primer sol de la mañana experimentando los cambios más bruscos después de los mínimos nocturnos, mientras que la galería E recibe más radiación global y cambios menos bruscos puesto que empieza a recibir radiación indirecta desde primeras horas del día.

La orientación también influirá, teóricamente, en las galerías expuestas a los vientos dominantes, aunque dadas las características del claustro, con una altura de dos plantas y protegido especialmente en el Norte y el Este por la iglesia y sus dependencias, es de esperar que este factor esté limitado en mayor o menor medida. Por otro lado, los datos que disponemos se refieren solamente a la dirección durante las precipitaciones sin conocer la velocidad. Esto permite prever únicamente que, en función de los datos de la Tabla 4, las galerías más expuestas a las precipitaciones serán la galería E durante el invierno y la primavera (período de máxima precipitación) y, con menor frecuencia, las orientaciones SW y SE (galería N y parte de la E y O en cada caso) durante la primavera y el otoño. Los ma-

38

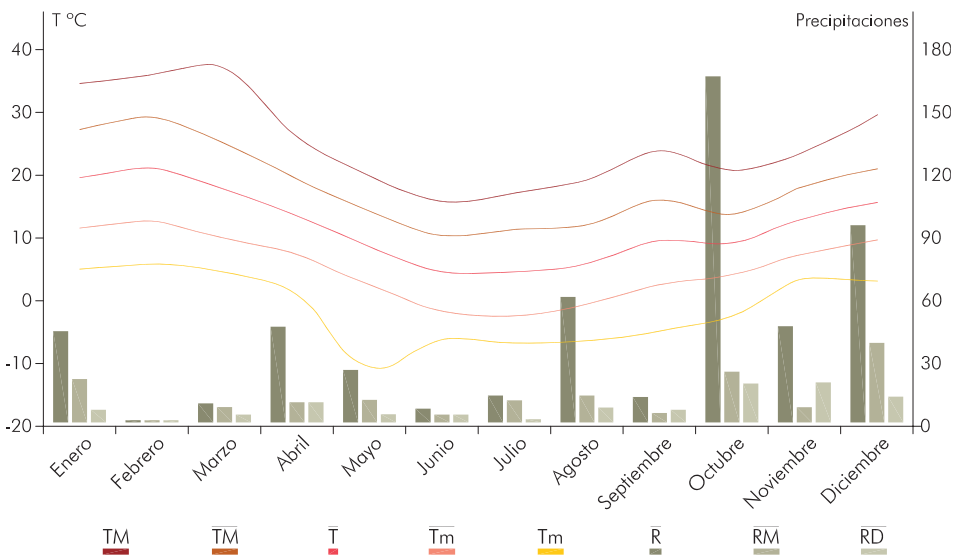


Gráfico 11. Temperatura y precipitaciones. Período abril 1988 - marzo 1989.

yores aguaceros parece que llegan con los vientos del SW predominantemente.

Una última previsión posible es la que se refiere a la humedad relativa. Este parámetro depende fundamentalmente de la cantidad de vapor de agua en el aire (humedad absoluta) y de la temperatura. Si se considera constante la humedad absoluta, las condiciones térmicas determinarían que la galería S mantuviera una humedad relativa más elevada y constante mientras que la galería N tendría datos medios más bajos con oscilaciones más bruscas. Sin embargo, la humedad absoluta aumenta con las precipitaciones y con la evaporación del agua del suelo y los materiales por efecto del aumento de la temperatura y la acción del viento. Por otro lado, el comportamiento hídrico de los materiales pétreos del claustro depende de las propiedades físicas de la piedra y de la cantidad de agua que puede acceder a su interior a partir del suelo u otras fuentes más difusas, las precipitaciones que inciden directamente sobre las superficies externas y la condensación que se produce cuando la temperatura de la piedra desciende por debajo del punto de rocío. Por lo tanto, la humedad relativa servirá de referencia, un tanto aproximada, del intercambio de vapor de agua entre el aire y la piedra, es decir, del balance entre los fenómenos de condensación y evaporación.

Datos experimentales

Los datos referentes al claustro tienen como base los registros continuos de temperatura y humedad relativa en las cuatro galerías desde abril de 1988, de los cuales se han extraído la temperatura y la humedad relativa cada dos horas a partir de las 0 horas, así como las mediciones máximas y mínimas de cada período diario. La precisión de los datos extraídos es de $\pm 1^\circ\text{C}$ para la temperatura y $\pm 1\%$ para la humedad relativa.

A partir de estos datos y de los parámetros de ellos obtenidos, se han elaborado los Gráficos 12, 13, 14 y 15, que resumen las características microclimáticas generales más importantes del claustro.

Temperatura

En la Tabla 6 se puede apreciar que la temperatura media mensual y anual en cada una de las galerías, difiere muy poco entre sí y en relación con el exterior. Las pruebas de significación realizadas para analizar las diferencias entre las varianzas y las medias anuales corroboran esta hipótesis.

Según estos datos, que confirman las previsiones teóricas, la temperatura media anual es más elevada en la galería N y más baja en la S, mientras que la de las galerías E y O son similares a la del exterior y situadas, aproximadamente, en un punto medio del intervalo entre las dos primeras.

En el Gráfico 13 se observa cómo a partir de julio las galerías N y E tienen una temperatura superior al exterior, debido al efecto de la insolación y la acumulación de calor por el material pétreo del claustro. En el período estudiado, con un invierno seco y relativamente cálido, la galería N ha seguido manteniendo la temperatura media superior al exterior a partir de diciembre, aunque en condiciones que se presumen más normales, se estima que el punto de inflexión donde se cruzan ambas curvas ocurre entre los meses de febrero y marzo, fecha a partir de la cual los materiales de la galería N empiezan a acumular de nuevo calor. En la galería E el cruce de las curvas se produce antes, entre diciembre y enero, puesto que la cantidad de calor acumulado es inferior. La galería S tiene un comportamiento similar a las anteriores pero manteniendo la temperatura siempre inferior al exterior. La temperatura de la galería O es la que descubre una curva más irregular, siendo igual o inferior a la del

exterior a lo largo de todo el ciclo anual, excepto en el mes de agosto en el que es ligeramente superior. Estas tendencias se pueden comprobar perfectamente en el Gráfico 12 en el que se refleja la diferencia de la temperatura media mensual de cada galería con relación al exterior.

El desfase de los valores extremos de la temperatura media mensual entre las galerías y el exterior no es apreciable en el ciclo anual, situándose los máximos en el mes de agosto y los mínimos entre los meses de diciembre y enero.

Teniendo en cuenta lo anterior, al utilizar los datos promedio entre los cuales no se han encontrado diferencias significativas, se puede pensar que el claustro

forma un sistema muy abierto al exterior. Sin embargo, al analizar las oscilaciones de temperatura entre los máximos y mínimos absolutos mensuales se observa (Tabla 7) que el claustro en general se comporta de manera más estable, térmicamente, que el exterior con oscilaciones absolutas a lo largo del año de 32 a 36 grados, según la galería, mientras que el exterior presenta oscilaciones de 47 grados. Si se compara la media anual de las oscilaciones mensuales también existe una diferencia apreciable entre el exterior (13,3°C), y el claustro (6,5, 5,8, 5,8 y 5,7 en las galerías N, S, E y O respectivamente), siempre con datos referidos al período estudiado.

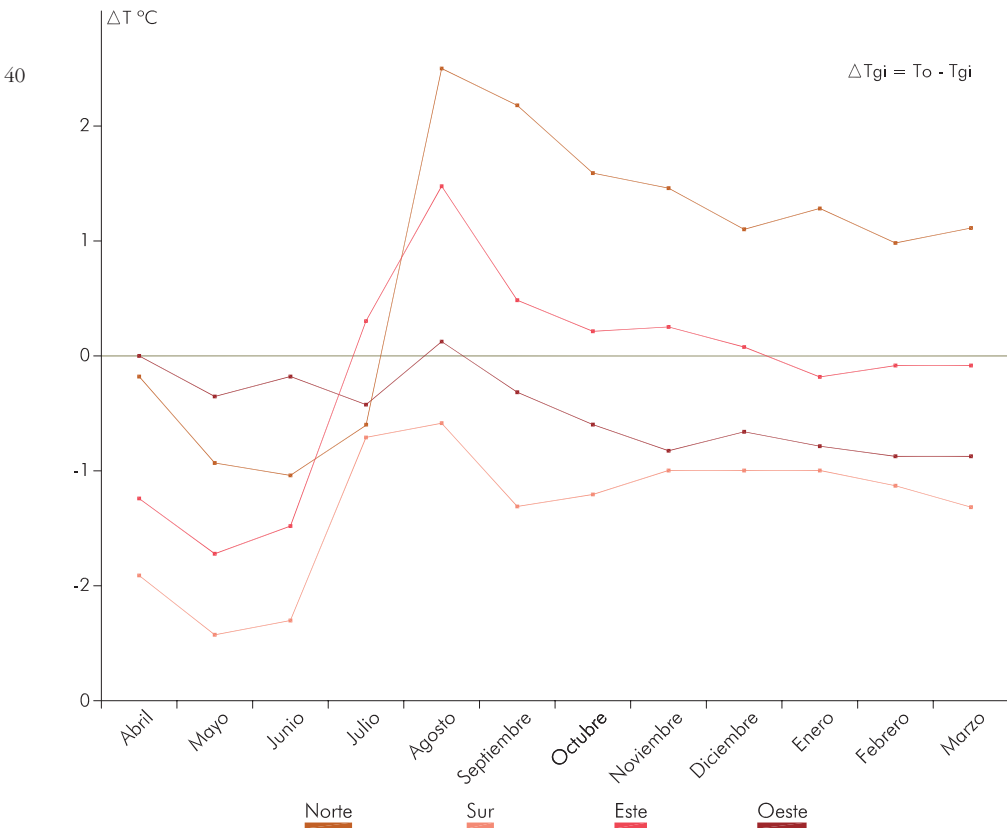


Gráfico 12. Variación de la diferencia de la temperatura media mensual (ΔT) entre cada una de las galerías (T_{gi}) y el exterior (T_o) según la expresión $\Delta T_{gi} = T_o - T_{gi}$ expresada en $^{\circ}C$ y tomando los valores reflejados en la Tabla 6.

	Exterior	Galería Norte	Galería Sur	Galería Este	Galería Oeste
Abril	8,7	8,5	6,8	7,5	8,7
Mayo	12,5	11,6	10,1	10,8	12,2
Junio	15,0	14,0	12,7	13,5	14,8
Julio	19,0	18,4	18,3	18,7	18,6
Agosto	20,3	22,8	19,7	21,8	20,4
Septiembre	17,1	19,3	15,8	17,6	16,8
Octubre	13,0	14,6	11,8	13,2	12,4
Noviembre	8,2	9,7	7,2	8,4	7,4
Diciembre	4,2	5,3	3,2	4,3	3,5
Enero	4,2	5,5	3,2	4,0	3,4
Febrero	5,5	6,5	4,4	5,4	4,6
Marzo	8,9	10,0	7,6	8,8	8,0
Año	11,4	12,2	10,1	11,2	10,9

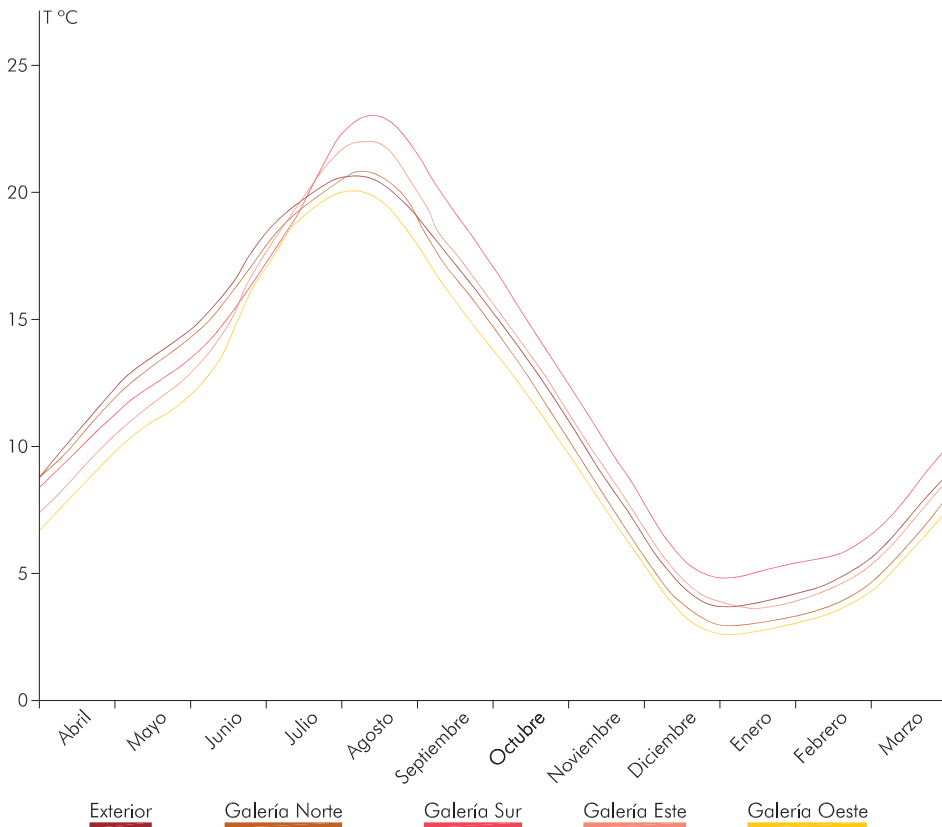


Tabla 6. Temperatura media mensual y anual. Período abril 1988 – marzo 1989.

Gráfico 13. Temperatura media mensual y anual en el exterior y en las cuatro galerías del claustro en el período abril de 1988 a marzo de 1989.

	Exterior	Galería Norte	Galería Sur	Galería Este	Galería Oeste
Abril	23,3	16	13	14	15
Mayo	20,5	11	11	13	13
Junio	26,4	14	15	15	15
Julio	29,5	20	20	20	18
Agosto	30,2	20	18	17	17
Septiembre	32,4	20	19	19	16
Octubre	25,4	17	16	15	17
Noviembre	30,3	21	19	19	18
Diciembre	22,2	13	12	10	11
Enero	23,8	13	13	10	12
Febrero	25,7	15	13	13	12
Marzo	28,5	20	17	17	17
Año	47,2	36	35	34	32

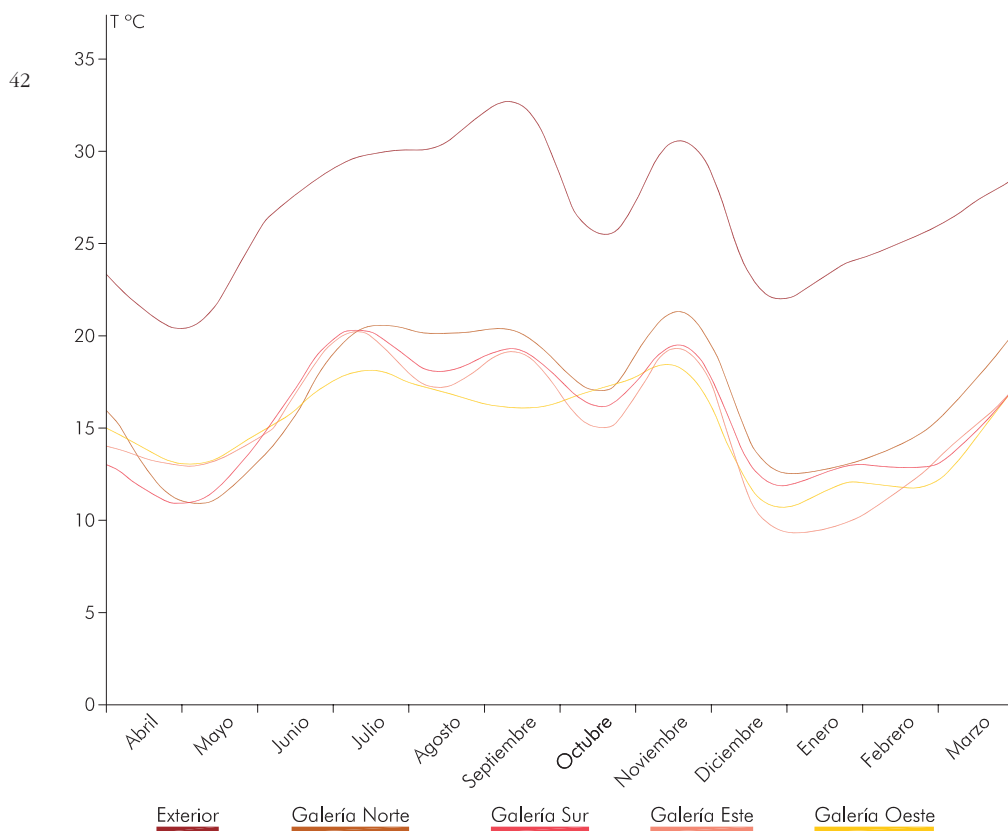


Tabla 7. Oscilaciones mensuales y media anual de temperatura. Período abril 1988 – marzo 1989.

Gráfico 14. Oscilaciones mensuales y media anual de la temperatura expresadas como la diferencia entre los valores máximos y mínimos absolutos mensuales y anual.

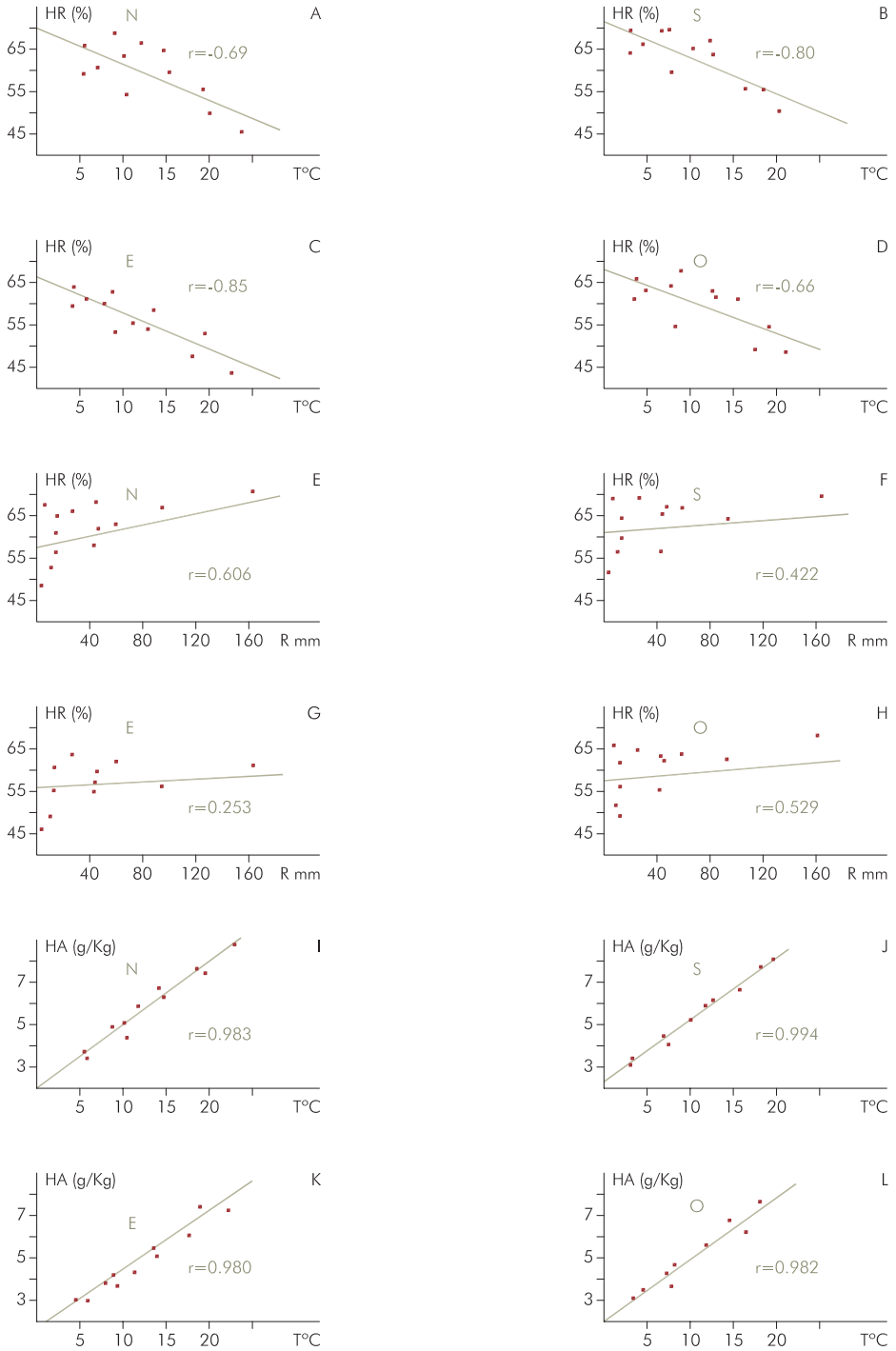


Gráfico 15 (A, B, C y D). Coeficiente de correlación (r) y recta de regresión de la humedad relativa sobre la temperatura en las galerías N, S, E y O, utilizando los datos medios mensuales de las Tablas 6 y 8.

Gráfico 16. (E, F, G y H). Coeficiente de correlación (r) y recta de regresión de la humedad relativa sobre la precipitación en las galerías N, S, E y O, utilizando los datos medios mensuales de la Tabla 8.

Humedad relativa

Para determinar las características de humedad en el claustro y la forma en que este elemento microclimático puede afectar a los materiales del mismo, se han analizado las diferencias entre las distintas galerías y la dependencia de este factor respecto a otros parámetros.

Es necesario tener en cuenta que los datos disponibles para evaluar la humedad son únicamente los registros de humedad relativa en el claustro, lo cual representa unas limitaciones para su comparación con el exterior, y para determinar el parámetro que mejor refleje la influencia que ejerce sobre los materiales del claustro.

- **Correlación de la humedad relativa con la temperatura.** La humedad relativa guarda una relación inversa, bien conocida, con la temperatura, de forma que cuanto menor sea la correlación entre estos dos parámetros, más importancia tendrán otros factores en la variación de la humedad.

Según los resultados resumidos en la Gráfico 15, las variaciones de humedad relativa están estrechamente relacionadas con la temperatura en la galerías E y S, mientras que en las galerías O y N existen otros factores que también influyen.

- **Correlación de la humedad relativa con la precipitación.** La humedad relativa también depende de la cantidad de vapor de agua que exista en el aire, y para el claustro se puede considerar que la principal fuente de vapor de agua es la evaporación de las precipitaciones, bien directamente o bien a partir de la humedad absorbida por el suelo y la piedra.

Según el coeficiente de correlación calculado para las distintas galerías (Gráfico 16) con los datos reflejados en la Tabla 8 y el Gráfico 18, la galería en la que la variación de la humedad relativa depende en mayor grado de las precipitaciones es la N, aunque con un coeficiente r sólo “aceptable”, mientras que la influencia de las precipitaciones se puede considerar como “moderada” en las galerías S y O, y muy baja en la E¹⁸.

- **Correlación de la humedad absoluta con la temperatura.** Además de las relaciones anteriormente analizadas, la humedad puede variar debido al incremento de vapor de agua procedente de la evaporación del suelo y los materiales, por efecto de la temperatura principalmente. Para analizar esta relación no es adecuado el parámetro de la humedad relativa, por lo que se ha procedido a relacionar los valores aproximados de humedad absoluta, estimados a partir de una carta psicrométrica, con los datos medios mensuales de temperatura. La humedad absoluta se expresa en g/kg, en lugar de la expresión habitual de g/m³, para evitar la acumulación de errores en estos datos aproximados.

Los coeficientes r obtenidos (Gráfico 17) indican una correlación esperada muy alta, siendo la galería E la que indica tener una relación ligeramente inferior, por lo que se interpreta como que la evaporación provocada por el aumento de la temperatura tiene menor influencia en la variación de la humedad relativa de esta galería.

¹⁸ Martínez Molina, I. (1986): Estadística. Aplicada a la Hidrometeorología. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

	Exterior	Galería Norte	Galería Sur	Galería Este	Galería Oeste
Abril	164,4/25	69,2	69,1	60,0	66,7
Mayo	45,7/20	67,2	65,4	56,4	62,5
Junio	94,2/14	65,6	63,8	55,5	61,4
Julio	43,7/7	57,5	57,2	54,8	55,1
Agosto	2,5/2	48,5	52,5	46,1	50,2
Septiembre	10,0/5	52,4	57,0	49,1	51,5
Octubre	45,7/11	61,3	66,5	59,0	61,4
Noviembre	25,8/5	64,7	69,2	62,8	64,3
Diciembre	6,7/5	66,5	69,1	64,1	65,2
Enero	12,7/3	60,3	64,6	59,8	61,0
Febrero	60,1/12	61,8	66,5	61,1	63,2
Marzo	12,9/7	55,7	59,8	54,5	55,2
Año	524,4/116	60,9	63,4	56,9	59,8

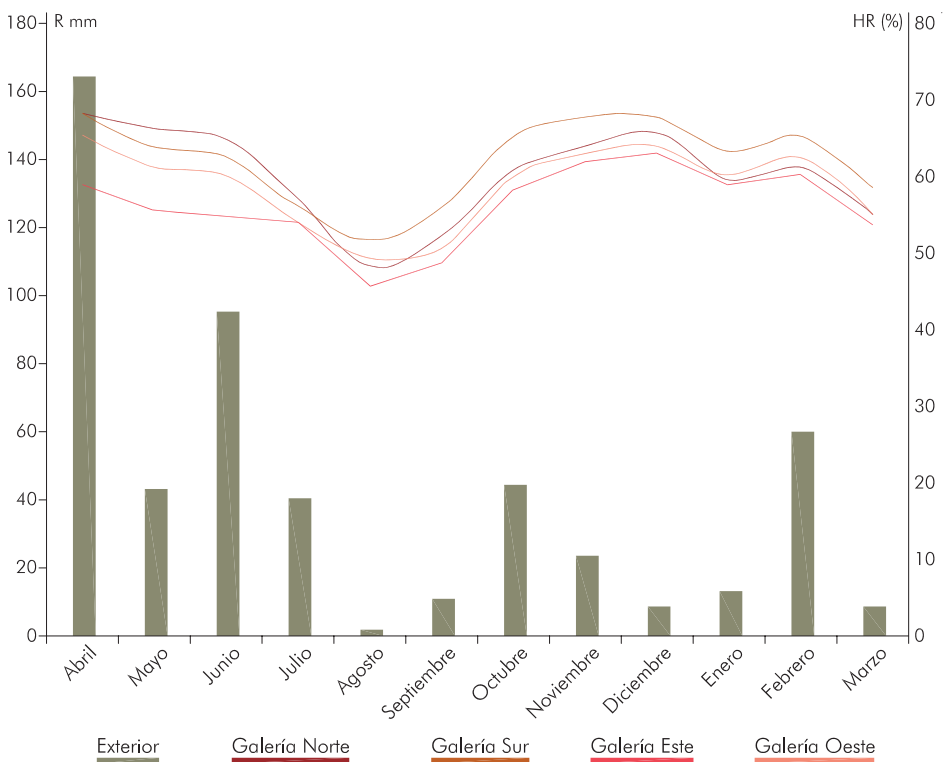


Tabla 6. Precipitaciones y humedad relativa (%) media mensual y anual. Período abril 1988 - marzo 1989.

Gráfico 18 Precipitaciones (en mm), número de días de precipitaciones y humedad relativa (en %).

• **Oscilación anual de la humedad relativa.** Teniendo en cuenta las oscilaciones a lo largo del ciclo estudiado, donde $HRM - HRm$ es la oscilación entre los valores extremos absolutos y $\overline{HRM} - \overline{HRm}$ es la oscilación media de los valores medios mensuales, y las cantidades están expresadas en %HR, se puede observar que la galería E es la más estable mientras que la galería N es la que registra una oscilación más amplia a lo largo del ciclo. Por otro lado, la galería O es la que presenta una media de las oscilaciones mensuales más elevada.

En resumen, se puede destacar que la galería más húmeda es la S, debido a la temperatura, y que las galerías N y O son las más afectadas por las precipitaciones

aunque en la N se produce una intensa evaporación provocada por la insolación. La galería más seca es la E, aunque los valores más bajos de humedad relativa no se expliquen totalmente en los análisis realizados, por lo que se sospecha que el efecto de la ventilación tenga gran importancia en esta galería. En general, la que presenta un comportamiento más complejo es la galería O, con las oscilaciones más amplias de los valores medios.

Este comportamiento se refleja perfectamente en el Gráfico 15 wen el que se aprecia que la curva de la galería S está siempre por encima de las demás, excepto en el período de máximas precipitaciones (abril-junio), durante el cual los valores de la galería N son superiores. La galería E siempre registra los valores más bajos durante el ciclo anual, y la galería O es la que muestra unos valores más oscilantes respecto a las otras galerías.

	Galería N	Galería S	Galería E	Galería O
$HRM - HRm$	69	63	56	59
$\overline{HRM} - \overline{HRm}$	22	21	20	23

Datos mensuales - Galería Norte														
	\bar{T}	\bar{TM}	\bar{T}_m	TM	T_m	$\frac{\bar{TM}}{\bar{T}_m}$	$\frac{TM}{T_m}$	\bar{HR}	\bar{HRM}	\bar{HR}_m	HRM	HR_m	$\frac{\bar{HRM}}{\bar{HR}_m}$	$\frac{HRM}{HR_m}$
Abr	8,5	11,2	5,8	18,0	2,0	5,4	16	69,2	80,4	57,9	91	32	22,5	59
May	11,6	14,2	9,0	17,0	6,0	5,2	11	67,2	79,0	55,3	86	46	23,7	40
Jun	14,0	16,7	11,3	22,0	8,0	5,4	14	65,6	77,4	53,9	85	39	23,5	46
Jul	18,4	22,4	14,4	29,0	9,0	8,0	20	57,4	71,2	43,7	87	28	27,5	59
Ago	22,8	27,4	18,2	32,0	12,0	9,2	20	48,5	60,7	36,3	80	27	24,4	53
Sep	19,3	23,1	15,5	31,0	11,0	7,6	20	52,4	63,4	41,3	80	28	22,1	52
Oct	14,6	17,7	11,6	23,0	6,0	6,1	17	61,3	71,9	50,6	87	32	21,3	55
Nov	9,7	12,5	7,0	17,0	-4,0	5,5	21	64,7	72,9	56,5	89	27	16,4	62
Dic	5,2	8,2	2,3	11,0	-2,0	5,9	13	66,5	75,1	58,0	91	36	17,1	55
Ene	5,5	8,7	2,2	12,0	-1,0	6,5	13	60,2	69,4	51,1	94	25	18,3	69
Feb	6,5	9,6	3,4	14,0	-1,0	6,2	15	61,8	72,6	50,8	90	27	21,8	63
Mar	10,0	13,6	6,4	20,0	0,0	7,2	20	55,7	66,7	44,8	86	25	21,9	61
Período	12	15,4	8,9	32,0	-4,0	6,5	36	60,9	71	50	94	25	21	69

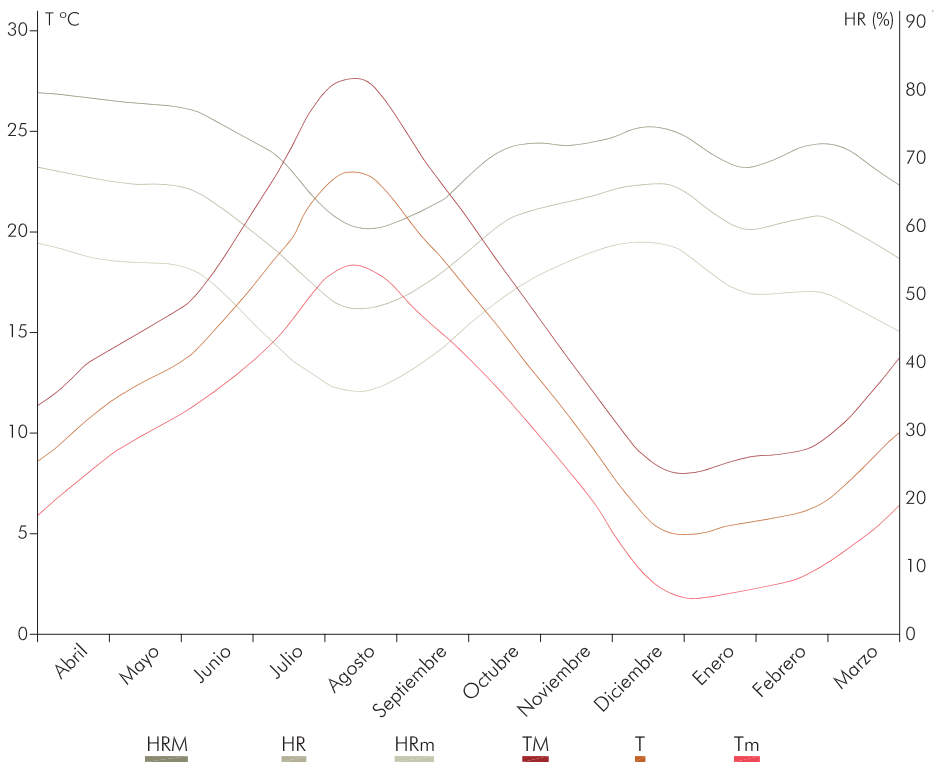


Tabla 7. Temperatura y humedad relativa. Galería Norte.

Gráfico 19. Gráfico de la tabla 7.

Datos mensuales - Galería Sur														
	T	TM	Tm	TM	Tm	$\overline{TM-Tm}$	TM-Tm	\overline{HR}	\overline{HRM}	\overline{HRm}	HRM	HRm	$\overline{HRM-HRm}$	HRM-HRm
Abr	6,8	9,0	4,5	14,0	1,0	4,5	13	69,1	79,1	59,9	89	36	19,2	53
May	10,1	12,6	7,7	15,0	4,0	4,9	11	65,4	76,5	54,3	84	44	22,2	40
Jun	12,7	15,4	10,0	21,0	6,0	5,4	15	63,8	75,3	52,4	84	39	22,9	45
Jul	18,3	22,2	14,3	30,0	10,0	7,9	20	57,2	70,3	44,2	83	30	26,1	53
Ago	19,7	23,4	16,0	29,0	11,0	7,4	18	52,5	64,7	40,3	79	24	24,4	55
Sep	15,8	19,0	12,7	27,0	8,0	6,3	19	57,0	67,7	46,3	83	30	21,4	53
Oct	11,8	14,4	9,2	19,0	3,0	5,2	16	66,5	76,4	56,5	90	37	19,9	53
Nov	7,2	9,5	4,9	14,0	-5,0	4,6	19	69,2	77,2	61,2	92	25	16,0	67
Dic	3,2	5,9	0,5	9,0	-3,0	5,4	12	69,1	77,3	60,9	92	34	16,4	58
Ene	3,2	5,9	0,5	10,0	-3,0	5,4	13	64,6	72,9	56,4	95	29	16,5	66
Feb	4,4	7,1	1,6	11,0	-2,0	5,5	13	66,5	76,9	56,1	94	31	20,8	63
Mar	7,6	10,8	4,3	16,0	-1,0	6,5	17	59,8	71,4	48,2	88	31	23,2	57
Período	10,1	12,9	7,2	30,0	-5,0	5,8	35	63,4	73,8	53,1	95	24	20,8	71

48

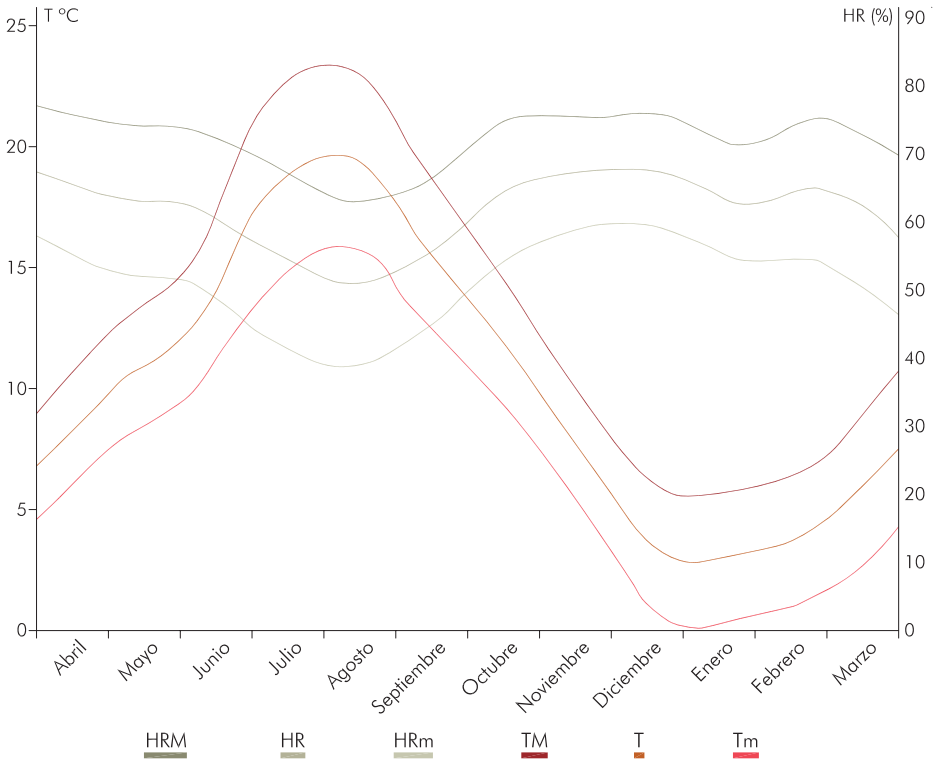


Tabla 8. Temperatura y humedad relativa. Galería Sur.

Gráfico 20. Gráfico de la tabla 8.

Datos mensuales - Galería Este														
	\bar{T}	\bar{TM}	\bar{T}_m	TM	T_m	$\frac{\bar{TM}}{\bar{T}_m}$	$\frac{TM}{T_m}$	\bar{HR}	\bar{HRM}	\bar{HR}_m	HRM	HR_m	$\frac{\bar{HRM}}{\bar{HR}_m}$	$\frac{HRM}{HR_m}$
Abr	7,5	9,8	5,2	15,0	1,0	4,6	14	60,0	69,9	50,0	80	26	19,9	54
May	10,8	13,4	8,2	18,0	5,0	5,2	13	56,4	68,1	44,6	79	32	23,5	47
Jun	13,5	16,3	10,7	22,0	7,0	5,6	15	55,5	66,7	44,4	80	27	22,3	53
Jul	18,7	22,6	14,7	30,0	10,0	7,9	20	54,8	71,0	38,6	90	23	32,4	67
Ago	21,8	25,9	17,6	29,0	12,0	8,3	17	46,1	57,4	34,8	73	21	22,6	52
Sep	17,6	20,9	14,4	28,0	9,0	6,5	19	49,0	59,0	39,1	77	26	19,9	51
Oct	13,2	15,7	10,7	21,0	6,0	5,0	15	59,0	68,5	49,5	85	33	19,0	52
Nov	8,4	10,6	6,1	15,0	-4,0	4,5	19	62,8	70,5	55,1	85	22	15,4	63
Dic	4,3	6,8	1,8	9,0	-1,0	5,0	10	64,1	71,4	56,9	87	30	14,5	57
Ene	4,0	6,6	1,4	9,0	-1,0	5,2	10	59,8	67,4	52,2	87	30	15,2	57
Feb	5,4	8,1	2,6	12,0	-1,0	5,5	13	61,1	71,2	50,9	88	27	20,3	61
Mar	8,8	12,0	5,5	17,0	0,0	6,5	17	54,4	64,4	44,4	81	25	20,0	56
Período	11,2	14,1	8,2	30,0	-4,0	5,8	34	56,9	67,1	46,7	90	21	20,4	69

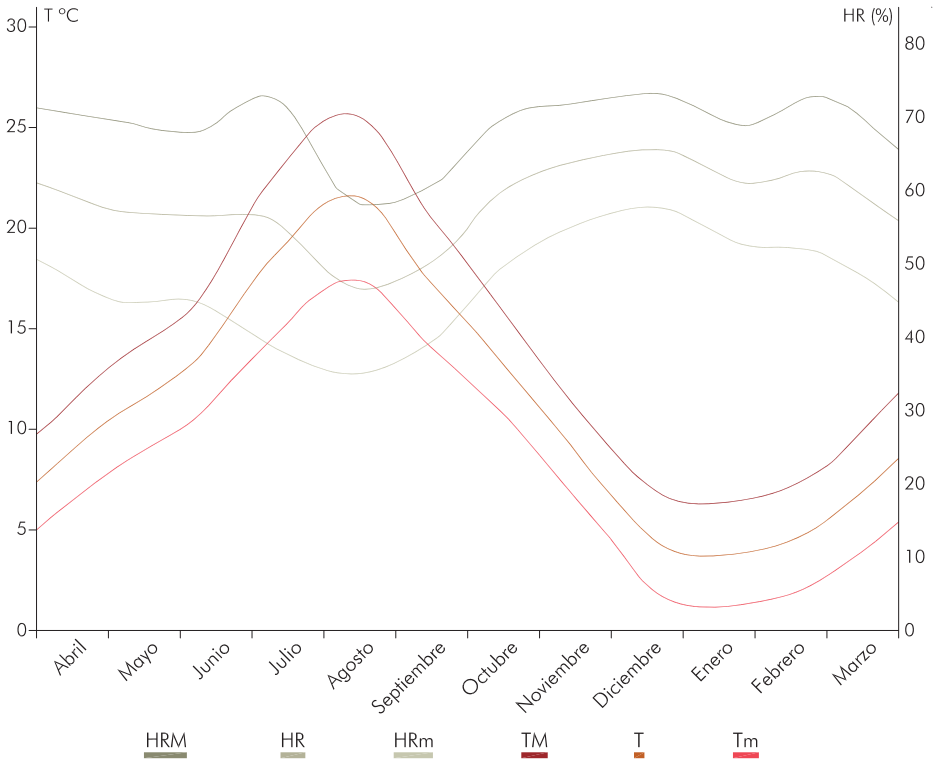


Tabla 9. Temperatura y humedad relativa. Galería Este.
Gráfico 21 Gráfico de la tabla 9.

Datos mensuales - Galería Oeste														
	\bar{T}	\bar{TM}	\bar{T}_m	TM	T_m	$\frac{\bar{TM}}{\bar{T}_m}$	$\frac{TM}{T_m}$	\bar{HR}	\bar{HRM}	\bar{HR}_m	HRM	HR_m	$\frac{\bar{HRM}}{\bar{HR}_m}$	$\frac{HRM}{HR_m}$
Abr	8,6	11,0	6,3	17,0	2,0	4,7	15	66,7	76,5	57,0	86	31	19,5	55
May	12,2	14,8	9,7	19,0	6,0	5,1	13	62,5	73,3	51,7	82	41	21,6	41
Jun	14,8	17,7	12,0	23,0	8,0	5,7	15	61,4	72,7	50,1	82	35	22,6	47
Jul	18,6	22,2	15,1	28,0	10,0	7,1	18	55,1	66,9	43,4	83	28	23,5	55
Ago	20,4	24,1	16,7	28,0	11,0	7,4	17	50,2	63,8	36,6	80	25	27,2	55
Sep	16,8	20,1	13,5	26,0	10,0	6,6	16	51,5	63,5	39,5	81	30	24,0	51
Oct	12,4	15,3	9,6	21,0	4,0	5,7	17	61,4	74,1	48,7	92	24	25,4	68
Nov	7,4	9,8	5,0	14,0	-4,0	4,8	18	64,3	74,0	54,6	90	14	19,4	76
Dic	3,5	6,0	1,0	9,0	-2,0	5,0	11	65,2	74,9	55,5	93	30	19,4	63
Ene	3,4	6,2	0,7	10,0	-2,0	5,5	12	61,0	71,0	51,0	95	29	20,0	66
Feb	4,6	7,3	2,0	10,0	-2,0	5,3	12	63,2	75,8	50,5	93	24	25,3	69
Mar	8,0	11,0	4,9	16,0	-1,0	6,1	17	55,2	67,2	43,2	93	23	24,0	60
Período	10,9	13,8	8,0	28,0	-4,0	5,8	32	59,8	71,1	48,5	95	14	22,7	81



Tabla 10. Temperatura y humedad relativa. Galería Oeste.

Gráfico 22. Gráfico de la tabla 10.

Oscilaciones estacionales y diarias

Además de los valores medios y de las oscilaciones del ciclo anual estudiados en el epígrafe anterior, interesa conocer, por un lado, las características propias de cada fase del ciclo, es decir los datos estacionales, y por otro, los valores y oscilaciones diarias de ciertos parámetros.

Observando las curvas de temperatura media (Tabla 6) se aprecia claramente que existe una oscilación típica con dos períodos extremos, en los que las máximas del período estival corresponden al mes de agosto y las mínimas invernales al período diciembre-enero. El máximo estival es más extremado respecto a la media que el mínimo invernal que, sin embargo, se dilata durante mayor tiempo en el ciclo. En las fases intermedias los cambios más rápidos ocurren de junio a julio, al final de la primavera, y durante un período más dilatado, de septiembre a diciembre, en otoño. Los valores medios mensuales se mantienen por encima de la media anual de junio a octubre, mientras que de noviembre a abril los valores se sitúan por debajo de la media.

Las curvas de humedad relativa (Gráfico 15) no tienen una estacionalidad tan marcada, destacando sólo de forma clara el mínimo estival relacionado con la elevación de la temperatura y la ausencia de precipitaciones. Sin embargo, la irregularidad del régimen pluviométrico durante el período estudiado impide sacar más conclusiones respecto a las características estacionales de este parámetro. Las oscilaciones más bruscas se producen en el invierno y especialmente en el mes de enero, en el que además de la alternancia de las precipitaciones con días soleados se produce la circunstancia, ya comentada, de dominancia de masas de aire frío y muy seco durante cortos períodos.

El período durante el que existe riesgo de heladas en el claustro parece abarcar el otoño y el invierno, desde el mes de noviembre hasta el mes de marzo, aunque con mucha menor frecuencia en el interior del claustro que en el exterior. Las frecuencias registradas durante el período de observaciones se distribuyen de la siguiente forma:

51

	Exterior	Galería N	Galería S	Galería E	Galería O
Noviembre	11	2	6	3	7
Diciembre	20	8	16	7	14
Enero	29	4	15	9	13
Febrero	18	3	8	5	5
Marzo	8	1	3	1	2
Abril	4	-	-	-	-

Así, se puede observar que el mayor riesgo de heladas corresponde a la galería S, seguida de la galería O, en el período de diciembre a enero.

Teniendo en cuenta esto, se decidió tomar como períodos representativos de cada una de las fases del ciclo los meses

de mayo, agosto, octubre y enero, para analizar las oscilaciones cíclicas diarias, a pesar de que los datos considerados como normales (serie 1973-1988, Tabla 2) definen otros períodos característicos (especialmente en relación con las precipitaciones).

Datos diarios

Mayo 1988														
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	DIA
Galería Norte	T	9,8	9,5	9,2	9,7	10,8	12,2	13,3	13,8	13,6	12,4	11,1	10,4	11,3
	HR	74,0	74,9	75,9	76,7	71,2	64,7	60,4	59,6	59,7	64,4	71,2	72,8	68,8
Galería Sur	T	8,5	8,2	7,9	8,5	9,7	10,8	11,6	12,3	12,0	11,1	9,7	9,1	10,0
	HR	72,4	73,2	74,2	73,8	68,3	62,7	59,3	58,2	58,0	63,0	70,0	71,1	67,0
Galería Este	T	9,1	8,8	8,4	8,7	9,5	10,7	11,7	13,1	12,8	11,8	10,5	9,5	10,4
	HR	62,7	64,1	65,2	66,4	63,2	55,9	51,4	48,6	47,6	51,0	58,1	60,7	57,9
Galería Oeste	T	10,7	10,2	10,0	10,3	12,0	13,5	14,0	14,0	14,2	13,1	11,7	11,1	12,1
	HR	68,9	70,2	71,1	71,2	64,5	58,3	56,2	56,4	55,9	59,6	66,1	67,8	63,9
Agosto 1988														
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	DIA
Galería Norte	T	20,4	19,4	18,6	18,6	20,7	23,2	25,8	27,2	26,3	24,6	22,7	21,4	22,4
	HR	53,4	55,3	57,3	59,1	55,4	47,4	40,6	37,5	37,8	42,5	48,0	50,9	48,8
Galería Sur	T	17,9	17,0	16,2	16,5	18,7	20,7	22,2	23,2	23,2	21,7	19,9	18,6	19,7
	HR	57,6	60,1	61,3	62,9	59,3	52,3	46,2	42,6	41,5	45,9	52,2	55,4	53,1
Galería Este	T	19,8	18,9	18,1	17,8	19,6	21,4	23,0	24,9	25,6	23,5	21,7	20,7	21,3
	HR	49,4	51,8	53,6	55,5	54,1	48,1	42,6	38,2	35,8	38,6	45,0	47,3	46,7
Galería Oeste	T	18,9	17,9	17,1	16,9	19,6	22,5	23,5	23,6	23,8	22,8	21,2	19,8	20,6
	HR	54,5	57,9	59,3	61,1	58,2	46,4	40,6	38,7	38,7	42,1	47,6	51,1	49,7
Octubre 1988														
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	DIA
Galería Norte	T	13,0	12,5	12,1	11,8	13,1	15,2	17,1	17,4	16,4	15,0	14,1	13,5	14,3
	HR	64,4	65,6	67,4	69,4	68,6	62,6	55,2	53,1	57,1	60,9	62,2	63,4	62,5
Galería Sur	T	10,6	10,1	9,6	9,7	10,9	12,4	13,8	14,2	13,5	12,4	11,5	11,1	11,7
	HR	68,6	70,1	72,0	73,4	72,7	68,5	62,1	59,2	61,6	65,3	66,2	67,9	67,3
Galería Este	T	12,0	11,5	11,2	11,0	12,0	13,5	14,8	15,6	15,2	13,8	13,0	12,4	13,0
	HR	61,2	62,5	64,0	65,8	65,9	62,3	56,4	52,4	53,2	58,1	59,3	60,6	60,1
Galería Oeste	T	11,0	10,5	10,1	10,0	11,5	13,6	14,6	15,1	14,4	13,2	12,1	11,6	12,3
	HR	64,2	66,2	68,6	70,9	70,2	62,6	55,4	52,6	55,4	60,2	61,2	63,0	62,5
Enero 1989														
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	DIA
Galería Norte	T	3,5	3,2	2,9	2,6	3,1	5,7	8,4	8,5	7,2	5,4	4,6	4,1	4,9
	HR	62,8	63,6	65,2	65,9	66,4	64,2	55,9	53,5	57,2	60,2	61,6	62,6	61,6
Galería Sur	T	1,5	1,2	1,1	0,7	1,1	3,1	5,0	5,8	4,8	3,4	2,4	2,2	2,7
	HR	66,4	67,4	68,2	69,1	69,5	69,5	63,3	58,8	60,8	64,5	65,8	66,2	65,8
Galería Este	T	2,6	2,2	2,0	1,7	2,0	3,9	5,6	6,5	5,9	4,4	3,6	3,2	3,6
	HR	60,9	61,9	62,8	63,9	64,3	64,2	59,6	54,8	55,6	58,9	60,5	60,9	60,7
Galería Oeste	T	1,9	1,5	1,3	0,9	1,4	3,5	5,3	6,1	5,0	3,7	2,7	2,3	3,0
	HR	63,0	64,4	66,1	67,2	68,1	66,6	58,4	54,3	56,6	59,5	61,7	63,2	62,4

Tabla 11. Datos diarios.

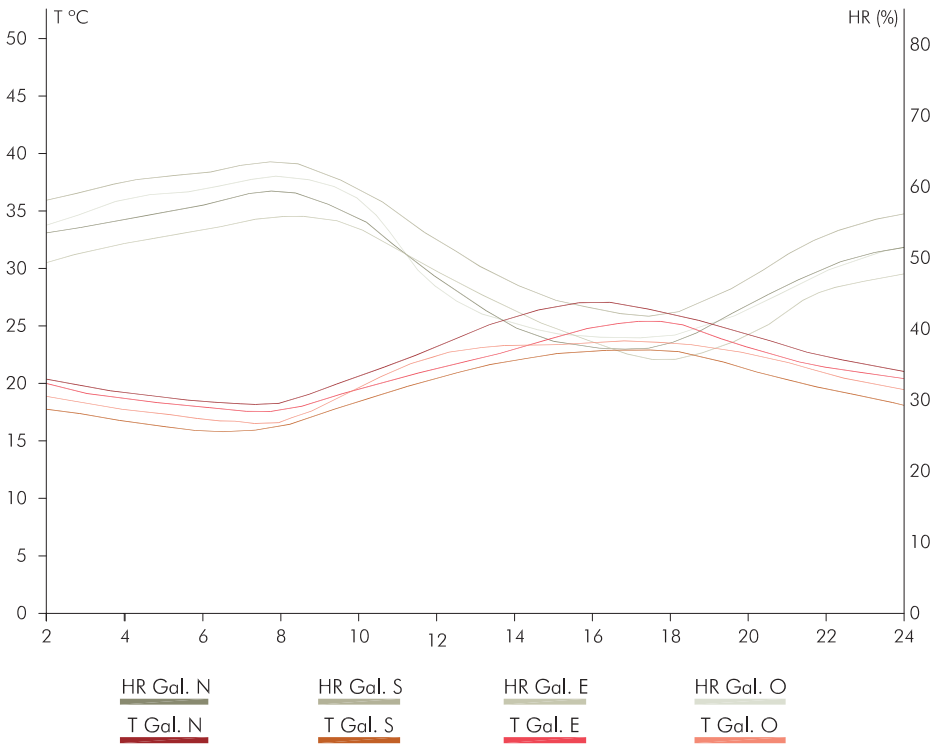
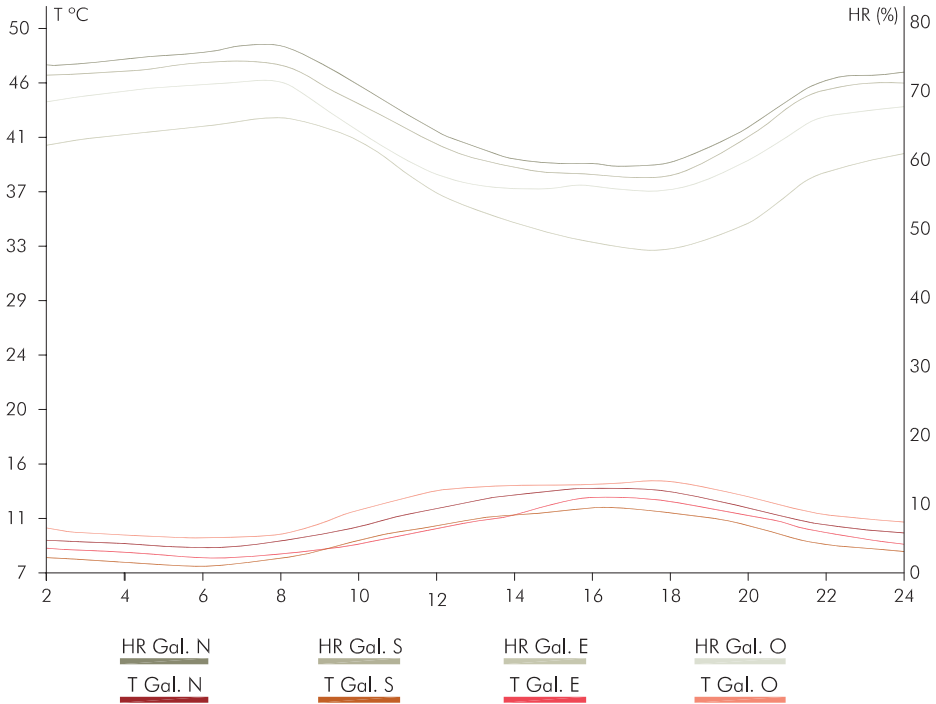
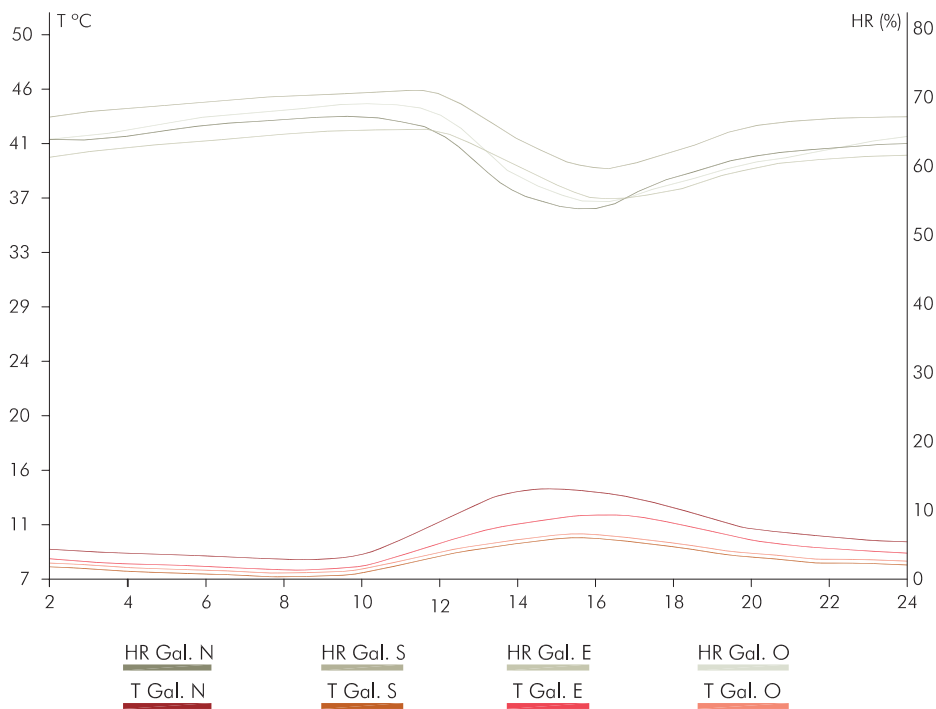


Gráfico 23 (arriba). Oscilación diaria de la temperatura y la humedad relativa en cada galería durante el mes de mayo de 1988, como datos representativos de la primavera.

Gráfico 24 (abajo). Oscilación diaria de la temperatura y la humedad relativa en cada galería durante el mes de agosto de 1988, como datos representativos del verano.

Claustro del Monasterio de Santo Domingo de Silos



54

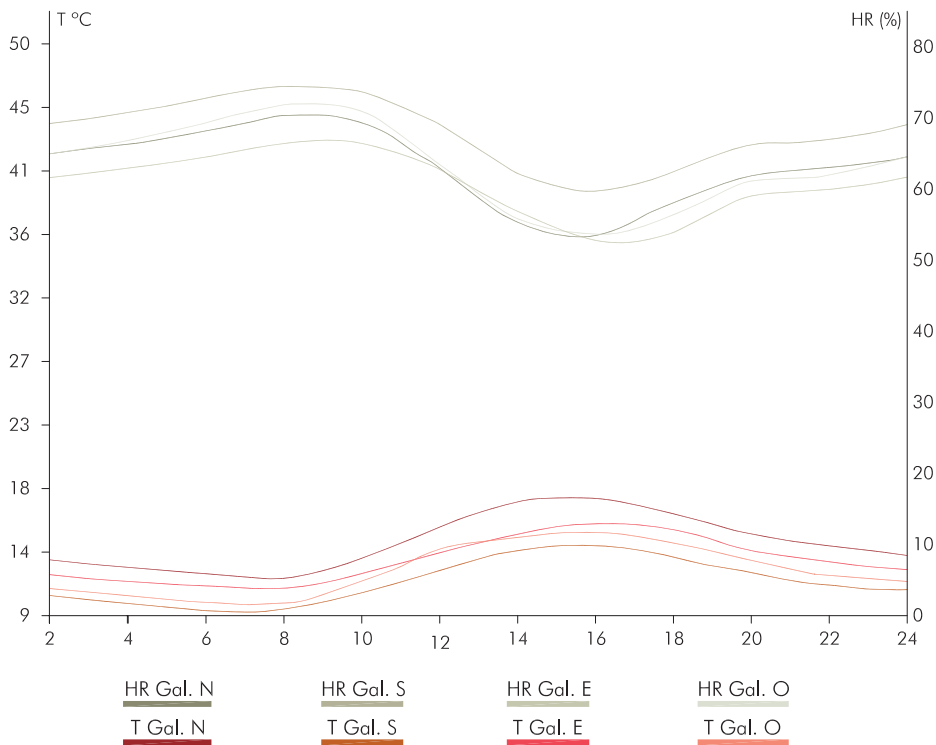


Gráfico 25 (arriba). Oscilación diaria de la temperatura y la humedad relativa en cada galería durante el mes de octubre de 1988, como datos representativos del otoño.

Gráfico 26 (abajo). Oscilación diaria de la temperatura y la humedad relativa en cada galería durante el mes de enero de 1989, como datos representativos del invierno.

Representatividad de los datos

Otra cuestión importante es la representatividad de los datos del período observado (abril 1988-marzo 1989) frente a los datos que hay que considerar como normales (serie 1973-1988), con las reservas ya mencionadas del corto tamaño de la serie (16 años).

Teniendo en cuenta que los datos a priori más discrepantes son los obtenidos para la precipitación, y especialmente los registros de diciembre y marzo con mínimos absolutos, y de abril con un máximo absoluto respecto a la serie, se ha procedido a analizar si existía una diferencia significativa entre estos datos y los estadísticos de la serie. También se ha comprobado la importancia de la diferencia existente entre la precipitación total (R) respecto a la media anual de la serie (\bar{R}). La temperatura también ha registrado valores un tanto discrepantes, con una temperatura media de las máximas (\bar{T}_M) sensiblemente superior a la media anual de la serie, por lo que también se han analizado los valores de la temperatura media anual (\bar{T}).

Los datos utilizados para estos parámetros son los que figuran en las Tablas 2 y 5 para la serie y el período observado, respectivamente.

Ajustando los datos a una distribución *t* de Student según

$$t_{obs} = \frac{x - M}{S(N+1) / N}$$

siendo $S = \sigma N / (N - 1)$

donde *x* es el dato del período, *M* la media de la serie, σ la desviación típica de la serie y *N* el tamaño de la serie¹⁹.

Los resultados para un nivel de confianza del 95% ($t_{0.975}$) son los siguientes:

Precipitación en abril	$t_{obs} = 1.98; t_{0.975} = 2.13$
Precipitación en diciembre	$t_{obs} = 1.06; t_{0.975} = 2.13$
Precipitación en marzo	$t_{obs} = 1.04; t_{0.975} = 2.13$
Precipitación anual	$t_{obs} = 1.47; t_{0.975} = 2.14$
Temperatura media anual	$t_{obs} = 1.19; t_{0.975} = 2.14$
Media anual de las máximas	$t_{obs} = 1.51; t_{0.975} = 2.14$

Según esto, hay que admitir que los datos analizados no son significativamente discrepantes respecto a la serie, siendo el dato más dudoso el de la precipitación en el mes de abril.

Otros datos que se consideran importantes, y de los que no se ha dispuesto para el presente estudio, son los referidos a la humedad en el exterior del claustro. La disponibilidad de estos datos y los anteriormente citados completaría una información básica para intentar desarrollar un modelo de la dinámica del entorno teniendo como variable independiente las oscilaciones en el exterior, y permitiendo de este modo evaluar el deterioro de los capiteles en función de ciertas variables.

¹⁹ Martínez Molina, I. (1986): Estadística. Aplicada a la Hidrometeorología. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

Interacción del material pétreo con el medio

El material pétreo tiene, como ya se ha señalado en el punto 3.1., un comportamiento termohigrométrico bien conocido teóricamente. Sin embargo, la evaluación precisa del balance térmico e hídrico entre la piedra de los capiteles y el aire ambiente exigiría el conocimiento de ciertas propiedades físicas de la piedra y la consideración de un número elevado de factores del medio que, en conjunto, forman el sistema complejo que define la interacción en un momento o período determinado.

Teniendo en cuenta esta complejidad del sistema, interesa tomar ciertos datos experimentales que permitan realizar una simplificación, reduciendo el número de variables, y de esta forma facilitar la evaluación de la influencia que dicho intercambio ejerce en los fenómenos de deterioro del material.

Metodología

Puesto que el objetivo es analizar si existe una relación entre el deterioro observado y la naturaleza del intercambio termohigrométrico de la piedra, se parte de la hipótesis de que la variable de mayor importancia en el intercambio ha de ser la orientación del capitel y la disposición de cada una de sus partes en relación a la galería y al claustro.

El método desarrollado, hasta el momento, para la obtención de los datos experimentales es limitado, y ha consistido en la medición de la temperatura superficial de la piedra en distintos puntos del claustro, dependiendo de la orientación y la disposición relativa de las distintas superficies. Así, se han realizado mediciones puntuales de forma periódica durante el ciclo diario en un capitel de cada galería. El capitel elegido ha sido el del punto

medio de cada galería coincidiendo con los puntos de medición de la temperatura y humedad relativa, de forma que los datos fueran comparables.

Dada la complejidad morfológica de los capiteles, se tomó como puntos de medición representativos el punto medio de la superficie lateral del cimacio de cada capitel observado, en sus cuatro orientaciones.

Los períodos de medición previstos son el ciclo diario en cada una de las fases o estaciones del ciclo anual, aunque por el momento sólo se han realizado las mediciones correspondientes al período estival.

Comportamiento térmico

Básicamente, el intercambio térmico entre la piedra y su medio dependerá de las ganancias de calor a partir de la radiación solar y las pérdidas debidas a la diferencia de temperatura con el aire circundante. De esta forma, la piedra acumulará calor durante el período de insolación y lo perderá por radiación cuando la temperatura del aire sea inferior, según las propiedades térmicas de la piedra y la magnitud de la diferencia de temperaturas.

Como se deduce de los datos de los apartados anteriores, se pueden considerar dos ciclos de variaciones en cuanto al intercambio térmico: uno anual y otro diario. El segundo crea diferencias más importantes entre la temperatura del aire y la piedra, pero se amortigua más rápidamente.

- Ciclo anual

Tomando como referencia las curvas que describen la diferencia de temperatura media en cada galería respecto al exterior, a lo largo del ciclo anual (Gráfico 12), se puede prever el ritmo anual del intercambio térmico en cada orientación.

En la galería N, existirá una ganancia neta de energía calorífica en la piedra, de junio a agosto. Durante este período se acumulará gran cantidad de calor en el material pétreo que luego, a partir de agosto, se irá liberando por radiación de forma irregular y dependiendo de las condiciones meteorológicas, como se puede apreciar en la curva descendente de esta galería en el Gráfico 12. El calor liberado por la piedra sirve para amortiguar el descenso de la temperatura en la galería.

La galería E tiene un comportamiento similar, siendo el período de acumulación neta de calor de mayo a agosto, aunque la cantidad acumulada será sensiblemente inferior. La curva de esta galería en el Gráfico 27 muestra este comportamiento, con una diferencia menor en el máximo de agosto y mayor en el mínimo de primavera, respecto a la temperatura del aire en el exterior.

La galería S, que nunca recibe radiación solar directa, mantiene siempre la temperatura media de la galería más baja que la del exterior, y la acumulación de calor en la piedra será mínima y reducida a la energía que reciba por radiación indirecta y conducción a partir de otras zonas más calientes.

La galería O mantiene un equilibrio térmico con el exterior durante todo el ciclo, con la temperatura siempre ligeramente inferior excepto en agosto que es ligeramente superior.

El Gráfico 27 con los datos de temperatura media (\bar{T}) obtenida de $(\bar{T}_M + \bar{T}_m)/2$, siendo \bar{T}_M la media de las máximas y \bar{T}_m la media de las mínimas, resume la situación en el período estival. Los datos se refieren a la media mensual en cada una de las galerías y el exterior, y los datos medios en el interior y el exterior de los capiteles 8, 26, 40 y 56 (galerías E, N, O y S respectivamente).

• Ciclo diario

Teniendo en cuenta el otro ciclo de variación de la temperatura, el diario, los datos obtenidos para el período estival son los que se resumen en los gráficos de los Gráficos 28, 29 y 30. En ellos se muestra la relación existente entre los distintos parámetros que determinan el intercambio de energía entre la piedra y el aire, durante el período estival, en cada galería.

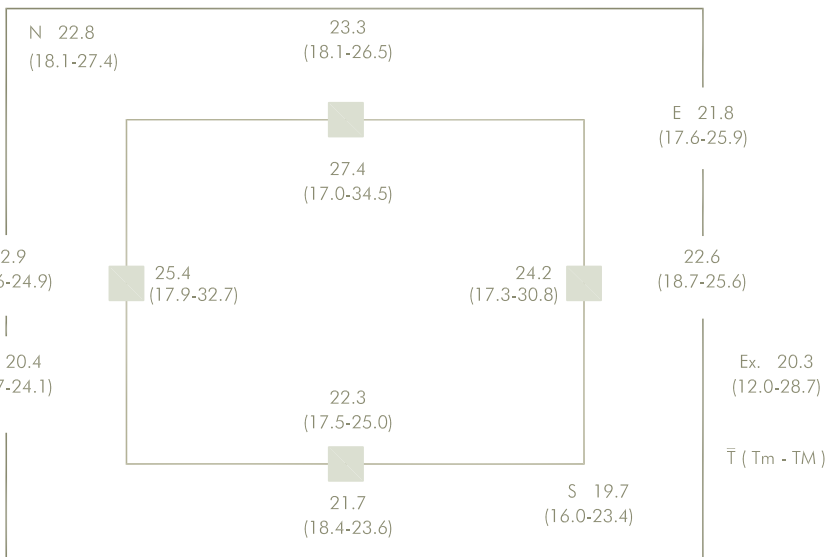


Gráfico 27.

58

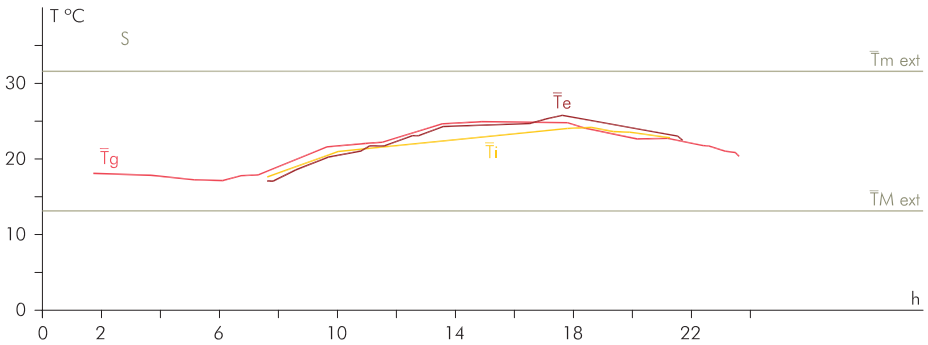
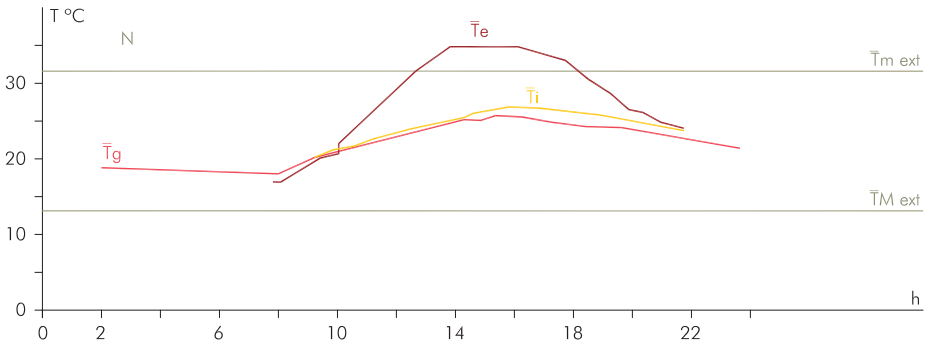
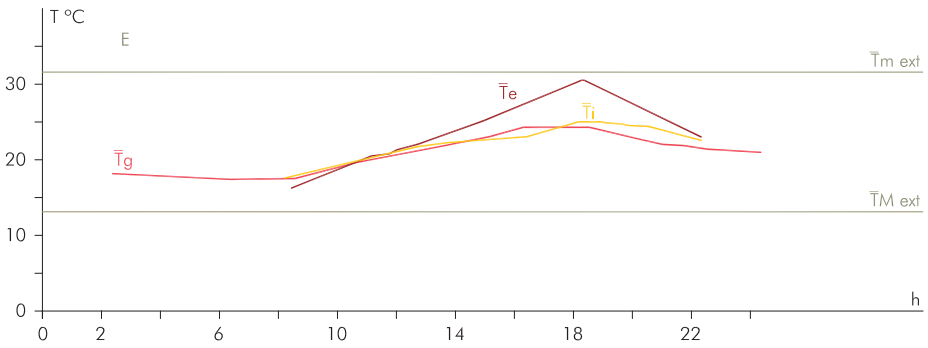


Gráfico 28 (arriba). Relación entre la media de la temperatura máxima (TM ext) y mínima (Tm ext) en el exterior, la temperatura media (Tg) en la galería N y la temperatura del capitel en la cara externa (Te) y en la interna (Ti), durante el período estival.

Gráfico 29 (abajo). Relación entre la media de la temperatura máxima (TM ext) y mínima (Tm ext) en el exterior, la temperatura media (Tg) en las galerías S y E y la temperatura del capitel en la cara externa (Te) y en la interna (Ti), durante el período estival.



59

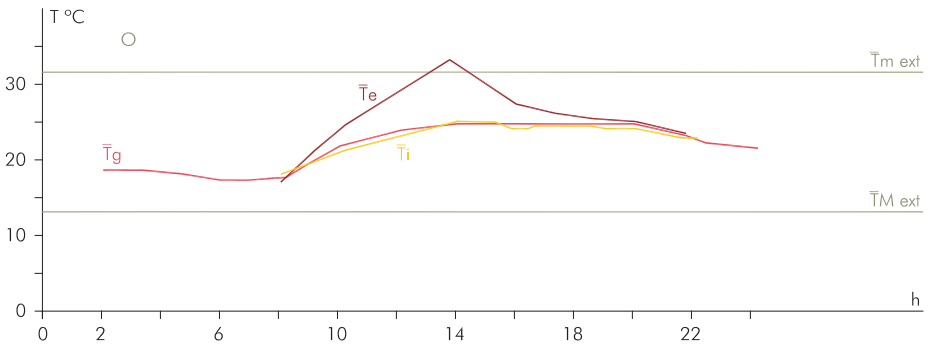


Gráfico 29 (arriba). Relación entre la media de la temperatura máxima (TM ext) y mínima (Tm ext) en el exterior, la temperatura media (\bar{T}_g) en las galerías S y E y la temperatura del capitel en la cara externa (\bar{T}_e) y en la interna (\bar{T}_i), durante el período estival.

Gráfico 30 (abajo). Relación entre la media de la temperatura máxima (TM ext) y mínima (Tm ext) en el exterior, la temperatura media (\bar{T}_g) en la galería O y la temperatura del capitel en la cara externa (\bar{T}_e) y en la interna (\bar{T}_i), durante el período estival.

• Estrés térmico

Si tratamos de relacionar estos datos con la degradación o estrés térmico de los capiteles es necesario tener en cuenta ciertos factores:

- Los datos son referidos, con el fin de homogeneizarlos y extraer conclusiones globales, al cimacio y no al propio capitel.
- Los datos se refieren al capitel central, aproximadamente, de cada galería.
- No se conocen las propiedades físicas exactas de la piedra de los capiteles que determinan su comportamiento térmico.
- Aparte del coeficiente de dilatación y la diferencia de temperatura entre la piedra y el aire, sería necesario conocer otros factores como: el contenido en agua del material y su oscilación por los fenómenos de evaporación, la elasticidad, la capacidad de deformación y el grado de restricción del movimiento por el contacto o presión de los elementos contiguos.

60

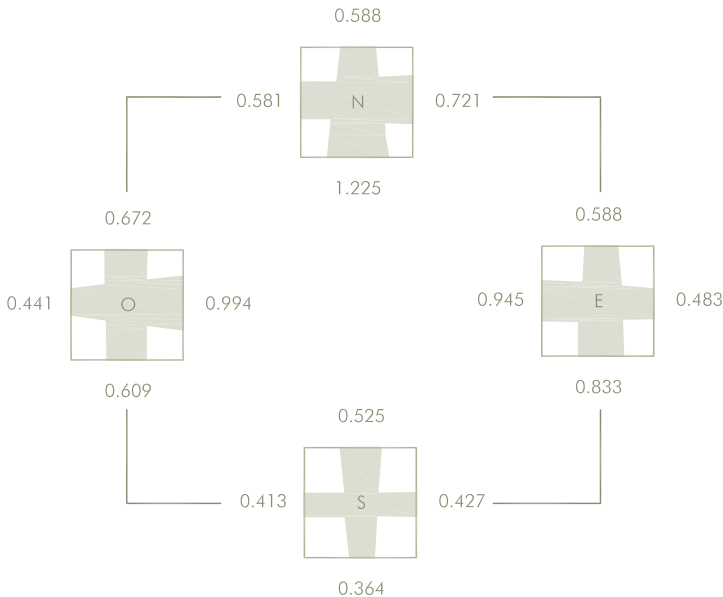
Teniendo en cuenta estas restricciones y aplicando el coeficiente de dilatación lineal (λ), asignado genéricamente a rocas calizas²⁰, a los datos de oscilación térmica observada en las distintas caras de los ca-

piteles, se obtienen las dilataciones lineales del Gráfico 31, expresadas en μ / cm .

• Forma y disposición de los capiteles

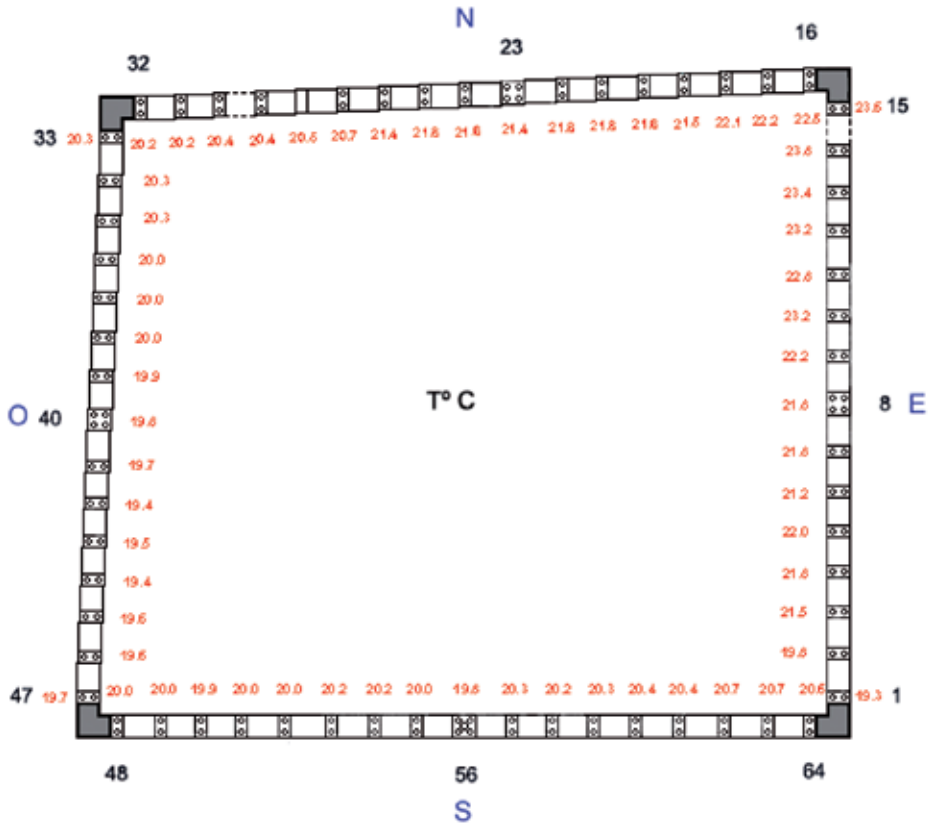
Una última consideración en cuanto a la interacción de los capiteles con el medio y su influencia en el deterioro hace referencia a la forma y exposición de las distintas superficies de los capiteles.

El tratamiento de los datos realizado hasta el momento considera una homogeneidad morfológica de los capiteles. Esta simplificación es necesaria para obtener datos extrapolables. Sin embargo, la superficie labrada e irregular, la variable inclinación de las superficies y el estado actual de los capiteles deben determinar un comportamiento termohigrométrico heterogéneo, incluso en capiteles próximos de la misma galería. Estas diferencias son apreciables en el termograma de la Gráfico 32 y en los datos de temperatura de la Gráfico 33.



²⁰ Feilden, B. M. (1982): Conservation of Historic Buildings. Butterworths. London.

Gráfico 31. Magnitudes relativas de dilatación lineal diaria, expresadas en μ/cm , en los capiteles 8, 26, 40 y 56 de las galerías E, N, O y S respectivamente, durante el período estival. Los datos de referencia son las oscilaciones medias diarias de temperatura, en $^{\circ}\text{C}$, en cada cara del capitel, tomando $1 = 7 \times 10^{-6} \text{ m/m } ^{\circ}\text{C}$ como coeficiente de dilatación lineal³.



61

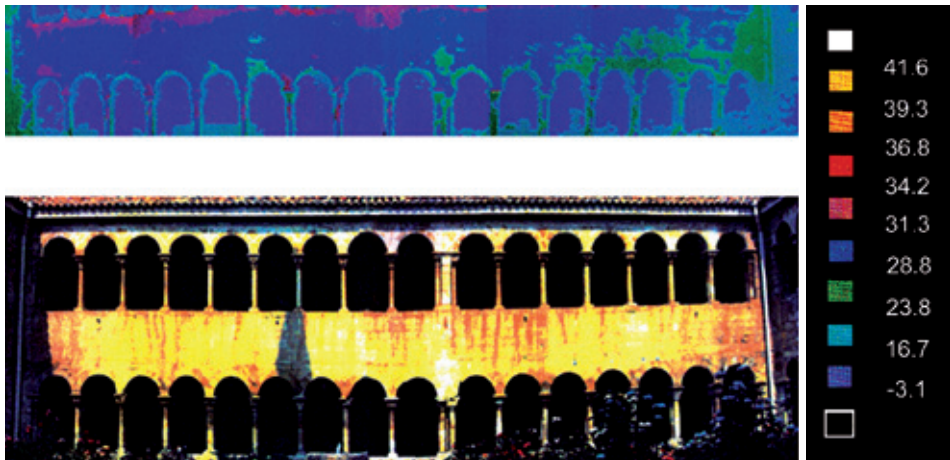


Gráfico 32 (abajo). Termograma de la galería N en el que se aprecia la diferencia del comportamiento térmico entre los capiteles de esta galería. (Tomas termográficas SETER consultores S.A.).

Gráfico 33 (arriba). Datos de temperatura en la superficie de la parte externa del cimacio de cada capitel, tomados en el intervalo de 20,30 a 21,00 horas el día 4 de agosto de 1988.

Comportamiento hídrico

De los datos térmicos anteriores se pueden extraer ciertas conclusiones respecto a los posibles intercambios hídricos de la piedra con el aire.

Los fenómenos de condensación se producirán cuando la temperatura de la piedra alcance el punto de saturación o temperatura del punto de rocío, dependiendo de los datos de temperatura y humedad del aire. Esto ocurrirá, previsiblemente, con mayor probabilidad durante los mínimos nocturnos.

Teniendo en cuenta los datos mensuales y diarios de temperatura y humedad relativa de las Tablas 7, 8, 9, 10 y 11 y calculando la temperatura del punto de rocío durante los valores coincidentes a la misma hora de mínimos de temperatura y máximos de humedad relativa, los capiteles de las galerías N y O son los más expuestos a los fenómenos de condensación.

El mayor riesgo de condensación se da durante la primavera, cuando la temperatura de la piedra debe ser más baja, después de haber cedido el calor acumulado durante los mínimos invernales. Esta época coincide con el período de mayor frecuencia de días de rocío en la localidad. En cuanto a las diferencias entre las galerías, el riesgo de condensaciones disminuye para las galerías N y E desde el verano a finales del otoño, mientras que la galería S tiene más probabilidades de condensación durante esta época.

Desde otro punto de vista, utilizando datos registrados durante el período de observaciones, se puede estimar el riesgo de condensación dependiendo de la frecuencia de registros de humedad relativa igual o superior al 90% en cada galería. Estos valores e incluso inferiores, según distintos autores, resultan críticos para la formación de capas de humedad sobre la superficie de la piedra.

- **Galería N:** 7 ocasiones de diciembre a abril, con un máximo de 94%.
- **Galería S:** 15 ocasiones de octubre a febrero, con un máximo de 95%.
- **Galería E:** 1 ocasión en abril, con 90%.
- **Galería O:** 15 ocasiones de octubre a febrero, con un máximo de 95%.

Hay que señalar, que estos valores máximos se han producido, en la mayoría de los casos, durante días de precipitaciones o nieblas.

También, hay que añadir que el riesgo de condensación se convierte en riesgo de helada durante el período de noviembre a marzo, meses durante los cuales la temperatura mínima ha sido igual o inferior a 0°C en varias ocasiones y en las cuatro galerías.

Representatividad de los datos

Para comprobar la validez de los datos utilizados al objeto de evaluar la interacción de la piedra y el medio, se han comparado los parámetros estadísticos, varianza y media, de los datos de temperatura del mes de agosto, considerados representativos de la estación estival, con los del período de datos puntuales (primera semana de agosto), por medio de pruebas de significación. Utilizando las pruebas habituales²¹ del ajuste de los datos a la distribución *F* de Snedecor, y *t* de Student para la comparación de las varianzas y las medias de los datos, respectivamente, se concluye que estos parámetros no difieren significativamente y por tanto los datos se consideran representativos del período estival.

²¹ Martínez Molina, I. (1986): Estadística. Aplicada a la Hidrometeorología. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

Los datos relativos a la temperatura superficial de la piedra, tomados durante el mismo período y con la misma frecuencia horaria, aunque sólo de 8 a 22 horas, también se consideran representativos para la evaluación de los valores medios y las oscilaciones, puesto que los máximos y mínimos se daban durante este período.

Una evaluación completa del comportamiento termohigrométrico de los capiteles durante el ciclo anual requeriría al menos contar con datos referentes al otro período extremo del ciclo, el invernal, datos de los que por el momento no se dispone.





Conclusiones

Puesto que el objetivo final del estudio era determinar la relación existente entre la degradación observada en los capiteles y los distintos factores microclimáticos, basándonos en la información recopilada en los apartados anteriores, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Las diferencias de los valores promedio de temperatura y humedad relativa de las cuatro galerías no es muy grande, encontrándose la mayor variación durante el ciclo diario en las estaciones extremas, verano e invierno.
- Las diferencias mayores se encuentran entre las galerías N y S, situándose siempre entre los valores de estas galerías los de la E y O. La galería N es la que experimenta unas oscilaciones más acusadas, debido a la insolación, mientras que la O es la que muestra un comportamiento más complejo en la evolución de sus parámetros, con oscilaciones menos amplias que en la galería N pero más frecuentes e irregulares.
- La influencia de las oscilaciones de temperatura en la degradación de la piedra se estima según el siguiente orden de mayor a menor:
 - Capiteles de la galería N. Experimentan importantes diferencias en las oscilaciones, según la orientación de cada una de sus superficies.
 - Capiteles de la galería O. Experimentan los cambios más bruscos, con oscilaciones menores que los de la galería N pero en períodos más cortos.
 - Capiteles de la galería E. Según las observaciones realizadas, los capiteles de esta galería experimentan oscilaciones menores de lo que cabría

esperar, y ello se atribuye a una mayor influencia de la ventilación.

- Capiteles de la galería S. Sufren las menores oscilaciones debido a la menor cantidad de radiación global recibida.

- La influencia del intercambio hídrico en los fenómenos de degradación de la piedra se interpreta según las variaciones de la humedad relativa del aire en cada galería y la correlación de ésta con otros factores. De esta forma, se puede deducir que la piedra de la galería N experimenta una evaporación importante, por lo que este fenómeno debe influir decisivamente en los procesos de alteración relacionados con el transporte y cristalización de sales observados en los capiteles de esta galería.

En el otro extremo se puede situar la galería S, que muestra valores de humedad relativa superiores al resto de las galerías, pero ello motivado principalmente por el efecto de la temperatura, siempre menor en ésta. Por tanto, se estima que el intercambio hídrico debe ser mínimo en esta galería, determinando que el contenido de agua de los capiteles sea mayor e influyendo este hecho en los fenómenos de alteración de la piedra que estén relacionados con la disolución y las reacciones químicas en los materiales favorecidas por la humedad.

En este aspecto, el comportamiento de las galerías E y O también es similar al que experimentan para la temperatura. Así, la galería E es la que indica una humedad relativa menor a lo largo de todo el ciclo anual y prácticamente durante todo el ciclo diario, en cada una de las estaciones. Nuevamente, la ventilación debe jugar un papel importante en este comportamiento. La galería O experimenta unas oscilaciones más irregulares.

- La influencia de las precipitaciones sobre la humedad parece afectar en mayor grado a las galerías N y O, circunstancia relacionada sin duda con el hecho de que la protección del claustro frente el viento es menor en la parte sureste, aunque la dirección dominante del viento durante los días de máxima precipitación es la SW. Algunas reservas han de observarse en este aspecto, puesto que el período analizado ha presentado cierta irregularidad en el régimen de precipitaciones.
- La mayor incidencia estimada de la ventilación en la galería E se justifica con el hecho, constatado mediante observaciones puntuales, de que se producen corrientes de aire considerables en esta galería debido a que en ella se encuentran las puertas de entrada y salida de los visitantes del claustro. Secundariamente, otros accesos como son el de la iglesia y subida al claustro superior, y el volumen abierto a la galería de la sala capitular, deben ser origen de diferencias de presión entre las masas de aire que provocan el fenómeno de la ventilación. También es necesario considerar que la dirección dominante de los vientos debe ser del sector W y por tanto las ráfagas de viento deben afectar en cierta medida a esta galería.
- El riesgo de condensación del vapor de agua sobre la piedra de los capiteles tiene una incidencia mayor en el lado interior, el que da a la galería. La galería con mayor riesgo es la S, puesto que las condensaciones son posibles durante todo el ciclo anual, mientras que en las galerías N y E el riesgo es mínimo desde el verano a finales del otoño. La mayor frecuencia de condensaciones se da en la

estación primaveral. Una distribución semejante tiene el riesgo de heladas, que afecta en mayor proporción a las galerías S y O, con una frecuencia máxima en la estación invernal.

- El efecto erosivo de los diferentes agentes de meteorización, considerado como la suavización o pérdida de relieves y material, se manifiesta de forma más clara en la parte exterior del cimacio o ábaco de los capiteles, así como en la parte más externa de la superficie superior del poyete y parte de las basas sobre las que se apoyan los fustes de los capiteles. Esta erosión se relaciona directamente con el impacto de los goteones de agua de lluvia procedentes de la cubierta del claustro, que debió ser intensa hasta la instalación, a partir de los años 70²², de los distintos sistemas de desagüe. En la situación actual, con el canalón de desagüe integrado en la cubierta, esta erosión parece muy amortiguada, aunque se produce cierto goteo generado por el espacio existente entre el canalón

y el extremo del tejado. Este goteo puede tener un efecto importante en el aporte de agua a los capiteles, mecanismo en el que el cimacio hace de colector de esta humedad.

Como resultado del presente estudio y teniendo en cuenta las conclusiones anteriores, se puede afirmar que la degradación observada actualmente en los capiteles debe depender de un conjunto de factores entre los cuales los microclimáticos han favorecido ciertos mecanismos de alteración, siempre dependiendo de las características particulares del material de cada capitel. Así, las conclusiones anteriores representan las tendencias de riesgo en función de la orientación del capitel, la posición relativa respecto al exterior y la oscilación de ciertos parámetros con el tiempo.

²² Valades Sierra, J. M. (1988): Primer Informe Histórico sobre el Claustro Románico del Monasterio de Santo Domingo de Silos. Área de Documentación del Servicio de Obras de Arte. ICRBC. Madrid.



Bibliografía y cartografía

Bibliografía

AGUILÓ, M. y otros (1984): Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico: Contenido y Metodología. CEOTMA. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid.

ALANO MARTÍNEZ, C. del (1983): El Claustro Románico de Silos. Alianza Editorial. Madrid.

FEILDEN, B. M. (1982): Conservation of Historic Buildings. Butterworths. London.

FONT TULLOT, I. (1983): Climatología de España y Portugal. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA (1983): Atlas Climático de España. Madrid.

MARTÍNEZ MOLINA, I. (1986): Estadística. Aplicada a la Hidrometeorología. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.

SPIEGEL, M. R. (1970): Estadística. McGraw-Hill, Ediciones de la Colina. Madrid.

UNIVERSIDAD DE OVIEDO. AREA DE PETROLOGÍA Y GEOQUÍMICA. DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA (1989): Caracterización Petrofísica y Alterológica. Primer Avance. Proyecto de Conservación del Claustro de Santo Domingo de Silos. Oviedo.

VALADES SIERRA, J. M. (1988): Primer Informe Histórico sobre el Claustro Románico del Monasterio de Santo Domingo de Silos. Área de Documentación del Servicio de Obras de Arte. ICRBC. Madrid.

Cartografía

Hoja 315: Santo Domingo de Silos. E. 1:50.000. Mapa Militar de España. Servicio Geográfico del Ejército.

Hoja 315: Santo Domingo de Silos. E. 1:50.000. Mapa Geológico de España. Instituto Geológico y Minero de España.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CULTURA