

VALORACION Y CONTROL CONTINUADO DE LOS PARAMETROS FISICOS

Carlo Cacace

Sección Microclima, Laboratorio de Física, ICR

Introducción

En el mapa temático del riesgo atmosférico se ha observado la necesidad, para la determinación del riesgo atmosférico, de la medición instrumental, sobre el terreno, de los parámetros físico-climáticos (por ejemplo, temperatura y humedad relativa). En el estudio climático no es posible prescindir, dentro de los lugares elegidos como muestra, del estudio microclimático local. Tal estudio se vuelve necesario para producir esas informaciones obligatoriamente vinculadas al objeto y a su entorno inmediato, que serán indispensables para determinar un mapa climático que tenga en cuenta la distribución en el territorio nacional de las magnitudes físicas microclimáticas. Dada la importancia que reviste este estudio es necesario decir algunas palabras sobre la metodología y sobre las modalidades de medición de los parámetros microclimáticos.

Metodología microclimática.

La metodología microclimática prevé la posibilidad de determinar esos momentos característicos en los cuales el ambiente ejerce su agresión sobre el objeto que en él se conserva. La investigación microclimática se propone determinar, a través de la medición y memorización continuada de los parámetros microclimáticos, los posibles momentos en los que se manifiestan las diferencias termohigrométricas que suponen un riesgo para la obra. El comportamiento termohigrométrico de un sistema (donde por sistema se entiende el medio ambiente y las obras contenidas en él) está gobernado, en primera instancia, por las condiciones meteorológicas locales debidas a los

ciclos diurnos y estaciones del tiempo. El estudio del microclima está dirigido a determinar y a definir: a) los flujos de energía térmica entre el ambiente y la estructura; b) los movimientos de agua en sus estados de agregación; c) las posibles interferencias con las obras conservadas en él.

Para afrontar este problema hay que tener en cuenta que el estado termohigrométrico de la estructura, así como su evolución, están definidos en el espacio y en el tiempo por algunos parámetros significativos y mensurables como la temperatura y la humedad relativa del aire, la radiación solar y la artificial, la velocidad del aire y la temperatura superficial de la estructura de la obra.

La investigación microclimática está dirigida fundamentalmente a adquirir información acerca de los comportamientos en el tiempo de las magnitudes en juego en puntos significativos de la estructura. La frecuencia de la toma de muestras de los datos resultará, por lo tanto, continua en el tiempo y discreta en el espacio. El número de los puntos de medición deberá ser oportunamente considerado en función de los objetivos que se deban alcanzar y teniendo en cuenta también las siguientes consideraciones: orientación y colocación de la estructura; extensión del lugar; y conformación de la estructura.

Lo que se está tratando de interpretar, partiendo de la medición de las magnitudes termohigrométricas y del análisis de su dinámica, es la entidad de los intercambios de energía "ambiente-objeto" a través del análisis sistemático de los estímulos producidos por los ciclos ambientales diurnos y estacionales. Por lo tanto, es fundamental la relación entre los datos

de tipo térmico y los datos de tipo higrométrico, unidos a las precipitaciones atmosféricas, a la velocidad y dirección de los vientos y a la presencia en la atmósfera del vapor de agua. Resulta fundamental, además, la posibilidad de resaltar gradientes térmicos entre las superficies y el ambiente, o bien entre el ambiente y las obras. Todas estas magnitudes físicas son directamente mensurables. Además, tienen un gran significado dos magnitudes físicas obtenidas a través de algoritmos matemáticos y derivadas de la temperatura y de la humedad relativa: los valores de temperatura de rocío y de humedad específica.

Se define la temperatura de rocío como la necesaria para que sobre una pared o en el aire se produzca el fenómeno de la condensación siempre que:

$T. \text{ ambiente} < T. \text{ rocío}$

$T. \text{ superficial} < T. \text{ rocío}$

La humedad específica es la cantidad real de vapor presente en el ambiente a esa determinada temperatura.

Resulta evidente que para la adquisición en el tiempo de las magnitudes físicas arriba indicadas, es necesario contar con unos instrumentos que permitan medir, grabar y memorizar según unos intervalos regulares de tiempo y que estén definidos según unos intervalos regulares de tiempo y según las exigencias del estudio que se quiere realizar. Con este fin, el laboratorio de física y controles ambientales, incluyendo todos sus sectores (electrónica, microclima e informática) ha puesto a punto un modelo de centralita equipada con distintos tipos de sensores para la medición de los parámetros microclimáticos, supervisada por un ordenador que se ocupa de gra-

bar las medidas adquiridas. Se ha desarrollado, además, el *software* para la gestión, la elaboración y el registro gráfico de la mole de datos que se consiguen con las campañas anuales de medición.

El estudio estadístico de los datos microclimáticos, grabados por el sistema automático de adquisición, permite la determinación de esos momentos característicos de las mutaciones microclimáticas que se están produciendo para determinar los hechos y los momentos en los que la agresión del ambiente se manifiesta de una manera coercitiva en relación con el contenido del sistema. La elaboración y la interpretación de los datos recogidos de este modo permitirán la determinación del índice de peligrosidad que determina la degradación en términos de niveles de estimulación ambiental.

En una segunda fase se pasa al cálculo de las medias diarias y de las medias horarias, con sus curvas relativas. Las medias diarias representan la evolución, en el curso del mes, de los comportamientos de los parámetros termohigrométricos medidos y memorizados directamente. Por consiguiente, es posible determinar las jornadas concretas en las que se puso de manifiesto un determinado fenómeno modificando el estado ambiental.

El estudio de las medias diarias se vuelve fundamental para la determinación, en los cambios estacionales, de las variaciones microclimáticas provocadas por el medio ambiente en el conjunto monumental.

Las medias horarias representan el día medio típico, índice determinante para la determinación cualitativa, además de cuantitativa, de los momentos

de la jornada en los que, eventualmente, un fenómeno se pone de manifiesto. Permite caracterizar exactamente el período en el que el comportamiento microclimático del ambiente determina fenómenos relevantes y no ligados a un simple azar. El día medio típico permite visualizar el comportamiento termohigrométrico diario del sistema examinado y permite la correlación directa de todos aquellos parámetros que intervienen en el equilibrio térmico del medio ambiente.

La curva, calculada a partir de cada una de las medidas, representa la variabilidad de las mismas dentro de la escala de medida. Esta es el intervalo que contiene las variaciones de cada una de las medidas registradas y permiten cuantificar el índice de error efectivo de los parámetros termohigrométricos identificadores del sistema microclimático. Ello permite definir los valores termohigrométricos a los cuales se expone más frecuentemente el sistema y, por lo tanto, valorar los "intervalos de riesgo" en los que se pueden verificar fenómenos de evaporación, condensación, gradientes térmicos y otros eventuales estímulos de interés.

Para una correcta interpretación de los datos registrados es importante, además, la posibilidad de relacionar matemáticamente las informaciones recabadas de cada una de las medidas, para verificar en qué medida un fenómeno depende de un hecho determinado. Es decir, si unos eventuales fenómenos microclimáticos están en función de particulares comportamientos termohigrométricos, es posible asociar, por ejemplo, fenómenos de evaporación con factores térmicos en momentos concretos de la jornada. Estas informaciones, recogidas directamente sobre el terreno, debidamente racionalizadas e integradas en bancos de datos estudiados a este propósito, concurrirán en el procedimiento general de la Carta del Riesgo, para determinar los índices de vulnerabilidad, además de los de peligrosidad, es decir, la capacidad del objeto de resistir a los estrés provocados.

Datos experimentales

Para demostrar la necesidad de llevar a cabo campañas microclimáticas de larga duración y como ejemplo de las elaboraciones necesarias para la caracterización ambiental, se presentan dos trabajos reali-

zados por el laboratorio de física y controles ambientales:

- Cripta de la Catedral de Anagni (Italia).
- Capilla Real de Granada (España).

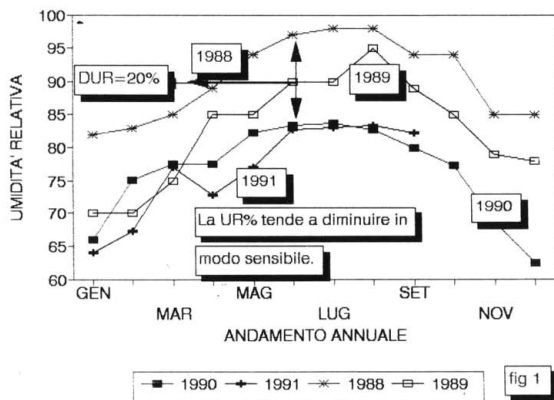
El estudio de los ambientes desde el punto de vista de la conservación presupone una clasificación de los mismos a fin de aplicar el modelo más concreto de interpretación del comportamiento microclimático. El caso de la Cripta de la Catedral de Anagni, construida a finales del siglo XI, con una superficie cubierta de frescos de alrededor de 600 m.², resulta complicado por su especial arquitectura. Esta permanece semienterrada en el noreste, a espaldas de un terraplén que limita con el claustro en el que está colocada una gran cisterna de agua, en uso hasta junio de 1989. Las formas particulares de degradación aparecidas en los últimos años bajo la forma de una pérdida de color de la película pictórica han llevado al Instituto Centrale per il Restauro a realizar un detenido estudio previo de los trabajos de restauración.

Queriendo esquematizar, en un primer acercamiento a la Cripta, como un ambiente cerrado que es, es necesario verificar en qué medida influyen sobre el microclima los estímulos termohigrométricos diurnos y estacionales, así como su especial ubicación. Ello para valorar, por ejemplo, elementos desestabilizadores introducidos por la cisterna y/o por la misma orientación de la Cripta. En esta dirección, el laboratorio de física ha realizado una campaña previa de estudio y de experimentación orientada a definir la red de medición ambiental y las técnicas de medida. Dicha campaña se inició en julio de 1987 y se terminó en junio de 1989, colocando en la Cripta seis sondas de temperatura ambiente y humedad relativa. Sobre la base de esta experiencia, a partir de julio de 1989 se ha colocado un sistema de adquisición de datos de 48 canales, que comprende:

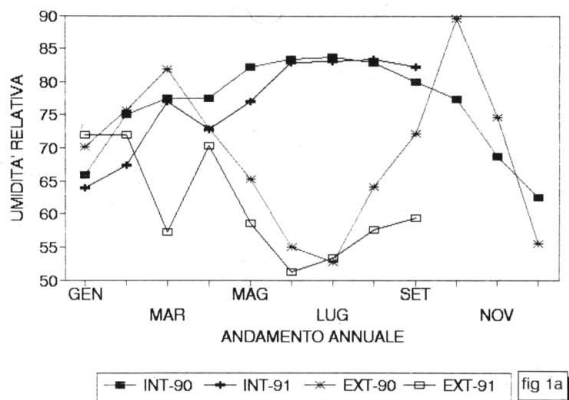
- 19 c. temperaturas ambientales.
- 11 c. temperaturas superficiales.
- 11 c. humedades relativas.
- 4 c. anemómetros.
- 1 c. gonioanemómetros.
- 1 c. solarímetro.

En la fig. 1 se puede observar cómo se eleva la tasa de humedad relativa, pasando del 85% en el período estival. En la fig. 2 se observa, además, cómo

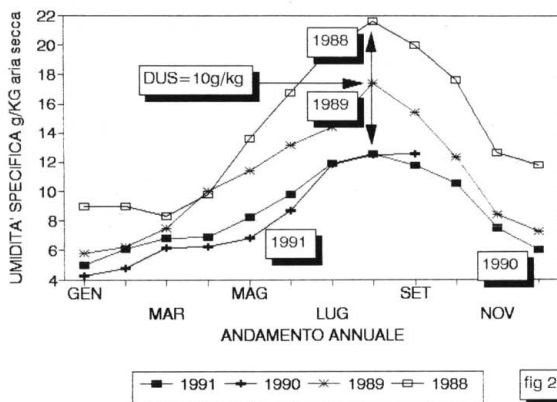
ANAGNI CRIPTA DEL DUOMO



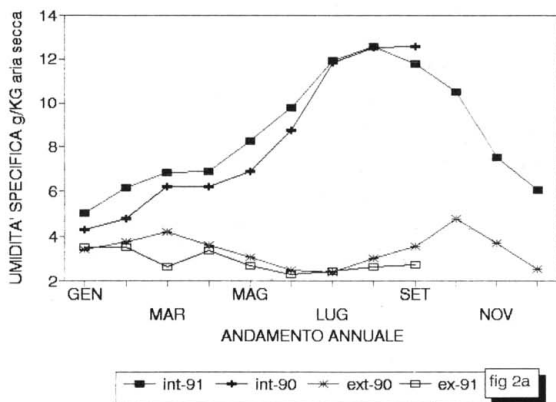
ANAGNI CRIPTA DEL DUOMO



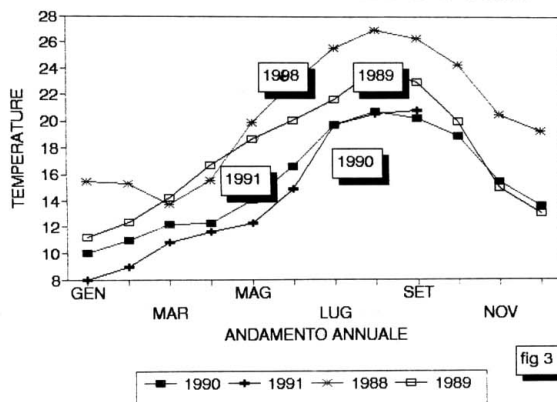
ANAGNI CRIPTA DEL DUOMO



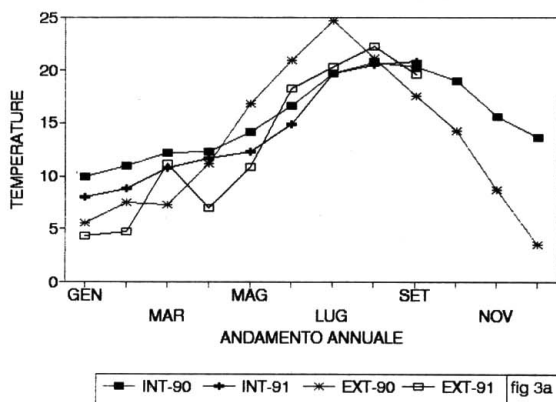
ANAGNI CRIPTA DEL DUOMO



ANAGNI CRIPTA DEL DUOMO



ANAGNI CRIPTA DEL DUOMO



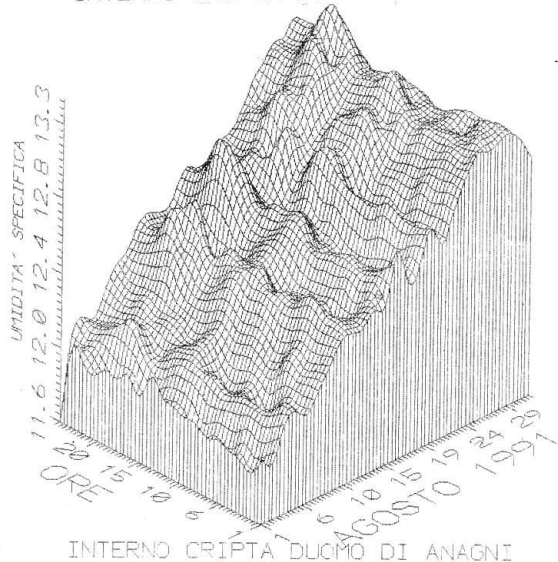
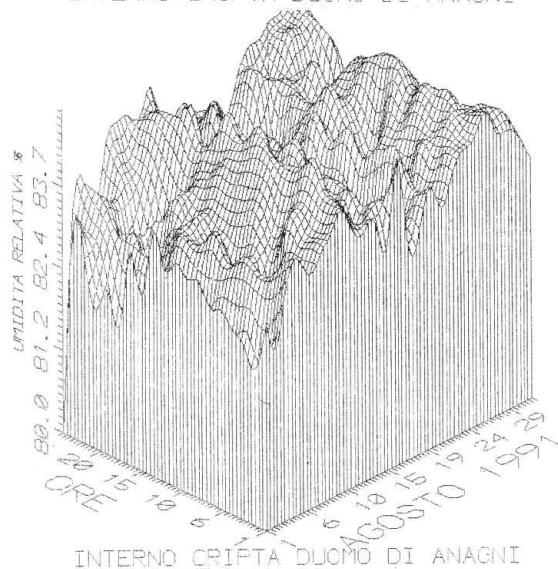
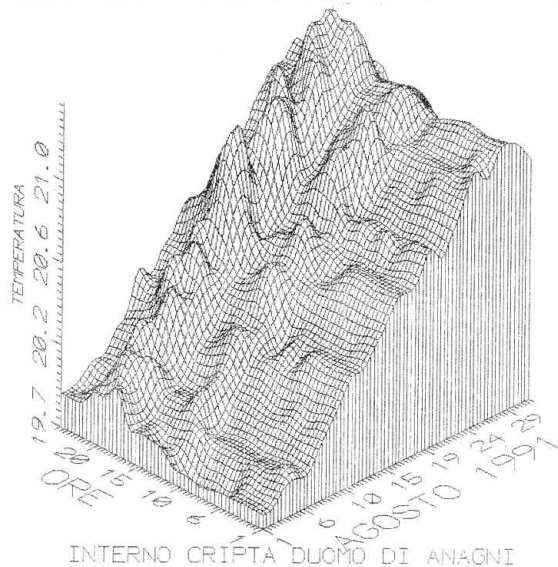
Figs. 4, 5 y 6

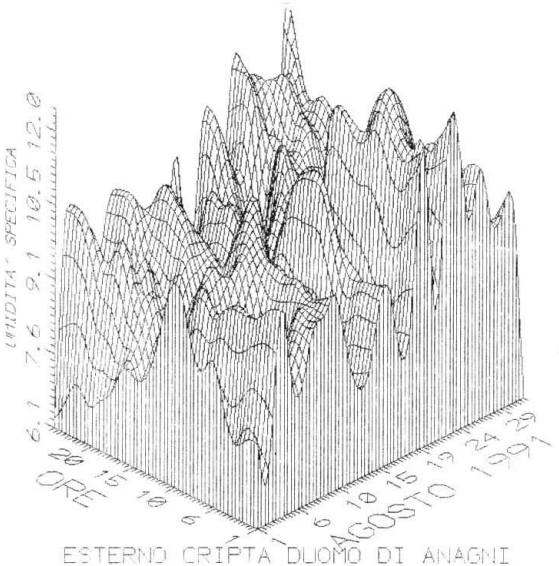
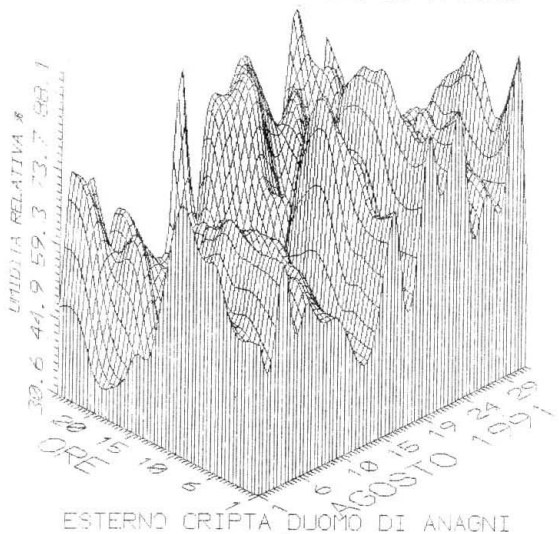
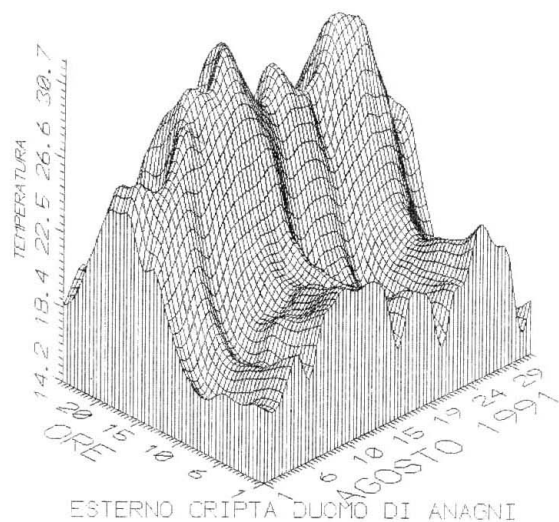
la cantidad de vapor es también mayor respecto a los años posteriores. De la comparación entre las figs. 3 y 2 se deduce que, al calentarse el ambiente por efecto del cambio climático estacional externo, el fenómeno de la evaporación aumenta sensiblemente, incrementando los riesgos para la conservación de los frescos. En octubre de 1988 se eliminó el flujo de agua de la cisterna y en abril del 89 se observó que la cisterna estaba casi vacía. Como se ha dicho, en julio de 1989 se comenzó una nueva campaña de mediciones con una centralita de 48 canales.

Partiendo siempre de la observación de las fig. 1, 2, 3, 1a, 2a, y 3a se observa la tendencia a la normalización de los parámetros microclimáticos. Globalmente, la humedad relativa tiende a descender, y lo mismo sucede con la cantidad de vapor. Los fenómenos de los intercambios de vapor con las paredes y de los flujos que llegan desde las aberturas hacia la Catedral permanecen pero tienden a disminuir en entidad y a notar únicamente los ciclos climáticos estacionales. Estas tendencias a la mejora pueden ser atribuidas, en parte, al hecho de que ya no funcione la cisterna; ello se refleja en una menor contribución de vapor al interior de la Cripta. Contribución que, de todos modos, tiende a anularse.

Se demuestra así que el sistema medioambiental de la Cripta acusaba de manera directa el pasaje estacional del clima exterior pero no estaba relacionado directamente con los ciclos climáticos diarios. En efecto, observando las gráficas tridimensionales mensuales de agosto de 1991 se observa cómo la curva de la temperatura exterior no influyen el comportamiento dentro de la Cripta (figs. 4 y 4a, fig. 7 y 7a) y que los picos mínimos registrados (de las 9 a las 11 horas y de las 14 a las 17) son debidos en parte a la afluencia de público y a pequeños movimientos de aire procedente de la Catedral.

Siempre siguiendo la comparación de las gráficas tridimensionales de la humedad relativa (fig. 5 y 5a) y del vapor (fig. 6 y 6a) del mismo mes se observa cómo el microclima interior de la Cripta es más húmedo que el exterior, confirmando que la interacción interior-exterior se produce sobre una base estacional y no diaria. A distancia de cuatro años del comienzo de las mediciones, en septiembre de 1991 empezó el trabajo de restauración, que se produce en condiciones microclimáticas menos extremas y que será sometido constantemente al monitotoraje ambiental puesto que





Figs. 4a, 5a y 6a

algunas sondas han sido dejadas en funcionamiento en los puntos más delicados de la Cripta.

En la Capilla Real de Granada se instaló, en diciembre de 1990, una centralita automática de adquisición de ocho canales, dotada de cuatro sensores de temperatura ambiental y de humedad relativa. La centralita permite una adquisición de datos en el tiempo, según intervalos de medida decididos por el operador. En el caso de la Sacristía de la Capilla Real se eligió una adquisición de treinta minutos debido a que nos encontrábamos en un ambiente cerrado pero no completamente aislado del exterior y, sobre todo, afectado por una multitud de visitantes, por lo tanto, se hizo necesaria tal adquisición para verificar la influencia del clima exterior, de los visitantes y del sistema de iluminación. Los sensores han sido colocados, según la metodología microclimática, del siguiente modo:

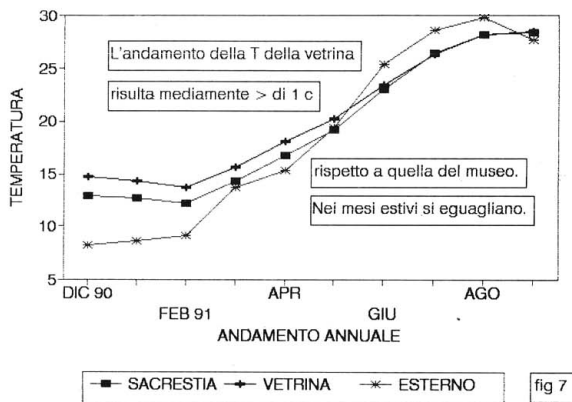
- 1 Exterior de la Capilla Real.
- 2 Interior de la Sacristía de la Capilla Real.
- 1 Interior de la vitrina con presencia de tejidos.

La medición ambiental está todavía en curso y en este texto se hace referencia a los resultados surgidos de la elaboración de los datos adquiridos en el período que va de diciembre del 90 a junio del 91.

De la observación de los datos hasta aquí recogidos se deduce una fenomenología idéntica para todo el período de observación. Expondremos, pues, a título de demostración, el comportamiento anual de la temperatura de la humedad relativa y del vapor, y como ejemplo mensual, el período del 1 al 30 de junio de 1991.

De la observación del comportamiento anual se deduce, en cuanto a la temperatura interior de la Sacristía, (fig. 7), y de la vitrina, una marcha relacionada y guiada por el cambio estacional de la temperatura exterior. De la comparación entre la humedad relativa de la Sacristía, (fig. 8), la de la vitrina y la del exterior se observa una notable disminución de la humedad relativa en el período estival, y también en este caso observamos un comportamiento que acusa los cambios estacionales del clima exterior. El vapor de la Sacristía, (fig. 9), y de la vitrina muestra un aumento hacia los meses más calurosos del año. Este comportamiento, asociado a la disminución de la humedad relativa, puede ser interpretado como un fenómeno de interacción ambiental del contenido de

CAPILLA REAL



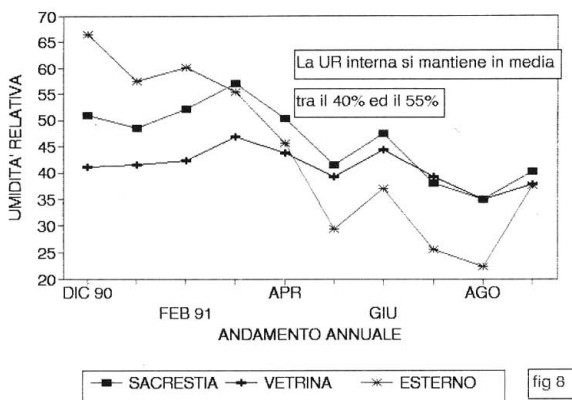
la Sacristía y de la vitrina. En la Sacristía este fenómeno es atenuado por la presencia del corcho y de las telas, que realizan un efecto de tampón respecto a las mesas, mientras que en la vitrina este fenómeno se produce, desgraciadamente, a cargo de los tejidos conservados. De los cambios de temperatura de la Sacristía y de la vitrina se observa cómo éstos son compatibles sobre una base anual y cómo, si nos limitásemos solamente a un estudio del comportamiento anual, perderíamos informaciones que sólo a través de un estudio mensual o diario ha sido puesto en evidencia como veremos a continuación.

Temperatura, Junio de 1991

Sacristía

El comportamiento de la temperatura, observando la fig. 10, está guiado claramente por los períodos de uso del museo. Se nota, en efecto, un aumento de la temperatura en concomitancia con la apertura del museo, en torno a las 10 horas, y a una disminución en torno a las 14 horas que es cuando se produce el cierre. Posteriormente, un nuevo aumento en la apertura posmeridiana, en torno a las 15 horas y un descenso a la hora del cierre, en torno a las 20 horas. La temperatura acusa el flujo de visitantes y el equipo de iluminación presente en la Sacristía. El exterior no influye directamente en cuanto a que su comportamiento es típico del ciclo diario, con un temperatura máxima en la parte central de la jornada como se puede observar si comparamos las figs. 10 y 10b.

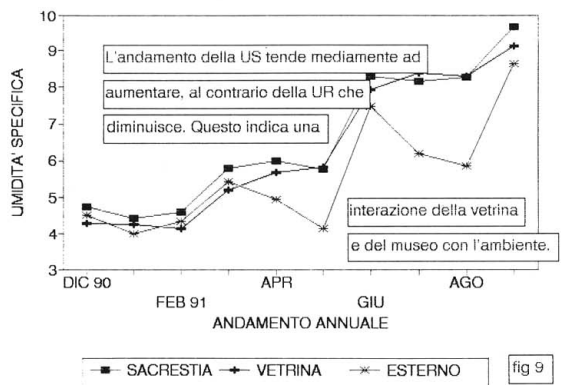
CAPILLA REAL



Vitrina

En la vitrina, fig. 10a, el comportamiento térmico es idéntico, como fenomenología, al de la Sacristía, pero los valores son más extremos. En efecto, se registran hasta 2°C de diferencia entre la vitrina y la Sacristía. Este comportamiento, en este caso concreto, hay que achacarlo a la ineficacia del sistema de iluminación (lámparas de incandescencia) que calientan el ambiente. Ese calentamiento se produce en un intervalo de tiempo muy breve, con un gradiente interno de $dt = 3.4^{\circ}\text{C}$ (22°C a 25.5°C). La rapidez con la que se determina el gradiente y la naturaleza del material conservado (tejidos) determinan una condición de gran estrés para el citado material.

CAPILLA REAL



Humedad específica

Figs. 10, 10a y 10b

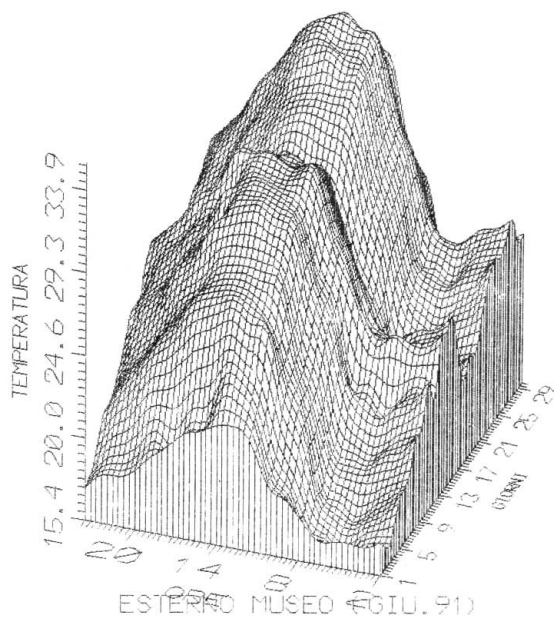
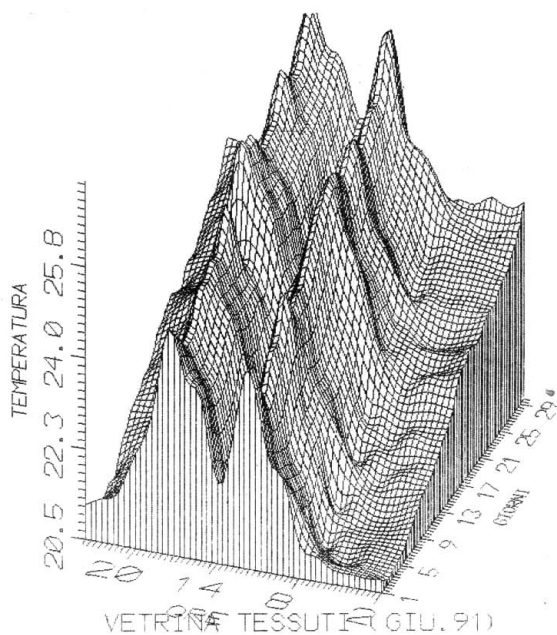
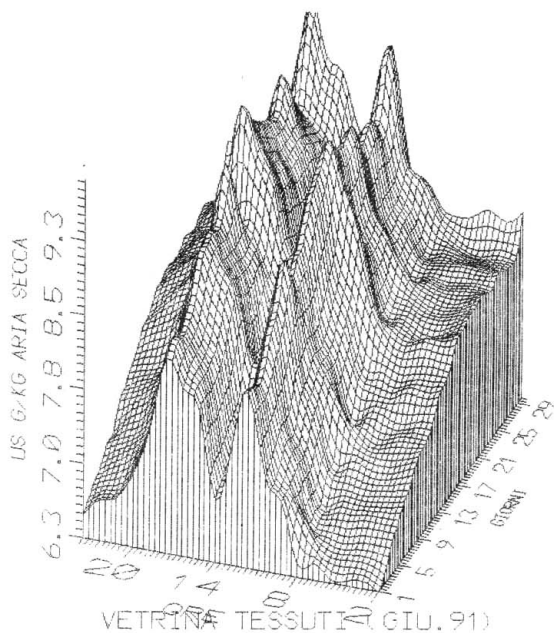
Sacristía

El comportamiento del vapor, fig. 11, está determinado casi por completo, además de por la temperatura, por el flujo de visitantes. Podemos observar que éste aumenta también en concomitancia con los períodos de apertura de la Capilla Real (de 8,5 g/kg a 8.7 g/kg). La cantidad de vapor generado es absorbido en gran parte por las estructuras murarias, por la presencia de una gran cantidad de corcho y por el abundante drapado de la sala.

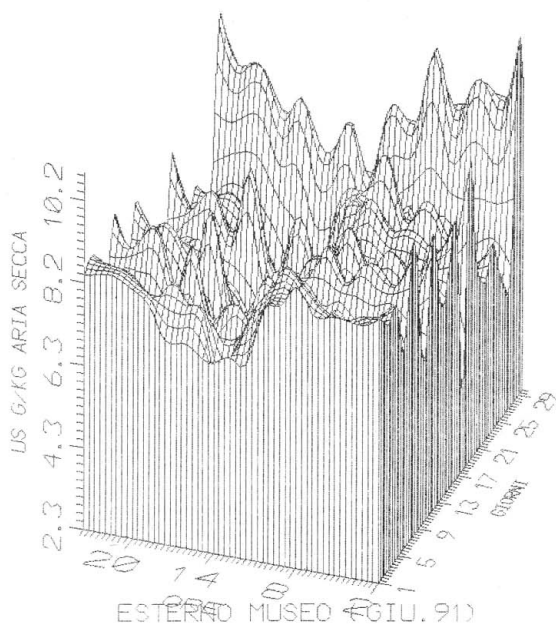
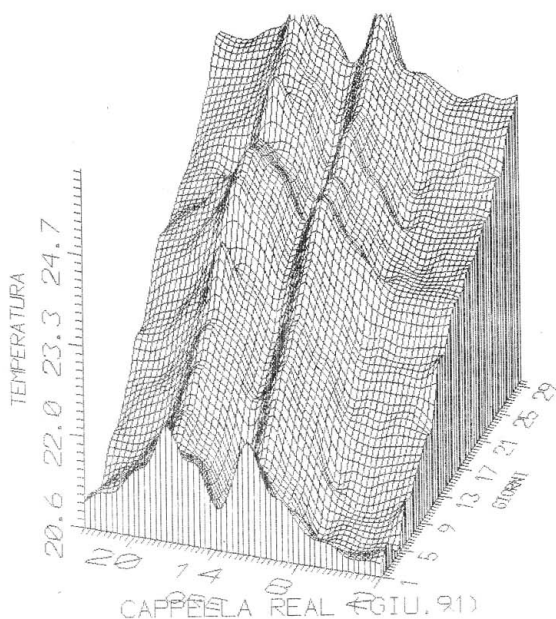
Vitrina

El comportamiento del vapor comporta un riesgo notablemente mayor. Se determina una variación de 2 g/kg en el arco de pocas horas (de 7.5 g/kg a 9.5 g/kg), fig. 11a, y siempre en correspondencia con el encendido de las lámparas de iluminación. También se crea un gradiente de vapor entre la vitrina y la Sacristía. Esta cantidad de vapor está toda a cargo del material conservado, acentuando la problemática ya determinada con el comportamiento de la temperatura.

Observando los comportamientos del interior del museo (Sacristía y vitrina) con el comportamiento exterior (fig. 11b) se observa cómo también el vapor presente en la Capilla Real depende exclusivamente



Figs. 11a, 11b y 11



de una fenomenología interna, resultando en este caso que existe incluso menos vapor en el exterior.

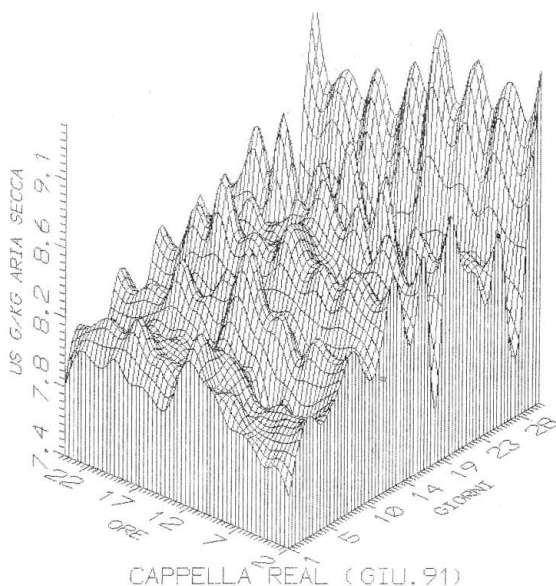
Humedad relativa

Sacristía

La humedad relativa en correspondencia con los aumentos de la temperatura y del vapor disminuye en un 3% (del 49% al 46%) y viceversa (de 46% a 48%), fig. 12. Esto demuestra el hecho de que la cantidad de agua que el ambiente necesita para ponerse en una condición de equilibrio bajo la variación térmica está a cargo de la estructura arquitectónica y, en parte, de su contenido.

Vitrina

En este caso la vitrina se comporta como un sistema cerrado, (fig. 12a) en el que se producen variaciones térmicas y el vapor guía directamente la humedad relativa solo que la cantidad de humedad presente en la vitrina por efecto de una mayor temperatura debería disminuir y, sin embargo, tenemos una humedad relativa del 44,5% con un comportamiento que sigue, como se ha dicho, al vapor. La cantidad de agua intercambiada en la vitrina está totalmetne a cargo de los tejidos conservados en ella. En ese mes los cambios son menores y las variaciones menos significativas, pero esto significa el máximo

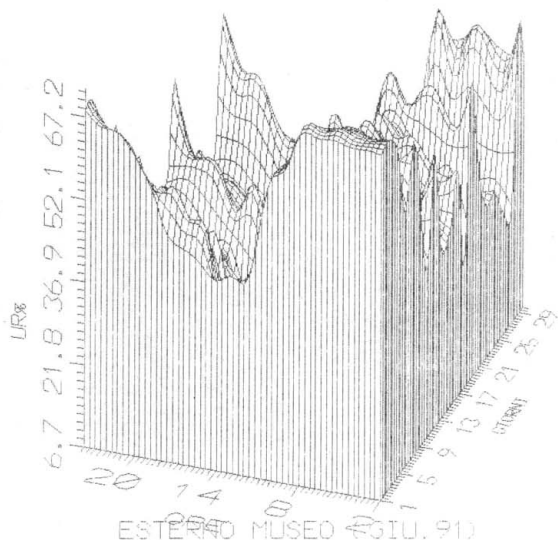
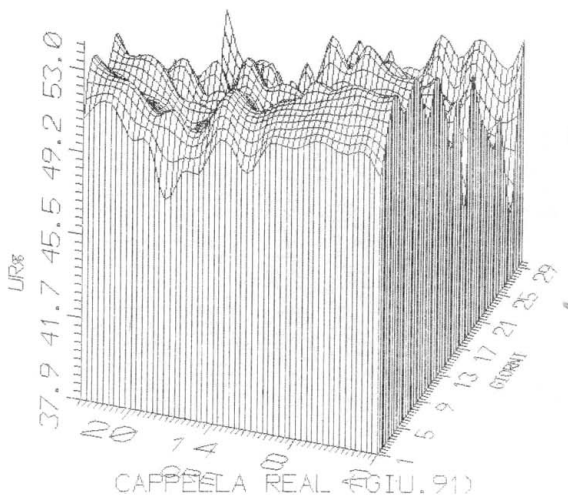
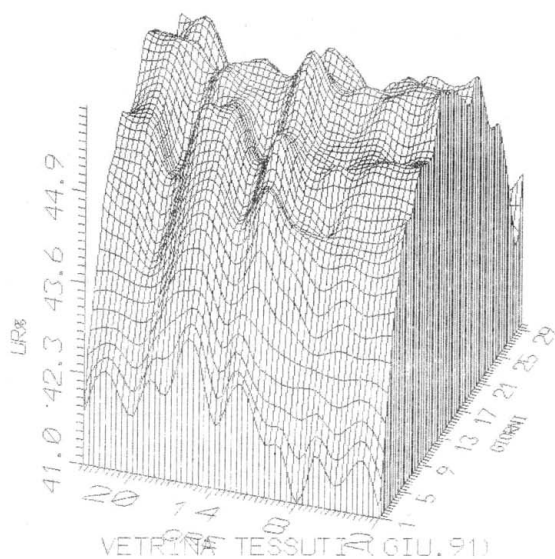


porcentaje de riesgo para los tejidos que están sometidos al estrés de una cantidad de vapor, que por el contrario, ha aumentado notablemente.

El estudio de los gráficos tridimensionales muestra cómo el comportamiento caracterizado por el estudio estadístico del día medio típico, se corresponde con el comportamiento de todo el mes. Se observa por el gráfico de la vitrina cómo la temperatura aumenta respecto a la de la Sacristía y cómo del mismo modo la humedad específica es mayor. Se observa además que la humedad relativa de la vitrina tiene un comportamiento opuesto al de la Sacristía. En presencia de una variación térmica, la humedad relativa de la Sacristía disminuye en correspondencia con un aumento del vapor que indica, por lo tanto, un fenómeno de absorción. En la vitrina, sin embargo, se observa un aumento de la humedad relativa y del vapor creando los presupuestos de la cesión de agua bajo el estrés térmico.

Por último se observa cómo el comportamiento del exterior no influye diariamente, ni con la temperatura ni con el vapor, en el sistema Sacristía-vitrina. En el cálculo de la media mensual para la representación anual, en este caso, se venía a perder la información de las variaciones ligadas a un uso particular de la Capilla Real, dado que los incrementos producidos durante las horas de apertura eran luego atenua-

Figs. 12, 12a y 12b



dos en las restantes horas en las que la Capilla no era visitable.

Esta información ha sido necesaria, sobre todo, para determinar un comportamiento diferenciado en las horas de apertura de la Capilla Real entre el comportamiento ambiental de la vitrina y el de la Sacristía en cuanto a que el estrés térmico producido en la Capilla Real es atenuado por el material tampón y por las dimensiones más vastas del ambiente respecto a la vitrina. Por consiguiente, el volumen del material lúneo es considerablemente menor que el volumen global del ambiente mientras no sucede lo mismo en la vitrina en la cual es el tejido el que se hace cargo de los intercambios que se producen en su interior.

El problema que se presenta en la Sacristía de la Capilla Real puede ser subdividido en dos motivos de preocupación:

- 1) la gran afluencia de visitantes;
- 2) el comportamiento térmico del sistema de iluminación de la vitrina.

Teniendo que proceder a la estructuración definitiva de la Sacristía como exposición museística hará falta que la intervención esté basada en un estudio del tipo de material tampón que hay que insertar en lugar de las telas y del corcho que deberá ser eliminado.

Este material es de fundamental importancia para

permitir a los cuadros no hacerse cargo "ellos mismos" de las variaciones higrométricas que se producen. A tal fin se hará necesario un estudio adecuado de la iluminación de la Sacristía tanto como contribución energética como en su eficacia para la exposición. Además, reviste una fundamental importancia la limitación de la afluencia del público a la Sacristía. Habrá que estudiar un recorrido alternativo de visita de toda la Capilla Real y un control tal que no puedan encontrarse en la sala de la Sacristía, contemporáneamente, más de cincuenta personas.

Conclusiones

Con lo obtenido en las dos experiencias aquí referidas se ha creado un banco de datos que representa una base óptima para verificar sí, con el paso del tiempo, los fenómenos estudiados presenta variaciones perjudiciales para las obras. En general, retomando el tema del riesgo ambiental, podemos decir que, midiendo continuamente los parámetros físicos, elaborándolos y poniéndolos en relación con otros que poco a poco se han ido elaborando y memorizando, se obtienen esas relaciones e interconexiones determinantes a la hora de valorar los índices necesarios para completar las informaciones indispensables para la formulación de la carta temática del riesgo atmosférico.