

**LA DIGITALIZACIÓN AL SERVICIO DE LA CONSERVACIÓN: DIAGNÓSTICO, PROPUESTA Y EJECUCIÓN DE ACCIONES; Y VERIFICACIÓN CON EL APOYO DE LA INTELIGENCIA DEL DATO**

*DIGITISATION AT THE SERVICE OF CONSERVATION: DIAGNOSIS, PROPOSAL AND EXECUTION OF ACTIONS, AND VERIFICATION WITH THE SUPPORT OF DATA INTELLIGENCE*

**Joaquín García<sup>a</sup>, Jesús Castillo<sup>a</sup> y Mario Tena<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>Fundación Santa María la Real del Patrimonio Histórico, Monasterio Santa María la Real, 34800, Aguilar de Campo. [j.garcia@santamarialareal.org](mailto:j.garcia@santamarialareal.org); [j.castillo@santamarialareal.org](mailto:j.castillo@santamarialareal.org); [m.tena@santamarialareal.org](mailto:m.tena@santamarialareal.org)

How to cite: Joaquín García, Jesús Castillo y Mario Tena. 2022. La digitalización al servicio de la conservación: diagnóstico; propuesta y ejecución de acciones; y verificación con el apoyo de la inteligencia del dato. En libro de actas: II Simposio de Patrimonio Cultural ICOMOS España. Cartagena, 17 - 19 de noviembre de 2022. <https://doi.org/10.4995/icomos2022.2022.15372>

---

**Resumen**

*La digitalización es uno de los procesos modernos de interacción con la realidad, que resulta imprescindible implantar en, prácticamente, cualquier ámbito de la sociedad. En entornos como la gestión sanitaria, tributaria, de administración de grandes empresas, ocio, y tantos otros, es un mecanismo de progreso y eficiencia absolutamente incontestable.*

*El mundo del patrimonio no es ajeno a esta realidad y, aunque más tímidamente, lo digital ha llegado para quedarse también aquí. Es sobre todo en las cuestiones relativas a registros de la realidad material, a través de escaneados laser 3D, fotogrametría, repositorios fotográficos digitales, digitalización documental, etc., donde la aplicación de la tecnología es más evidente.*

*Sin embargo, hay otros campos donde esta digitalización es posible e incluso más necesaria, si cabe. La instalación de sistemas de monitorización que a través de sensórica recopilen información de parámetros de humedad, temperatura, luminosidad y estabilidad, fundamentalmente, se convierte en un activo valioso, tanto para la elaboración del diagnóstico como para el seguimiento posterior de la eficacia de las medidas implantadas en las actuaciones de rehabilitación.*

*La intervención en las cubiertas de la Iglesia de San Martín de Castañeda, la instalación de sensórica ayudó a la elaboración de un diagnóstico que condujo a la propuesta y ejecución de unas acciones de restauración. Gracias al mantenimiento del sistema de monitorización en el tiempo, hoy es posible comprobar la eficacia de las medidas implementadas a través de la comparación de los datos, antes, durante y después de la restauración.*

*La continuidad en la toma de registros nos permite disponer de series largas de datos que nos lleven al establecimiento de la "huella termohigrométrica" del edificio, para poder evaluar variaciones o anomalías en el comportamiento.*

**Palabras clave:** Digitalización, monitorización, diagnóstico, interpretación, rehabilitación.

---

**Abstract**

*Digitization is one of the modern processes of interaction with reality, which must be implemented in basically every area. In environments such as health management, taxes, business administration, leisure, and many others, it is an absolutely incontestable mechanism of progress and efficiency.*

*The heritage world is no stranger to this reality and, although more timidly, digitization has come to stay here too. It is above all related to documenting reality, through 3D laser scanning, photogrammetry, digital photographic repositories, document digitization, etc.; where applied technologies are most evident.*

*However, there are other fields where this digitization can be used and it is even more necessary, if possible. The installation of monitoring systems that, through sensors, collect humidity, temperature, luminosity and stability parameters, becomes a valuable asset, both for diagnosis and for the subsequent monitoring of the implemented measures effectiveness in rehabilitation actions.*

*During the work carried out on the roofs of San Martín de Castañeda Church, the installation of sensors helped to prepare a diagnosis that led to the proposal and execution of restoration actions. Thanks to the maintenance of the monitoring system over time, today it is possible to check the implemented measures effectiveness by comparing the data before, during and after the restoration.*

*Record documentation allows us to obtain long series of data. With this the "thermo-hygrometric footprint" of the building can be established, in order to be able to evaluate variations or anomalies in behavior.*

**Keywords:** *Digitization, monitoring, diagnosis, interpretation, rehabilitation.*

## 1. Introducción

La iglesia de San Martín de Castañeda está situada en el municipio de Galende perteneciente a la localidad de Galende, en Zamora. Está enclavada en un paraje privilegiado, en el entorno del lago de Sanabria, incluida dentro del conjunto monumental del monasterio de San Martín de Castañeda, de gran valor histórico y artístico (FSMR, 2002).

El Monasterio de esta localidad fue uno de los mayores complejos religiosos de la provincia de Zamora hasta el s. XIX. Tras la desamortización de Mendizábal desapareció parte de su conjunto histórico, la abadía de la fachada sur, existiendo actualmente dos espacios de gran interés: por un lado, la iglesia y por otro, la parte que albergaba el Centro de Interpretación del Parque Natural del Lago de Sanabria.

De origen desconocido, se sabe que fue reconstruido en el 921 por monjes mozárabes procedentes de Córdoba, conservándose el epígrafe fundacional. Posteriormente, en el siglo XII, sería reformado por iniciativa de Alfonso VII que ha llegado hasta nuestros días, y a la que pertenece la iglesia, exceptuada la parte destruida en el siglo XIX.

La iglesia es un edificio con grandes pilares cuadrados estructurada en tres naves. San Martín de Tours es el patrono y su imagen se conserva en el interior de este templo, pero además en el friso de la puerta, se encuentra esculpida en piedra otra imagen del santo a caballo, cortando la capa con su espada para darle la mitad a un pobre. Otra imagen de gran valor es el de la Virgen de la Peregrina, patrona del pueblo y cuya fiesta se celebra el primer domingo de septiembre. Estas imágenes, junto con el retablo renacentista y la sillería del coro, forman un conjunto de gran valor.

En un momento de la historia reciente del monumento los usuarios comienzan a informar de que, en el interior de la iglesia, bajo el crucero, “llovía dentro” en determinados períodos, especialmente mayo y junio. Además de algunas goteras evidentes, con origen en deterioros puntuales de la cubierta, se hacía necesario un definir un protocolo de investigación fundamentado un conocimiento profundo de la historia y materialidad del conjunto y en la obtención de datos fiables, de series temporales lo suficientemente largas como para afinar un diagnóstico y proponer acciones correctivas. Esta recopilación de información debía extenderse al momento de la intervención y, por supuesto, continuar aportando datos para verificar la corrección de las acciones acometidas.

En el artículo se mostrará todo este proceso referido a las cubiertas de la nave central, aunque la intervención no se limitó a esta zona, sino que también se intervino sobre las naves laterales. A fecha de la redacción de este artículo, los resultados son aún parciales, pero bastante evidentes en la nave central, necesitándose un periodo mayor de tiempo para la verificación en las naves laterales.

## 2. Desarrollo

Todo el proceso tiene su origen en la necesidad de identificar el origen de los daños provocados por la humedad en el edificio. La manifestación más significativa era la lluvia interior reportada por los usuarios y algunas manchas de humedad y colonizaciones vegetales manifestadas de forma evidente en el interior. Todos esto parecía sugerir, además de problemas de filtraciones en cubierta, la posibilidad de la formación de condensaciones en el trasdós de la bóveda del crucero, aunque se desconocía la configuración constructiva precisa de este sistema constructivo.

Todo el proceso se articuló según el siguiente esquema:

### CONOCIMIENTO-DIAGNÓSTICO-INTERVENCIÓN-VERIFICACIÓN

Ninguno de estos planteamientos resulta novedoso en sí mismo (IPCE, 2011), puesto que todos ellos se vienen aplicando, en mayor o menor medida, en intervenciones en patrimonio desde que existe una teoría de restauración específica. Lo que queremos plantear aquí es el hecho de la aportación de la digitalización en lo que respecta a la obtención de datos relevantes y su interpretación a lo largo de todo el proceso y, especialmente, en la verificación de la adecuación de las medidas correctoras ejecutadas.

### 2.1 Conocimiento

El exhaustivo conocimiento material del edificio se realizó a través de:

- La consulta de la documentación histórica existente.
- Diversas visitas realizadas al monumento.
- Un programa de catas constructivas diseñado específicamente para dar respuesta a los interrogantes suscitados.
- Elaboración de un “Estudio petrológico de la iglesia de San Martín de Castañeda, Zamora”, redactado como documentación base para la intervención de restauración de las cubiertas de los ábsides, a cargo de Pedro Pablo Pérez (Pérez, 2011).
- Además, y en este punto es donde conectamos la intervención con la digitalización, en la interpretación de un conjunto de datos de humedad y temperaturas obtenidos de un sistema de monitorización instalado al efecto.

Como resultado de este programa de conocimiento se obtuvo una caracterización precisa que permitió una interpretación de los datos que condujo a un diagnóstico y a la consiguiente propuesta de intervención.

Se omitirá en este artículo la parte relativa a la caracterización histórica, aunque se debe hacer mención a que el conocimiento de la evolución constructiva del conjunto resultó fundamental para contextualizar muchas de las situaciones estudiadas.

#### 2.1.1. Caracterización física

La nave central y crucero tenían como cubrición pizarra recibida con mortero de cal y sin anclajes aparentes, presumiblemente clavadas. La cubierta se compone de 4 vertientes que derraman el agua que recogen sobre las cubiertas inferiores de las naves laterales a norte y sur, y las cubiertas de los absidiolos y la sacristía al este. En el encuentro de cada una de las vertientes se articula la solución constructiva con un caballete, este a su vez es rematado con teja de hormigón gris recibida con mortero de cemento. La singularidad de la cubierta reside en dicho encuentro entre las cumbres de la nave principal y del crucero, dado que están situadas en diferentes planos en altura, siendo más alta la del crucero, se construye evitando las limas que se formarían en un encuentro constructivo al uso y resolviéndolo mediante una serie de superficies alabeadas que le confieren a este tejado un aspecto similar a una cubierta tipo pagoda “Figura 1”.

La solución constructiva del tablero, no visible en el momento del primer diagnóstico, se apuntaba en el estudio petrológico como una propuesta de intervención realizada entre 1962 y 1963 de Menéndez Pidal y Pons Sorolla: “En cuanto a la cubierta de la nave mayor, al no haber aparecido restos originales, se colocarían tableros de rasilla impermeabilizados sobre tabiquillos de ladrillo hueco doble, para repartir la carga en las bóvedas, y se techaría con pizarra del país clavada sobre la madera y recibida con mortero de cal.”

Tras la ejecución de unas catas constructivas se pudo comprobar que dicha descripción era correcta salvo la mención a la madera, pues el clavado de las lajas de pizarra se realizó directamente sobre una torta de mortero de espesor variable. Se pudo comprobar, además que tanto la torta de mortero, como el ladrillo del tablero se encontraban completamente humedecidos.



**Fig. 1** Vista de la nave central y el crucero desde la espadaña



**Fig. 2** Pérdida de material. Este punto en concreto se manifiesta al interior en forma de gotera

El estado de esta cubierta era irregular, con piezas del caballete movidas, algunos de sus morteros disgregados y esparcidos por los planos inferiores, con numerosas piezas sueltas o movidas y diversas colonizaciones vegetales entre las juntas. Especialmente deteriorado se encontraba el faldón este del brazo sur del crucero, donde la pérdida de piezas de pizarra había dejado al descubierto al tablero de formación de pendiente y era un punto de entrada de agua evidente que se estaba manifestando al interior el edificio en forma de gotera y de mancha de humedad y verdín “Figura 2”.

La cubierta presentaba numerosas reparaciones menores, con aportación de material nuevo, sellados de silicona ineficientes y restos de elementos metálicos, aparentemente planchas de zinc como intento de atajar de forma económica posibles filtraciones. Además, en el faldón norte de la nave se apreciaban evidentes irregularidades en el plano, con presencia de depresiones y elevaciones que apuntaban a un deficiente estado del soporte.

En la cubierta del crucero existía además un elemento de ventilación, colocado de forma experimental durante una intervención del año 1986 (Pérez, 2011). Era evidente que ya entonces se había detectado un problema de ventilación en el espacio bajocubierta, aunque no se había cuantificado su magnitud excepto por el extraño fenómeno de la lluvia interior.

Este elemento pétreo se ha revelado ineficaz puesto que los resultados de las mediciones realizadas hasta el momento con el sistema de monitorización instalado y que se describirá en el apartado correspondiente, revelan una humedad relativa del 100% durante amplios períodos de tiempo en el espacio entre el tablero de la cubierta y las bóvedas. De hecho, el goteo durante determinados periodos de tiempo ha seguido produciéndose de manera regular durante los años siguientes a la intervención.

### 2.1.2. Caracterización termohigrométrica

Resultaba crucial para el planteamiento de las acciones a realizar en la intervención en las cubiertas de la iglesia del Monasterio de San Martín de Castañeda, comprender el funcionamiento del sistema constructivo de la cubierta a efectos de su comportamiento frente a la humedad en sus diferentes presentaciones.

Se partió de un hecho cierto y es que, en los meses de final de la primavera y comienzo del verano, hay testimonios que hablaban de que llovía en el interior del edificio, especialmente en el crucero. Otros testigos indirectos eran las evidentes manchas de humedad, o de colonizaciones biológicas que nos hablaban de un elevado contenido de humedad en el espacio bajocubierta además de en otros puntos del edificio, especialmente la esquina noroeste del crucero.

Para caracterizar el comportamiento higrotérmico del bajocubierta se planteó la ampliación de la monitorización instalada con motivo de una intervención anterior en los ábsides y la sacristía, realizada con un sistema digital de conservación preventiva. Este sistema se enmarca dentro del principio de conservación preventiva, mediante el cual se pretende



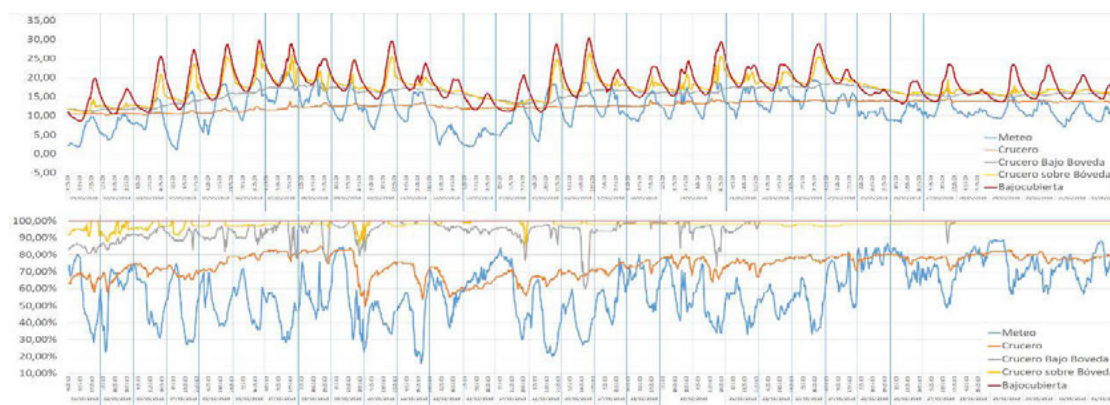
La gráfica de temperatura interior también muestra estas oscilaciones, aunque no tan acusadas como las dos anteriores. Los picos de temperatura de la gráfica de la estación meteorológica respecto de los de los sensores del bajocubierta y del trasdós de la bóveda están ligeramente desplazados por el efecto de la inercia de los materiales.

Resultaría excesivamente prolijo detallar todas y cada una de las circunstancias particulares que modifican los valores de humedad y temperatura en función de la insolación, la lluvia, el viento, etc. Sin embargo, sí que se pueden apuntar determinadas circunstancias que pueden resultar significativas.

En el mes de febrero y marzo hay algunas fechas en las que las gráficas de la temperatura del bajocubierta y la de la estación meteorológica se aproximan, llegando a coincidir y resultando, además, en episodios de condensación en el trasdós de las bóvedas. Estos momentos coinciden con situaciones de bajas temperaturas exteriores y lluvias, con la consiguiente ausencia de radiación solar, que también provocan condensaciones.

A la hora de interpretar las gráficas y a los efectos que nos ocupan, nos interesan especialmente aquellos momentos en los que la línea amarilla correspondiente al sensor del trasdós de la bóveda y la gris, correspondiente al del intradós, se aproximan a la línea de abscisas del 100%, puesto que significa que se están produciendo condensaciones.

Esta circunstancia se produce de forma periódica en el sensor del trasdós de la bóveda y de forma casi constante a partir del mes de mayo en el sensor del intradós.



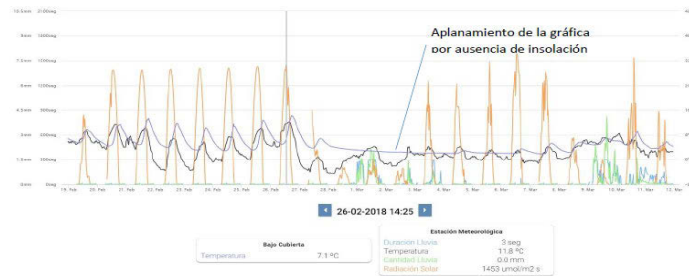
**Fig. 4 Gráficas de humedad y temperatura del mes de mayo**

## 2.2 Diagnóstico

Con toda esta información se realizó un diagnóstico completo de las diferentes fuentes de humedad en el edificio, que en el presente artículo se limita a las aparecidas en el crucero.

Los grandes incrementos de temperatura del espacio bajocubierta se explican por la presencia de la cubierta de pizarra. Al tratarse de un material oscuro y con una cierta inercia térmica, se calienta de forma considerable, transmitiendo este calor al tablero de rasilla y, posteriormente, al espacio bajocubierta (después se expondrán los efectos de este calentamiento en las condiciones de humedad) que llega a alcanzar en el mes de mayo temperaturas del orden de los 30°C, 10°C más que la máxima ambiental.

Los tramos en los que la curva se aplanan se deben a la ausencia de radiación solar por presencia de nubes, hecho que se comprueba en las gráficas y que coincide con la aparición de precipitaciones. En la “Figura 5” se aporta la gráfica del mes de febrero en que se puede comprobar esta circunstancia además de otros factores por los que la curva puede reducir sus picos y valles.



**Fig. 5 Detalle de la gráfica con aplanamiento de la gráfica**

En el sensor del intradós de la bóveda, debido a la inercia de la bóveda la curva se vuelve mucho más tendida, reflejando aproximadamente los valores promedio de los registrados en el bajocubierta. En aquellos puntos en los que la gráfica más serrada se ha aplanado llega casi a coincidir en forma con la del sensor del extradós.

El sensor ambiental del crucero se mantiene más o menos constante debido a la inercia térmica global del monumento y se encuentra en el mes de mayo en el entorno de los 12°C.

La gráfica de la humedad relativa resulta algo más difícil de interpretar, debido a un comportamiento más volátil vinculado a diferentes factores que pueden hacerla variar, puesto que depende de la humedad relativa exterior, de la aportación de agua por diversas fuentes de humedad, (el tablero de cubierta como se ha dicho, goteras, presencia de personas), episodios de ventilación, acción del viento, episodios de lluvia y todos ellos interrelacionados entre sí.

Sin embargo, hay un fenómeno que se observa de manera sistemática en el edificio. Los períodos de calentamiento intenso del aire del espacio bajocubierta debido a la insolación de la pizarra de cobertura provocan que la cantidad de agua que puede admitir ese aire sea mucho mayor. La fuente de aportación de agua es, en este caso, el tablero, que está permanentemente saturado por los motivos ya descritos. Esta agua ambiental de la cámara, cuando el aire se enfría, produce episodios de saturación que se observan perfectamente en los datos recopilados en los que el sensor del trasdós de las bóvedas registra valores de humedad relativa del 100%, que delata que el agua está condensando sobre esta superficie.

Estos episodios son perfectamente rastreables en las gráficas presentadas. A nivel general, se observa que la gráfica de humedad del sensor del trasdós va alcanzando valores de saturación, más frecuentemente, desde los meses invernales hasta la primavera, en que se encuentra estabilizado en el entorno del 98% de humedad relativa.

De esta forma, las condiciones ambientales que reflejaban situaciones constructivas inadecuadas y que se planteó necesario precisar corregir con la propuesta de restauración fueron:

- Situación de permanente estado de saturación del espacio bajocubierta.
- Condensaciones por excesivo calentamiento del espacio bajocubierta debido a la configuración constructiva del material de cobertura. Estas condensaciones, por su importancia durante el mes de mayo, provocan la saturación de la bóveda, llegando a manifestarse por el intradós.
- Condensaciones en momentos lluviosos y fríos de los meses de invierno con la temperatura del interior del edificio más baja que la del exterior. Estas condensaciones se producen en momentos puntuales y eran de escasa importancia.

### 2.3 Propuesta de intervención

La premisa inicial era que no se podía modificar ni la volumetría ni el aspecto exterior de la cubierta, con una imagen consolidada a lo largo de la historia, sin embargo, había que modificar la solución constructiva para que cumpliera los siguientes objetivos:

- Control de la temperatura del espacio bajocubierta
- Control del contenido de humedad del espacio bajocubierta.
- Control de la temperatura del ambiente interior del edificio

- Evitar el humedecimiento de la bóveda en presencia de humedades ocasionales.

Para lograr alcanzar los objetivos se propuso:

- Teja de pizarra de 1.5 cm recibida sobre rastreles para permitir la ventilación del elemento, aislante multicapa reflexivo de 16mm., para mitigar el efecto de la radiación de la pizarra, lámina impermeabilizante drenante, 8 cm de poliestireno expandido para evitar el calentamiento excesivo del espacio bajocubierta, una capa de mortero de nivelación de 2 cm de espesor y un rasillón de 3.5 cm para la formación de pendiente.
- Para evitar la concentración de humedad del bajocubierta se propone la ventilación a través de los aleros y con perforaciones en los hastiales de las fachadas este y oeste.
- Además, el proyecto proponía la ejecución de una serie de perforaciones en las bóvedas para comunicar el ambiente de la nave con el del bajocubierta y ayudar a equilibra más aún el contenido de humedad.

Con esta propuesta de restauración se realizó una comprobación teórica del funcionamiento de la solución propuesta, que no es objeto del presente artículo. Según este modelo, se producirían leves episodios de condensación en las bóvedas en el mes de febrero, que se propuso solucionar con la colocación de una lámina impermeabilizante transpirable sobre el trasdós de las bóvedas.

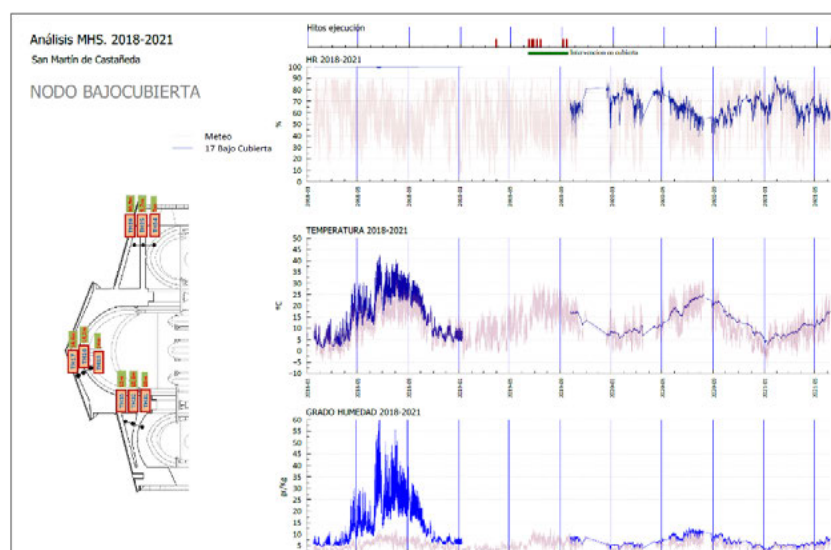
#### 2.4 Ejecución de las obras y verificación de las acciones realizadas

Las obras comienzan en junio de 2019, y en la cubierta se extienden hasta mayo de 2020. Durante el período de la ejecución no se registran datos procedentes del sistema de monitorización.

Sin embargo, sí se dispone de datos de un año posterior a la conclusión de las cubiertas. De la simple observación de la gráfica, es posible apreciar que el cambio en el comportamiento de la cubierta ha sido significativo, atenuándose las fluctuaciones de temperatura en el sensor del trasdós de la bóveda y apreciándose valores de humedad significativamente menores que en el período de toma de datos y diagnóstico.

Se observa con toda claridad que la gráfica se ha normalizado, “Figura 6”, no existiendo las grandes variaciones presentes con la anterior solución constructiva e incluso la humedad en el bajocubierta, aun siendo elevada, se encuentra bastante por debajo de la saturación.

Dadas las dimensiones requeridas para el artículo, solo presentamos los resultados más evidentes, que son los de la nave central y el crucero, pero semejantes comportamientos se aprecian también en la nave sur, aunque algo más atenuados. La nave norte, de configuración constructiva diferente deberá ser objeto de un análisis independiente, aunque aplicando la misma metodología.



**Fig. 6 Gráfica del cruceo con comparación de momentos previos y posteriores a la intervención**



### 3. Conclusiones

Los resultados expuestos en el artículo muestran que nos encontramos ante un caso paradigmático, en el que la digitalización juega un papel fundamental, que justifica las ventajas de esta metodología de intervención y control posterior para la intervención y conservación monumental.

Esta digitalización, en forma de datos, ha contribuido de manera definitiva a aportar información en las fases de diagnóstico y verificación de las intervenciones realizadas. Cabe destacar, como se ha demostrado, que además de la toma de datos, es igualmente relevante el procesamiento y la aplicación de conocimiento experto para su interpretación. Solo una aplicación experta de estas soluciones puede conducir a unos resultados con impacto para la mejor conservación de los bienes patrimoniales.

Hasta el momento, estamos en condiciones de poder afirmar que la solución constructiva está funcionando correctamente, con lo que el diagnóstico se puede considerar acertado y la solución propuesta adecuada.

Sin embargo, entendemos que el proceso no termina aquí, pues la obtención de series más largas de datos nos permitirá disponer de información que contribuya a:

- Comprender mejor la evolución de la solución constructiva realizada,
- planificar su conservación preventiva y mantenimiento,
- realizar modelos predictivos vinculados al cambio climático y así adaptar las acciones preventivas,
- mejorar el conocimiento del edificio y determinar su “huella termohigrométrica”, que establezca el patrón de comportamiento normal del monumento y así ser capaces de identificar anomalías dentro de esa normalidad.

### Referencias

Fundación Santa María la Real del Patrimonio Histórico, FSMR (2002). *Enciclopedia del Románico en Zamora*. Santander.

Instituto de Patrimonio Cultural de España, IPCE (2011). *Plan Nacional de Conservación Preventiva*. Subdirección General de Protección del Patrimonio Histórico del Ministerio de Cultura, Madrid.

Pérez, P. P. (2011). *Estudio Petrológico de la Iglesia de San Martín de Castañeda, Zamora*. Junta de Castilla y León, Dirección General de Patrimonio.