

CÓDIGO 1.7.12

INTEGRACIÓN DE TÉCNICAS METROLÓGICAS Y TERMOGRÁFICAS PARA EL SEGUIMIENTO Y MEDICIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL MOVIMIENTO DEL LIENZO SUR DE LA NAVE DEL CRUCERO DE LA IGLESIA DEL ANTIGUO CONVENTO DE SAN LUIS EN SAN VICENTE DE LA BARQUERA (CANTABRIA)

Bayarri Cayón, Vicente¹; Castillo López, Elena²; García-Moncó, José Manuel³ y Calonge Diez, Jorge³

1: GIM Geomatics S.L. C/ Poeta José Luís Hidalgo nº5 (con frente a C/ Jesús Cancio). 39300 Torrelavega – Cantabria.

e-mail: vicente.bayarri@gim-geomatics.com, web: <http://www.pagweb.com>

2: Área de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria. Avda. Los Castros s/n, 39005, Santander

e-mail: castille@unican.es

3: J.G.M. Ingenieros S.L.P. C/ Catalina Bárcena, 1A, 1º A, Santander - Cantabria

PALABRAS CLAVE: geomática, monitorización, patrimonio, láser escáner, control de cambios

RESUMEN

El trabajo que se presenta tenía como objetivo la búsqueda de una solución ingenieril que garantizara la consolidación tanto de la cimentación como de los contrafuertes y la fábrica de mampostería del lienzo de la fachada sur del Convento de San Luis, situado en el norte de la península ibérica, más concretamente en San Vicente de la Barquera (España), utilizando para ello las técnicas más apropiadas que puedan asegurar el buen comportamiento futuro de la misma.

En este artículo se centra en la integración de varias técnicas geomáticas con el objetivo de controlar geoméricamente la buena ejecución de la solución propuesta y, lo que es más importante, la integración en dicho análisis de una variable que no puede pasar desapercibida como es la radiación solar incidente sobre el lienzo sur de la nave del crucero de la Iglesia del antiguo convento de San Luis.

1. INTRODUCCIÓN

El antiguo Convento de San Luis está datado en 1454, según documentación existente; si bien éste fue remodelado entre finales del siglo XV y principio del XVI. Actualmente de su estructura original se mantienen las cubiertas abovedadas del ábside, coro y las 2 fachadas Norte y Sur. El resto de la cubierta de la nave se desplomó hace ya muchos años.

A pesar de la desaparición de la cubierta con sus arcos y material de cobertura, los restos que quedan se conservan en bastante buen estado. El desplome de los arcos de la nave del crucero, eliminó de golpe los empujes de los mismos sobre las fachadas y contrafuertes, pero dejó un lienzo de aproximadamente 12m. de altura, sin posibilidad de contrarresto tanto de las acciones horizontales como el viento, como de los giros que pudiese tomar como consecuencia de asientos del terreno.

La patología fundamental observada en esta construcción es el desplome hacia el interior del crucero de la fachada Sur, sobre todo a la altura del contrafuerte más cercano al coro.



Figura 1: Fachada del convento de San Luis y estabilizadores.

2. SOLUCIONES PLANTEADAS

2.1 Solución constructiva

Las obras acometidas incluyeron tareas relacionadas con el terreno, los contrafuertes y la estabilización provisional de la fachada; siguiendo la siguiente secuencia:

- A) ejecución del micropilotaje de apoyo de los estabilizadores provisionales de la fachada;
- B) instalación de los elementos de estabilización;
- C) realización de inyecciones de consolidación bajo los zócalos de la cimentación de la fachada Sur;
- D) consolidación de los contrafuertes mediante la inyección en su interior de micro-cementos a través de tuberías de polietileno introducidas en taladros;
- E) y ejecución de los anclajes pasivos de los contrafuertes a la roca.

2.2 Solución tecnológica

Con el fin de controlar geoméricamente la solución adoptada y su proceso constructivo se elaboró una red de auscultación topogeodésica tradicional a la que se integraban observaciones de datos de láser escáner 3D. Dicha red se materializó mediante hitos tipo *fenos* y fue observada utilizando una estación topográfica (ETT), con un doble objetivo, referenciar el resto de las observaciones y controlar el movimiento entre fenos. La integración de datos provenientes de láser escáner, permitió tener un control exhaustivo de los movimientos del lienzo.

Se realizaron 18 campañas, unas de ellas en horario matinal (8:00) y otras en vespertino (13:30), entre febrero y junio de 2012. Tras varias campañas de auscultación, se apreciaron movimientos caóticos entre campañas y cierta dependencia entre observables en función del horario en que se realizaban las mismas.

Dado que el lienzo está a la intemperie, se ve expuesto a un calentamiento como consecuencia del sol a lo largo del día a ambos lados del paramento, lo que conlleva un movimiento del mismo. Dicho parámetro (temperatura del lienzo) inicialmente no fue tenido en cuenta, pero las observaciones realizadas dejaron entrever que su influencia no era despreciable.

Por tanto, el presente artículo se centra en una nueva metodología y los resultados obtenidos con la misma utilizando la integración de datos tradicionales microgeodésicos con Láser escáner 3D y termografía en la auscultación del movimiento del lienzo a lo largo de la obra, tanto para la fase constructiva como para su posterior control.

El método, además de ofrecer un control geométrico preciso, permite llegar a predecir y realizar simulaciones de las posiciones de desplome en función de la temperatura que cogen las caras del lienzo.

3. GEOMETRÍA

3.1 Fiabilidades

Se pretende controlar entre campañas el movimiento del paramento de un muro. El objetivo es alcanzar una fiabilidad global de 3 mm. Para lograrlo, se ha optado por un método que combina la materialización de una red local utilizando Estación Topográfica Total, para fijar el marco de referencia, y el escaneado mediante láser escáner 3D, para la digitalización masiva de los paramentos del muro.

En la campaña topográfica se controlaron los valores de temperatura, presión y humedad, que podrían afectar al factor de escala del siguiente modo:

- TEMPERATURA: Variación de $10^{\circ}\text{C} = 9.9 \text{ ppm}$
- PRESIÓN: Variación de $30 \text{ mbar} = 8.4 \text{ ppm}$
- HUMEDAD: Variación de $0\text{-}100\% = 4 \text{ ppm}$

Se empleó una estación topográfica total con una precisión angular de $2''$, una fiabilidad en distancia igual a $1\text{mm} + 1\text{ppm}$ a prisma, compensador para corregir los ángulos Hz y V de la falta de verticalidad del equipo. Conocidas las características, se optó por ajustar una red trilaterada, pues es mayor la fiabilidad en distancia que en ángulo y realizar 6 series de Bessel a un miniprisma de precisión.

Las bases fueron niveladas con un nivel digital, que permitió cierres de los anillos mejores a 1 mm.

El error de radiación de las dianas necesarias para la georreferenciación de los escaneos se estima en 1,5 mm; dicho valor se empleará como fiabilidad de los puntos de apoyo en el ajuste en bloque de los escaneos.

3.2 Red local o microgeodésica

En primer lugar se decidió diseñar, observar y ajustar una red local con el objeto de dotar a los datos del escaneo de un marco de referencia con la fiabilidad necesaria, y por otro de controlar posibles subsidencias del terreno o movimientos laterales de la estructura en conjunto.

La red se materializó, mediante hitos tipo feno o clavos de acero estilo "geo-punt". La red, formada por 6 vértices, se realizó a partir de una trilateración, obtenida del promedio de 6 series de observaciones directas e inversas, para poder alcanzar la fiabilidad necesaria para la monitorización de la estructura, que debía estar en el entorno de 1 mm.

Para el cálculo como red ligada, se decidieron fijar 2 estaciones, una interior y otra exterior que correspondieron a las estaciones con mayor número de observaciones y observables. Las estaciones fijadas corresponden a la 1 y 3 tal y como aparece en la figura posterior.

Por tanto, la red quedó configurada del siguiente modo:

- Número de vértices de la red: 6 (2 fijos)
- Número de ecuaciones totales 11 (0 de condición)

Las correcciones a las variables y las variables compensadas obtenidas fueron:

Variable	Corrección	Variable Compensada	Desviaciones típicas
X(2)	-0.001	109.984	0.001
Y(2)	0.000	108.694	0.001
X(4)	0.000	145.039	0.001
Y(4)	0.001	65.191	0.001
X(5)	-0.001	124.930	0.001
Y(5)	0.001	87.232	0.001
X(6)	-0.001	123.275	0.001
Y(6)	0.001	104.145	0.001

Factor de escala= 1.02 ppm, con una desviación típica de 0.00001

El estimador de la varianza del observable de peso unidad: 0.00578

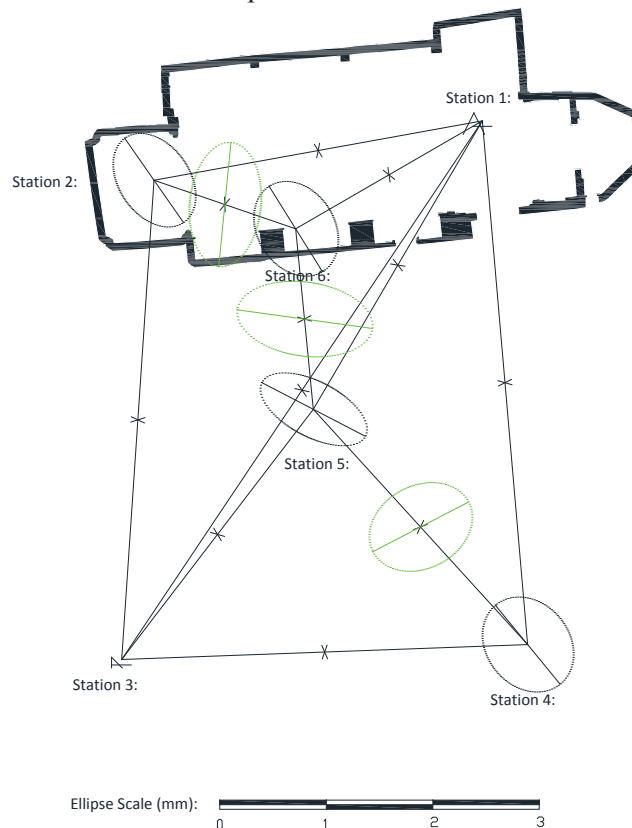


Figura 2: Gráfico de observación y elipses asociadas.

Las elipses de error (Figura 2) son las siguientes:

Elipses de vértice

Vértice	Semieje mayor	Acimut semieje	Semieje menor	Acimut semieje
2	0.0010 mts	161.1632 gra	0.0007 mts	611.632 gra
4	0.0010 mts	156.2265 gra	0.0008 mts	562.265 gra
5	0.0011 mts	130.4047 gra	0.0005 mts	304.047 gra
6	0.0009 mts	164.4022 gra	0.0007 mts	644.022 gra

Elipses relativas

Vértices	Semieje mayor	Acimut semieje	Semieje menor	Acimut semieje	
2	4	0.0016 mts	159.6851 gra	0.0010 mts	59.6851 gra
	5	0.0015 mts	142.2516 gra	0.0009 mts	42.2516 gra
	6	0.0012 mts	6.2529 gra	0.0007 mts	106.2529 gra
4	5	0.0010 mts	69.6303 gra	0.0008 mts	169.6303 gra
	6	0.0013 mts	131.4039 gra	0.0010 mts	31.4039 gra
5	6	0.0013 mts	108.7195 gra	0.0007 mts	8.7195 gra

3.3 Digitalización del muro

En cada campaña se realizaron 9 escaneos en el interior, más 2 en los extremos y 5 en el exterior (ver Figura 3 en la que aparecen los 9 escaneos y la información empleada, cada escaneo de un color). A efectos de la presente comunicación, sólo se ha considerado el muro interior.

En las 18 campañas, el marco de referencia se materializó mediante 9 puntos radiados y las 3 estaciones en el interior del edificio; que fueron empleadas como puntos de apoyo en el ajuste en bloque.

La corrección aplicada al realizar el ajuste en bloque, permitió obtener coordenadas de los puntos de escaneo con una desviación por debajo de 0,5 mm para todos los escaneos en todas las campañas. A modo de prueba, se añadió un constreñimiento de inclinómetro para las tomas, pero dada la configuración espacial de las referencias, no contribuía a mejorar la solución.

Para la digitalización se empleó un láser escáner 3D con las siguientes características:

Rango de Medida	153.49 m
Resolución	17 Bit Rango
Frecuencia de Medida	976 kHz
Error Lineal	<= 2 mm a 25 m y 90% reflexión
Potencia del Láser (CW, media)	20,5 mW
Longitud de onda	785 nm
Clasificación del Láser	3R (DIN EN 60825-1)
Seguridad Visual intrínseca	> 1,5 m @ 8000 puntos resolución en 360°
Divergencia del Rayo	0,2 mrad (0,012 grados)
Diámetro del rayo (a la salida)	3,3 mm, circular
Plano Vertical de trabajo	320°
Plano horizontal de trabajo	360°
Resolución Vertical	0,011° (32.000 3D-Píxeles en 360°)
Resolución Horizontal	0,00076° (470.000 3D-Píxel en 360°)

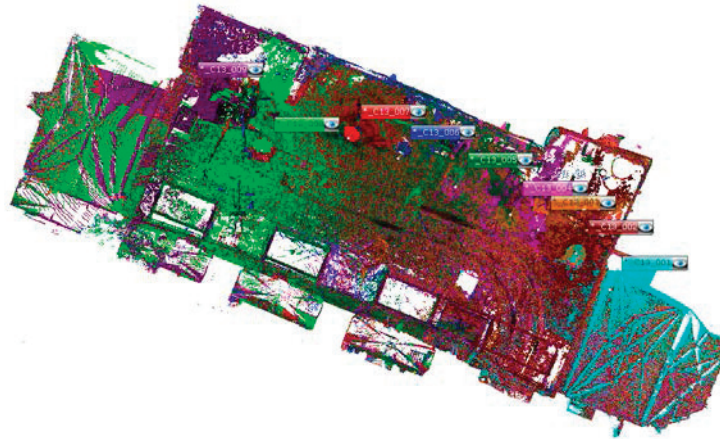


Figura 3: Escaneos realizados para la digitalización del muro.

3.4 Estado inicial del muro

Previo al proyecto de consolidación, se realizó una campaña origen o de referencia para conocer el estado del muro. De ella, a parte de una serie de planos de desplome y abombamiento de la pared, se derivó un mapa de desplomes del lienzo, en el que cada $2 \times 2 \text{ cm}^2$, se contaba con un valor de distancia respecto a un plano origen, ajustado al muro, pero constreñido de verticalidad, esto es, que sigue la línea de la plomada.

Se implementó un algoritmo de cálculo de distancia normal al plano entre el elemento creado y la superficie ajustada.

A partir del mapa anterior, se observa que el máximo desplome (D, en la Figura 4) se encuentra en la espadaña y hace el centro del muro y la mayor torsión (T, en la Figura 4) en la clave de los primeros arcos de izquierda y derecha.

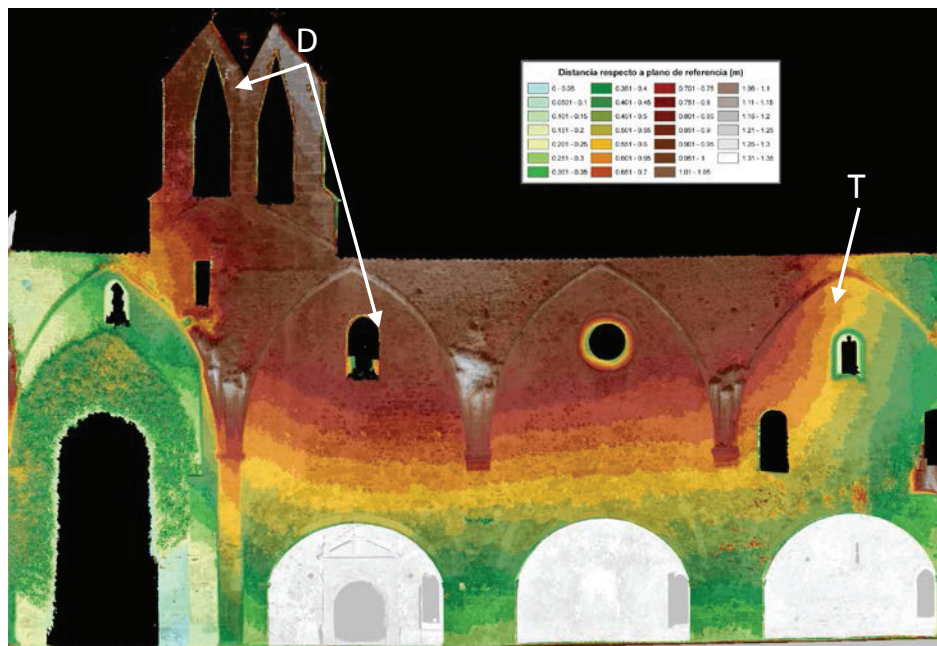


Figura 4: Mapa de desplomes

3.5 Control geométrico del muro

La consolidación de la estructura se realizó en cinco fases; durante ellas se acometieron 18 campañas de control geométrico. Las fases en las que se controlaron los movimientos fueron:

- **Fase I:** Ejecución del micropilotaje de apoyo de los estabilizadores provisionales de la fachada. Se acometieron 7 campañas durante esta fase, y los resultados se muestran a continuación.

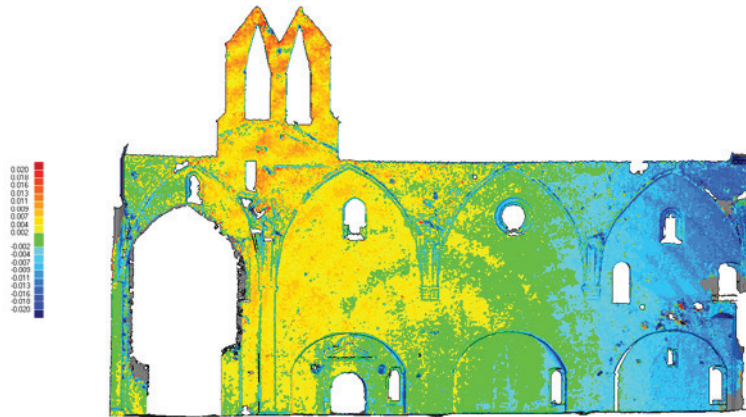


Figura 5: Comparación entre la campaña 1 y 7, correspondientes a la anterior y posterior a la fase de micropilotaje. Ambas fueron realizadas a la misma hora.

Dada la fiabilidad del método, se ha fijado que los valores menores a ± 2 mm están por debajo del umbral mínimo detectable y aparecen simbolizados con color verde. Los tonos comprendidos entre el amarillo y el rojo, representan puntos en los que el movimiento se ha producido hacia el interior del convento; mientras que el rango de tonos entre el cian y el azul marino representan desplazamientos hacia el exterior del convento.

Si el lienzo no se moviese, permanecería totalmente en verde; pero en este caso se observa un aumento del desplome menos de 20 mm en la parte centro-izquierda del muro y espadaña, mientras que la parte derecha se ha plomado e incluso desplazado levemente hacia fuera.

- **Fase II:** Instalación de los andamios estabilizadores: Se acometieron 3 campañas durante este proceso y básicamente se apreció una estabilización del movimiento que conllevó que el muro se aplomase levemente; esto es menos de 1 cm en la espadaña.

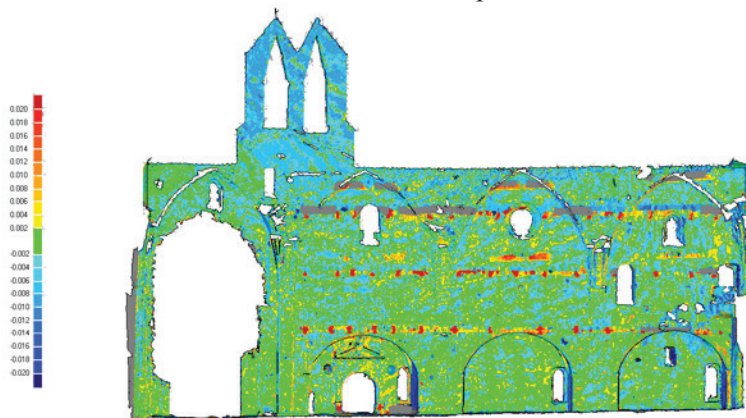


Figura 6: Comparación entre la campaña 8 y 9, correspondientes al inicio y fin del montaje de los andamios estabilizadores.

- **Fase III:** Realización de inyecciones de consolidación bajo los zócalos de la cimentación de la fachada Sur (o exterior). Se realizaron 3 campañas. Básicamente se aprecia una estabilización de las zonas bajas y extremos del alzado. No obstante la inyección en el exterior, hace que se produzca un aumento del desplome interior, cuyo máximo es de 4 cm en la zona de la espadaña; posiblemente debido a un giro del mismo.
- **Fase IV:** Consolidación de los contrafuertes mediante la inyección en su interior de microcementos a través de tuberías de polietileno introducidas en taladros.

No se aprecian movimientos notables durante la consolidación de los contrafuertes. Los valores máximos son debidos al relleno de las perforaciones.

- **Fase V:** Ejecución de los anclajes pasivos de los contrafuertes a la roca. Se realizaron 5 campañas en las horas claves de insolación, esto es al amanecer y al mediodía. Simultáneamente al registro geométrico se registraron datos termográficos. El propósito era doble; por un lado controlar la geometría tal cual se había venido haciendo en el proceso de consolidación y por otro poder medir la influencia del contraste térmico (diferencia entre el lienzo interior y exterior del edificio) o movimiento producido la dilatación de la argamasa como consecuencia del calentamiento de los lienzos.

En el caso anterior se aprecia que el muro permanece prácticamente inalterado, salvo la zona de la espadaña que apenas se ha desplomado unos milímetros, posiblemente porque la estructura no haya tenido suficiente tiempo para relajar. Por otro lado, en una hora de mayor contraste térmico se aprecia como aumenta el desplome hasta casi 20 mm, aún después de haber consolidado el muro.

4. TERMOGRAFÍA

Se realizaron 5 campañas termográficas, correspondientes a las campañas 14, 15, 16, 17 y 18 de control geométrico, para el interior y exterior del muro simultáneamente al proceso de digitalización. El objetivo perseguido era determinar, a partir de un valor de emisividad medio para todo el paramento, la temperatura interior y exterior del lienzo con el objeto de poder cuantificar, para el intervalo de tiempo de digitalización el contraste térmico del muro, o diferencia de temperatura entre la cara exterior e interior de los lienzos del muro.

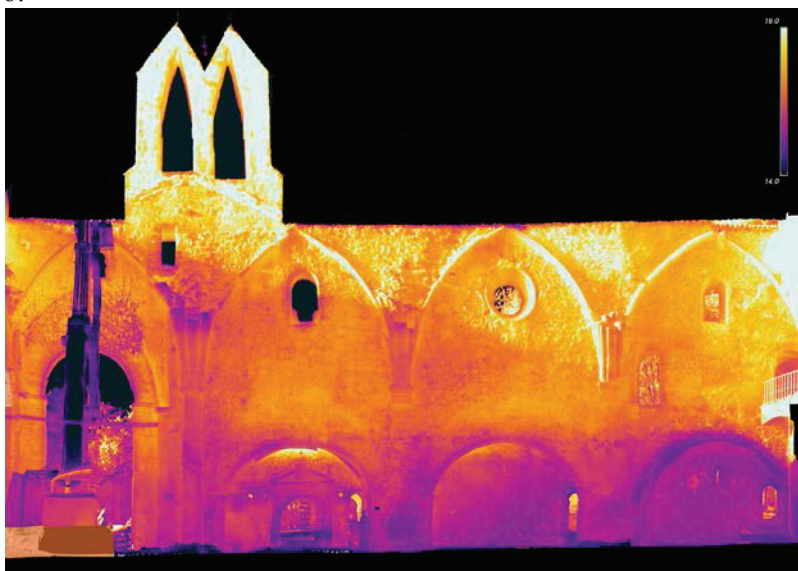


Figura 7: Termografía obtenida en el Convento de San Luis.

Para la captura de los datos se ha empleado la cámara termográfica, calibrada para trabajar en el rango de temperaturas -20°C a 100°C y una sensibilidad térmica $<0.05^{\circ}\text{C}$.

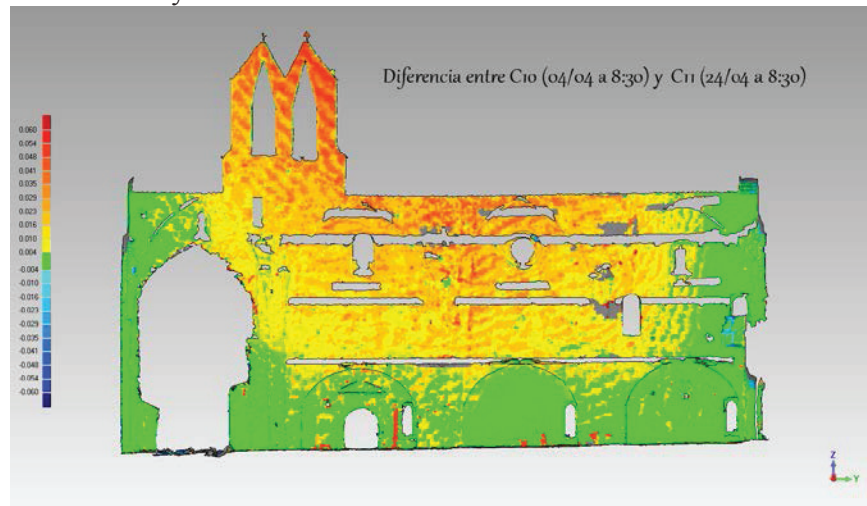


Figura 8: Diferencia de temperatura observada entre el 04 de Abril y el 24 de Abril a las 8:30 horas.

Se han analizado diferentes escenarios, con fechas y horas distintas, y se ha determinado la diferencia de temperatura observada entre fechas. Todo ello acompañado de simulaciones sobre cómo incide el sol en el paramento en cada momento del año.

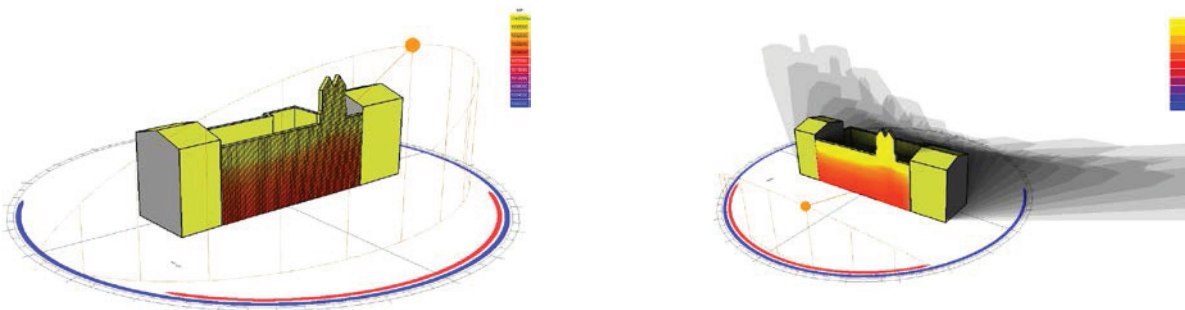


Figura 9: Simulación sobre la radiación solar total que inciden en los muros del convento a lo largo del año.

No se pueden incluir más gráficos ni las pruebas llevadas a cabo por no hacer el artículo más extenso pero se explicarán con detalle en la presentación del artículo.

5. CONCLUSIONES

Es necesario indicar que la principal novedad de este artículo no radica en la auscultación o control geométrico del paramento, que es algo sobradamente utilizado y demostrado, sino en la correlación que existe en el comportamiento de las paredes del convento, el momento temporal y la radiación solar que incide sobre el mismo en ese momento.

Cuando se realizan campañas geométricas sin tener en cuenta variables más allá de la presión media, temperatura media, humedad relativa,... puede obtener observaciones que lejos de ser anómalas están mostrando el verdadero comportamiento del elemento.

6. REFERENCIAS

- [1] Anquela, A.B.; Chueca, M.; Berné, J.L. (2001). *Aportaciones al problema general de redes locales de alta precisión: condicionantes específicos de fijación de criterios teóricos y prácticos, de calificaciones de parámetros intermedios y resultados finales*.
- [2] Baarda, W. (1977). *Measures for the accuracy of geodetic network*. Sopron.
- [3] Chueca, M.; Berné, J.L.; Anquela, A.B.; Baselga, S. (2001). *Avances en la Interpretación de Resultados en Redes Locales. Recintos de Error*. Ed. Universidad Politécnica de Valencia.
- [4] Cooper, M.A.R. (1987). *Control surveys in civil engineering*. Collins Professional and Technical Books.
- Grafarend, E.W. and Sansó (1985). *Optimization and Design of Geodetic Networks*. Springer-Verlag. Berlin.