

La termografía de infrarrojos en el estudio del Patrimonio Cultural

Miguel Gómez-Heras (1)

(1) Departamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid, 28049, Madrid (España)

Abstract

This paper analyzes the use of infrared thermography in the study of cultural heritage, particularly in assessing the deterioration of stone and related materials. Infrared thermography is a non-invasive technique that measures the surface temperature of objects through the infrared radiation they emit, allowing the detection of temperature differences that reflect variations in the structure or composition of materials. There are three thermography methods: passive, sequential, and active, each with specific applications. In addition to identifying moisture issues and structural damage in historic buildings, infrared thermography enables detailed studies on deterioration through the analysis of image series.

Key-words: Temperature, decay, building materials, image processing

Resumen

Esta comunicación analiza el uso de la termografía de infrarrojos en el estudio del patrimonio cultural, especialmente en la evaluación del deterioro de materiales pétreos. La termografía infrarroja es una técnica no invasiva que mide la temperatura superficial de los objetos mediante la radiación infrarroja que emiten, permitiendo detectar diferencias de temperatura que reflejan variaciones en la estructura o composición de los materiales. Existen tres métodos de termografía: pasiva, secuencial y activa, cada uno con aplicaciones específicas. Además de para identificar problemas de humedad y daños estructurales en edificios históricos, la termografía de infrarrojos permite realizar estudios detallados sobre el deterioro a partir del análisis de series de imágenes.

Palabras clave: Temperatura, deterioro, materiales de construcción, análisis de imagen

1. El papel de la temperatura en el deterioro de los materiales pétreos

La temperatura es una propiedad fundamental para comprender los procesos de deterioro en los materiales pétreos (roca, ladrillo, mortero, etc.). Sin embargo, los estudios de deterioro se limitan a establecer una temperatura ambiental como condición de contorno en determinada zona o experimento sin tener en cuenta las grandes diferencias que pueden existir entre la temperatura en determinado material y la temperatura ambiente, así como la anisotropía que puede existir en la temperatura de determinado elemento arquitectónico.

Cuando se considera sólo la temperatura ambiente y el calentamiento de los materiales por transporte directo de masa (es decir, por convección) se elimina la influencia de las propiedades físicas relacionadas con la absorción de una radiación electromagnética, como por ejemplo el albedo. El efecto de otras propiedades, como la conductividad térmica y la capacidad calorífica, se atenúa, dando lugar a que se anulen las diferencias entre los materiales y las diferentes zonas de un material calentado por la radiación solar (McGreevy et al, 2000).

Por tanto, la medida de la temperatura superficial de manera simultánea en un área nos permite comprender mejor el “paisaje térmico” de un determinado edificio, en el que se pueden encontrar grandes diferencias de temperatura superficial en un pequeño espacio (Figura 1). La termografía de infrarrojos permite realizar este tipo de medidas y se ha convertido en una herramienta crucial en los estudios de meteorización, del patrimonio proporcionando una manera no invasiva y no destructiva de observar las variaciones de temperatura en las superficies de los materiales. En la actualidad, las cámaras de infrarrojos permiten obtener imágenes térmicas que pueden registrar hasta más de 780 mil puntos de temperatura en una sola imagen.

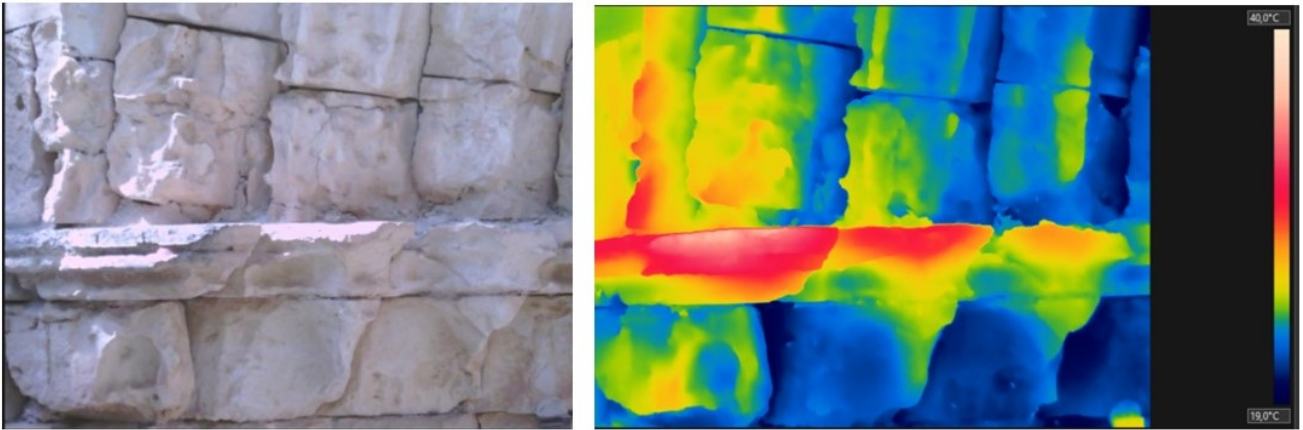


Fig. 1. Par de imágenes, visible y el equivalente en infrarrojo, de capiteles de la portada sur de las ruinas del Monasterio de Santa María de Bonaval (Guadalajara). En la imagen de infrarrojos se observan diferencias de temperatura superficial de hasta 20°C.

2. La termografía de infrarrojos

La termografía infrarroja (IRT) es una técnica no destructiva y no invasiva basada en imágenes que están relacionada con la temperatura superficial de los objetos calculada a partir de la radiación infrarroja que emiten.

Un cámara de infrarrojos recoge la cantidad de radiación infrarroja en un determinado rango dependiendo del tipo de equipo (SWIR: 0.9 – 2.5 mm; MWIR: 2 – 5 mm o LWIR: 8 – 14 mm). Un “cuerpo negro” es un cuerpo ideal que no trasmite ni refleja y que absorbe toda la energía incidente para emitirla con una distribución de longitudes de onda determinada por la ley de Planck.

Los materiales que se inspeccionan con una cámara de infrarrojos van a corresponder con cuerpos negros sino como “cuerpos grises”, cuya distribución espectral es similar en forma a la definida por la ley de Planck, o “cuerpos no grises”, en los que la distribución espectral de la energía emitida tiene picos determinados (Figura 2).

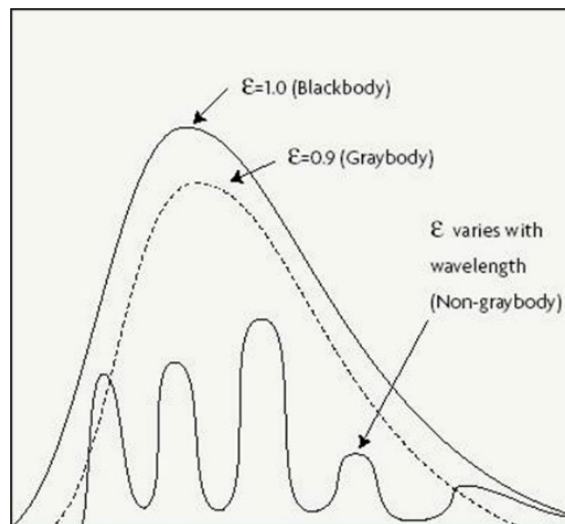


Fig.2. Distribución de energía emitida por un cuerpo negro, gris y no gris. La ratio entre la energía recibida y la energía emitida se llama “emisividad” (ϵ).

Por tanto, hay que tener en cuenta que la imagen resultante de una inspección realizada con una cámara de infrarrojos es una imagen de temperaturas calculadas a partir de la radiación infrarroja recibida suponiendo una distribución espectral de la energía que siguiese la ley de Planck. Así, para realizar determinaciones de temperaturas reales, se deben de aplicar determinadas correcciones para convertir las temperaturas superficiales aparentes en temperaturas reales:

- Emisividad (e): Relación entre la cantidad de radiación recibida y la radiación emitida. En el caso de un cuerpo negro la emisividad es igual a uno. En un cuerpo gris la emisividad es un valor constante a lo largo de todo el espectro y en un cuerpo no gris la emisividad varía con la longitud de onda.
- Temperatura aparente reflejada: Un cuerpo se va a ver afectado por la radiación recibida de las fuentes de calor externas. La temperatura aparente reflejada es la temperatura aparente de objetos cuya energía radiante es reflejada por el material inspeccionado hacia la cámara infrarroja.
- Corrección atmosférica: Dado que el vapor de agua absorbe la radiación infrarroja, se debe de tener en cuenta la temperatura y humedad relativas, así como la distancia a la que se han tomado las imágenes, para calcular el efecto opacador de la humedad ambiental.

3. Métodos de análisis de la termografía de infrarrojos para el diagnóstico del deterioro en el Patrimonio Cultural

Además de para la medición de temperaturas superficiales reales, la termografía de infrarrojos se puede utilizar para el diagnóstico del deterioro a partir de la detección de anomalías en la distribución de temperaturas aparentes superficiales en imágenes individuales o con el análisis de series de imágenes, con ejemplos de diferencias por materiales o daños estructurales.

Para ellos se puede realizar el análisis de la termografía con tres metodologías:

- Termografía pasiva: captura imágenes estáticas de la distribución de temperaturas aparentes superficiales en un momento concreto.
- Termografía secuencial: analiza la variación linear en cada píxel de series de imágenes tomadas a lo largo del tiempo sin que sea necesaria una estimulación térmica inducida.
- Termografía activa: se realiza una estimulación térmica y se toma una serie de imágenes durante el calentamiento y enfriamiento de las zonas de medida. La estimulación térmica exagera las diferencias de respuesta térmica.

En la inspección de edificios se utiliza normalmente la termografía pasiva como una técnica para un análisis cualitativo de zonas con un comportamiento irregular en relación con un patrón “normal” (Avdelidis y Moropoulou, 2003). Esta técnica es particularmente útil para la detección de humedad y la localización de daños estructurales. Los materiales húmedos se observan con una anomalía negativa (una temperatura aparente superficial más baja) que los materiales secos (Figura 3a y b). Las zonas de un material que no presentan continuidad térmica con las adyacentes (como el caso de los desplazados en granito en la Figura 3c y d), presentan menor inercia térmica y, por tanto, una anomalía positiva si el material está siendo calentado por la radiación solar.

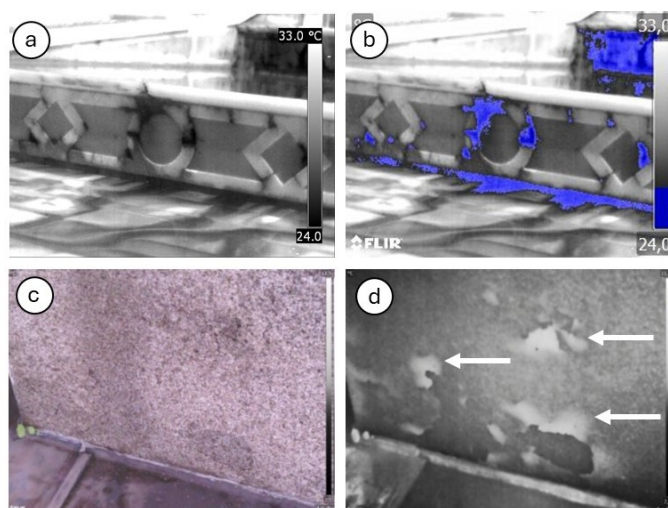


Fig.3. Las zonas húmedas de uno de los frontales de la Fuente de la Cascada del Real Sitio de la Granja de San Ildefonso aparecen con una temperatura aparente superficial más baja en la figura 3a (más oscuras, según la paleta de colores aplicada de escala de grises). En la figura 3b se ha coloreado de azul las zonas por debajo de la isoterma de 26°C para mostrarlo con mayor claridad. La figura 3c y d son un par de imágenes, visible (c) y el equivalente en infrarrojo (d) en los que se observa las zonas con desplazados en un sillar de granito en la Puerta de Alcalá de Madrid. Las zonas desplazadas, marcadas por flechas, se detectan por la mayor temperatura aparente superficial (colores más claros, según la paleta de colores aplicada de escala de grises)

Con las imágenes obtenidas mediante termografía secuencial o termografía activa, es posible realizar análisis multi-imagen para evaluar la evolución de distintas zonas de un objeto durante la adquisición de las imágenes. Estas técnicas de análisis de imagen incluyen la operación simple con imágenes (como la sustracción de imágenes mostrada en la Figura 4) o el filtrado mediante transformada de Fourier y el análisis de Componentes Principales en Termografía (PCT). Las técnicas de termografía activa se han desarrollado principalmente en campos muy distintos al estudio del patrimonio cultural y, generalmente, se necesita adaptar sus metodologías para su aplicación en este campo.

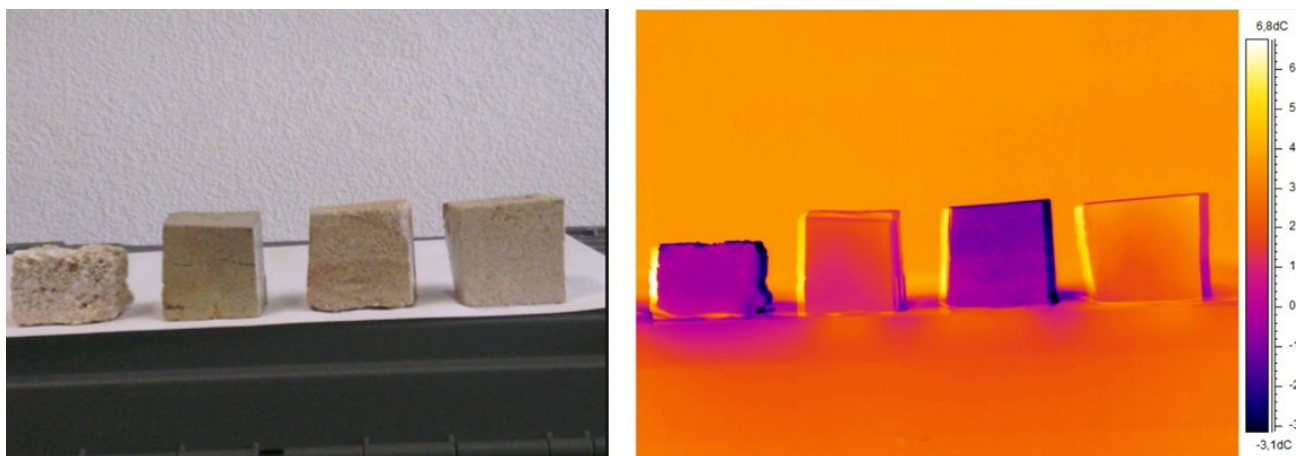


Fig.4. Imagen obtenida por sustracción de dos imágenes tomadas antes y después del secado no forzado de cubos de 4 litotipos diferentes de calizas porosas tunecinas saturados en agua. La escala muestra la diferencia de temperatura entre una imagen tomada 8 horas después del comienzo del secado y el momento inicial. Las dos litologías más porosas muestran una mayor diferencia negativa de temperatura como consecuencia de una tasa de evaporación más rápida.

Las técnicas de tratamiento de series de imágenes termográficas (especialmente el análisis de Componentes Principales) se han utilizado para detectar problemas de humedad en edificios históricos. (p.ej. Lerma et al., 2011) y para ver la contribución de diferentes factores en la dinámica de evaporación de muestras en laboratorio (p.ej. Gómez-Heras et al., 2014).

El análisis de componentes principales de imágenes de infrarrojos (PCT) nos sirve para reducir la dimensionalidad de una serie de imágenes de infrarrojos mediante algebra lineal. Cada componente principal es una imagen que corresponde a un porcentaje de la variación total del proceso que representa esa componente. Esto permite categorizar diferentes procesos según la contribución a la variación total de cada componente (Figura 5).

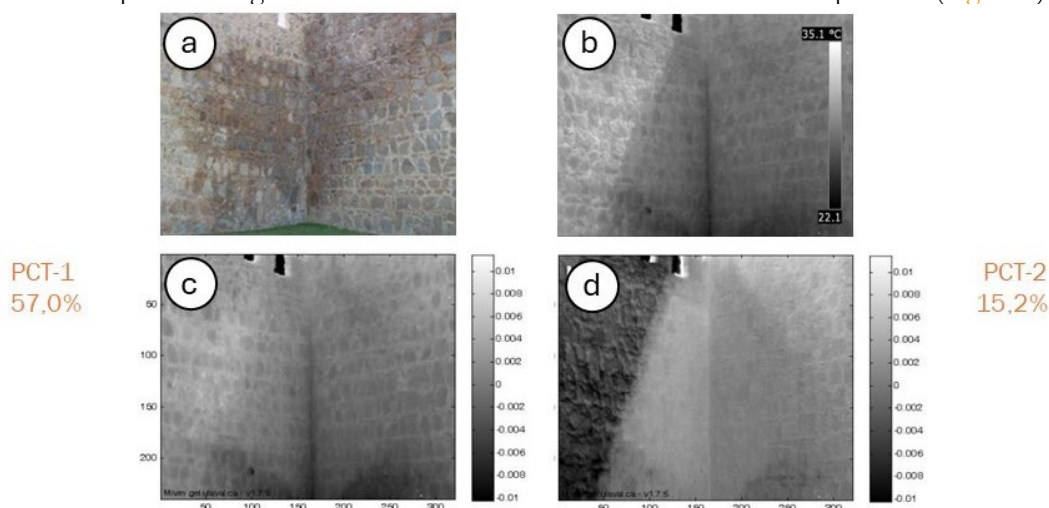


Fig.5. La figura 5 a y b corresponden a un par de imágenes, visible (a) y una de las imágenes en infrarrojo (b) de una serie tomadas a lo largo del tiempo a intervalos iguales en una sección del lienzo oeste de las murallas de Ávila. El análisis de componentes principales de termografía de la serie de imágenes permite obtener las imágenes c y d que son los dos componentes principales con más peso en la variación de la serie de imágenes. Este análisis permite aislar la anomalía negativa generada en la parte baja del muro debida a la humedad y el mayor peso del componente PCT-1 nos indica que es cualitativamente más importante que la variación de temperatura generada por la diferencia de calentamiento entre la zona de sol y de sombra.

4. Conclusión

Se debe de entender que una imagen de infrarrojos no es una necesariamente una medida cuantitativa de la temperatura superficial de los objetos fotografiados. La interpretación de las imágenes obtenidas mediante termografía requiere de la aplicación de unas correcciones que no son necesariamente las mismas en toda la imagen. Las imágenes de infrarrojos, una vez procesadas, son una herramienta muy útil para la localización y la evaluación de la incidencia de diferentes procesos de deterioro. El análisis de series de imágenes permite mejorar la evaluación de estos procesos.

Referencias

- Avdelidis, N.P., Moropoulou, A. (2003) Emissivity considerations in building thermography. *Energy and Buildings*, 35, 663–667.
- Gómez Heras, M., McAllister, D., Gomez Flechoso, M.D., Fort González, R., García Morales, S. (2014) Ejemplos de análisis cuantitativo de imágenes de infrarrojos obtenidas por termografía activa para la detección de patologías de humedades. In: REHABEND 2014, Universidad de Cantabria, Santander, España, 461–468.
- Lerma, J.L., Cabrelles, M., Portalés, C. (2011) Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building façade. *Construction and Building Materials*, 25, 2190–2197.
- McGreevy, J.P., Warke, P.A., Smith, B.J. (2000). Controls on stone temperatures and the benefits of interdisciplinary exchange. *Journal of the American Institute for Conservation*, 39(2), 259-274.