

APLICABILIDAD DE LA TERMOGRAFÍA PARA LA INSPECCIÓN DE LOS EDIFICIOS RURALES: CASO DE UNA COMARCA ESPAÑOLA

(SUITABILITY OF INFRARED THERMOGRAPHY FOR THE EXAMINATION OF RURAL BUILDINGS: THE PARTICULAR CASE OF A SPANISH REGION)

Ignacio Cañas Guerrero¹, Silvia Martín Ocaña¹, Ignacio González Requena²

¹ Departamento de Construcción y Vías Rurales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.

² Departamento de Materiales y Producción Aeroespacial. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos. Universidad Politécnica de Madrid.

Fecha de recepción: 02-XII-03

ESPAÑA

235-1

RESUMEN

En este artículo se pretende verificar la posibilidad de utilización de la termografía infrarroja como técnica de inspección del estado de los edificios rurales. Se reúnen los resultados obtenidos en varios trabajos de campo. Mediante esta técnica se puede analizar: localización de materiales y elementos ocultos, localización de diferentes materiales en fachada, presencia de grietas, localización de estructuras, localización de zonas húmedas y puntos de pérdidas de calor. Esta técnica permite inspeccionar un alto número de edificios en un breve período de tiempo, proporcionando resultados válidos. Los resultados muestran que en función del tipo de edificio las inspecciones se deben realizar en diferentes momentos del día: por la noche en los edificios con muros de carga y al amanecer en edificios con estructuras internas.

SUMMARY

This article is aimed at establishing the chance of applying the infrared thermography technique for the examination of rural buildings. The results from field works are collected. The next issues were determined by thermography: Hidden materials and elements; differences between different materials; location of cracks; location of structures; location of humid areas; points of heat losses and areas where the hot air is accumulated. It is possible to inspect a high number of buildings in a short time and get valuable results. The time where the inspection should be done is dependent on the type of building: in the evening for buildings with bearing walls and at daybreak for buildings with interior structures.

1. INTRODUCCIÓN

En España el número de edificios rurales es elevado y su localización es muy dispersa, no existiendo, en ocasiones, vías de acceso para automóviles. Las técnicas que se empleen para diagnosticar el estado de estos edificios deben ser capaces de proporcionar unos resultados válidos con una sola medición, debido al problema existente de desplazamiento. En la actualidad la termografía está siendo ampliamente utilizada para la inspección de edifi-

cios urbanos, viviendas y oficinas. Se encuentran trabajos centrados en la inspección de instalaciones (1), de acabados (2) y del aislamiento térmico (3); la mayoría de las aplicaciones se emplea para análisis cualitativos pero también aparecen algunos estudios cuantitativos (4). Además de edificios de viviendas, la termografía empieza a emplearse para el estudio de edificios de interés cultural, debido a su carácter de técnica no destructiva y al valor añadido de este tipo de edificios (5,6); así como para el estudio de las estructuras de obras civiles (7,8,9)

Este artículo presenta los resultados de las inspecciones termográficas realizadas sobre los edificios rurales de la comarca Soriana de "Tierras Sorianas del Cid", una comarca típicamente castellana de la zona interior de la península ibérica. Las condiciones de las construcciones rurales hacen de la termografía una técnica factible para la inspección del estado de los mismos. Dado el alto coste de una inspección termográfica comparado con el valor económico de los edificios rurales, se debe preparar un sistema que permita la realización de un alto número de inspecciones por día.

2. BASES FÍSICAS

Todos los materiales tienen la capacidad de absorber radiación infrarroja aumentando su temperatura; asimismo todos los materiales con una temperatura superior al cero absoluto emiten energía infrarroja. La termografía es una técnica que aprovecha la radiación emitida por la superficie de un cuerpo como variable termométrica. Esta radiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura superficial del objeto (Ley de Stefan-Boltzmann):

$$W = \mu \cdot \tilde{A} \cdot T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Donde W es la energía radiante de un cuerpo, μ es la emisividad (valor entre 0 y 1), \tilde{A} es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) y T es la temperatura absoluta del objeto.

En la práctica se puede considerar la emisividad como una constante propia de cada material, aunque en realidad es función de la longitud de onda, de la temperatura y del ángulo de incidencia. Por tanto, si se conoce la emisividad del objeto que vamos a inspeccionar, la medida de la radiación nos dará un valor de temperatura. Los materiales típicamente empleados en la construcción tienen emisividades superiores a 0,8, estos valores hacen que la temperatura medida mediante termografía proporcione valores fidedignos. Por el contrario los metales o materiales brillantes tienen emisividades entre 0,05 y 0,2, por lo que resulta difícil medir su temperatura si no se emplean sistemas para aumentar su emisividad.

Mediante la captación de la radiación infrarroja emitida por un cuerpo, la cámara es capaz de medir diferencias de temperaturas por debajo de 0,08 °C.

El espectro infrarrojo se extiende desde el límite del rango visible hasta llegar a la región de las microondas, sin embargo, existen dos regiones donde la transmisión es más elevada, la zona de 3 a 5 μm (sistemas de onda corta) y la zona de 8 a 13 μm (sistemas de onda larga). El equipo empleado en nuestro trabajo es un sistema de onda larga, puesto que es más recomendado para el uso en exteriores porque captan con más dificultad las reflexiones solares y son más sensibles a las radiaciones de baja temperatura

del entorno. Se trata de un sistema de captación de imágenes térmicas que representan la distribución superficial de temperaturas del objeto observado, permitiendo la realización de medidas y análisis térmico sobre la propia imagen.

El uso de la termografía infrarroja para la inspección de edificios requiere un conocimiento previo de los fenómenos físicos que tienen lugar entre el exterior y el interior. Durante el día, la radiación solar que incide sobre la superficie exterior es absorbida haciendo que aumente la temperatura. Por la noche el calor es disipado desde la fachada hacia el ambiente exterior a menor temperatura por radiación. La capacidad de acumulación de calor de un cuerpo es función de su volumen, de su densidad y de su calor específico, cuanto mayores sean éstos, el cuerpo acumulará más calor/frío y mantendrá su temperatura durante más tiempo transcurrido el período de calentamiento/enfriamiento. Las diferencias de temperaturas en los elementos de las fachadas estarán determinadas por las distintas cualidades de los materiales.

Con el fin de evitar el conflicto del aumento de temperatura debido a la radiación solar, las inspecciones se deben realizar por la noche o en días nublados, con poco viento, para reducir las pérdidas por convección.

3. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

Este trabajo se enmarca dentro de un proyecto de reutilización de edificios rurales financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología. Uno de los primeros pasos que hay que dar antes de determinar las posibilidades de reutilización de un edificio es el de conocer el estado de conservación del mismo. El objetivo de este estudio es evaluar las posibilidades de aplicación de la termografía a este tipo de edificios como uno de los primeros pasos que nos ayude en su diagnóstico.

Las inspecciones termográficas se han realizado desde el exterior del edificio, por tanto se han obtenido mapas de temperaturas de las fachadas de los mismos. Con este sistema se pueden diagnosticar los defectos de los edificios que lleven aparejadas variaciones de las temperaturas superficiales, como son: fallos estructurales, problemas de humedades, falta de aislamiento térmico y estructuras ocultas, entre otros. El objetivo es localizar zonas problemáticas para un posterior análisis, los resultados obtenidos se basan en comparación de temperaturas de una superficie y no en valores absolutos, es decir, se trata de un análisis cualitativo.

4. REALIZACIÓN DE LAS INSPECCIONES

Se han inspeccionado 36 edificios pertenecientes a los términos municipales de Valdanzo y Castillejo de Robledo,

en Soria. Las inspecciones termográficas se han realizado en dos jornadas, la tarde-noche del 26 de marzo y el amanecer del 27 de marzo. La hora del día se ha seleccionado de forma que no incida la radiación solar para evitar que se enmascaren algunos fallos constructivos. Para la realización de las inspecciones se han seguido las indicaciones propuestas en la norma europea EN 13187:1998 (10).

La cámara empleada es una ThermaCAM SC 2000 de FLIR SYSTEMS y el software es ThermaCAM Researcher 2001 de la misma firma. La cámara tiene la capacidad de procesar tanto imágenes visuales como térmicas, con salida digital de 14-bits en tiempo real y enfoque automático. La calibración automatizada del sistema de la ThermaCAM SC 2000 usa cuatro referencias de temperatura interna, identificación de lente automático y avanzados algoritmos matemáticos lo cual asegura la fiabilidad en la ejecución de mediciones de temperaturas.

Especificaciones técnicas:

- Campo de visión/Distancia mínima de enfoque: 24°x18°/0,3 m
- Sensibilidad térmica: 0,07 °C a 30 °C
- Resolución espacial: 1,3 mrad

5. RESULTADOS: APLICACIONES

5.1. Determinar materiales y elementos ocultos

Gran parte de los edificios rurales antiguos han sufrido una serie de remodelaciones a lo largo del tiempo. Lo que hoy vemos en el entorno rural es raramente un edificio en su estado original. Antes de decidir las necesidades de rehabilitación para una futura reutilización, es preciso conocer tanto los materiales empleados en su construcción como la existencia de elementos ocultos. La termografía es una herramienta que puede facilitar este proceso.

Uno de los detalles que se pueden observar mediante la termografía es la existencia en la fachada de antiguos huecos ocultos. Esta práctica era muy habitual, debido a cam-

bios de uso o de la unidad familiar, en muchos edificios se hacía necesario cambiar la disposición de puertas o ventanas, abriendo huecos nuevos y tapando otros existentes. En la figura 1 aparece la imagen visual y termográfica de la fachada de una vivienda rural. En la termografía se distingue claramente un hueco de fachada que no aparece en la imagen visual. Se trata de un antiguo hueco que ha sido tapado, el grosor empleado para tapar el hueco es menor que el espesor del muro de cerramiento, por tanto su capacidad para acumular calor también es inferior. La termografía ha sido realizada al anochecer, cuando la temperatura exterior está descendiendo. El hueco oculto aparece a una temperatura similar a la del resto de huecos de fachada y a menor temperatura que el resto del muro.

Otro de los resultados que obtuvimos en las inspecciones fue la determinación del material de construcción oculto tras un enfoscado de cemento. A simple vista no se podría determinar el material de cerramiento del edificio de cara a futuras reparaciones. En la imagen termográfica pudimos observar con claridad que el muro estaba constituido por piezas de pequeño tamaño; por la disposición e irregularidad se pudo afirmar que se trataba de un muro de adobe. Además, la presencia de una zona inferior a mayor temperatura, indicaba la existencia de un zócalo de piedra, que, debido a su mayor espesor, acumuló más calor durante el día y, por tanto, aparecía en la imagen más caliente.

5.2. Distinguir materiales empleados en la construcción

Esta aplicación se debe a la distinta capacidad de almacenar calor que tienen los materiales. Los materiales con mayor densidad (piedra, barro) tienen una capacidad de almacenar calor más elevada que los materiales ligeros (maderas y aislantes). Esto quiere decir que los primeros acumulan calor por el día y lo mantienen durante más tiempo que los ligeros. Al anochecer, los materiales ligeros ya han perdido todo su calor y aparecen a menor temperatura que los pesados, lo contrario ocurre al amanecer.

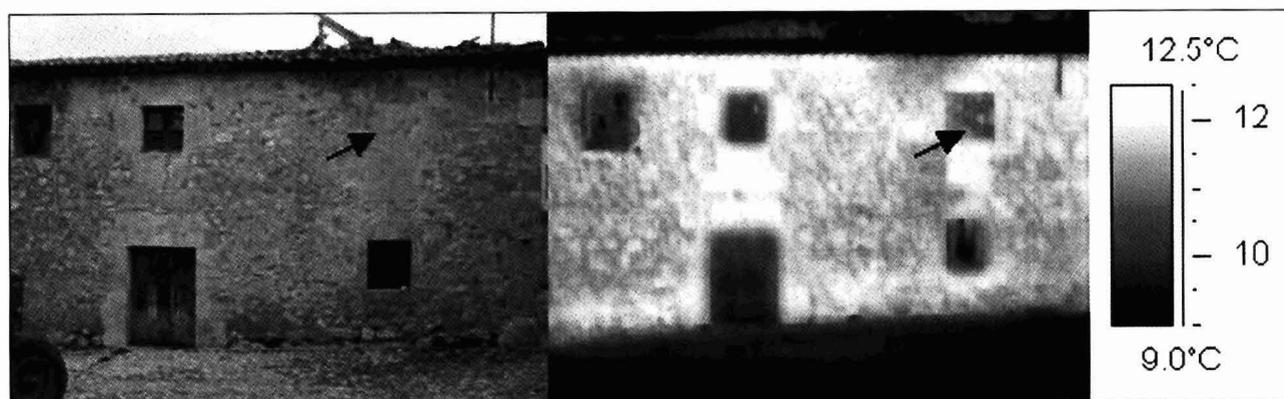


Figura 1.- Fachada de una vivienda rural. La imagen termográfica revela la existencia de un antiguo hueco en la fachada que ha sido tapado. Tomada al anochecer.

Los edificios antiguos encontrados en el entorno rural fueron construidos con distintos materiales, teniendo en cuenta el criterio de economía y la disponibilidad de los mismos. En las inspecciones realizadas se han encontrado fachadas realizadas con diferentes materiales, en la figura 2 aparece un ejemplo de vivienda rural construida con mampostería de piedra y adobe. En la imagen termográfica se observa perfectamente el diferente comportamiento térmico de los mismos. La parte inferior del edificio realizada en mampostería de piedra tiene un espesor mayor que la última planta realizada en adobe debido a las necesidades de capacidad portante, al aumentar el espesor aumenta el volumen que puede almacenar calor, es por esto que al anochecer, cuando las temperaturas han disminuido, la parte del muro realizada con mampostería de piedra está a mayor temperatura que el adobe.

5.3. Identificación de grietas

Una aplicación muy interesante de la termografía es la de determinar fallos en la estructura y en el cerramiento. Para determinar el estado de conservación de un edificio es importante conocer si existen grietas en el mismo, su número y su tamaño. En la figura 3 se muestra la imagen de una nave agrícola, la termografía desvela la localización de una junta que no era apreciable a simple vista. La detección de este tipo de fallos obedece a una diferencia de

emisividad más que a una diferencia de temperaturas. La zona donde se localiza la junta no tiene las mismas características superficiales que la fachada intacta, lo que hace que varíe su capacidad de emitir radiación.

5.4. Identificación de estructuras

La termografía es una herramienta eficaz a la hora de identificar las estructuras de los edificios. A pesar de que la termografía se basa en la medición de la radiación y, por tanto, la temperatura superficial de un cuerpo, se pueden detectar elementos interiores siempre que éstos transmitan por conducción su diferente temperatura hacia el exterior. La estructura interna de los edificios responde a las variaciones de la temperatura interior. Las inspecciones realizadas indican que sólo son visibles las estructuras portantes de los edificios en las termografías tomadas al amanecer. La razón es que el interior del edificio, a veces, al amanecer, está a mayor temperatura que el exterior, además el muro de fachada permanece todavía a baja temperatura lo que resulta en un mayor contraste de temperaturas. Esta identificación permite conocer el estado en el que se encuentra dicha estructura.

Reconocer el lugar exacto en el que se encuentran las vigas y los pilares nos da una información valiosa a la hora de acometer obras de rehabilitación de edificios.

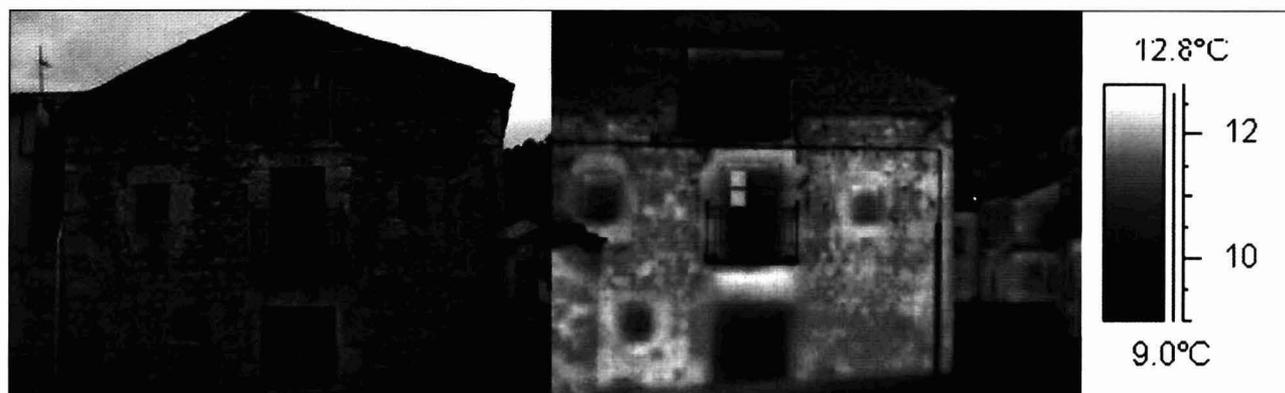


Figura 2.- Fachada de una vivienda rural. Las dos primeras plantas están realizadas en mampostería de piedra y la planta de cubierta en adobe. La termografía muestra el diferente comportamiento de estos materiales. Tomada al anochecer.



Figura 3.- Nave agrícola. La termografía revela la presencia de una junta de importante espesor en el muro. Tomada al amanecer.

En la figura 4 aparece la imagen de una bodega de construcción actual, la termografía realizada muestra perfectamente la ubicación de la estructura portante.

5.5. Identificación de zonas húmedas

La humedad es uno de los agentes atmosféricos que más daño provoca en los edificios. La termografía permite conocer este tipo de defectos de la construcción. El agua es un elemento con un elevado calor específico, es decir, requiere gran cantidad de energía para modificar su temperatura; es por ello que los materiales de construcción cargados de humedad se comportan de forma distinta que los mismos materiales secos. Además de este efecto existe la posibilidad de que el agua se evapore produciendo una disminución de la temperatura de la superficie. Un material húmedo retiene el calor absorbido durante más tiempo que seco, y, por lo tanto, radiará energía durante más tiempo.

En la figura 5 aparece una imagen de una vivienda rural. La rotura del canalón de desagüe ha provocado que las aguas de lluvia caigan directamente por el muro. Este hecho hace que aparezca una zona húmeda en la parte del muro en contacto con el suelo. En la imagen termográfica tomada al amanecer esta zona aparece más fría debido a que su inercia es mayor que la del resto del muro, por tanto tarda más en calentarse que el resto.

5.6. Pérdidas de calor

Dado que la termografía permite reconocer diferencias de temperatura, es posible determinar zonas de pérdidas de calor. Reconocer estos puntos críticos es fundamental a la hora de decidir las intervenciones necesarias para solucionar el problema. Reducir las pérdidas de calor de los edificios conlleva una reducción en el gasto energético así como una mejora del confort interior. Si se pretende reutilizar un edificio rural, habrá que tener este hecho presente, dado que muchos edificios antiguos carecen de un aislamiento efectivo. La falta de aislamiento aparece en la termografía como una zona a mayor temperatura.

La figura 6 muestra una imagen de una vivienda rural en la que aparecen puntos de pérdidas de calor en los tambores de las persianas.

5.7. Reconocer zonas de acumulación de calor

En todas las termografías realizadas al anochecer han aparecido puntos calientes bajo los salientes de la fachada (bajo balcones, bajo alero de cubierta), así como en los remetimientos de la misma (marcos de ventanas y puertas). Éstos son puntos en los que el aire no puede circular libremente. Durante el día la envolvente se va calentando y en estos puntos se acumula aire caliente.



Figura 4.- Bodega de construcción moderna. En la termografía aparece la estructura a una temperatura superior al resto del muro de fachada. En la imagen inferior aparece una termografía de detalle en la que se señala una bovedilla. Tomadas al amanecer.



Figura 5.- Vivienda rural. El canalón de desagüe se ha partido y las aguas de lluvia caen directamente al suelo, se ha formado una zona húmeda en la parte inferior del muro que aparece como una zona fría en la imagen termográfica. Tomada al amanecer.

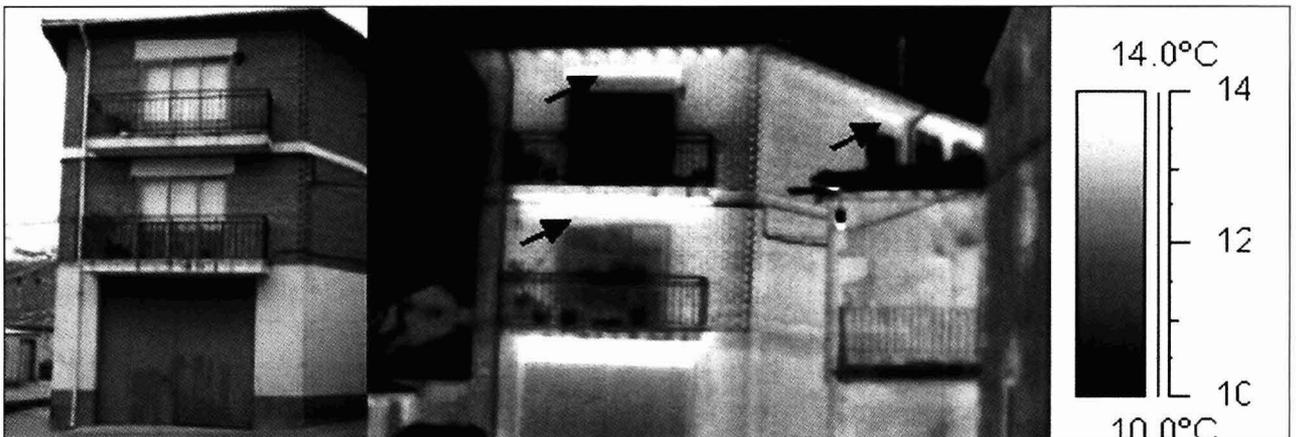


Figura 6.- Vivienda rural. En la imagen termográfica se señalan puntos de pérdidas de calor que corresponden con los tambores de las persianas. En la planta baja también se pierde calor por la ventana del garaje. Termografía tomada al anochecer.

6. VENTAJAS DE LA TERMOGRAFÍA PARA DETERMINAR EL ESTADO DE CONSERVACIÓN DE EDIFICIOS RURALES

La termografía es una técnica no destructiva que proporciona información amigable y completa sobre diversas características de los edificios. El programa informático que acompaña a la cámara termográfica permite explorar la imagen térmica para obtener la máxima información posible. Entre las posibilidades existentes están:

- Regulación de la escala de temperaturas: por defecto normalmente la imagen termográfica viene definida entre unas temperaturas que son la máxima y la mínima encontradas en el entorno que se inspecciona. Sin embargo existe la posibilidad de reducir este intervalo de temperaturas para identificar problemas en zonas concretas del termograma (ver figura 7).

- Realizar perfiles de temperatura: esto permite conocer la variación de la temperatura a lo largo de una superficie

determinada. En la figura 8 el perfil de temperaturas permite ver la variación de la temperatura con la altura del edificio.

- Realizar histogramas de temperaturas. Esta herramienta es útil para determinar las pérdidas de calor por el cerramiento. Conociendo la temperatura media del exterior y situando esta temperatura en el punto medio del histograma se puede determinar el comportamiento del edificio a diferentes horas del día (ver figura 9 en la página 28) o comparar distintos edificios.

- Realizar un mosaico de varias termografías. Las imágenes termográficas tienen la posibilidad de ser tratadas como imágenes de formato JPEG, es por ello que se pueden realizar mosaicos de varias imágenes. La condición indispensable para que no se pierda información es que todas las imágenes estén en la misma escala de temperaturas y se hayan realizado consecutivamente. Esto permite obtener una imagen termográfica de un edificio completo que, por su situación, no permite la realización de la termografía completa "in situ".

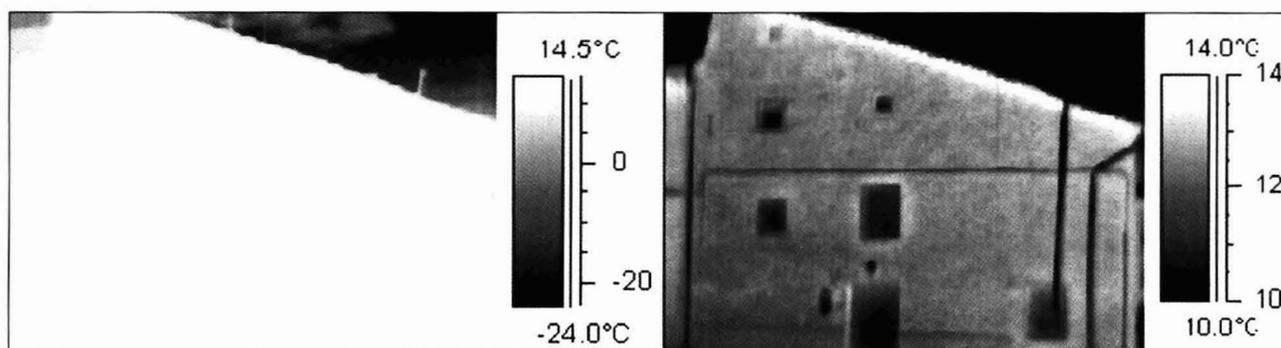


Figura 7.- Imágenes termográficas de una vivienda rural. En la izquierda el rango de temperaturas corresponde a la máxima y a la mínima de toda la imagen. En la derecha se ha reducido el rango a las máximas y las mínimas encontradas en la fachada.

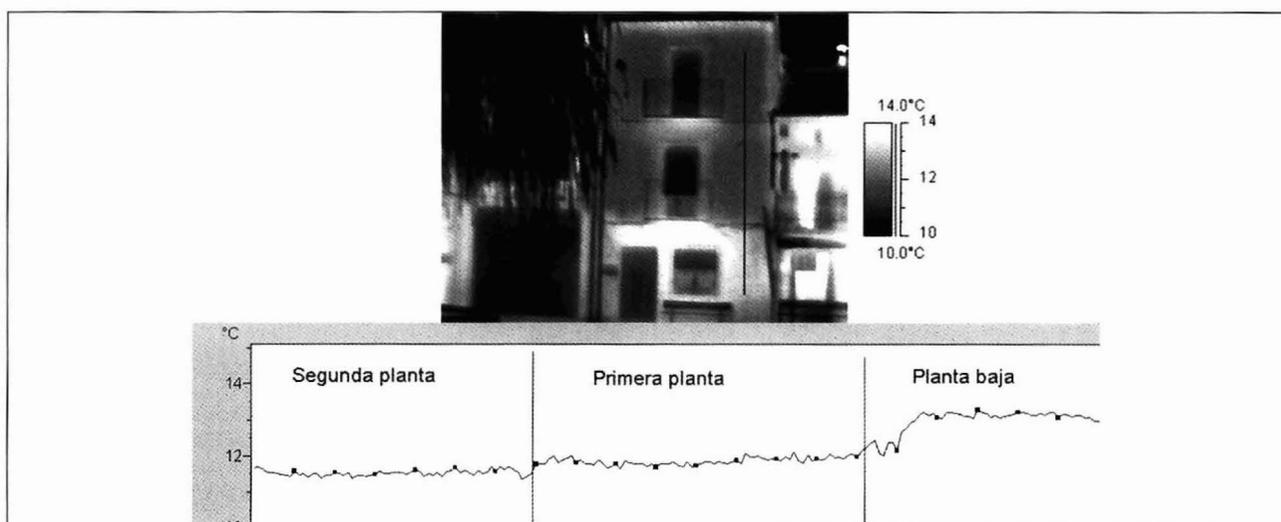


Figura 8.- Imagen termográfica de una vivienda rural. En la parte inferior aparece un perfil de temperaturas que corresponde a la línea marcada en la termografía. Se observa una reducción de la temperatura con la altura del edificio. Termografía tomada al anochecer.

7. CONCLUSIONES

Del estudio realizado se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- La termografía es una técnica que sirve para una localización inicial de posibles puntos con problemas.

- El almacenar imágenes para poderlas tratar con posterioridad nos permite tener documentación gráfica.

- El sistema permite realizar un gran número de inspecciones en un tiempo limitado.

- Tiene la ventaja de proporcionar información a distancia, sin ser necesario el contacto con el edificio, por lo que se pueden inspeccionar puntos inaccesibles.

- Se han podido determinar:

- Materiales y elementos ocultos
- Distintos materiales de construcción
- Localización de grietas
- Localización de estructuras
- Localización de zonas húmedas
- Pérdidas de calor
- Zonas de acumulación de calor

- Con los medios actuales la termografía no permite medir temperaturas absolutas, por tanto se trata de una técnica cualitativa.

- Las diferencias de temperaturas que se producen en el ambiente exterior son de pequeña magnitud (20 °C de amplitud máxima diaria exterior), en estas condiciones se puede admitir que la emisividad de los cuerpos permanece constante y no es necesario realizar medidas adicionales de emisividad o de temperatura.

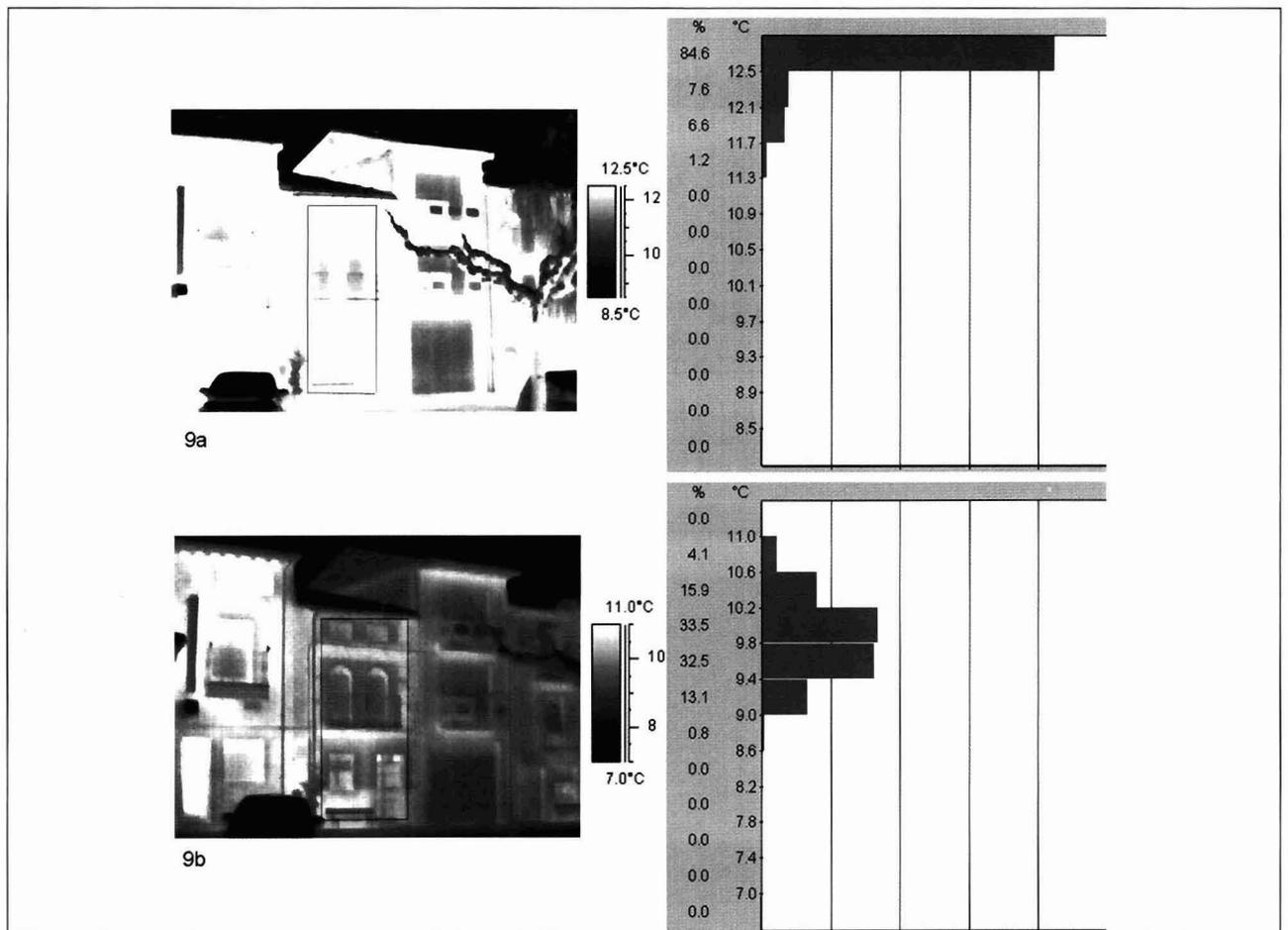


Figura 9.- Imagen termográfica de una vivienda rural. 9a: corresponde a la termografía tomada al anochecer, la temperatura del aire exterior era de 10,5 °C, se ha considerado éste como punto intermedio del intervalo. El histograma muestra que todos los puntos están a temperatura muy superior a la exterior. 9b: corresponde a la termografía realizada al amanecer, la temperatura del aire era de 9 °C, este punto se ha situado en el punto medio del intervalo. El histograma muestra que hay un gran porcentaje de puntos por encima de la temperatura media, existiendo también puntos a menos temperatura. La distribución de temperaturas no está tan alejada de la media como en 9a.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el apoyo financiero prestado al proyecto de investigación PB8-0720 "Aproximación a una metodología de reutilización de construcciones rurales" del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Balaras, C. A; Argiriou, A. A. Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings*, vol. 34. 2002. pp 171-183.
- (2) Li, Z; Yao, W; Lee, S; Lee, C; Yang, Z. Application of infrared thermography technique in building finish evaluation. *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 19. 2000. pp 11-19.
- (3) Haralabopoulos, D. A; Paparsenos, G. F. Assessing the thermal insulation of old buildings - the need for in situ spot measurements of thermal resistance and planar infrared thermography. *Energy Conversion and Management*, vol. 39. 1998. pp 65-79.
- (4) Grinzato, E; Vavilov, V; Kauppinen, T. Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*, vol. 29. 1998. pp 1-9.
- (5) Grinzato, E; Bressan, C; Marinetti, S; Bisson, P. G; Bonacina, C. Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared. *Infrared Physics & Technology*, vol. 43. 2002. pp 165-169.
- (6) Grinzato, E; Bison, P. G; Marinetti, S. Monitoring of ancient buildings by the thermal method. *Journal of Cultural Heritage*, vol. 3. 2002. pp 21-29.
- (7) Clark, M. R; McCann, D. M; Forde, M. C. Application of infrared thermography to non-destructive testing of concrete masonry bridges. *NDT & E international*, vol. 36. 2003. pp 265-275.
- (8) Wiggenshauser, H. Active IR-applications in civil engineering. *Infrared Physics & Technology*, vol 43. 2002. pp 233-238.
- (9) Titman, D. J. Applications of thermography in non-destructive testing of structures. *NDT & E international*, vol. 34. 2001 pp 149 -154.
- (10) EN 13187: 1998. Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method (ISO 6781:1983 modified).