

PALABRAS CLAVE

Termografía infrarroja,
Diagnóstico térmico rápido,
Edificios existentes

KEYWORDS

Infrared thermography,
Quick thermal diagnostic,
Existing buildings

DIAGNÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS EN FORMA MASIVA MEDIANTE EL USO DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

MASSIVE DIAGNOSIS OF THE THERMAL BEHAVIOR OF BUILDINGS THROUGH THE USE OF THE INFRARED THERMOGRAPHY

> CAROLINA GANEM

Universidad Nacional de Cuyo - Facultad de Artes y Diseño
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía - Centro Científico Tecnológico-Mendoza

> GUSTAVO BAREA

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía - Centro Científico Tecnológico-Mendoza

> CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO (NORMAS APA):

Ganem, C. y Barea, G. (2019). Diagnóstico del comportamiento térmico de edificios en forma masiva mediante el uso de la termografía infrarroja. *AREA*, 25(1), pp. 1-14.
https://www.area.fadu.uba.ar/wp-content/uploads/AREA2501/2501_ganem_barea.pdf

RECIBIDO

30 DE SETIEMBRE DE 2018

ACEPTADO

10 DE ABRIL DE 2019



EL CONTENIDO DE ESTE ARTÍCULO
ESTÁ BAJO LICENCIA DE ACCESO
ABIERTO CC BY-NC-ND 2.5 AR

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es realizar el diagnóstico del comportamiento térmico de edificios mediante el uso de la termografía infrarroja y evaluar la utilidad de esta herramienta para una evaluación rápida y confiable. Se seleccionó un barrio representativo de la edificación existente en la ciudad de Mendoza, Argentina (32°40' Lat. Sur, 68°51' Long. Oeste, 750 m s. n. m.). Se trabajó con 48 perfiles urbanos, 12 en cada una de las cuatro orientaciones de la cuadrícula. Se siguió un protocolo específico: 1) Se procedió a la toma de imágenes termográficas en dos momentos del día, la tarde-noche y la mañana temprano, para evitar posibles errores debidos a la incidencia de radiación solar directa. 2) La emisividad se introdujo en la cámara de acuerdo con estudios de materiales locales. Al mismo tiempo, se realizaron mediciones continuas de la temperatura del aire en el interior y exterior con registradores de datos con el objetivo de examinar en detalle los resultados obtenidos mediante el estudio termográfico.

ABSTRACT

The objective of this work is to diagnose the thermal behaviour of buildings through the use of infrared thermography, and to evaluate the usefulness of this tool for a fast and reliable diagnosis. A district, representative of the existing building, was selected in the city of Mendoza, Argentina (32°40' Lat. South, 68°51' Long. West, 750 m a. s. l.). We worked with 48 urban profiles, 12 in each of the four orientations of the grid. A specific protocol was followed: 1) Thermographic images were taken at two times of the day, in the evening and in the early morning, to avoid possible errors due to the incidence of direct solar radiation. 2) The emissivity was introduced into the chamber according to local materials studies. At the same time continuous measurement of air temperature inside and outside were taken with data-loggers with the objective of examining in detail the obtained results by the thermographic survey.

➤ ACERCA DE LOS AUTORES

CAROLINA GANEM. Arquitecta por la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Mendoza (FAU-UM), Especialista por el Centro Interuniversitario di Architettura Bioecologica e innovazione Tecnologica per l'Ambiente, Università degli Studi di Firenze (ABITA-UNIFI, Florencia, Italia) y Doctora en Arquitectura por la Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya (ETSAB-UPC, Barcelona, España). Investigadora Adjunta del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (INAHE-CONICET). Profesora Titular Efectiva en la Carrera de Proyectos de Diseño de la Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo) y Docente Investigadora Categoría 1. Se especializa en bioclimatología edilicia y hábitat sustentable. Actualmente trabaja en proyectos de investigación sobre las oportunidades ambientales en la rehabilitación del hábitat construido y en el diseño de nuevos proyectos.
✉ <cganem@mendoza-conicet.gov.ar>

GUSTAVO BAREA. Arquitecto por la FAU-UM, Especialista en Investigación Projectual por la Universidad de Buenos Aires (UBA) y Doctor en Ciencias en el Área de Energías Renovables por la Universidad Nacional de Salta (UNSa). Es Investigador Asistente del INAHE-CONICET. Docente en la Tecnicatura Universitaria en Energías Renovables, dependiente de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales de la Universidad Nacional de San Luis (UNSL). Dicta cursos de posgrados específicos en simulaciones edilicias por medio de Energy Plus (ENREL). Se especializa en bioclimatología edilicia y simulaciones computacionales térmicas y energéticas, de edificios y sistemas pasivos. Actualmente trabaja en el desarrollo de sistemas pasivos de acondicionamiento térmico para edificios sustentables. Participa en proyectos de investigación donde se busca esclarecer la influencia del cambio climático en edificios existentes y nuevos.

Introducción

El consumo de energía de los edificios se debe principalmente al acondicionamiento térmico de espacios habitables. El impacto de los mismos está impulsando a los responsables políticos hacia la conservación de la energía que comienza con una evaluación y certificación del rendimiento térmico de los elementos constructivos. Se dispone de varias técnicas y métodos de cálculo para la evaluación del *valor-U* (transmitancia térmica). Estas se emplean de manera diferente según los requisitos y necesidades específicas (en términos de precisión, tiempo y esfuerzo económico). Sin embargo, los profesionales, los técnicos, los grupos de investigación y los políticos están de acuerdo con la necesidad de un método rápido, económico y confiable para determinar fácilmente la transmisión térmica de los edificios. Esto podría ayudar a acelerar los procesos de decisión y las políticas energéticas que involucran al sector de la construcción, que a su vez afectan las políticas macro que los países adoptan para contrarrestar los efectos del cambio climático (Nardi, Lucchi, de Rubeis y Ambrosini, 2018).

La termografía infrarroja es una tecnología de investigación y ensayo no destructiva (END). Se ha utilizado durante los últimos 30 años para comprobar, de forma sencilla, la dinámica térmica de edificios y su eficiencia energética. Resultó ser un método efectivo, conveniente y económico para detectar aspectos estructurales de edificios (formas preexistentes, cambios estructurales, anomalías estructurales, presencia de cavidades), para evaluar el sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC por sus siglas en inglés), para detectar degradación (grietas), identificar fuentes de fuga de aire, determinar pérdidas de calor, mapear humedad, verificar aislamiento y evaluar tratamientos de conservación (Kirimtat y Krejcar, 2018; Lucchi, en prensa; Costillas Sanz, 2017; de Prada Pérez Azpeitia, 2016; Bianco y Ceradini, 2010; Nuzzo, Calia, Leberatore, Masini y Rizzo, 2010; Gamidi, 2009; Ostrowski, Antczak, Defer y Duthoit, 2003).

A diferencia de las imágenes digitales normales que capturan la radiación de luz visible, las cámaras termográficas, miden la radiación infrarroja (IR) y convierten los datos en imágenes donde cada color representa una temperatura, mostrando de esta forma imágenes de temperaturas superficiales. La IR fue descubierta por William Herschel en 1800 y después del descubrimiento del efecto termoeléctrico por Thomas Johann Seebeck en 1821, los científicos han estado constantemente preocupados por medir esta radiación de onda larga con la ayuda de termopares y termófilos. La IR se encuentra entre el espectro visible y las microondas del espectro electromagnético. La fuente principal de radiación IR es el calor o la radiación térmica. Cualquier objeto con una temperatura superior al cero absoluto (-273,15 °C) emite radiación en la región infrarroja. Todos los días estamos expuestos a rayos infrarrojos. El calor de la luz solar, el fuego o un radiador son formas de IR (FLIR Systems, 2018).

Numerosos investigadores han usado esta técnica de forma efectiva con diferentes objetivos, demostrando su gran potencial.

Nardi et al. (2018) han revisado la literatura disponible de los últimos 64 años (1954-2018) sobre el uso de la IR para la evaluación de la emisividad y de los puentes térmicos de la envolvente edilicia. Concluyen que la técnica se ha convertido en un importante campo de interés debido a sus ventajas, como: tiempos de medición cortos que varían de minutos a días, costos reducidos en comparación con la técnica de medición *in situ* con sensores *data-loggers* más utilizada y por la posibilidad de inspeccionar gran parte del edificio, gracias

a la posibilidad de integrar las cámaras IR en drones. No obstante, los autores hacen hincapié en que algunos factores podrían afectar la exactitud de los resultados. En particular, la precisión del sensor de la cámara IR elegida, las condiciones de contorno (los coeficientes de transferencia de calor por convección tienen un impacto importante y su evaluación debe hacerse con cuidado), la radiación infrarroja reflejada, la presencia de humedad en la superficie y la radiación solar directa.

Stefano Sfarra et al. (2018), trabajan con IR para la detección de puentes térmicos en edificios, puntos clave a tener en cuenta en el procedimiento de mejora para lograr ahorro energético. Para ello existe una norma, ISO 6781:1983 (ISO, 2017), donde los autores exponen que el éxito de la misma se ve afectado por un defecto en la metodología empleada. Para ello proponen una metodología de análisis iterativo (IF: *Iterative Filtering*) que permite filtrar la señal IR, limpiando los píxeles influenciados por las sombras del entorno, aumentando la medición de los puentes térmicos.

Fox, Goodhew y De Wilde (2016), utilizaron la IR para la detección de problemas constructivos, comparando dos metodologías: *Walk-through thermography* (método tradicional) y *Pass-by thermography*.

La primera metodología¹, consiste en caminar alrededor del edificio escaneando sistemáticamente todas las superficies en busca de anomalías térmicas, por fuera y por dentro. Cuando se detecta una, el termógrafo graba una imagen térmica para su posterior análisis. Para ello se exige una serie de requisitos climáticos: velocidad de viento inferior a 5 m/s, al menos 10 °C de diferencia

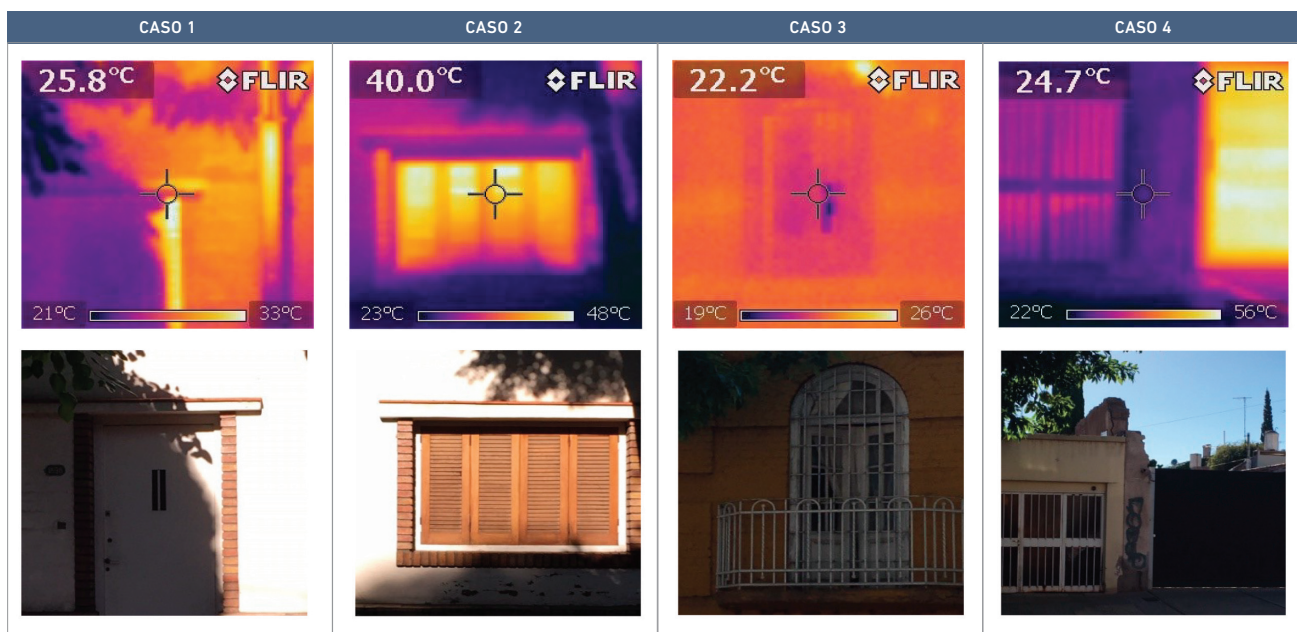
entre interior y exterior, superficies libres de exposición solar directa y realizar la auditoría con condiciones nubosas para evitar los reflejos de un cielo despejado. Este tipo de metodología puede llevar mucho tiempo, especialmente en edificios con muchas habitaciones con el agravante que, a medida que aumenta el tiempo de auditoría, aumentan los costos de la misma.

La segunda metodología evaluada, *Pass-by thermography*, tiene como principal objetivo reducir los costos y acelerar el proceso de inspección. El termógrafo toma imágenes en el exterior, en cada vivienda a medida que camina por enfrente de las fachadas. Esta metodología es similar a la utilizada por *Google Street-view* para la fotografía de calle y se conoce como un enfoque de *drive-by*. Está claro que pasar por los edificios con una cámara térmica permite que se inspeccione un mayor número de propiedades durante el mismo período de tiempo. Además, este método no requiere acceso a las viviendas, por lo que dichas inspecciones pueden realizarse fuera de las horas sociales. Los autores concuerdan que esta metodología es 4 a 4,5 veces menos costosa que el método tradicional y mucho más rápida. En el 2012, en Escocia, utilizaron este método para evaluar 30.000 viviendas, en siete noches, entre las 6 pm y las 2 am. Se descubrieron pérdidas de calor inesperadas por infiltraciones, mal aislamiento y deficiencia en puertas y ventanas.

Miller y Singh, (2015) se basaron en la metodología *Pass-by thermography* y fabricaron un dispositivo de hardware multisensor que está conectado al techo de un vehículo personalizado para escanear rápidamente cientos de edificios en un corto período de tiempo. En el Campamento Base de la Infantería de Marina de los EE.UU., *Camp Lejeune*, la unidad identificó más de 2.500 componentes ineficientes en las envolventes de los edificios en toda la base. Estos componentes ineficientes identificados se clasificaron por tipo y temperatura de la superficie para proporcionar un análisis en profundidad del perfil de energía de la envolvente de cada edificio.

1. Avalada por la ASTM (1997), el RESNET (2012) y el BS (1999).

Tabla 1. Casos comparativos en los que se aprecia la diferencia en la temperatura superficial obtenida en los perfiles urbanos, dependiendo de la radiación incidente.



Fuente: registros fotográficos e imágenes termográficas propias.

En este primer informe, los autores, muestran un análisis en profundidad de 30 edificios en cada instalación y recomiendan medidas de conservación de energía específicas. Martínez Ocaña, Cañas Guerrero y González Requena (2004) han propuesto un protocolo basado en la norma BS EN 13187:1999 (BS, 1999) para evitar errores comunes en las mediciones con termografía debidos a la radiación solar incidente. Este protocolo ha sido aplicado en diversas investigaciones en las que se ha probado su utilidad (Ganem, 2018; Ganem, Barea y Balter, 2016). A continuación, en la Tabla 1 se ejemplifican distintos casos tomados el mismo día, 9 de diciembre de 2018, a la misma hora 9 am, en el mismo perfil, con orientación hacia el este en los Casos 1 y 2; y orientación al oeste en los Casos 3 y 4. Se pueden observar la diversidad de resultados en los distintos casos en los que la radiación incidente afecta de distintas formas a las imágenes termográficas. Se puede observar en los Casos 1 y 2, cómo las fachadas y los elementos constructivos se encuentran parcialmente irradiados por estar orientados hacia el este a las 9 am. En estos casos las temperaturas que se obtienen mediante la inspección termográfica sufren

variaciones considerables, con diferencias que pueden superar los 20 °C. En los Casos 3 y 4, las fachadas no se encuentran irradiadas por estar orientadas hacia el oeste a las 9 am. El Caso 3, es el ejemplo de la correcta toma de imágenes termográficas. Se puede observar la homogeneidad de las temperaturas debido a que la inspección se realiza a la mañana temprano. En el Caso 4, el elemento de la derecha se encuentra irradiado en su cara este. Si no se toma en cuenta dicha circunstancia, se pueden realizar interpretaciones incorrectas del comportamiento térmico de los distintos materiales y elementos constructivos en un mismo perfil urbano. En este caso las diferencias entre las temperaturas registradas están en el orden de los 35 °C. Otro aspecto a tener en cuenta para la correcta inspección termográfica es la emisividad. Avdelidis y Moropoulou (2003) afirman que las consideraciones de emisividad en la termografía son claves para la certeza de la información obtenida. El comportamiento térmico de los materiales está determinado principalmente por sus propiedades ópticas y térmicas. El albedo y la emisividad térmica son los dos factores principales (Doulos, Santamouris y Livada, 2004).

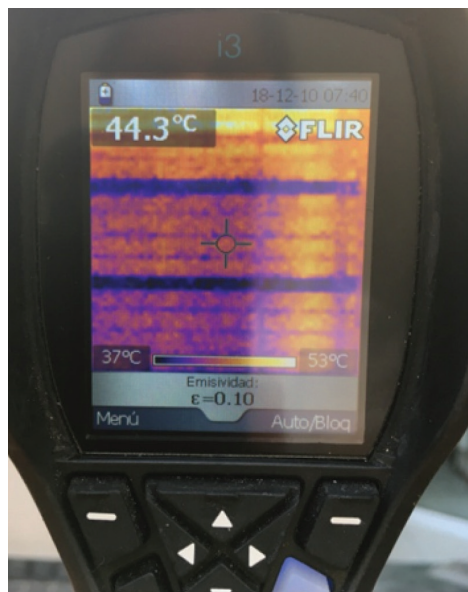
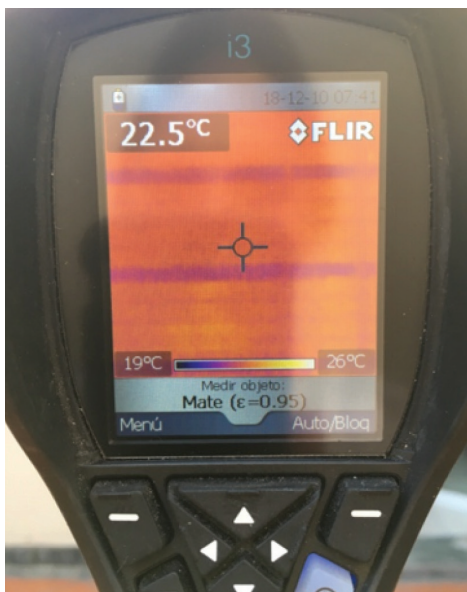
Metodología

Flores Larsen y Hongn (2012) reportan diferencias entre 25 y 50 °C cuando se toman imágenes termográficas del mismo elemento constructivo, en un mismo momento, pero con distintos valores de emisividad: 0,9 (valor probable muy cercano al real) y 0,1 (valor muy alejado del real). Al respecto concluyen que es importante destacar que, para aplicaciones cualitativas, el uso de una u otra emisividad no afecta más que a un cambio de escalas para ajustar los colores de la imagen. En cambio, en una aplicación cuantitativa en donde el objetivo es conocer la temperatura de la superficie, es fundamental que la emisividad con que se toma el termograma sea cercana al valor real.

Por los argumentos expuestos, el objetivo de este trabajo es realizar el diagnóstico del comportamiento térmico de edificios mediante el uso de la termografía infrarroja, y evaluar la utilidad de esta herramienta para un diagnóstico rápido y confiable del comportamiento térmico del conjunto de los edificios existentes.

La termografía infrarroja es una técnica que transforma el patrón de emisiones de un objeto en una imagen visible. Las cámaras infrarrojas no pueden medir temperatura en forma directa. Todas las cámaras interpretan la radiación infrarroja proveniente de la superficie investigada, que involucra radiación emitida, reflejada y ocasionalmente transmitida. El principio de funcionamiento de la termografía infrarroja coincide con las tres leyes esenciales de la radiación:

1. La Ley de Kirchhoff de radiación térmica, que establece la relación entre la emisión y la absorción de energía. Indica que un cuerpo que absorbe mucho también emite mucho y, de acuerdo con este principio, el coeficiente de emisión \mathcal{E} , se introduce en la ecuación como la relación de la emisividad E , del cuerpo real a la emisividad E_z , del cuerpo negro bajo la misma temperatura $\mathcal{E} = E / E_z$. El coeficiente de emisión es no-dimensional y tiene valores entre 0 y 1 dependiendo de la longitud de onda, de la temperatura y de la textura del cuerpo.



Fotografías 1 y 2

Termografía de una ventana tomada con emisividad 0,95 (izquierda) y con emisividad 0,10 (derecha). Se deben notar los errores en la temperatura cuando la emisividad está muy alejada del valor real. Fuente: registro fotográfico propio.

2. La ley de Planck de radiación, describe la radiación espectral específica I' que emana el cuerpo negro ideal. Ecuación 1 (Mohr, Taylor y Newell, 2008).

$$I'(\lambda, T) = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (1)$$

Donde:

λ es la longitud de onda,
 T es la temperatura absoluta,
 h es la constante de Planck,
 c es la velocidad de la luz,
 e es la base del logaritmo natural 2,718281,
 k es la constante de Boltzmann.

Si la radiación espectral específica I , se grafica en la longitud de onda λ , en función de la temperatura, se obtienen como resultado las curvas típicas de Planck. En ellas se puede observar que el máximo de las curvas cambia con el incremento de la temperatura hacia una longitud de onda menor de acuerdo con la Ley de Desplazamiento de Wien. Ecuación 2 (Mohr, Taylor y Newell, 2008).

$$\lambda = b/T \quad (2)$$

Donde:

λ es el largo de onda máximo,
 T es la temperatura absoluta del cuerpo negro,
 b es un constante de proporcionalidad llamado constante de desplazamiento de Wien equivalente a $2.8977685(51) \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$.

3. La ley de Stefan-Boltzmann, aplicada a la emisión de una superficie en todas las longitudes de onda, integra la Ley de Planck. El poder radiante I , [W/m^2], se incrementa con el cuarto poder de la temperatura. Ecuación 3 (Duffie y Beckmann, 1991).

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (3)$$

Donde:

E es la energía de la radiación (W/m^2),
 ϵ es la emisividad hemisférica total de la superficie ($0 < \epsilon < 1$) (no-dimensional),
 σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67051 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$), y
 T es la temperatura (K).

Para este estudio se utilizó una cámara infrarroja marca *FLIR* modelo *i3* de bajo costo, fácil de usar, pequeña y liviana. Este tipo de cámara es factible que sea utilizada, por ejemplo, por técnicos municipales para realizar diagnósticos generales del conjunto de edificios existentes. Sus especificaciones técnicas son:

- > Resolución: 60 x 60 pixeles.
- > Pixeles totales: 3.600 pixels.
- > Campo de visión: $12,5^\circ \times 12,5^\circ$
- > Sensibilidad térmica: $< 0,15^\circ \text{C}$
- > Precisión: $\pm 2\%$ o 2°C
- > Rango de Temperatura: -20°C a 250°C
- > Emisividad: 0,1 a 1,0 Ajustable.

Utilizando el método de *Pass-By Thermography* se tomaron imágenes termográficas acompañadas por imágenes fotográficas para observar la diversidad de comportamientos de las diferentes viviendas en los dos momentos pautados para evitar la incidencia de la radiación solar directa: a la mañana temprano y a la tarde-noche: Para el caso del mes de diciembre se tomaron imágenes termográficas a las 6 am y a las 8:30 pm.

En la Figura 1 se presenta un ejemplo del trabajo realizado con los distintos componentes arquitectónicos y constructivos, en cada perfil urbano. Debido a que en la literatura hay muy pocos trabajos publicados que informen valores de emisividad de materiales de construcción es importante realizar pruebas de laboratorio dentro de un rango de temperatura preestablecido. Para este trabajo, los valores de emisividad fueron introducidos en la cámara de acuerdo con lo informado en estudios locales sobre las propiedades ópticas de los materiales. Dicha información se resume en el Gráfico 1 (Alchapar, Correa y Cantón, 2012; Alchapar y Correa, 2015).

Los materiales comúnmente utilizados para la construcción de viviendas se identifican en la Figura 1 como *Materiales Absortivos* con emitancias de 0,85 o superiores y reflectancias de 0,5 o inferiores. Estos datos son coincidentes con los de Martínez Ocaña, Cañas Guerrero y González Requena (2004) quienes expresan que la mayoría de los materiales de construcción (especialmente los tradicionales) tienen valores de emisividad

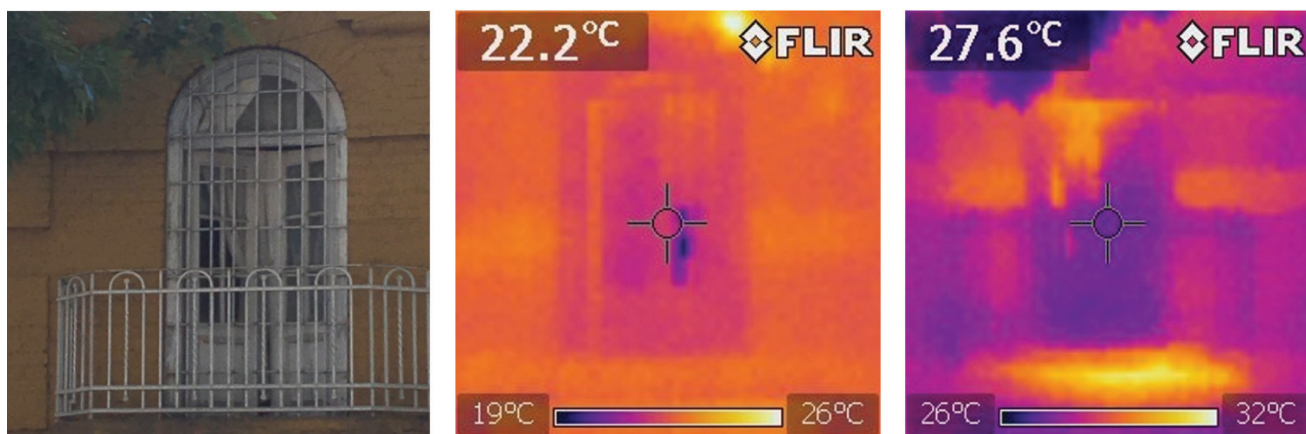


Figura 1
De izquierda a derecha:
(a) imagen en el espectro visible de la abertura,
(b) imagen infrarroja tomada a las 6 am y (c) imagen infrarroja tomada a las 8:30 pm.
Fuente: registro fotográfico e imágenes termográficas propias.

entre 0,9 y 0,95, que al ser elevados hacen posible el registro preciso de temperatura mediante la termografía.

Al mismo tiempo, en un caso, se realizó una inspección con la metodología *Walk-through thermography* y en forma complementaria se realizaron mediciones continuas dentro y fuera del edificio cada 15 minutos con micro-adquisidores LASCAR EL-USB-TC-LCD con el objetivo de examinar en detalle los resultados obtenidos mediante la auditoría termográfica. Los micro-adquisidores se ubicaron suspendidos en el espacio, alejados de estructuras con masa térmica y cuando fue necesario, protegidos de la radiación directa. La distancia del suelo se fijó en 2 metros en todos los casos. Las mediciones que deben tomarse cada 15 minutos por el lapso continuo de una semana o más se realizaron durante 1 mes. Y también se tuvo en cuenta que los micro-adquisidores deben programarse para iniciar al mismo tiempo y mantenerse juntos midiendo por un período de tiempo en las mismas condiciones, previo

a ser colocados en el edificio, para de esta forma poder detectar si hay diferencia entre los sensores.

Las imágenes termográficas se tomaron en verano para el hemisferio sur del 1 al 10 de diciembre de 2018, en un barrio consolidado con edificaciones representativas de los edificios existentes en la ciudad de Mendoza, Argentina (32°40' Lat. Sur, 68°51' Long. Oeste, 750 m s. n. m.). De acuerdo con la clasificación de Geiger y Pohl (1953), Mendoza tiene un clima Bwk: un clima templado continental seco con importantes variaciones de temperatura diaria y estacional. En la Tabla 2 se presenta información climática relativa a la temperatura y a la radiación solar.

Caso de estudio

Se seleccionó un barrio consolidado y característico de la vivienda existente en la ciudad de Mendoza, el barrio Bombal Sur. Se analizaron 48 perfiles: 12 en cada una de las 4 orientaciones de

Tabla 2. Información climática para Mendoza, Argentina.

VALORES ANUALES	JULIO	ENERO			
Temperatura máxima media	24,5 °C	Temperatura máxima media	15,7 °C	Temperatura máxima media	32,3 °C
Temperatura mínima media	9,6 °C	Temperatura mínima media	0,8 °C	Temperatura mínima media	17,4 °C
Temperatura media	16,5 °C	Temperatura media	7,3 °C	Temperatura media	24,9 °C
Irradiancia Global Horizontal	18,4 MJ/m ²	Irradiancia Global Horizontal	10,2 MJ/m ²	Irradiancia Global Horizontal	26,1 MJ/m ²
Humedad Relativa	56%	Humedad Relativa	63%	Humedad Relativa	49%
Heliofanía Relativa	63%	Heliofanía Relativa	58%	Heliofanía Relativa	66%
				Grados día de calefacción (Tb = 18 °C)	1.384
				Grados día de refrigeración (Tb = 23 °C)	215

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, Ministerio de Defensa.



Figura 2
 (a) Ubicación en la trama urbana consolidada de la ciudad de Mendoza del barrio Bombal Sur (izq.) y (b) delimitación del sector de estudio de los perfiles urbanos (der.). Sin escala. Fuente: Google Maps (consultado en noviembre de 2018).

la cuadrícula: norte, sur, este y oeste. La desviación de la cuadrícula del norte magnético es de 5° hacia el este. En la Figura 2 se presenta a la izquierda, la ubicación del barrio Bombal Sur dentro de la trama consolidada de la ciudad de Mendoza. El mismo se encuentra delimitado por las calles Hipólito Irigoyen hacia el norte, Beltrán hacia el oeste, Anzorena hacia el sur y la avenida San Martín hacia el este. A la derecha se muestra el sector en estudio en el que se tomaron los 48 perfiles urbanos de aproximadamente 100 metros cada uno. El mismo está delimitado por las calles 25 de Mayo hacia el norte,

Echeverría hacia el oeste, Tucumán hacia el sur y la avenida San Martín hacia el este.

Resultados y discusión

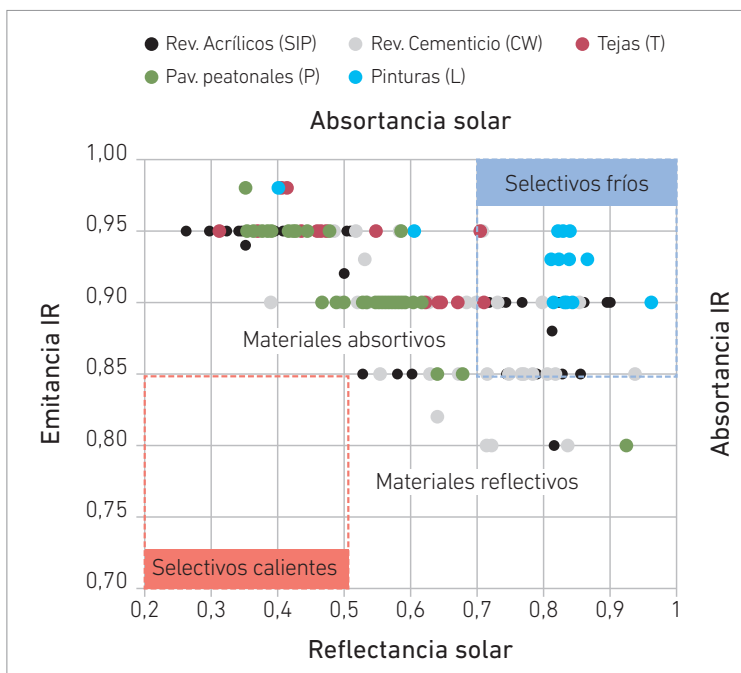
Pass-By Thermography

En la Figura 3 se presentan como ejemplo cuatro perfiles urbanos. Cada uno en una orientación diferente en la trama urbana. En la calle Tucumán entre la numeración 0-100, se presentan fachadas orientadas al norte y al sur, perfiles A y B respectivamente. Y, en la calle Sáenz Peña entre la numeración 1600-1700, se presentan fachadas orientadas al oeste y al este, perfiles C y D respectivamente. Dichas calles se indican en color rojo en la Figura 2. Se puede observar que en los cuatro casos es posible identificar los distintos materiales, defectos constructivos e infiltraciones. Es un método muy rápido y permite obtener gran cantidad de información de forma no invasiva. Utilizando correctamente la termografía es posible realizar primer análisis del perfil de energía de la envolvente de cada edificio e identificar tendencias en el desempeño térmico en edificios con construcción similar.

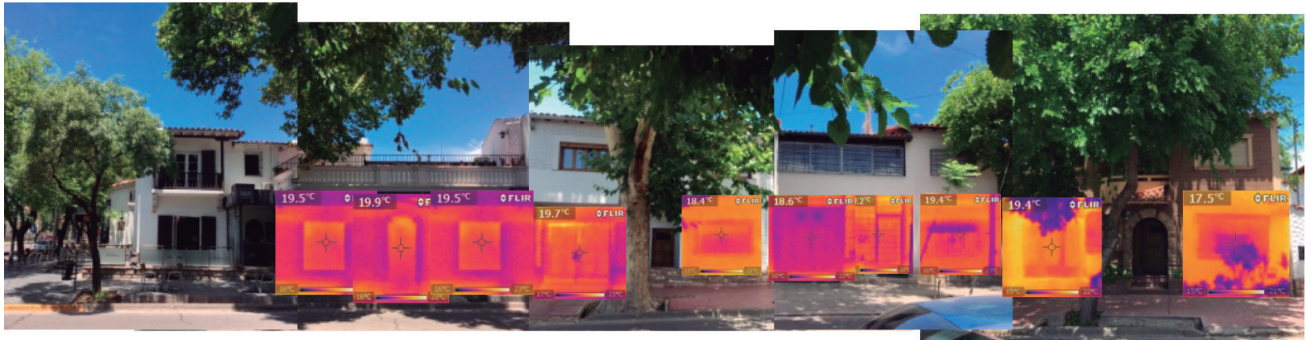
Walk-through Thermography

En el período seleccionado, las temperaturas interiores presentaron variaciones entre 24 y 28 °C. Las temperaturas exteriores variaron diariamente 15 °C, desde 20 a 35 °C. Aunque hay un potencial excepcional para utilizar la estrategia de ventilación nocturna para enfriar espacios interiores, las ventanas se mantienen cerradas la mayoría del día.

Gráfico 1. Propiedades ópticas de los materiales locales (construcción tradicional).



Fuente: Alchapar y Correa (2015).



A. Perfil urbano orientado hacia el norte. Calle Tucumán numeración del 0 al 100. (Parcial).



B. Perfil urbano orientado hacia el sur. Calle Tucumán numeración del 0 al 100. (Parcial).



C. Perfil urbano orientado hacia el oeste. Calle Saenz Peña numeración del 1600 al 1700. (Parcial).



D. Perfil urbano orientado hacia el este. Calle Saenz Peña numeración del 1600 al 1700. (Parcial).

Figura 3
Ejemplos de perfiles urbanos (parciales) relevados durante el estudio. Fuente: elaboración, registro fotográfico e imágenes termográficas propias.

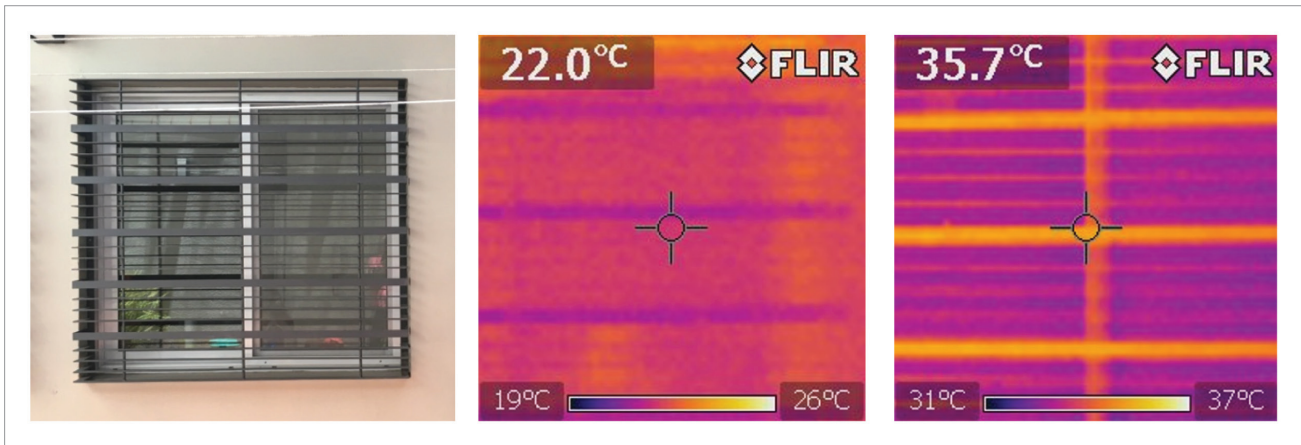
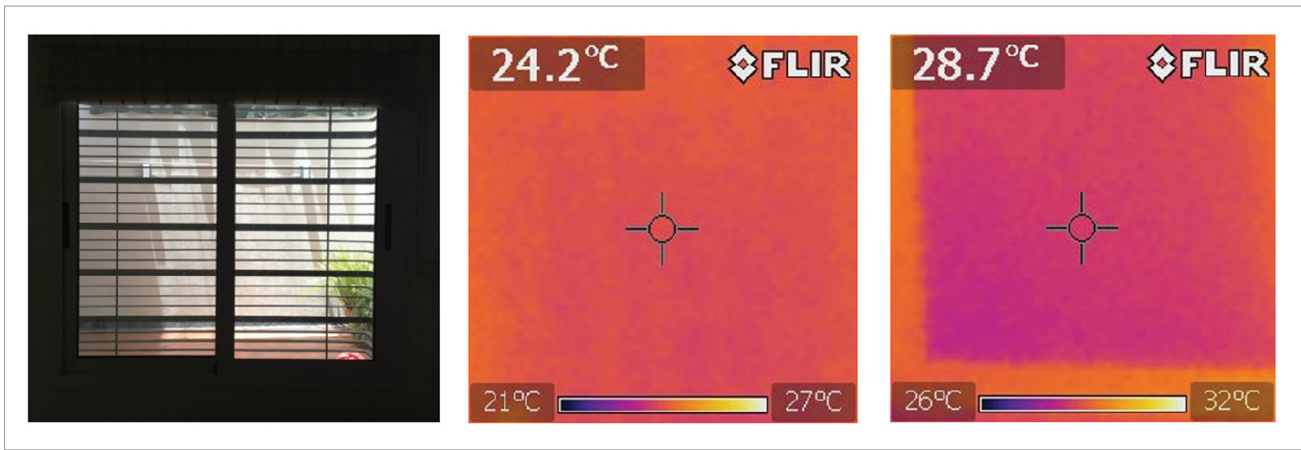


Figura 4

De izquierda a derecha:
Interior del espacio inspeccionado. (a) Fotografía en el rango visible desde el espacio interior, (b) termografía a las 6 am y (c) termografía a las 8:30 pm. Fuente: registro fotográfico e imágenes termográficas propias.

Figura 5

De izquierda a derecha:
Exterior del espacio inspeccionado. (a) Fotografía en el rango visible desde el espacio exterior, (b) termografía a las 6 am y (c) termografía a las 8:30 pm. Fuente: registro fotográfico e imágenes termográficas propias.

En la mañana, al momento de la realización de la inspección termográfica, la temperatura dentro de la casa era de 24 °C y la exterior era de 21 °C. El gradiente térmico era de 3 °C. En la tarde-noche, al momento de la realización de la inspección termográfica la temperatura dentro de la vivienda era de 28 °C y la temperatura exterior era de 35 °C. El gradiente de temperatura era de 7 °C (ver Figura 4).

En el interior, la escala de temperaturas en el registro termográfico realizado a la mañana temprano varía entre 21 y 27 °C, mientras que en la tarde noche, las temperaturas registradas varían entre 26 y 32 °C, mientras que la temperatura del aire varía entre 24 °C a la mañana y 28 °C a la tarde-noche. Se puede observar que en la mañana temprano, las temperaturas que muestra la imagen termográfica son casi homogéneas alrededor de los 24 °C.

En el caso de la imagen de la tarde-noche, las temperaturas de cada elemento constructivo varía y es posible identificar con mayor claridad la ubicación de la ventana en la pared (ver Figura 5). La escala de temperaturas en el registro termográfico realizado a la mañana temprano varía entre 19 y 26 °C, mientras que en la tarde noche, las temperaturas registradas varían entre 31 y 37 °C. Las temperaturas superficiales varían entre 6 y 7 °C, mientras que la temperatura del aire varía 15 °C.

En la imagen termográfica tomada en la tarde-noche, una vez más las diferencias entre los materiales livianos y pesados de la envolvente se observan con claridad.

Conclusión

Este trabajo presenta una revisión exhaustiva de la literatura de los últimos años cubriendo tanto las metodologías ya establecidas y probadas, como las metodologías emergentes que buscan facilitar y ampliar el uso de la termografía para fines de diagnóstico térmico edilicio. Al trabajar con dos métodos complementarios la termografía infrarroja y la medición de temperatura del aire mediante *data-loggers*, se ha logrado clarificar para investigadores, docentes y arquitectos, cuáles son las posibilidades de cada aplicación, sus alcances y limitaciones de forma de permitir una elección fundada para la valoración y diagnóstico de edificaciones existentes.

Asimismo, se demuestra el potencial de trabajar varias metodologías para la toma de termografías edilicias de forma complementaria: *Pass-by Thermography* y *Walk-throught Thermography*. Iniciar el diagnóstico con una auditoría menos costosa y rápida lleva a identificar rápidamente tendencias de comportamiento térmico y defectos constructivos previo a realizar un diagnóstico prolongado en el tiempo y que consume una mayor cantidad de recursos. Este último puede realizarse para ciertos casos representativos

y de esta forma poder hacer extensivos los resultados obtenidos a un conjunto mayor de edificaciones similares.

Se concluye que la termografía infrarroja es una herramienta apta para realizar diagnósticos de comportamiento térmico de edificios en forma masiva de alta replicabilidad y bajo costo, siempre que se siga un protocolo específico que pauté cuándo y cómo se obtiene el registro termográfico y el valor de la emisividad que se introducirá previamente en la cámara. Si estos aspectos se tienen en cuenta es posible la obtención de resultados confiables.

Las imágenes tomadas en la mañana temprano tienden a mostrar temperaturas homogéneas en las superficies en casos con alta inercia térmica. El registro en la tarde-noche muestra mejor los diferentes comportamientos de los materiales de construcción.

Si el objetivo del diagnóstico termográfico es detectar puentes térmicos u otro tipo de intercambio energético, la tarde-noche será el mejor momento para realizar el registro termográfico. Pero, si el objetivo es más amplio y se incluye el análisis del comportamiento térmico del edificio en su conjunto, los dos periodos (en la mañana temprano y en la tarde-noche) deben ser registrados ■

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento recibido del CONICET, de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) y a los propietarios de la vivienda que permitieron realizar las mediciones térmicas y el registro termográfico.

> REFERENCIAS

- Alchapar, N. y Correa, E. (2015). Solar reflectance of opaque enveloped and its effect on urban temperatures. *Informes de la Construcción*, (67). doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.131>
- Alchapar, N.; Correa, E. y Cantón, A. (2012). Solar reflectance index of façade coatings: mitigation potential of urban heat islands. *Ambiente Construido*, (12), pp. 107-123.
- American Society for Testing and Materials-ASTM. (1997). Standard Practice for thermographic inspection of insulation installations in envelope cavities of frame buildings. [Archivo PDF]. West Conshohocken: ASTM. Disponible en <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C1060-11>
- Avdelidis, N. P. y Moropoulou, A. (2003). Emissivity considerations in building thermography. *Energy and Buildings*, (35), pp. 663-667.
- Bianco, A. y Ceradini, V. (2010). The Church of S. Eusanio, Damaged by the April 6, 2009 L'Aquila Earthquake: In situ Diagnostic Investigations as Confirmation of Historical Research and Aimed at Restoration Plan. *Proceedings in the 14th European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid, Republic of Macedonia, pp. 1-6.
- British Standard (BS). (1999). *BS EN 13187:1999 Thermal performance of Buildings e Qualitative Detection of Thermal Irregularities in Building Envelopes e Infrared Method (ISO 6781:1983 Modified)*. Londres: British Standards Institution.
- Costilla Sanz, C. (2017). *Aplicación práctica para cámara IR (Infrarrojos)*. [Proyecto Fin de Carrera/Trabajo Fin de Grado]. E.T.S.I. y Sistemas de Telecomunicación (UPM). [Inédito]. Madrid.
- de Prada Pérez de Azpeitia, F. I. (2016). La termografía infrarroja: un sorprendente recurso para la enseñanza de la física y la química. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, (13), pp. 617-627.
- Doulos, L., Santamouris, M. y Livada, I. (2004). Passive Cooling of Outdoor Urban Spaces: the Role of Materials. *Solar Energy*, (77), pp. 231-249.
- Duffie, J. A. y Beckman, W. A. (1991). *Solar Engineering and Thermal Processes*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- FLIR Systems. (2018). Guía sobre termografía para aplicaciones en edificios y energía renovable. [Archivo PDF]. Wilsonville: FLIR Systems. Recuperado de http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820325/T820325_ES.pdf
- Flores Larsen, S. y Hongn, M. (2012). Termografía infrarroja en la edificación: aplicaciones cualitativas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, (16), pp. 8.25-8.32.
- Fox, M., Goodhew, S. y De Wilde, P. (2016). Building defect detection: External versus internal thermography. *Building and Environment*, (105), pp. 317-331.
- Gamidi, S. H. (2009). *Non-Destructive Testing of Structures*. Bombay: Indian Institute of Technology.
- Ganem, C. (2018). Termografía infrarroja para el diagnóstico térmico confiable con alta replicabilidad y bajo costo de viviendas en Mendoza, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 8(2), pp. 80-89.

- Ganem, C., Barea, G. y Balter J. (2016). Infrared Thermography for Quick Thermal Diagnostic of Existing Building. *Actas del 32nd International Conference on Passive and Low Energy Architecture – PLEA 2016: Cities, Buildings, People: Towards Regenerative Environments*. Los Ángeles, 11 al 13 de Julio.
- Geiger, R. y Pohl, W. (1953). *Revision of Köppen-Geiger climate maps of the Earth*. Gotha: Justus Perthes.
- International Organization for Standardization (ISO). (2017). ISO 6781:1983 Thermal insulation. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method. [En línea]. Disponible en <https://www.iso.org/standard/13277.html>
- Kirimtat, A. y Krejcar, O. (2018). A review of infrared thermography for the investigation of building envelopes: Advances and prospects. *Energy and Buildings*, (176), pp. 390-406.
- Lucchi, E. (En prensa). Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Martínez Ocaña, S., Cañas Guerrero, I. y González Requena, I. (2004). Thermographic survey of two rural buildings in Spain. *Energy and Buildings*, (36), pp. 515-523.
- Miller, J. P. y Singh, N. (2015). *Kinetic Super-Resolution Long-Wave Infrared (KSR LWIR) Thermography Diagnostic for Building Envelopes: Scott AFB, IL*. [Archivo PDF]. Washington D. C.: Engineering Research and Development Center (ERDC). Recuperado de <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a621108.pdf>
- Mohr, P., Taylor, B. y Newell, D. (2008). CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2006. *Review of Modern Physics*, 80(2), pp. 633-730.
- Nardi, I., Lucchi, E., de Rubeis, T. y Ambrosini, D. (2018). Quantification of heat energy losses through the building envelope: a state-of-the-art analysis with critical and comprehensive review on infrared thermography. *Building and Environment*, (146), pp. 190-205.
- Nuzzo, I., Calia, A., Liberatore, D., Masini, N. y Rizzo, E. (2010). Integration of Ground- Penetrating Radar, Ultrasonic Testes and Infrared Thermography for the Analysis of Precious Medieval Rose Window. *Advances in Geosciences*, pp. 69-82.
- Ostrowski, Ch., Antczak, E., Defer, D. y Duthoit, B. (2003). Association of Infra-red Thermography and Thermal Impedance Applied to the Detection of Empty Spaces under Concrete Slabs. *Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, pp. 1-6.
- Residential Energy Services Network-RESNET. (2012, abril). Interim Guidelines for Thermographic Inspections of Buildings. [Archivo PDF]. Oceanside: RESNET. Recuperado de <https://www.resnet.us/blog/resnet-revises-interim-guidelines-for-thermographic-inspections-of-buildings/>
- Sfarra, S.; Cicone, A.; Yousefie, B.; Ibarra-Castanedo, C.; Perilli, S. y Maldague, X. (2018). Improving the detection of thermal bridges in buildings via on-site infrared thermography: The potentialities of innovative mathematical tools. *Energy and Buildings*, (182), pp. 159-171.