

TERMOGRAFÍA INFRARROJA EN LA EDIFICACIÓN: APLICACIONES CUALITATIVAS

Silvana Flores Larsen¹ y Marcos Hongn²

INENCO – Universidad Nacional de Salta – CONICET - Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina

Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255389 – Email: seflores@unsa.edu.ar

Recibido: 07/08/12; Aceptado: 31/09/12

RESUMEN: La termografía infrarroja es un método no destructivo que permite determinar la distribución superficial de la temperatura del área a analizar. Utilizada en conjunto con las técnicas tradicionales de monitoreo de edificios, se convierte en una valiosa herramienta para detectar defectos en la envolvente de los edificios, puentes térmicos, infiltraciones de aire y humedad. El presente trabajo tiene como objetivo mostrar las aplicaciones cualitativas de la termografía infrarroja en la construcción y analizar el efecto sobre medidas cuantitativas de algunas de las fuentes de error más comunes. Para ello, en primer lugar se describe brevemente el funcionamiento de una cámara termográfica y las posibles fuentes de error de los termogramas. A continuación se muestran las imágenes termográficas de edificios de la ciudad de Salta, tomados durante la noche del período invernal y se analiza la información entregada por las imágenes, ejemplificando las posibles causas de interpretaciones erróneas de los termogramas y analizando aquellas aplicaciones en las que la termografía brinda información relevante de patologías o defectos de la estructura.

Palabras clave: termografía infrarroja, auditorías energéticas, mediciones no destructivas.

INTRODUCCION

La termografía infrarroja es un método no destructivo que permite determinar la distribución superficial de la temperatura del área a analizar. Utilizada en conjunto con las técnicas tradicionales de monitoreo de edificios, se convierte en una valiosa herramienta para detectar defectos en la envolvente de los edificios, puentes térmicos, infiltraciones de aire y humedad (Balaras y Argiriou, 2002). Esta técnica, como complemento de las auditorías térmico-energéticas, es particularmente importante para evaluar el confort térmico a través de la medición de temperaturas superficiales de muros, pisos y techos, además de ser sumamente útil para estudiar la integración y conexiones de los sistemas de calefacción solar a la envolvente edilicia y para detectar patologías o defectos constructivos. Actualmente, en los países desarrollados hay un renovado interés en extender la aplicación de la termografía en construcciones, debido a la creciente demanda de edificios con bajo consumo y a la necesidad de un mantenimiento predictivo de los mismos (Grinzato et al., 1998). También se utiliza para estudios de isla de calor urbana, como el realizado en la ciudad de Tel-Aviv desde un edificio de 103 m de altura (Chudnovsky et al., 2004), o para la determinación de pérdidas térmicas en la envolvente edilicia (Lagüela et al., 2011; Sanglier, 2003; Martín, 2004). Debido a la modernización de la tecnología utilizada en los termógrafos actuales, es posible realizar monitoreos en estado transitorio (Defer, 2002; Ordenes, 2009) para estudiar, por ejemplo, el calentamiento de una pared debido a la insolación, a sistemas de calefacción, etc., con los que se obtiene una comprensión más acabada de los procesos de transferencia de calor involucrados y de las propiedades térmicas de los materiales (Astarita et al., 2000; Barreira y de Freitas, 2008).

En la Argentina, el uso de la termografía en la construcción es aún incipiente, debido principalmente a que el alto costo de las cámaras (fabricadas en el exterior) no permite su uso extendido. Sin embargo, debido al auge que esta técnica está teniendo en países del hemisferio Norte, es importante que comience a difundirse tanto en el ámbito académico, pues sus aplicaciones científicas son numerosas y de gran valor, como en el ámbito privado, en donde sus aplicaciones cualitativas son de inmensa utilidad.

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar las aplicaciones cualitativas de la termografía infrarroja en la construcción y analizar el efecto sobre medidas cuantitativas de algunas de las fuentes de error más comunes. Para ello, en primer lugar se describe brevemente el funcionamiento de una cámara termográfica y las posibles fuentes de error en la obtención de información de los termogramas. A continuación se muestran las imágenes termográficas de edificios de la ciudad de Salta, tomados durante la noche del período invernal y se analiza la información entregada por las imágenes, ejemplificando las posibles causas de interpretaciones erróneas y analizando aquellas aplicaciones en las que la termografía brinda información relevante de patologías o defectos de la estructura.

BREVE INTRODUCCION A LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Todos los materiales con temperaturas mayores al cero absoluto emiten energía en forma de radiación, modelizada por la ley de Planck. La radiación infrarroja está comprendida en la banda entre 0.75 μ m a 1000 μ m, fuera del rango del ojo humano que detecta longitudes de onda entre 0.4 y 0.7 μ m. Esta banda infrarroja se subdivide en cuatro regiones: infrarrojo cercano (0.75-3 μ m), infrarrojo medio (3-6 μ m), infrarrojo lejano (6-15 μ m) e infrarrojo extremo (15-1000 μ m). Las cámaras trabajan usualmente en dos bandas: de 2 a 5.6 μ m y de 8 a 14 μ m, las cuales se eligen porque la absorción atmosférica en estas longitudes de onda es menor. Las cámaras termográficas actuales están compuestas de una matriz de sensores, denominado

¹ Investigador Adjunto de CONICET

² Becario doctoral de CONICET

FPA (Focal Plane Array). Estos sensores son transductores que absorben la energía infrarroja y producen una señal eléctrica S , usualmente una tensión o un voltaje. Esta señal eléctrica S_{medida} producida por el sensor es proporcional a la radiación que llega al sensor. Para objetos opacos, esta radiación incluye tres aportes (Gaussorgues, 1981): (1) la radiación emitida por la muestra a temperatura $T_{muestra}$, (2) la radiación que proviene del entorno de la muestra y es reflejada por ésta hacia el sensor y (3) la radiación emitida por el mismo aire ambiente a temperatura T_{aire} . Estas tres componentes deben atravesar el aire entre la muestra y la cámara, lo cual puede producir que parte de la radiación se absorba en el aire (por ejemplo, cuando el aire tiene alto contenido de humedad). Entonces, para muestras opacas, este balance se puede escribir como:

$$S_{medida} = \tau_{aire} \epsilon_{muestra} S_0(T_{muestra}) + \tau_{aire} (1 - \epsilon_{muestra}) S_0(T_{entorno}) + (1 - \tau_{aire}) S_0(T_{aire}) \quad (1)$$

donde $S_0(T)$ es la señal producida por el sensor cuando incide radiación proveniente exclusivamente de un cuerpo negro a temperatura T , τ_{aire} es la transmitancia efectiva de la atmósfera en el rango del detector, $\epsilon_{muestra}$ es la emisividad efectiva de la muestra en dicho rango, $T_{entorno}$ es la temperatura media radiante del entorno (K) usualmente denominada temperatura de fondo, T_{aire} la temperatura del aire (K) y $T_{muestra}$ la temperatura de la muestra (K). Para una correcta medida, el usuario debe configurar en la cámara los parámetros τ_{aire} , $\epsilon_{muestra}$ y T_{aire} con los que se calculará $T_{muestra}$ a partir de la ecuación (1). Para atmósferas limpias y con bajo contenido de humedad, se supone $\tau_{aire}=1$. Usualmente, en ambientes en donde no existen fuentes de radiación considerables, se supone que la temperatura de fondo es similar a la temperatura del aire ($T_{entorno} = T_{aire}$), lo cual puede no verificarse en algunos casos.

Una vez que el software de la cámara calcula la temperatura para cada sensor de la matriz, la transforma en una imagen visible, en donde cada nivel de temperatura se representa mediante un color o nivel de gris configurable. Debe tenerse presente que los sensores de la cámara no miden la temperatura de los objetos, sino la radiación emitida por los mismos, siendo el software contenido en la cámara el que transforma estos valores de radiación en valores de temperatura a través de la ley de Planck.

Los principales parámetros que caracterizan la performance de una cámara son: sensibilidad térmica, campo de visión, velocidad de adquisición de datos, distancia focal mínima y precisión. La sensibilidad de una cámara se expresa en NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) que representa la diferencia de temperatura entre dos puntos de la imagen que resulta en una señal igual al ruido aleatorio de background y se mide en °C. El campo de visión (FOV) es la región en el espacio que contiene una cantidad específica de energía radiada que es recogida por el sistema óptico de un termómetro infrarrojo y se expresa normalmente en grados.

Existen varios factores que pueden conducir a errores o incertezas cuando se trabaja en termografía y son los siguientes:

(1) *Se debe conocer la emisividad ϵ de la superficie del objeto en el rango de medida de la cámara.* La emisividad describe la capacidad de un objeto de emitir radiación comparado con un cuerpo negro (1 es un emisor perfecto y 0 un reflector perfecto). La radiación proveniente de un material opaco se origina en una capa de unos pocos micrones por debajo de la superficie. Por consiguiente, la emisividad de las superficies pintadas es característica del recubrimiento, no de los materiales subyacentes. Debe tenerse presente que la emisividad se define para un intervalo de longitudes de onda de interés. En el caso de la termografía, si se usa una cámara entre 8 y 14 μm es la emisividad promedio en ese rango la que interesa. La emisividad también depende de la temperatura del cuerpo. Avdelidis y Moropoulou (2003) midieron emisividades de cuerpos a 0°C, 48.8°C y 100°C y encontraron que para el rango entre 8 y 14 micrones la emisividad disminuye al aumentar la temperatura, mientras que para el rango entre 3 y 5.4 micrones la emisividad aumenta al aumentar la temperatura del material. La mayoría de los materiales de construcción presentan emisividades en el infrarrojo mayores a 0.8, excepto los metales y algunos materiales brillantes que poseen bajas emisividades. Para corregir este error, las cámaras cuentan con ajustes de emisividad para que el usuario ingrese la emisividad real del objeto. Existen varios métodos para determinar la emisividad de una superficie, siendo el más extendido el de medir la temperatura de la superficie con un termómetro calibrado y ajustar la emisividad de la cámara hasta que ambas temperaturas coinciden.

(2) *Se debe conocer la radiación térmica proveniente de los alrededores del objeto y que es reflejada por el mismo.* Los objetos no solo emiten radiación térmica sino que también reflejan la radiación térmica del entorno. Es la radiación emitida por un objeto la que determina su temperatura, por lo que el componente reflejado implica siempre una sobreestimación de la temperatura del objeto. Por eso es necesario conocer el entorno del objeto y las posibles fuentes de radiación (debido por ejemplo a llamas, el sol, muros calientes, reflejos de las nubes en superficies como los vidrios, etc.). Para corregir este error, algunas cámaras cuentan con ajustes de la temperatura ambiente para que el usuario ingrese una temperatura de fondo (que en caso de no existir fuentes de temperatura mucho mayor a lo que se mide, suele ser similar a la temperatura del aire). Por esta razón, las imágenes termográficas de objetos en el exterior suelen tomarse entrada la noche o a las primeras horas de la mañana para que la incidencia de la radiación del entorno sea la menor posible (se eliminan los reflejos de la radiación solar y se minimiza la radiación de objetos urbanos calientes que se enfrían durante la noche). Una mejora de mayor precisión suele ser utilizar una placa metálica reflectante delante del objeto, que refleje el entorno. Luego se realizan sustracciones de las imágenes térmicas producidas por la placa y por el objeto. Para ello es necesario contar con el archivo de datos radiométrico producido por la cámara, el cual no siempre es accesible.

Además existe otro problema cuando se trabaja en el exterior: bajo condiciones de cielo claro la radiación emitida por la atmósfera en la banda de la cámara es despreciable. Esto significa que la temperatura equivalente de cielo para la cámara es muy baja, lo cual significa que para superficies orientadas hacia el cielo (como los techos) el aporte de la radiación de cielo es despreciable (no existen reflejos sobre la muestra). El problema en este caso está relacionado con la aparición de errores de

calibración debido a que el software de muchas de las cámaras no soporta temperaturas de fondo tan bajas y no se puede suponer que $T_{entorno} = T_{aire}$. Suelen ser comunes errores de hasta 15°C en las lecturas (Krenzinger y de Andrade, 2007).

(3) *La radiación térmica puede ser parcialmente absorbida o emitida por el aire.* Si bien se considera al aire como transparente a la radiación térmica, muchas veces el ambiente en que se realiza la medida puede contener gases calientes o partículas de polvo o agua que pueden absorber, emitir o reflejar la radiación. Las bandas de longitudes de onda que se eligen para los termógrafos son aquellas en las que la absorción del aire es menor. Esto implica que las bandas deben ser pequeñas (lo cual se obtiene con filtros adecuados), con lo que la cantidad de radiación que llega al sensor es menor. Por ello existe un compromiso entre el ancho de banda y la sensibilidad del detector. Algunas cámaras incluyen la opción de ingresar la transmisividad del aire, con el cual corrigen la radiación que llega a la cámara debido a la interacción con partículas del mismo aire.

(4) *El objeto medido debe abarcar todo el campo de visión de la cámara.* Si bien para aplicaciones cualitativas este requerimiento no es fundamental, para aplicaciones cuantitativas se requiere asegurarse que la radiación que llega a determinado sensor proviene del punto que se quiere medir y que no contiene otras contribuciones. Cuando los objetos son muy pequeños o están suficientemente alejados de la cámara debe tenerse presente que los resultados cuantitativos serán menos precisos. También es importante que el objeto a medir esté ubicado en el ángulo correcto en relación con la cámara, preferentemente de frente a la misma.

(5) *El objeto debe estar ubicado en un ángulo correcto en relación a la cámara, de preferencia frente a ésta.* La emisividad es una propiedad óptica que depende del ángulo de incidencia. En general las determinaciones de emisividad se realizan a incidencia normal, por lo que si el ángulo de visión entre la cámara y el objeto es muy diferente, pueden aparecer errores cuantitativos importantes en la determinación de la temperatura. Existen estudios realizados de cómo se modifica la imagen térmica cuando se termografían objetos en los que varía el ángulo de la normal a la superficie en relación al lente de la cámara, como por ejemplo en el caso de esferas isotermas que aparecen con distribuciones de temperatura que en realidad no son tales, sino producto de valores de emisividad diferentes para cada punto de la superficie.

Como se puede apreciar, el uso de la termografía infrarroja en forma cuantitativa es bastante complejo, cualquiera sea la aplicación a estudiar. Sin embargo, la termografía usada cualitativamente es una herramienta de gran utilidad para el diagnóstico de pérdidas térmicas, puentes, infiltraciones de aire, falta o rotura de aislación térmica, presencia de humedad, etc. A continuación se muestran los resultados de una campaña de medición realizada para ejemplificar algunos de los puntos mencionados anteriormente.

MATERIALES Y METODOLOGIA

La metodología consistió en tomar imágenes termográficas de diferentes escenarios urbanos, seleccionándose algunos de los edificios más significativos de la ciudad. Luego se seleccionaron las imágenes que resultaron más esclarecedoras en cuanto a la aplicación y utilidad de la termografía, por lo que el trabajo muestra sólo un pequeño grupo de los edificios registrados con la cámara. Las mediciones exteriores se realizaron durante la noche del 12 de julio y a primeras horas del amanecer del 13 de julio de 2012 para construcciones ubicadas en diversas zonas de la ciudad de Salta, mientras que las mediciones en interiores se realizaron durante la tarde del día 12 de julio. La temperatura exterior osciló entre 5 y 8°C. Se utilizó una cámara termográfica Fluke Ti55FT, de microbolómetros no refrigerados en matriz de plano focal con detectores de VOx con bajo nivel de ruido, de 320x240 píxeles, con distancia focal mínima de 15cm. La sensibilidad térmica NETD es de 0.05°C a 30°C, con una precisión de $\pm 2^\circ\text{C}$ o 2% (el mayor de ambos) y rango de temperatura de -20°C a 600°C (en tres rangos: -20°C a 100°C, -20°C a 350°C y 250°C a 600°C). La banda espectral es de 8 a 14 μm y cuenta con corrección de emisividad de 0.1 a 1 (en incrementos de 0.01) y tecnología IR-fusion. La temperatura de fondo mínima que acepta el software es de -50°C. Para todas las medidas se consideró $\tau_{aire} = 1$.

A continuación se muestran y discuten los resultados obtenidos. En primer lugar se analiza la influencia de la emisividad y de los reflejos provenientes del entorno sobre el valor de temperatura entregado por la cámara. A continuación, se muestran los resultados de aplicaciones cualitativas en las que la termografía es capaz de brindar información relevante para la detección de patologías en la edificación.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

1- ¿Cuánto error puede producir en la medida de temperatura utilizar una emisividad muy diferente de la real?

La termografía de la Figura 1 corresponde a un techo de madera con 5cm de aislación y cubierta de teja, orientado hacia el Oeste, que recibió radiación solar durante toda la tarde. La temperatura de la habitación al momento de la medida fue de 18.9°C. Para ejemplificar la influencia de la emisividad en el error de la temperatura superficial se tomaron dos termogramas: el primero con emisividad 0.9 (valor probable muy cercano al real) y con emisividad 0.1 (valor muy alejado del real). Las temperaturas del techo indicadas por la cámara cuando la emisividad es cercana a su valor real (figura de la izquierda), oscilan entre 21 y 28°C, valores razonables para temperaturas de superficies interiores. El muro más frío es una pared medianera de ladrillo macizo expuesta al exterior, por lo que su temperatura superficial es menor (15.6°C). Sin embargo, cuando se toma el mismo techo con una emisividad muy diferente de la real (figura de la derecha), la temperatura del techo en el punto de mayor temperatura, que en la imagen de la izquierda indicaba 28°C, en la imagen de la derecha indica 77.1°C, valor completamente irreal. Lo mismo sucede con la temperatura de la pared, que en la imagen de la izquierda indicaba 15.6°C y en la imagen de la derecha indica -29.4°C. 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.

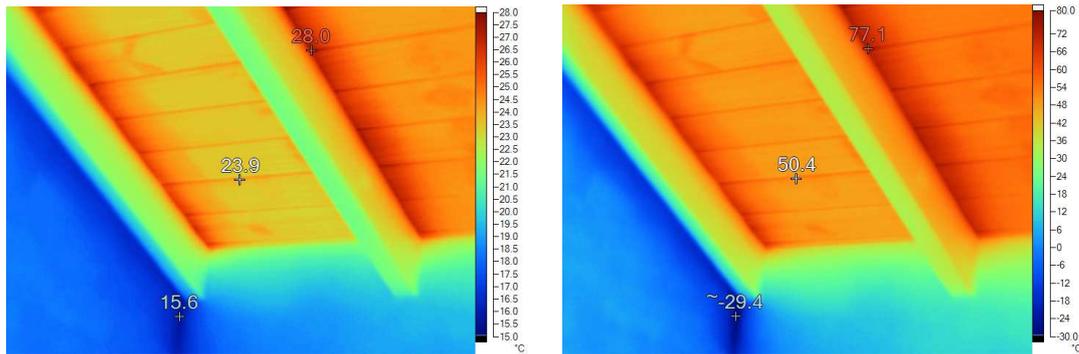


Figura 1: termografía de un techo de madera tomada con emisividad 0.9 (izquierda) y con emisividad 0.1 (derecha). Notar los errores en la temperatura cuando la emisividad está muy alejada del valor real.

2- ¿Cuánto error puede producir en la medida de la temperatura la radiación del entorno reflejada por la muestra?

Como ya se mencionó, la radiación que llega a la cámara proviene de tres fuentes: la radiación emitida por el propio objeto que se está observando, la radiación del entorno del objeto reflejada por éste y la radiación emitida/absorbida por el aire.

El aporte de la radiación del entorno reflejada por el objeto puede ser de importancia cuando la emisividad del objeto es baja (alta reflectancia), como por ejemplo cuando se miran materiales metálicos a temperaturas bajas o medias. En estos casos es más difícil estimar la temperatura de los objetos porque lo que reflejan del entorno es mayor que lo que ellos mismos emiten por su propia temperatura. Por otra parte, el aporte del reflejo del entorno se minimiza si la temperatura del objeto a medir es mucho mayor a la de los objetos del entorno (hornos, estufas, focos, etc.). Si el entorno del objeto está a temperatura uniforme conocida (muy común en medidas hechas en laboratorio o ambientes interiores), se puede utilizar este valor como temperatura de fondo.

Las siguientes tres figuras muestran objetos con temperatura uniforme cuyas imágenes termográficas, sin embargo, no muestran superficies isotermas debido a que han registrado el aporte de la radiación del entorno. Si el usuario no tiene en cuenta estos factores, seguramente caerá en errores sustanciales de interpretación de las imágenes.

El primer caso que se muestra es la imagen termográfica de un vidrio (Figura 2). El vidrio, si bien es transparente en el rango visible, no lo es en el rango infrarrojo puesto que absorbe toda la radiación de este rango. Esto significa que cualquier objeto que se ubique por detrás del mismo, aunque esté a alta temperatura, no se verá en una imagen termográfica. Por otra parte, si bien la reflectancia infrarroja de los vidrios es baja (menor a 0.15), aún así la cámara puede detectar objetos reflejados por el vidrio. La Figura 2 muestra una imagen tomada a través del vidrio de una ventana. La imagen de la izquierda muestra una superposición de las imágenes visible y térmica tal como se ve en la cámara. La imagen central muestra la toma en el rango visible y la imagen de la derecha la toma en el rango infrarrojo. Se observa en la imagen infrarroja que el vidrio es completamente opaco por lo que no se puede apreciar la imagen termográfica de la vivienda. Además se observa que la imagen reflejada del operador, lo cual no significa que el vidrio esté en esa zona más caliente que en la zona azul. Si bien en este caso es evidente que el reflejo corresponde al operador y que toda la superficie del vidrio está a temperatura uniforme, no siempre los reflejos del entorno son tan identificables como en este caso.

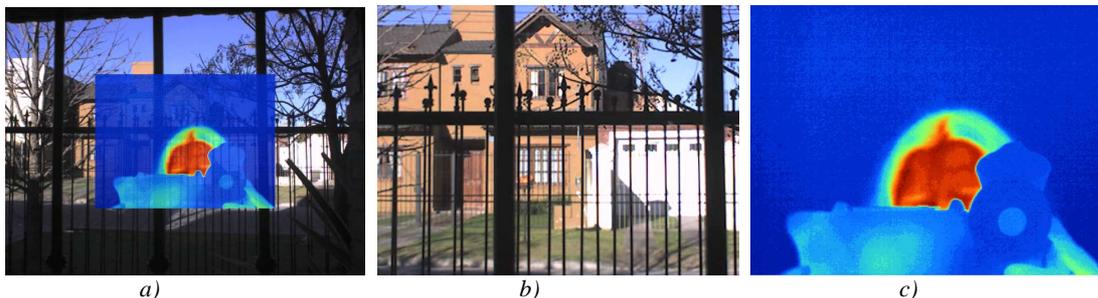


Figura 2: a) Imagen visible + imagen IR; b) imagen visible; c) imagen IR. El vidrio es transparente en el visible pero opaco en el infrarrojo, por lo que la imagen de la casa vista a través del vidrio de una ventana no se puede ver en la imagen infrarroja, que muestra exclusivamente la imagen reflejada del operador de la cámara.

La Figura 3 muestra el termograma del agua de dos piscinas distintas, tomadas durante la noche. Es evidente que el agua se comporta como un material especular y que, si bien existen zonas del agua en las que el termograma indica temperaturas más altas (anaranjadas) y otras más bajas (azules), esto no se corresponde con la realidad, puesto que la superficie del agua se encuentra a temperatura constante y las zonas que aparecen calientes corresponden en realidad al aporte de reflejos del entorno, del cual aún se pueden identificar las formas y geometría. En este caso, la temperatura del agua es complicada de estimar exactamente puesto que no se conoce la temperatura de fondo, sin embargo se puede estimar un límite máximo para la misma. Para ello se toma el dato en el punto donde se ve el “reflejo” del cielo despejado (es decir, en un punto donde se

puede presuponer que el aporte del entorno es mínimo). Si tomáramos una emitancia igual a 1 (para eliminar el efecto del entorno, según la ecuación 1), sería como suponer que el agua se comporta como un cuerpo negro y emite la máxima radiación posible a la temperatura a la que se encuentra. En este caso la temperatura del agua que indica la cámara es de 4.9°C. Como el agua no es un cuerpo negro perfecto (su emitancia es $\epsilon_{\text{agua}}=0.98$) y como puede existir un pequeño aporte proveniente del cielo, entonces la temperatura del agua será en realidad menor a 4.9°C, siendo este valor una cota máxima para su posible temperatura. Se puede hacer el ejercicio de ingresar a la cámara la emitancia real (0.98) y la menor temperatura admisible para la radiación de fondo (-50°C). Con estos valores, la cámara arroja un valor para la temperatura del agua de 5.6°C (por encima de la cota máxima). El error en este caso se debe a la temperatura mínima de fondo admisible por la cámara.

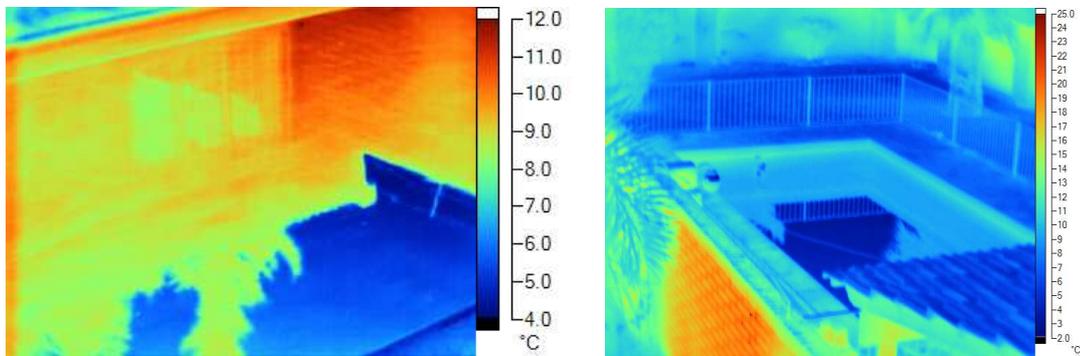


Figura 3: termogramas del agua de dos piscinas tomados en la noche (IAM). El agua está a temperatura constante. Se observa el reflejo de una pared medianera y de una ventana en el agua de la pileta, lo cual no indica que la temperatura del agua sea mayor en esas zonas.

En la figura siguiente, se muestra un caso menos evidente que podría llegar a ser objeto de confusión (Figura 4). La termografía, realizada durante la noche, muestra una pared lateral exterior de ladrillo macizo visto, en la cual se observan zonas más calientes en los laterales y una zona central más fría. A primera vista podría pensarse en un muro con grandes diferencias de temperatura, entre 14°C y 21°C. La temperatura del aire exterior al momento de la medición (23:30 hs) fue de 12°C. Este muro recibió radiación solamente hasta las 16:30 hs, por lo que no podría a priori suponer que la mayor temperatura corresponde a un aporte de ganancia solar. Una primera hipótesis podría ser un defecto de aislación o la presencia de un caño con agua fría o humedad. Pero el muro no tiene aislación, no pasan caños de agua por la zona, ni se observa humedad o cambio de coloración en la superficie de la pared. Una segunda hipótesis podría ser que las partes calientes de la pared se deben a que el interior está calefaccionado (estufas sobre la pared, o enfrentadas a ésta) y que lo que se observa son pérdidas térmicas no uniformes. Pero la zona no se calefaccionó en todo el día, el monitoreo interior indica que el día que se tomó la medida la temperatura no superó los 20°C y un termograma del lado interior muestra una distribución de temperatura uniforme, por lo que debe buscarse otra explicación a la no homogeneidad térmica de la pared. La solución se encuentra en el análisis del entorno: existen grandes superficies construidas ubicadas a ambos laterales y al frente de esta pared, las cuales emiten radiación térmica que se refleja en los ladrillos. Las zonas calientes corresponden a la sumatoria de distintos reflejos provenientes de estas superficies del entorno. Como la zona central y en mayor medida la superior es la que recibe menos radiación reflejada, “aparenta” tener menor temperatura. En este caso, si se quisiera conocer la temperatura con mayor precisión, se coloca sobre la superficie de la pared una superficie metálica (para tener baja emitancia), de forma que esta superficie refleje la imagen infrarroja del entorno. Se toman dos termografías: la primera sin la superficie y la segunda con la superficie metálica, y luego se realiza una resta de ambas imágenes (en valores radiométricos). Una alternativa cuando no se tiene acceso a los archivos radiométricos sería registrar el termograma de la pared acercando la cámara a la superficie y “sombreado” la zona a medir con una superficie metálica.

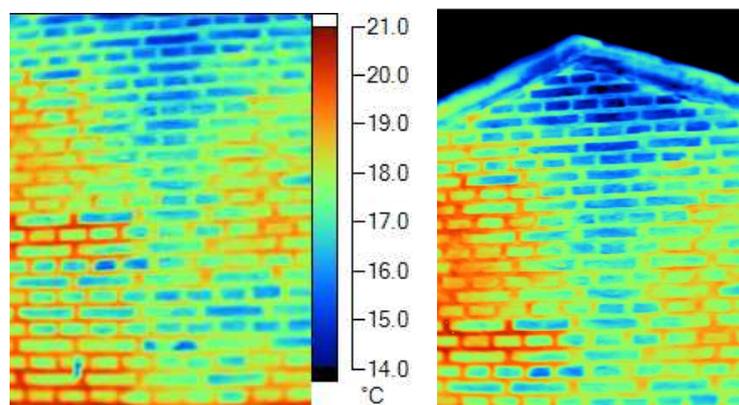


Figura 4: una pared que aparentemente tiene una distribución de temperatura no uniforme, en realidad está reflejando la radiación térmica de construcciones vecinas ubicadas en los laterales.

3- Ejemplos de aplicaciones cualitativas

A continuación se muestran algunos ejemplos en donde la termografía cualitativa puede ser de gran utilidad. La Figura 5 muestra el termograma de la pared medianera de un edificio. En la imagen de la izquierda se marcaron con círculos dos manchas: la inferior, con temperatura de unos 16°C, es clara evidencia de un calefactor encendido, en donde el aire caliente sube y se estratifica en el techo del local; la segunda mancha, de color oscuro, indica o bien un punto frío causado probablemente por una pérdida de agua. La imagen visible revela en ese punto (y en dos superiores) que el revoque está reparado, por lo que es muy probable que las pérdidas se hayan reparado satisfactoriamente en los pisos superiores y que tenga problemas en el de más abajo. El óvalo en rojo del termograma señala una zona del departamento claramente calefaccionada: se observa una zona caliente a la altura del techo que se extiende hacia abajo, casi delimitando el rectángulo de la habitación. El óvalo en verde señala una zona claramente no calefaccionada, probablemente la escalera del edificio.

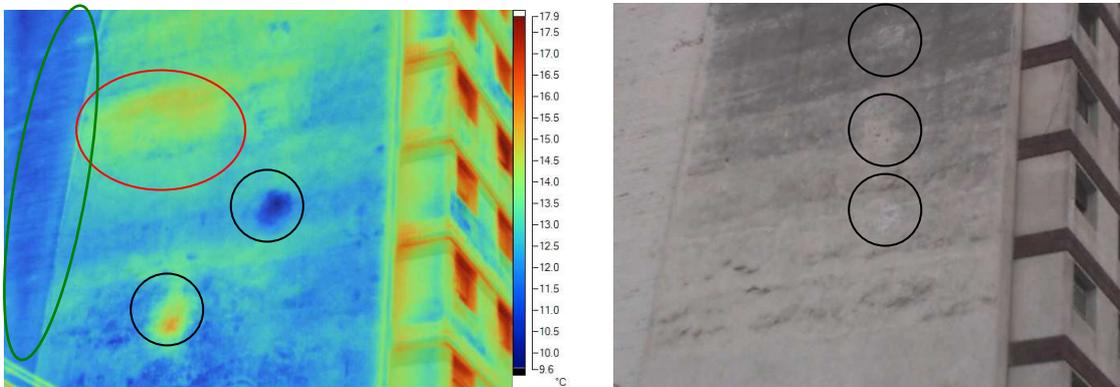


Figura 5: termografía de un edificio de departamentos (calles 25 de Mayo y Güemes).

La Figura 6 muestra otro edificio de la ciudad. En este caso, se pueden observar los puentes térmicos debido a las vigas verticales de hormigón del edificio, en azul oscuro y los contornos de los ladrillos de las paredes, que en la imagen de la derecha son invisibles bajo el revoque. También se pueden detectar los ambientes calefaccionados, con el calor estratificado cerca del techo, y los que no lo están.

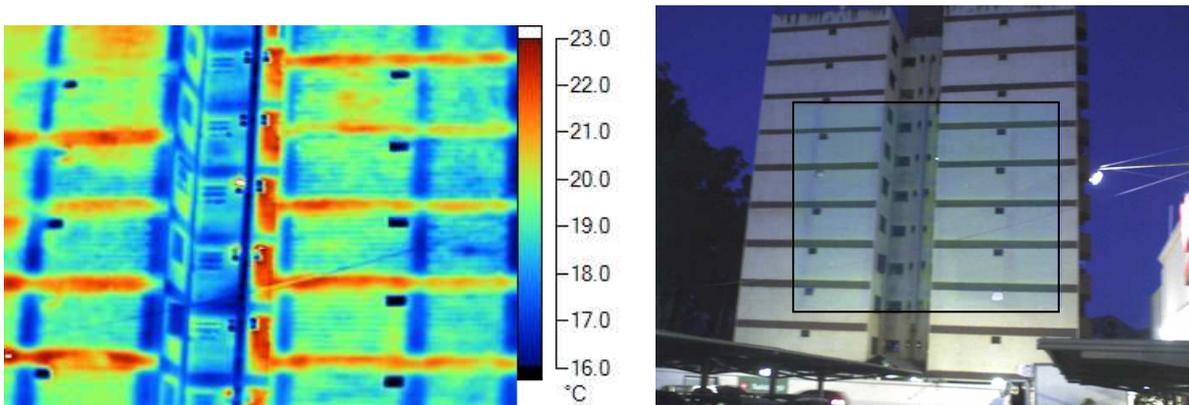


Figura 6: termografía de un edificio de departamentos (edificio VEA, calle Sarmiento).

En la siguiente figura (Figura 7) se observa, a la izquierda, la imagen infrarroja del mismo techo de machimbre de pino de la Figura 1, en una zona diferente. La imagen muestra una mancha caliente indicando un defecto en la colocación de la aislación. La imagen de la derecha de la Figura 7 muestra una esquina del techo de un ambiente interior, en donde la pared azul es una medianera que da hacia el exterior y las restantes son interiores. Se observa una diferencia de entre 1°C y 2°C entre ambas superficies.

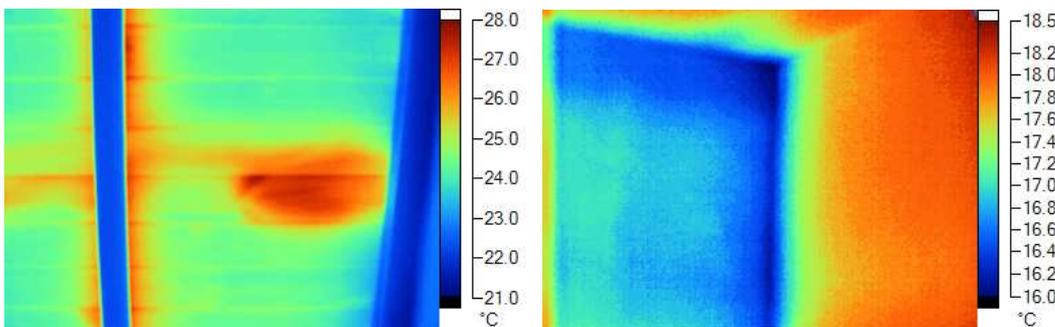


Figura 7. Termogramas de un techo de machimbre de pino con un defecto en la aislación (izquierda) y de la esquina del techo de un ambiente (derecha).

La Figura 8 muestra una pared interior de ladrillo macizo a la vista que conecta un living con una galería cerrada. La imagen se tomó con una emitancia de 0.85 correspondiente a ladrillo macizo. Se observa que la mezcla cementicia tiene mayor temperatura que el ladrillo, lo cual es de esperarse debido a que el hormigón tiene una conductividad térmica mayor que el ladrillo y funciona como un puente térmico entre los ambientes que conecta la pared. El ladrillo macizo presenta en promedio temperaturas 2.5°C menores a la de la mezcla cementicia. La imagen de la derecha muestra la variación de temperatura a lo largo de la línea vertical del termograma. Se observan claramente los máximos (correspondientes a la mezcla cementicia, todos con el mismo valor) y los mínimos, correspondientes a los ladrillos, los cuales presentan más oscilaciones en sus valores mínimos debido a que sus superficies rugosas reflejan el entorno de forma diferente entre uno y otro.

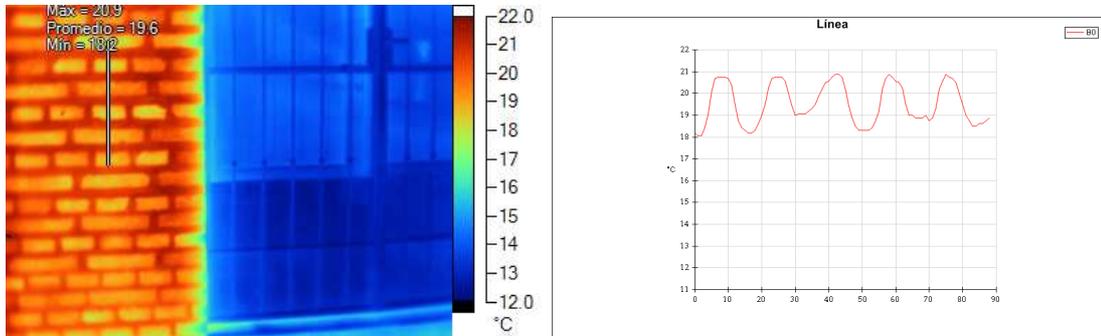


Figura 8: termograma de una pared interior de ladrillo macizo a la vista (izquierda) y distribución de temperatura a lo largo de una línea vertical de la pared (derecha).

Finalmente, la Figura 9 muestra una imagen termográfica de una parte de la ciudad de Salta, tomada durante la noche. Se detectan las fachadas de los edificios en altura, más calientes. El conjunto de edificios en la zona central tiene su fachada hacia el Oeste. También se alcanzan a divisar los cerros hacia el fondo. Este tipo de imágenes es el que se utiliza para evaluar cualitativamente los efectos de isla de calor en las ciudades, de los materiales de las construcciones y tipos de pavimentos, etc. Un estudio cuantitativo requiere de un análisis complejo del entorno, condiciones climáticas, propiedades ópticas de los materiales y temperatura radiante, entre otros.

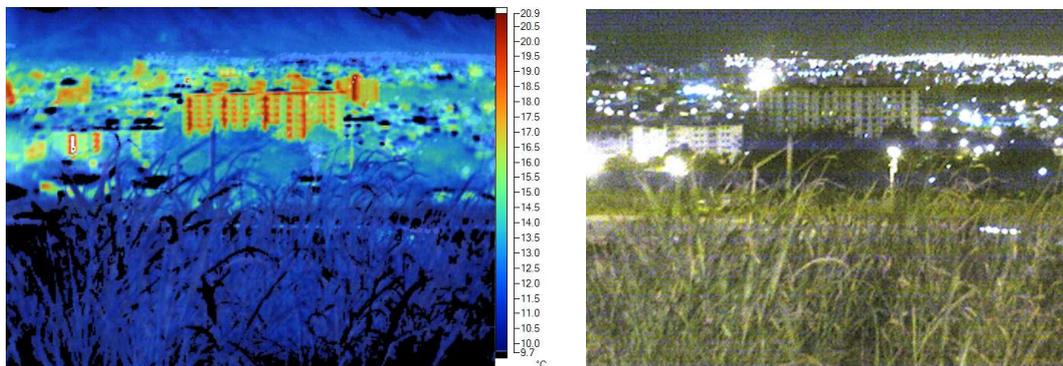


Figura 9: termografía de una parte de la ciudad de Salta tomada durante la noche desde La Loma.

CONCLUSIONES

La termografía infrarroja es una herramienta de gran utilidad para detectar rápidamente defectos constructivos en edificios que de otra manera serían muy difíciles de evaluar. Es una herramienta de suma utilidad como complemento de auditorías térmicas y energéticas. Para que las mediciones realizadas en forma cuantitativa sean acertadas, deben tenerse siempre presentes las posibles fuentes de error y ser conscientes de las limitaciones que presenta este tipo de medidas. A continuación se listan algunas de las sugerencias más importantes:

- Complementar las imágenes térmicas con imágenes visibles.
- Documentar el entorno, detectar fuentes calientes o causas de posibles reflejos.
- Determinar la emisividad de las superficies de la imagen.
- Detectar si en la imagen coexisten superficies con emisividades muy diferentes.
- Sensar la temperatura ambiente y la humedad relativa del aire.
- En lo posible, en los interiores evitar corrientes de aire.
- Tomar la imagen infrarroja lo más cerca posible del objeto y con el ángulo de visión correcto.
- En caso de termografías en el exterior de edificios, conviene tomarlas de noche o inmediatamente antes de la salida del sol.
- Recordar que un dato cuantitativo de temperatura superficial es extremadamente difícil de determinar mediante termografía, por lo que siempre deben darse con suma precaución.

- Los sensores infrarrojos funcionan mejor a bajas temperaturas. El uso de la cámara durante un tiempo prolongado causa que los sensores, la electrónica interior y la carcasa de la cámara aumenten su temperatura, emitiendo radiación que puede alcanzar a los sensores y causar errores en la medida.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta y por PICTO ENARGAS 0192.

REFERENCIAS

- Astarita T., Cardone G., Carlomagno G.M., Meola C. (2000). A survey on infrared thermography for convective heat transfer measurements. *Optics & Laser Technology* 32, pp. 593-610.
- Avdelidis N.P., Moropoulou A. (2003). Emissivity considerations in building thermography. *Energy and Buildings* 35, pp. 663–667.
- Balaras C., Argiriou A. (2002). Infrared thermography for building diagnostic. *Energy and Buildings* 34, pp. 171-183.
- Barreira E., de Freitas, V.P. (2007). Evaluation of building materials using infrared thermography. *Construction and Building Materials* 21, pp. 218–224.
- Chudnovsky A., Ben-Dor E., Saaroni H. (2004). Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements. *Energy and Buildings* 36, pp. 1063–1074.
- Defer D., Shen J., Lassue S., Duthoit B. (2002). Non-destructive testing of a building wall by studying natural thermal signals. *Energy and Buildings*, Volume 34, pp. 63-69.
- Gaussorgues G., *La thermographie infrarouge Technique et Documentation*, Paris, 1981.
- Grinzato E., Vavilov V., Kauppinen T. (1998). Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings* 29, pp. 1-9.
- Krenzinger A., de Andrade A.C. (2007). Accurate outdoor glass thermographic thermometry applied to solar energy devices. *Solar Energy*, Volume 81, pp. 1025-1034.
- Lagüela S., Martínez J., Armesto J., Arias P. (2011). Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic. *Energy and Buildings* 43, pp. 1216–1221.
- Martín S., Cañas I., González I. (2004). Thermographic survey of two rural buildings in Spain. *Energy and Buildings* 34, pp. 515–523.
- Ordenes M., Lamberts R., Güths S. (2009). Estimation of thermophysical properties using natural signal analysis with heat and moisture transfer model. *Energy and Buildings* 41, pp. 1360-1367.
- Sanglier G. (2003). Aplicación de la termografía al estudio de pérdidas energéticas en edificios. En : *Teledetección y Desarrollo Regional, X Congreso de Teledetección*, 2003, pp. 329–332.
- Saunders P., White D. R. (2004). Interpolation errors for radiation thermometry. *Metrologia* 41, 41–46, 2004.

INFRARED THERMOGRAPHY IN BUILDINGS: QUALITATIVE APPLICATIONS

ABSTRACT: Infrared thermography is a non-destructive methodology to determine the surface temperature distribution of samples. It is a valuable tool that used together with traditional monitoring techniques allows detecting envelope failures, thermal bridges, air cracks and presence of humidity. The main focus of this article is to show some qualitative applications of infrared thermography in buildings and to analyze the effect of the common error sources on the quantitative results. Firstly, the functioning principle of a thermographic camera and the possible error sources on the measures are presented. Then a set of infrared images taken during a winter night in Salta city is shown and the information collected from the data is analyzed. Examples of common erroneous interpretations are presented together with some applications where the infrared thermography gives relevant information for building diagnostic.

Key words: infrared thermography, energy auditing, non-destructive measurements.