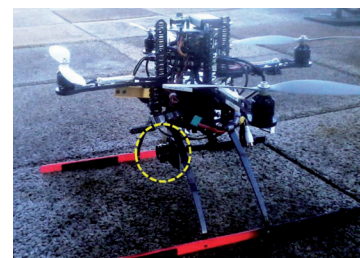


Monitorización del comportamiento térmico de fachadas mediante UAV: aplicaciones en la rehabilitación de edificios



Thermal monitoring of facades by UAV: applications for building rehabilitation



Beatriz González-Rodrigo¹, Ricardo Tintero-Caballero², María García-De-Viedma², Jesús Pestana-Puerta³, Adrián Carrio-Fernández³, José-Luis Sánchez-López³, Ramón Suárez-Fernández³, Pascual Campoy-Cervera³, Javier Bonatti-González³, Juan Gregorio Rejas-Ayuga⁵, Rubén Martínez-Marín⁵, Miguel Marchamalo-Sacristán⁵

¹ Universidad Politécnica de Madrid. ETSI Civil. Dpto. de Ingeniería Civil. Calle Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid.

² Universidad Politécnica de Madrid. ETS de Edificación. Dpto. Construcciones Arquitectónicas y su Control. Avda. Juan de Herrera, 6 - 28040 Madrid.

³ Universidad Politécnica de Madrid. ETSI Industriales. Calle de José Gutiérrez Abascal, 2 - 28006 Madrid.

⁴ Universidad de Costa Rica. Centro de Investigación en Ciencias Atómicas, Nucleares y Moleculares (CICANUM). Ciudad de la Investigación. San Pedro de Montes de Oca (Costa Rica).

⁵ Universidad Politécnica de Madrid. ETSI de Caminos, Canales y Puertos. Calle Profesor Aranguren, 3 - 28040 Madrid.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7899> | Recibido: 01/12/2015 • Aceptado: 01/04/2016

ABSTRACT

• This paper presents the integration of data acquisition from land and unmanned aerial vehicles (mUAV) in the visible and thermal channels, validating the results for inspection and detection of different pathologies on facades of real case studies. An original methodology is proposed and tested for rapid inspection of building envelopes, supported by geospatial techniques. Frequent pathologies, as moisture damages and thermal losses are analyzed in real urban facades. UAV-based inspection allows checking inaccessible areas with visible and thermal sensors, obtaining homogeneous global models that can be analyzed with sufficient time and detail at the office (postprocessing). Based on these models, objective diagnosis can be performed even in the most complex neighborhoods and building designs, as well as energy balance analyses and detection of pathologies with economical and reliable means for large areas. This technology is ready for use in building inspection and it is very useful in the design of rehabilitation projects for tall and complex buildings in the framework of energy efficiency.

• **Keywords:** building inspection, computer vision, façade pathologies, thermal loss, multicopter, microUAV.

RESUMEN

Se presenta la integración de la adquisición de información desde vehículos aéreos no tripulados (mUAV) y tierra en los canales visible y térmico, validando los resultados para la inspección y detección de distintas patologías en fachadas de casos reales. Se propone y testa una metodología original para la inspección rápida de envoltantes, apoyada en técnicas geoespaciales. Se analizan patologías reales frecuentes en fachadas urbanas: daños por humedad y puentes térmicos. La inspección con mUAV permite revisar zonas inaccesibles, con sensores visibles y térmicos, para la obtención de modelos homogéneos globales que se pueden analizar con suficiente tiempo y detalle en la oficina (post-proceso). Con estos modelos se pueden realizar diagnósticos objetivos incluso en los diseños más complejos de barrios y edificios, así como análisis del balance energético de los edificios y detección de sus

patologías con medios económicos y fiables para grandes áreas. Se concluye que esta tecnología está preparada para su uso en inspección de edificios, siendo muy útil en el diseño de proyectos de rehabilitación de edificios altos y complejos en el marco de la eficiencia energética.

Palabras clave: inspección de edificios, visión por ordenador, patologías de fachada, pérdidas térmicas, multirrotores, microUAV.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La rehabilitación es una disciplina prometedora en Arquitectura e Ingeniería Civil, ya que muchos edificios están llegando al final de su ciclo de vida en los países occidentales. Asimismo, la mejora de la eficiencia energética en zonas urbanas está promoviendo la renovación de edificios y la rehabilitación, en el marco de las Directivas Internacionales, como las EPBD (eficiencia energética de los edificios) 2002/91 / CE [1] y 2010/31 / UE [2]. La rehabilitación presenta retos complejos, ya que no hay soluciones generales para todos los edificios, sino soluciones técnicas que deben ser elegidas para cada edificio de acuerdo con sus especificidades [3].

En el ámbito de la UE se ha verificado que el consumo de energía en edificación está en aumento [2]. La estimación de los consumos energéticos en edificación es compleja y se suele computar como la diferencia entre consumos reales y estimados [4]. En este marco, la medición directa de los flujos de calor existentes eliminaría esta incertidumbre. Se estima que en España había aproximadamente 17.200.000 viviendas en 2010, de las que un 70% están en bloques de viviendas [5]. La transferencia térmica en edificios residenciales se produce principalmente (83%) a través de las ventanas y los muros [6]. Asimismo se estima que un 23 % de estas pérdidas se deben a anomalías como puentes térmicos o infiltraciones no deseadas, y el resto a procesos de ventilación o transmitancia a través de materiales sólidos.

Las auditorías energéticas en las zonas urbanas se complican cuanto más denso y complejo es el mosaico de un barrio. Incluso en el mismo edificio, se pueden observar distintas respuestas energéticas en diferentes partes del mismo, dependiendo principal-

mente de la orientación, pero también de detalles de construcción y ejecución [7][8]. El análisis de eficiencia energética debe hacerse a distintas escalas: ciudad, barrio, edificio. Para las escalas de ciudad y barrio se han desarrollado metodologías específicas que se basan en estimar y cuantificar efectos relacionados con las islas urbanas de calor (UHI, *Urban Heat Islands*) [9]. UHI es un fenómeno influido por muchos factores, como las propiedades térmicas de los materiales urbanos, la menor evapotranspiración comparada con el suelo no urbano, el efecto "cañón" de la topografía urbana, la contaminación y, muy especialmente, el calor generado por las actividades de calefacción, transporte y metabolismo. [10]

A escala de edificio, la inspección es un proceso clave en el diseño de proyectos de rehabilitación. La disponibilidad de modelos 3D termográficos y ortoimágenes es esencial para el diseño óptimo de proyectos de rehabilitación eficientes [11][12]. El desarrollo en los últimos años de pequeños sensores termográficos para vehículos no tripulados amplía las posibilidades para aplicaciones en teledetección. Las zonas urbanas presentan dificultades añadidas para la teledetección, dada la diversidad y complejidad de los materiales y tipologías de fachada [13]. Esto representa un inconveniente para el seguimiento y la gestión de estas áreas.

El desarrollo de *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) en la última década con múltiples aplicaciones [14], hace posible el diseño de una unidad termográfica de inspección de edificios a bordo de un UAV, propuesta como un reto a medio plazo [12]. Eschmann et al. [15] incluyeron este tipo de diseños en el marco de los avances prometedores en el dominio de los ensayos no destructivos (NDT).

1.2. TERMOGRAFÍA INFRARROJA Y TELEDETECCIÓN

La termografía infrarroja permite la medición de la radiación emitida por una superficie. Se registra la información de la radiación de la superficie en longitudes de onda largas (7 a 14 micras) del infrarrojo, denominado TIR (*Thermal Infrared*). Estos sensores se utilizan para adquirir datos de superficies a temperatura ambiente.

Las cámaras de infrarrojos se han desarrollado y expandido rápidamente en los últimos años debido al desarrollo de la tecnología de imagen digital y los bolómetros. En los últimos años se ha comenzado a fabricar detectores matriciales 2D de resolución media para sensores y cámaras de infrarrojos no refrigerados. Esto permite el montaje de cámaras térmicas de alta calidad de bajo coste. La tecnología de detectores IR no refrigerados dominante es la de los microbolómetros con más del 95% del mercado en 2010 [16].

Las termografías infrarrojas (termografías IR) permiten captar y representar la distribución de la temperatura superficial de una parte o el total de la envolvente de un edificio [17]. La intensidad de la imagen está afectada por la temperatura de la superficie, las características de la misma, las condiciones ambientales y el propio sensor. Tras la medición debe realizarse la interpretación de las imágenes térmicas (termogramas). Los flujos de calor pueden conducir al calentamiento o enfriamiento diferencial de las superficies de los edificios mediante mecanismos tales como la diferente inercia térmica de los materiales utilizados en fachadas, los puentes térmicos y las filtraciones de aire. La humedad de las superficies a menudo reduce la temperatura de las mismas debido a la refrigeración por evaporación [18]. La termografía infrarroja se puede utilizar en diversos campos de la rehabilitación de edificios, como la detección de anomalías y patologías (humedad, infiltración, puentes térmicos, defectos, ...) [19][20][21].

La inspección termográfica de envolventes de edificios se suele realizar sin utilizar ningún medio de excitación externo, es de-

cir, estudiando su propio patrón de emisión infrarroja en estado normal. Por ello, estas inspecciones se enmarcan en el campo de la termografía pasiva, en contraste con la termografía activa, en la que se aplica una excitación térmica artificial con el objetivo de inducir una excitación de los electrones de los átomos del material y el consecuente incremento de la emisión en forma de radiación infrarroja [22]. Las principales metodologías para obtener termografías de un área de interés son [23]: reconocimientos aéreos, vuelos automatizados, muestreos de pasada continua a pie de calle, muestreo a pie tradicional (externo; externo e interno), muestreos con repetición y muestreos time-lapse. Una descripción de cada tipo de muestreo con la bibliografía y características relacionados se pueden encontrar en Fox et al. [23].

Los principales problemas de la toma de datos de termografías IR de fachadas, provienen de la falta de accesibilidad y ángulo de visión, que incrementan el efecto de la temperatura reflejada en las imágenes. En ciudades es posible tomar imágenes correctamente de los primeros pisos desde pie de calle, pero en edificios altos, el efecto de la temperatura reflejada (TRFL) aumenta hacia arriba al disminuir el ángulo de incidencia, y se hace difícil separar la energía emitida de la reflejada.

Actualmente se plantea la oportunidad de aprovechar la complementariedad de las imágenes tomadas a pie de calle y las imágenes tomadas desde los UAV. Esto permite la inspección en lugares inaccesibles, asegurando una posición ortogonal de la cámara con respecto al paramento. Del mismo modo, es posible tomar imágenes de las cubiertas desde arriba, girando la posición de la cámara en el UAV.

1.3. INSPECCIÓN DE EDIFICIOS CON UAV

El uso de micro-vehículos aéreos no tripulados (mUAVs) es un medio para obtener imágenes aéreas en la inspección de edificios. Estas imágenes presentan la ventaja de cerrar la brecha entre las imágenes aeroportadas tradicionales y las imágenes tomadas desde tierra. Un tipo común de mUAV utilizado para aplicaciones de la fotografía son multirrotores, también conocidos como multicopteros.

La investigación basada en la realización de termografías con mUAVs ha sido escasa en el pasado, pero está ganando impulso recientemente. Martínez-De-Dios y Ollero [24] emplearon UAVs en termografía pasiva de edificios, específicamente para detectar la pérdida de energía procedente de las ventanas. Más tarde, el trabajo de Iwaszczuk et al. [25] se centró en la combinación de imágenes en los espectros visible e infrarrojo para complementar un modelo de edificio 3D existente. Eschmann et al. [15] fueron capaces de obtener mosaicos muy detallados de una fachada con un mUAV octocóptero. Estos autores mencionaron la posibilidad de utilizar sus algoritmos para adquirir imágenes térmicas, pero presentaron solamente resultados en espectro visible. En esta dirección, empleando imágenes en tierra, González-Aguilera et al. [12] aplicaron un tratamiento de reconstrucción 3D de la imagen con termografías para obtener un modelo termográfico de una fachada. En un trabajo reciente Yahyanejad y Rinner [26] se propusieron nuevos descriptores de entidades de imagen para mejorar la combinación de las imágenes en diferentes longitudes de onda. Estos autores aplicaron esta técnica a una imagen de mosaicos en los espectros visible y térmico, adquiridos desde varios cuadrirrotores.

Otro campo que está recibiendo mucha atención es la georeferenciación de las imágenes tomadas por mUAVs. En esta dirección, Lagüela et al. [27] desarrollaron una metodología para la extracción automática de la geometría del edificio directamente

desde imágenes termográficas oblicuas aéreas. Los modelos 3D geométricos y térmicos obtenidos pueden ser insertados así en un Sistema de Información Geográfica (GIS). La georeferenciación de imágenes adquiridas desde mUAVs a menudo se centra en las imágenes en el visible. Por ejemplo, el Grupo de Visión Aérea (Graz, Austria) ha centrado su investigación en combinar nubes de puntos con las fuentes de datos disponibles públicamente [28][29]. De esta manera, se pueden georeferenciar las imágenes adquiridas. En investigaciones más recientes se explora el uso de marcadores de referencia para mejorar para aumentar la calidad de las reconstrucciones 3D [30] así como en la detección automática de puentes térmicos en edificación [31].

1.4. OBJETIVOS

Este trabajo presenta una metodología para la integración de imágenes adquiridas desde UAV y tierra en los canales visible y térmico para la inspección de edificios, con dos objetivos específicos:

- a) Desarrollar una metodología basada en mUAV para la inspección de edificios integrando instrumentos y sensores.
- b) Validar el uso de las imágenes térmicas obtenidas desde UAV para la detección de patologías de fachadas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. SENSORES

MicroCam [32] es un sensor pasivo que registra la radiación procedente de las superficies en las longitudes de onda de 8 a 12 micrómetros. Se monta con una lente óptica de 7,5 mm. La sensibilidad térmica de esta cámara permite trabajar en un rango de temperatura de entre -20°C a 60°C , en una secuencia de imágenes máxima de 60 fotogramas por segundo. En estas condiciones, adquiere imágenes de 384×288 píxeles, con salida de vídeo NTSC (*National Television System Committee*) y una sensibilidad NEDT (*Noise equivalent differential temperature*) de 80mK.

Una de las características que hacen de este sensor particularmente interesante para el monitoreo cercano (o de corto alcance) es que el cálculo de la emisividad de las superficies puede ser realizado mediante calibración externa, comparando con otro sensor térmico (por ejemplo, una cámara de mano térmica calibrada). Por tanto, se pueden caracterizar diferentes cuerpos en el infrarrojo térmico en una adquisición sencilla a partir del cálculo del parámetro de emisividad.

Las imágenes a nivel de calle fueron tomadas con una cámara Flir B-335, de resolución de 320×240 píxeles y sensibilidad NEDT de 50-70mK [33]. Esta cámara funciona en un rango de temperatura de -20°C a 350°C y con un IFOV (*Instantaneous Field of View*) de 1,364 mRad.

2.2. INTEGRACIÓN Y OPERACIÓN UAV

La adquisición de las imágenes se realizó con un cuadricóptero AscTec Pelican [34], equipado con la cámara térmica MicroCam y un ordenador de a bordo, AscTec Atomboard (Figura 1). Este cuadricóptero se utiliza en los laboratorios de investigación, gracias a su alta capacidad de carga útil, capacidad de vuelo y el diseño de su estructura, que permite la adición de sensores adicionales. El software de adquisición del sensor es modular utilizando el marco *Robot Operating System* [35], lo que permite determinar la configuración del sensor en tiempo de ejecución sin necesidad de recompilar las fuentes. El cuadricóptero es operado por un piloto humano. Esta configuración permite guardar las imágenes

adquiridas a 30 fps, y un tiempo de vuelo de unos 10 minutos por unidad de batería.

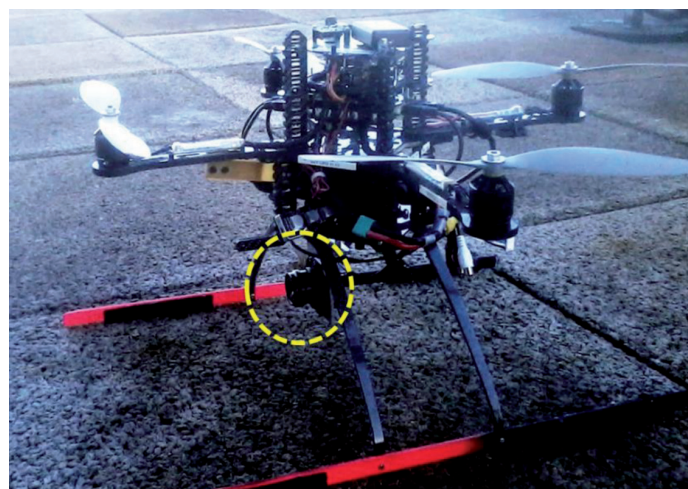


Fig. 1: Cuadricóptero AscTec Pelican con sensor térmico MicroCAM

2.3. TRABAJO DE CAMPO: EDIFICIOS SELECCIONADOS

Se eligieron dos edificios para el trabajo de campo, ambos centros académicos de la Universidad Politécnica de Madrid: el edificio principal de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (ETSI Caminos) y el edificio de Automática y Robótica de la Escuela de Ingenieros Industriales (ETSI Industriales). El edificio de Caminos fue construido en 1963 en hormigón armado (estructura y fachada) con un diseño de líneas estrechas de ventanas con mal aislamiento. El edificio de Automática y Robótica se edificó en la década de 1930 con fachada de ladrillo. A comienzos del Siglo XXI se remodeló la cubierta y se instalaron nuevas ventanas aisladas. Las fachadas seleccionadas para el monitoreo presentan orientación norte (Caminos) y este (Industriales) para evitar el reflejo de la radiación solar de la tarde.

Durante el trabajo de campo, se muestrearon varios tipos de posibles patologías de fachadas: humedad, degradación y puentes térmicos. Estas patologías se estimaron por evaluación visual y posteriormente se contrastaron con el análisis de imágenes. Las temperaturas interiores y exteriores fueron medidas continuamente durante la captura de imágenes.

2.4. ANÁLISIS DE IMÁGENES

Las técnicas de procesamiento de datos empleadas incluyen la corrección geométrica, corrección radiométrica, y una serie de análisis de imagen (realces y mejoras de imagen, operaciones entre bandas de imagen y análisis estadísticos). La elección de las técnicas a aplicar depende de la calidad de imagen y la salida requerida. La función principal de los diferentes procesos aplicados a los datos adquiridos es producir un único archivo de múltiples fuentes perfectamente co-registrado. Esto tiene como objetivo realizar un análisis posterior destinado a correlacionar espacialmente los elementos de interés de monitoreo (paredes, ventanas, estructuras, materiales, ...) con la temperatura superficial registrada.

Las imágenes FLIR B-335 fueron procesadas con el software FLIR para ajustarlas, incluyendo la temperatura y la humedad ambiente medidos durante los trabajos de campo. Asimismo, se introdujeron en el software la emisividad conocida y la temperatura reflejada medidas en campo. De esta manera, se pudieron generar ráster de temperatura de las fachadas analizadas, que fueron empleados para validar la metodología de inspección que emplea el sensor MicroCAM en el mUAV.

Las imágenes del sensor MicroCAM fueron analizadas con software ENVI-ITT, aplicando termografía cualitativa para la detección de las posibles patologías, para lo cual no se requieren magnitudes absolutas de reflectancia superficial y/o emisividad. Se aplicaron algoritmos estándar de detección de anomalías espectrales como el RX [36] a ficheros multifuente formados por las bandas de imagen corregidas de la MicroCAM integradas con las de FLIR. Las distorsiones radiométricas detectadas se corrigieron con transformaciones basadas en PCA (Principal Component Analysis), como MNF (Minimum Noise Fraction) [37] y filtros de paso alto. La regularidad de la fachada de ladrillo hace que en toda su superficie se mantenga prácticamente constante la proporción entre el mortero de cemento visible en las juntas y el ladrillo. Esto permite ajustar un valor de emisividad conjunto para la fachada, que se incorpora a la corrección de las imágenes FLIR. Ambos materiales se encuentran dentro del mismo rango de emisividad, con valores medios asignados por diversos autores de 0,93 [38].

Cuando se produce una anomalía o singularidad térmica puede ser indicio de una patología constructiva. Esta anomalía se manifiesta como una variación poco frecuente de radiación infrarroja, detectable estadísticamente mediante un estudio discriminado por percentiles o cuantificando las variaciones con respecto a la media de valores alejados de las tolerancias de ejecución de los materiales empleados. No existe ningún documento o consenso sobre los diferenciales que pueden ser considerados como significativos. No obstante, en la práctica se consideran significativas las

variaciones instantáneas con valores superiores a 0,5 °C en obras de ladrillo (fábrica), yeso u hormigón (emisividades muy altas y conductividades bajas).

Las diferencias de temperatura observadas se corresponden con una fuente de calor o una diferencia de la composición o el estado de materiales teóricamente uniformes. En el caso de un cuerpo negro o de ensayos realizados en laboratorio con control preciso de la homogeneidad de la emisividad del material, las diferencias en la emisión de radiación infrarroja indican diferencias de temperatura, ya que la potencia emitida por un cuerpo es directamente proporcional al producto de la emisividad (1 en caso de un cuerpo negro), la constante de Stefan-Boltzmann y la cuarta potencia de la temperatura.

3. RESULTADOS

3.1. ANÁLISIS COMBINADO VISIBLE-TÉRMICO DE PATOLOGÍAS DE FACHADA

El mUAV permitió la adquisición de ambas fachadas completamente en imagen visual y térmica. Una vez llevado a cabo el filtrado y análisis de imágenes se identificaron posibles patologías en los canales visible y térmico. Estas patologías potenciales fueron validadas con una segunda visita de trabajo de campo en ambos edificios.

La Figura 2 presenta un ejemplo de detección combinada en visible y térmico de una patología por humedad. Se detectaron

dos zonas potenciales de humedad en la inspección visual (Fig. 2 arriba), mientras que las imágenes térmicas (Fig. 2 abajo) permitieron discriminar una zona muy húmeda (izquierda), mientras que la otra no estaba húmeda, correspondiendo a un daño por humedades pasadas, no activas en la actualidad (derecha).

La Figura 3 muestra la evaluación de las pérdidas térmicas en dos casos, uno relacionado con una ventana abierta y otro relacionado con aislamiento externo deficiente de la instalación de aire acondicionado. Similares pérdidas térmicas fueron identificadas con cámaras termográficas de mano en el edificio de 1953 del Instituto Eduardo Torroja (CSIC), con fachada de ladrillo y ventanas mal aisladas [39].

La Figura 4 mues-

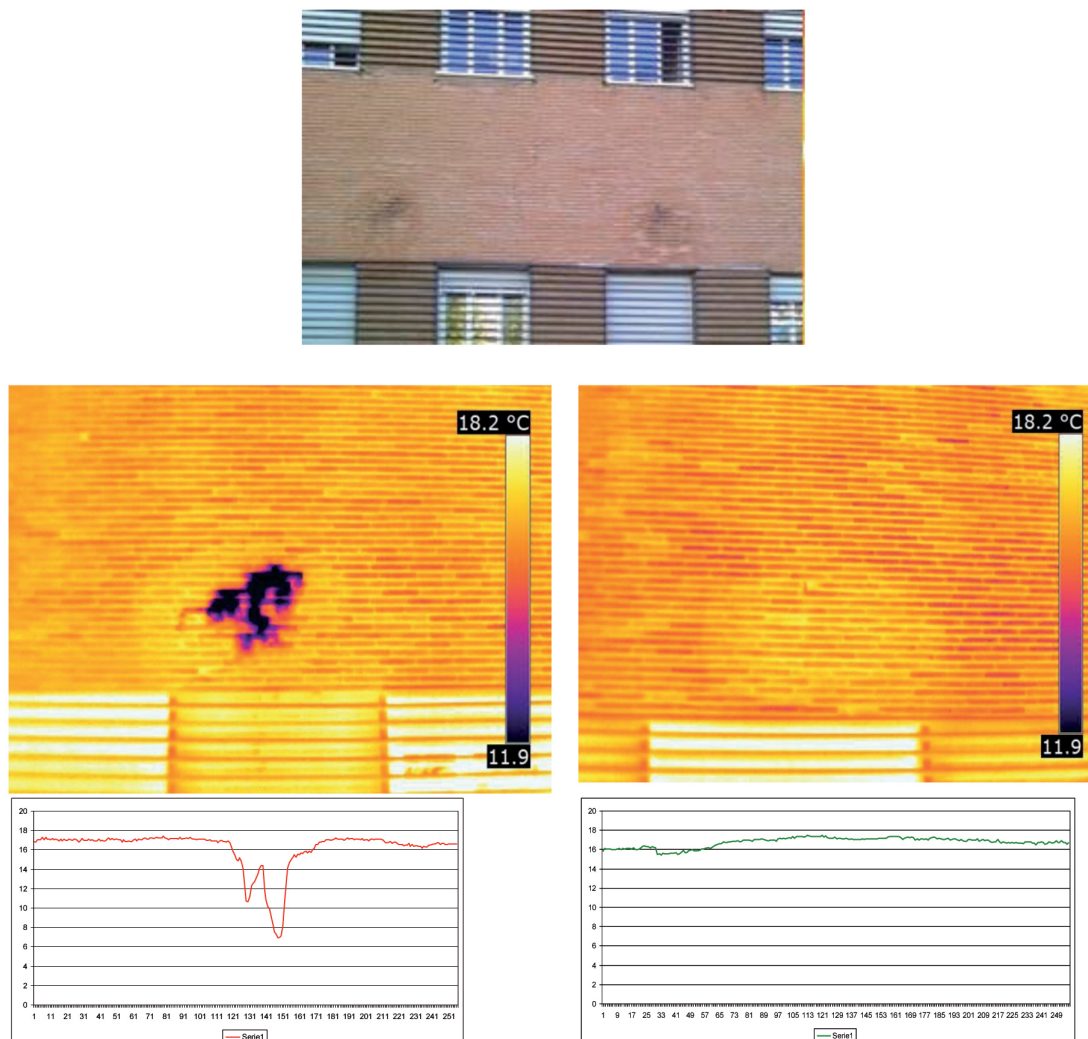


Fig. 2: Detección de patologías por humedad activa en la fachada de la ETSI Industriales (UPM): Arriba imagen en visible, debajo imágenes térmicas y perfiles de una humedad activa (izquierda) y no activa (derecha)

tra la detección de pérdidas térmicas en el contacto de un muro vertical con la fachada de hormigón del edificio de la ETSI Caminos UPM. En las imágenes FLIR se puede apreciar una pérdida térmica vertical en la unión entre el muro y la fachada de hormigón. El análisis de los perfiles de temperatura en los ficheros multifuente que integran los datos de ambos sensores permite confirmar la presencia de estos puentes térmicos. La Figura presenta asimismo la detección de anomalías térmicas relacionadas con forjados. El contacto entre forjado y fachada suele ser vulnerable a las pérdidas térmicas, ya que en estos puntos el aislamiento de fachada puede ser deficiente si el proceso de construcción no es cuidadoso.

Las imágenes del edificio de ETSI Caminos (hormigón) muestran un patrón de variación uniforme de la temperatura en toda la superficie, no relacionado con puentes térmicos u otras patologías, sino con la textura. La textura de esta fachada está condicionada por las huellas de las tablas de encofrado con el que fue hecha y la falta de planeidad. Como resultado, se aprecia una distorsión continua en la superficie, debido a pequeños cambios en la orientación de cada mesa de encofrado y, por tanto, los pequeños cambios de temperatura, registrados por el sensor térmico. En este

caso, sólo los cambios drásticos en la temperatura de la superficie pueden indicar patologías en estas áreas, por lo que en muchos casos ha sido necesario calentar durante la noche las oficinas para así detectar cambios relacionados con los puentes térmicos.

Las patologías detectadas se pueden clasificar en las siguientes clases:

- puentes térmicos en los componentes estructurales, principalmente en las uniones de los encofrados y los muros verticales con las fachadas de hormigón.
- patologías relacionadas con la humedad, claramente apreciadas en las imágenes térmicas.
- pérdidas térmicas en las ventanas y aberturas aisladas deficientemente.
- pérdidas térmicas en los circuitos de aire acondicionado.

Los edificios analizados presentan patologías típicas comunes a otros edificios del siglo XX en España, como el edificio del IETCC [39]. Numerosos barrios de nuestras ciudades fueron construidos en la época de la posguerra (1945 - 1965) por lo que sus edificios e infraestructuras se acercan al final de su vida útil. Por ello, varios

autores recomiendan realizar la inspección para la rehabilitación a nivel de barrio [40]. El trabajo de inspección a escala de barrio requerirá la combinación de varias técnicas a distintas escalas de trabajo, incluyendo imágenes de satélite, aeroportadas, UAV y tomadas a pie de calle.

3.2. DETECCIÓN DETALLADA DE ANOMALÍAS TÉRMICAS

Se realizó un análisis detallado de detección de anomalías térmicas en la fachada del edificio de la ETSI Caminos, como indicador de posibles puentes térmicos. Para ello se seleccionó una fracción del cerramiento exterior del edificio y se muestra la imagen térmica FLIR con una ventana móvil de 50x50 cm calculando la media y desviación típica de la temperatura en cada sector. Las imágenes térmicas se escalaron asignando dimensiones geométricas a las celdas de las matrices, con el fin de poder asignar temperaturas a las superficies

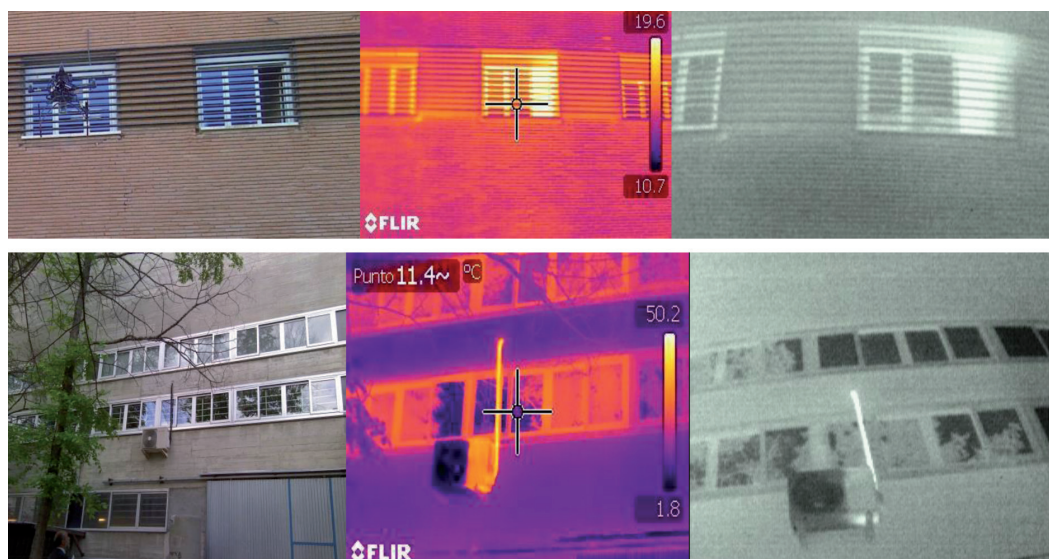


Fig. 3: Detección de pérdidas térmicas en cerramientos y conducciones de climatización: de izquierda a derecha (a) Visible; (b) FLIR; (c) MicroCAM

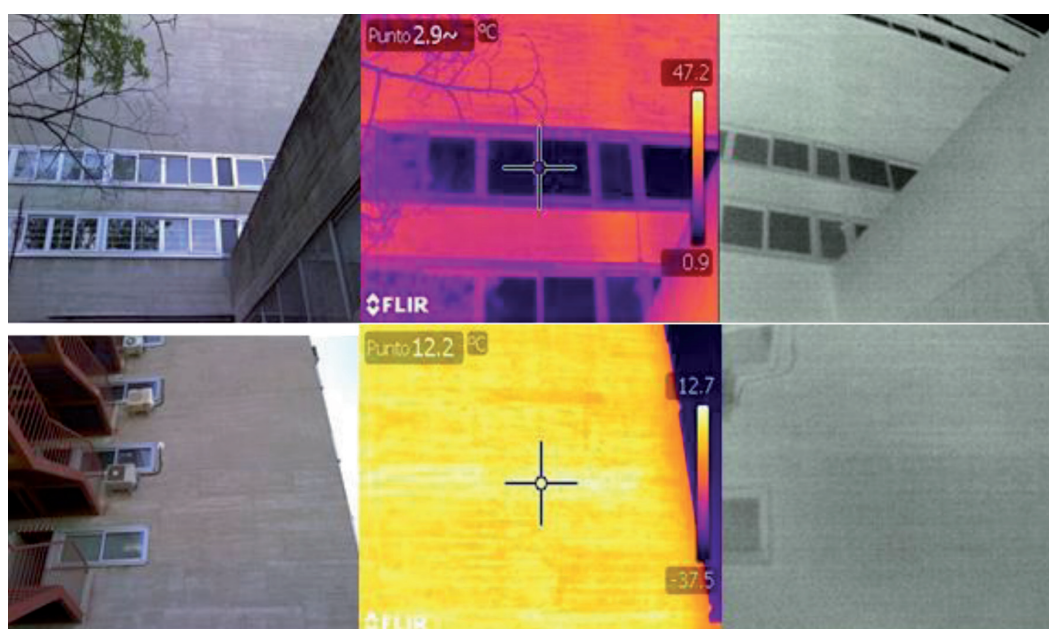


Fig. 4: Detección de pérdidas térmicas en el contacto de 1) muros verticales con fachadas de hormigón (arriba) y 2) forjados con fachadas de hormigón (debajo): de izquierda a derecha (a) Visible; (b) FLIR; (c) MicroCAM

analizadas. Una vez escalada la imagen se estableció el número de celdas que equivalen a una ventana de 50 cm x 50 cm, para analizar los estadísticos de la misma con la utilidad de ventanas móviles de una hoja de cálculo. La Tabla 1 presenta la dispersión de los valores de temperatura para cada sector analizado.

En la Tabla 1 se puede apreciar que el sector con mayor desviación de temperatura es el A10. Este hecho se puede considerar un indicador de posible puente térmico en el mismo. Para verificarlo, es necesario filtrar el ruido proveniente de pequeños cambios de temperatura debidos a las propiedades de los materiales y la irregularidad de su acabado. Una de estas distorsiones se presenta en el análisis de paramentos de superficie poliédrica y, por lo tanto con distinta temperatura reflejada. En la fachada de la ETSI Caminos, ejecutada en hormigón visto encofrado con tabla de madera, puede observarse como los valores de temperatura superficial aparentes obtenidos tienen variaciones debidas a esta circunstancia que es preciso descartar para estimar la temperatura superficial exterior.

La representación gráfica de estas desviaciones permite detectar potenciales anomalías térmicas en el paramento (Figura 5). Este análisis detallado permite identificar las zonas del cerramiento con una temperatura diferente en las que se presentan diferen-

cias de comportamiento frente al flujo de calor, es decir, puentes térmicos.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación confirma que la inspección térmica con mUAV permite el registro y muestreo de fachadas obteniendo datos con una alta resolución espacial. El análisis exploratorio de datos, centrado en el estudio de la correspondencia espacial entre las anomalías térmicas y las patologías de las superficies, combinado con los perfiles de temperaturas, permiten identificar y localizar dichas patologías en las fachadas.

Se corrobora que la inspección con mUAV permite revisar lugares inaccesibles de los edificios, con sensores visibles y térmicos, para la obtención de modelos homogéneos globales que se pueden analizar con suficiente tiempo y detalle en la oficina (postproceso). Estos modelos globales permiten realizar diagnósticos objetivos incluso en los diseños más complejos de barrios y edificios.

Teniendo en cuenta la influencia de la textura de las fachadas en las diferencias de temperatura de la superficie, se concluye que estos estudios son más fiables en superficies más homogéneas. En superficies irregulares, es necesario filtrar el ruido proveniente de pequeños cambios de radiación infrarroja debidos a las propiedades de los materiales y la irregularidad de su acabado.

Esta tecnología es apta para la inspección de edificios e infraestructuras y es muy útil en el diseño de proyectos de rehabilitación de edificios altos y complejos en el marco de la eficiencia energética. Se recomienda aplicarla en estudios de edificios singulares que incluyan análisis energéticos y de patologías detallados.

Se proponen dos líneas de investigación para esta tecnología desde UAV: a) calibración y validación de la tecnología para un rango amplio de patologías y condiciones ambientales, determinando los umbrales de detección y b) la automatización de la detección de anomalías en envolventes.

BIBLIOGRAFÍA

[1] European Union. Directive 2002/91/EC of The European Parliament and of the council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings. Journal of the European Communities, 2003, 1: 65-71.

[2] European Union. Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union, 2010.

[3] Charlot-Valdieu C, Outrequin P. "An approach and a tool for setting sustainable energy retrofitting strategies referring to the 2010 EPBD". Informes de la Construcción. 2011. Vol. 63(Extra) p. 51-60. doi: http://dx.doi.org/10.3989/ic.11.064

Fig. 5: Análisis detallado de un puente térmico en el cerramiento exterior de la ETSI Caminos, Canales y Puertos

	TEMPERATURAS APARENTES (°C)				DESVIACIÓN STANDARD
	Temperatura media	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Máxima diferencia entre temperaturas	
A10	13,30	14,12	12,44	1,68	0,29
A9	12,70	13,37	11,99	1,38	0,25
A8	12,89	13,38	12,31	1,07	0,16
A7	12,89	13,43	12,27	1,16	0,17
A6	12,89	13,43	12,27	1,16	0,17
A5	12,81	13,51	12,02	1,49	0,21
A4	12,71	13,36	12,08	1,28	0,24
A3	12,82	13,34	12,17	1,17	0,19
A2	12,87	13,28	12,38	0,90	0,14
A1	12,88	13,41	12,46	0,95	0,16

Tabla 1: Temperatura media y desviación típica calculados con ventana móvil 50x50cm sobre la imagen calibrada FLIR de la ETSI Caminos, Canales y Puertos (UPM)

- [4] Taylor I. "How near is nearly zero?" CIBSE Journal. Mayo 2013. Londres. <http://www.cibsejournal.com/archive/PDFs/CIBSE-Journal-2013-05.pdf> [en línea] [ref. de 11 de enero de 2016]
- [5] IDAE. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe final del Proyecto SECH-SPAHOUSEC. IDAE. Madrid, España: 2011. 76 p.
- [6] Folgueras MB, Díaz-Fernández RM. "Contribución de la calidad energética de los edificios al desarrollo sostenible". En: Congreso Ibérico de aislamiento térmico y acústico-CIATEA, Universidad de Oviedo, Dpto. de Energía, Gijón, 2004.
- [7] García-Navarro J, González-Díaz M, Valdivieso M. "Estudio PrecostEte: evaluación de los costes constructivos y consumos energéticos derivados de la calificación energética en un edificio de viviendas situado en Madrid". Informes de la Construcción. 2014. Vol. 66(535) e026. doi: 10.3989/ic.13.052
- [9] Sobrino JA, Oltra-Carrió R, Soria G, et al. "Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing". International Journal of Remote Sensing. 2013. Vol. 34 (9-10) p. 3177 – 3192. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2012.716548>
- [10] EnergyCity. Remote Sensing Study. Output Report 3.1.2. EnergyCity: Reducing energy consumption and CO2 emissions in cities across Central Europe. Budapest University of Technology and Economics. European Regional Development Fund. 2013. <http://www.energycity2013.eu/> [en línea] [ref. de 11 de enero de 2016]
- [11] Wang C, Peng Y, Cho Y et al. "As-built residential building information collection and modeling methods for energy analysis". En: Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), Seoul, Korea, June 2011, p. 226–231.
- [12] González-Aguilera D, Lagüela S, Rodríguez-González P, et al. "Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings façades". Energy and Buildings. 2013, Vol. 65 (2013), p. 29–36. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.040>
- [13] Rejas JG, Martínez Marín R, Malpica JA. "Hyperspectral Remote Sensing Application for Semi-Urban Areas Monitoring". En: Electrical and Electronics Engineers, Inc (IEEE), Vol. XXII, nº 127, 2007. ISBN-1-4244-0711-7 catalog number 07EX1577.
- [14] Cuerno-Rejado C, García-Hernández L, Sánchez-Carmona A, et al. "Evolution of the Unmanned Aerial Vehicles until present". DYNA Mayo 2015. Vol. 90 nº 3. Pag.281–288. doi: <http://dx.doi.org/10.6036/7781>
- [15] Eschmann C, Kuo CM, Kuo CH, et al. "High-resolution multisensor infrastructure inspection with unmanned aircraft systems". ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 1(2):125–129, 4 – 6 de septiembre de 2013, Rostock, Alemania.
- [16] Rogalski, A. "History of infrared detectors". Opto–Electron. Rev. 2012. Vol. 20:3 p. 279–308. doi: <http://dx.doi.org/10.2478/s11772-012-0037-7>
- [17] AENOR. EN-13187- Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method ISO 6781:1983 modified, 2000.
- [18] Vollmer M, Möllmann KP. Infrared Thermal Imaging, Wiley-VCH, Weinheim: 2010. 594 P. ISBN 978-3527407170
- [19] Grinzato E, Vavilov V, Kauppinen T. "Quantitative infrared thermography in buildings". Energy and Buildings. 1998. Vol. 29 p. 1–9. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00039-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00039-X)
- [20] Balaras C, Argiriou A. "Infrared thermography for building diagnostics". Energy and Buildings. 2002. Vol. 34 (2) p. 171–183. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00105-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00105-0)
- [21] Rosina E, Spodek J. "Using infrared thermography to detect moisture in historic masonry: a case study in Indiana". APT Bulletin. 2003. Vol. 34(1) p. 11–16. doi: <http://dx.doi.org/10.2307/1504847>
- [22] Rodríguez Martín M, Lagüela S, González Aguilera D, et al. "Termografía Activa. Parte 1: Enfoque teórico de la captación infrarroja. Procesamiento de datos y clasificación". DYNA. 2015. Vol. 90(4) p. 456–460. doi: <http://dx.doi.org/10.6036/7556>
- [23] Fox, M, Coley D, Goodhew S, et al. "Thermography methodologies for detecting energy related building defects". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 40 (2014) p. 296–310. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.188>
- [24] Martínez-De-Dios JR, Ollero A. "Automatic detection of windows thermal heat losses in buildings using UAVs". En: Automation Congress, 2006-WAC'06. IEEE, p. 1–6, 2006.
- [25] Iwaszczuk D, Hoegner L, Stilla U. "Matching of 3D building models with IR images for texture extraction". En: Urban Remote Sensing Event (JURSE), IEEE, p. 25–28. 2011.
- [26] Yahyanejad S, Rinner B. "A fast and mobile system for registration of low-altitude visual and thermal aerial images using multiple small-scale UAVs". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2014. doi <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.07.015>
- [27] Lagüela S, Díaz-Vilariño L, Roca D, et al. "Aerial oblique thermographic imagery for the generation of building 3D models to complement Geographic Information Systems". En: 12th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, 7–11 Julio de 2014, Burdeos, Francia.
- [28] Rumpler M, Irschara A, Wendel A, et al. "Rapid 3d city model approximation from publicly available geographic data sources and georeferenced aerial images". En: Computer vision winter workshop (CVWW), 2012.
- [29] Maurer M, Rumpler M, Wendel A, et al. "Geo-referenced 3d reconstruction: Fusing public geographic data and aerial imagery". En: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, p. 3557–3558. 2012.
- [30] Rumpler M, Daftryab S, Tscharf A, et al. "Automated end-to-end workflow for precise and geo-accurate reconstructions using fiducial markers". ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. 1 p. 135–142. doi <http://dx.doi.org/10.5194/isprannals-II-3-135-2014>
- [31] Cereijo J, Lagüela S, Roca D, et al. "Automatic detection of thermal bridges in thermographic building inspections". En: 40th IAHS World Congress on Housing, 16–19 Diciembre de 2014, Funchal, Portugal.
- [32] Thermoteknix. MicroCAM. <http://www.thermoteknix.com> [en línea] [ref. de 11 de enero de 2016]
- [33] FLIR. FLIR B-335. <http://www.flir.es/> [en línea] [ref. de 11 de enero de 2016]
- [34] Ascending Technologies. AscTec Pelikan. <http://www.ascotec.de/en/> [en línea] [ref. de 11 de enero de 2016]
- [35] Quigley M, Conley K, Gerkey B, et al. "ROS: an open-source Robot Operating System". En: ICRA workshop on open source software, Vol. 3, no. 3.2, p. 5, 2009.
- [36] Reed IS, Xiaoli Y "Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution. Acoustics, Speech and Signal Processing". IEEE Transactions. 1990. Vol.38:10 p. 1760 – 1770.
- [37] Green AA, Berman M, Switzer P, et al. "A Transform for Ordering Multispectral Data in terms of Image Quality with Implications for Noise Removal" IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1988. Vol. 26:1 p. 65–74.
- [38] Testo AG. Teoría y práctica de la medición termográfica. <https://www.testo.com.ar/> [en línea] [ref. de 11 de enero de 2016]
- [39] Martín-Consuegra F, Oteiza I, Alonso C, et al. "Análisis y propuesta de mejoras para la eficiencia energética del edificio principal del Instituto C.C. Eduardo Torroja-CSIC". Informes de la Construcción. 2014. Vol. 66(536):e043. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.125>
- [40] Rubio del Val J. "Rehabilitación Urbana en España (1989–2010). Barreras actuales y sugerencias para su eliminación". Informes de la Construcción. 2011. Vol. 63: Nº Extra (2011) p. 5–20. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.2011.v63.iExtra>.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de España por las becas JAE-Predocctoral de dos de los autores, al Ministerio de Ciencia español por la financiación de los proyectos DPI2010-20751-C02-01 y DPI2014-60139-R, así como al Ministerio Educación español por financiar la estancia de investigación internacional de uno de los autores. La colaboración de la Universidad de Costa Rica ha sido posible gracias a la financiación del programa PCI de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y del Vicerrectorado de Relaciones Internacionales de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/7899-1.pdf

