

# Isla de calor nocturna estival y confort térmico en Madrid: avance para un planeamiento térmico en áreas urbanas

Fernando ALLENDE ÁLVAREZ (1)  
& Felipe FERNÁNDEZ GARCÍA (2)  
& Domingo RASILLA ÁLVAREZ (3)  
& Jorge ALCAIDE MUÑOZ (4)

- (1) Profesor Contratado Doctor. Departamento de Geografía (UAM) &  
(2) Catedrático de Geografía Física (UAM) &  
(3) Profesor Titular de Geografía física (U. Cantabria) &  
(4) Licenciado en Ciencias Ambientales (UAM)

**RESUMEN:** Se plantea la modelización espacial de la isla de calor nocturna estival en Madrid y su área metropolitana. En el trabajo se utilizan diferentes métodos, escalas y fuentes de información que fueron normalizadas y combinadas: Agencia Estatal de Meteorología, Red de Contaminación Atmosférica y Red de observación municipal, observadores aficionados (METEOCLIMATIC), usos de suelo del URBAN ATLAS e imágenes de satélite de temperatura superficial (MODIS). El modelo resultante nos permitió realizar una estimación de la distribución espacial de las diferentes islas de calor, definir los episodios de calor intenso en verano y realizar una cartografía del impacto térmico resultante.

**DESCRIPTORES:** Isla de calor urbana. Temperatura fisiológica equivalente. Olas de calor. Sistemas de información geográfica. MODIS. Madrid.

Recibido: 23.03.2017; Revisado: 21.07.2017

Correo electrónico: fernando.allende@uam.es; felipe.fernandez@uam.es; domingo.rasilla@unican.es; jorge.alcaide86@gmail.com  
Los autores agradecen los comentarios y sugerencias realizados por los evaluadores anónimos, que han contribuido a mejorar y enriquecer el manuscrito original.

## Summer nocturnal Heat Island and thermal comfort in Madrid: approaching a thermal planning for urban areas.

**ABSTRACT:** This paper aims to achieve a spatial modeling of Urban Heat Island at night and of its effects in the city and metropolitan area of Madrid during the summer. Different methods, resources and reference scales were used, normalized and combined: State Meteorological Agency, Atmospheric Contamination Monitoring and Municipal Network, amateur observers (METEOCLIMATIC), land uses from URBAN ATLAS and satellite images of Land surface temperature (MODIS). The resulting model allows us an estimation of the spatial distribution, frequency, intensity and thermal impact of the heat waves in the summer.

**KEYWORDS:** Urban heat island (UHI). Physiological equivalent temperature (PET). Heat waves. Geographic information systems (GIS). Moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS). Madrid.

*«La capacidad de los parques frondosos como amortiguadores ambientales se manifiesta especialmente en los meses calurosos, cuando ramas y hojas de árboles forman cubiertas que protegen el espacio comprendido bajo ellas de la incidencia de rayos solares, amortiguan la luz intensa y mantienen la temperatura ambiental varios grados por debajo de la temperatura del entorno».*

MARTÍNEZ SARANDESES & *al.*, (1999)

### 1. Introducción

El cambio climático es uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial. En este cambio las ciudades desempeñan un papel muy importante, ya que son las principales causantes del efecto de invernadero y a la vez son las zonas que, debido a la concentración de población, resultan más vulnerables. Aunque el área ocupada por las ciudades apenas representa el 2% de la superficie del planeta en ellas se consume más del 75% de los recursos naturales y se produce el 80% del total de gases emitidos a la atmósfera (UN-Habitat, 2011). Además, la ciudad provoca modificaciones en el clima local facilitando la formación de la denominada isla de calor urbana e inclusive agudizando los efectos negativos del calentamiento, como durante las olas de calor de los veranos del 2003, 2007 y 2010 en gran parte de Europa (KUNST & *al.*, 1993; LASCHEWSKI & JENDRITZKY, 2002; HAINES & *al.*, 2006; VANDENTORREN & *al.*, 2004). En el caso de Madrid, durante estos años se observó un incremento de hasta un 40% de la mortalidad (FERNÁNDEZ GARCÍA, 2010; GARCÍA PALOMARES & ALBERDI, 2005). A los efectos directos sobre la población se unen los indirectos como el aumento del consumo eléctrico y los episodios de ozono troposférico (FISCHER & *al.*, 2003).

El imparable proceso de urbanización, las previsiones de aumento de fenómenos extremos y el elevado número de personas que viven en las ciudades, ha facilitado el desarrollo de modelos estadísticos que incorporan los SIG y la Teledetección y que facilitan el análisis del clima urbano. Destacan, entre otros, los trabajos realizados en la ciudad sueca de Gothenburg, Lisboa, el proyecto FUSE de la Universidad de Portland o los desarrollados en Manaus (SVENSSON & ELIASSON, 2002; ANDRADE & ALCOFORADO, 2008; HART & SAILOR, 2008; CORRÊA & *al.*, 2016). Recientemente también se han obtenido modelos específicos para simular el calentamiento urbano y la isla de calor en Teherán, Bagdad y Casablanca (ALIZADEH-CHOOBARI, & *al.*, 2016; ALOBAYDI, D. & *al.*, 2016; BAHÍ, H. & *al.*, 2016) y los efectos de cambio de densidad en las tramas urbanas y sus repercusiones en Birmingham y Toronto (AZEVEDO & *al.*, 2016; BERARDI & WANG, 2016). Conviene señalar también los estudios orientados a la modelización del estrés térmico generado por episodios extraordinarios de calor (CHEN & *al.*, 2016; FERNÁNDEZ GARCÍA & *al.*, 2016).

A lo anterior se suman los programas de mitigación adoptados por organismos internacionales como EURO HEAT, desarrollado por la Unión Europea y orientado a la mejora de las medidas de sanidad pública en condiciones meteorológi-

cas extremas; PHEWE destinado a la prevención de efectos agudos para la salud derivados de las condiciones meteorológicas en Europa; CASHh, que tiene como objetivo el estudio del cambio climático y las estrategias de adaptación para la salud humana en Europa; o, más recientemente, el Urban-LEDS Project (UN-Habitat, 2015). Además, la Agencia Espacial Europea (ESA) financió la campaña DESIREX, desarrollada en Madrid durante el verano de 2008 como avance del proyecto *Urban heat island and urban thermography*, y que se desarrollará en 10 ciudades europeas durante los próximos años (SOBRINO & *al.*, 2008; 2012). Resulta destacable el caso de Madrid con la puesta en marcha del Plan de uso sostenible de la energía y prevención del cambio climático de la ciudad de Madrid Horizonte 2020 (AYUNTAMIENTO DE MADRID, 2014) cuyo objetivo consiste en establecer un marco estratégico (periodo 2014-2020) que integre las medidas de eficiencia energética, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la adaptación frente al Cambio Climático.

Todos estos programas tienen como objetivo fundamental la mitigación de la isla de calor urbana o UHI (*Heat Island*). Se diferencian dos tipos de isla: la *atmosférica*, que representa las diferencias en la temperatura del aire entre las zonas urbanas y las rurales y la *superficial*, indicativa de la diferencia de temperatura registrada en diferentes materiales. En los dos casos se observan diferencias en los mecanismos de formación y las técnicas empleadas para su identificación, pero tanto una como otra están influenciadas por factores meteorológicos regionales, como la estabilidad, la velocidad del viento y la nubosidad, pero también por los usos del suelo y sus diferentes tipologías presentes en la ciudad y entorno próximo (RUNNALLS & OKE, 2000; MORRIS & *al.*, 2001; VOOGT & OKE, 2003; TOMLINSON & *al.*, 2010; DELAMI & *al.*, 2016; DU & *al.*, 2016). Entre ambas existe una estrecha relación y la temperatura del suelo es uno de los factores esenciales en la formación de la isla de calor atmosférica. En consecuencia, el conocimiento de la isla superficial es clave a la hora de plantear las medidas más adecuadas para disminuir la temperatura en las zonas urbanas, actuando sobre el tipo de materiales del complejo entramado urbano.

En este contexto se plantean como marco de referencia conocer de qué modo la presencia de una ciudad como Madrid modifica las condiciones climáticas mesoescales, qué estructuras y morfologías urbanas contribuyen de manera más acusada a estos cambios y cuáles son los impactos sobre el grado de confort y bienestar de sus habitantes. El trabajo se sitúa

en la línea de estudios previos desarrollados por los autores en los que se han analizado diferentes aspectos de la isla de calor comparando observatorios urbanos y rurales con series climáticas largas, así como la propuesta de creación de un Sistema de Información Climático Ambiental para Madrid, integrando las diferentes variables que contribuyen a la formación del clima urbano (FERNÁNDEZ GARCÍA & *al.* 2013; FERNÁNDEZ GARCÍA & *al.* 2016). Como objetivos específicos el trabajo pretende, en primer lugar, la modelización espacial de la isla de calor nocturna estival comparando los días considerados como normales en verano (con temperaturas máximas diarias inferiores a 36,5°C) y los días cálidos (con máximas diarias superiores a 36,5°C) para el periodo 2001-2015; en segundo, se integran las variables climáticas resultantes con los diferentes usos de suelo y estructuras urbanas; y, por último, se realiza una valoración del impacto provocado por estas situaciones extremas.

## 2. Área de estudio

El área metropolitana de Madrid es una zona muy transformada por la acción del hombre, con más del 30% de la superficie de carácter artificial (FIG 1). A ello ha contribuido la gran concentración de la población entorno a Madrid con 3.000.000 de personas en el área urbana y más de 5.000.000 en un radio inferior a 50 km. Además, 1.000.000 (en torno al 20%) constituyen grupos de riesgo que incluyen a los menores de 5 años y a los mayores de 65 (INE, 2015).

El clima regional es el propio del interior de la península Ibérica caracterizado como mediterráneo continental (Csa) con inviernos fríos y veranos secos y muy calurosos. Las mínimas de enero con frecuencia se sitúan por debajo de los 0°C y los veranos son muy cálidos, con temperaturas superiores a 30°C y donde son frecuentes los días con temperaturas máximas superiores a 36°C (FERNÁNDEZ & RASILLA, 2008). Las precipitaciones medias anuales se sitúan en torno a los 450 mm, con máximos en primavera y otoño y dos mínimos: uno secundario en invierno y otro muy acusado en verano. El elevado porcentaje de situaciones anticiclónicas, la fuerte insolación y la escasez de lluvia convierten el área en el escenario ideal para la formación de un clima urbano claramente diferenciado. A lo anterior se suma una posición latitudinal que favorece las olas de calor y cuya frecuencia es uno de los aspectos más reseñables en las proyecciones climáticas a medio y largo plazo (FERNÁNDEZ & RASILLA, 2008; FERNÁNDEZ & *al.*, 2013; EEA, 2017).

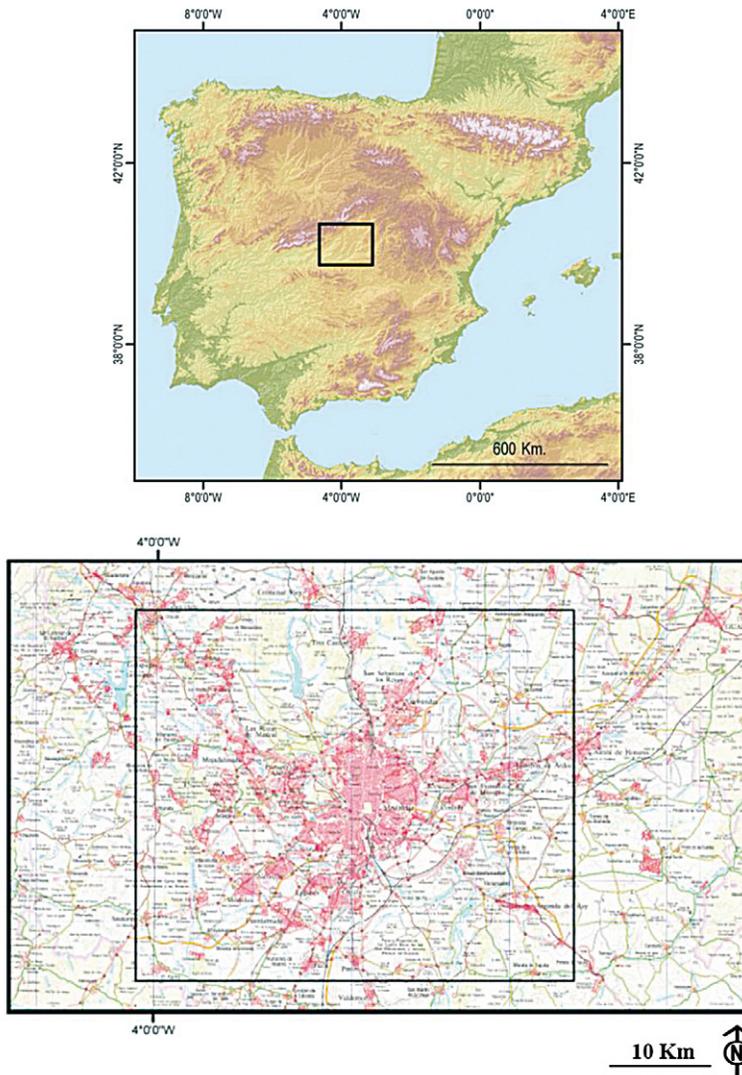


FIG. 1/ Localización del ámbito de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de Global Multi-Resolution Terrain Elevation Data 2010 (USGS) y de la base topográfica MTN25 (IGN) de España.

### 3. Metodología y fuentes

La complejidad en la elaboración del modelo ha sido determinante en la utilización de diferentes métodos y fuentes de información. Por ello el apartado se estructura en cuatro subapartados en los que se diferencian, por secuencia de elaboración y fuentes utilizadas: a) análisis y clasificación del comportamiento térmico de los usos de suelo procedentes del Urban Atlas (3.1); b) tratamiento de las variables climáticas (3.2); c) manejo y procesado de la *Land Surface Temperature* de MODIS (3.3); y obtención de

la *Physiological Equivalent Temperature* (3.4). Toda la información obtenida se ha integrado en una malla reticular de 500x500 que cubre una superficie de 2500 km<sup>2</sup> de Madrid y su entorno metropolitano. Como *software* de análisis se han combinado técnicas propias del SIG comercial *ArcGis* 10.2, las ofrecidas por el programa estadístico *SPSS* v.21 y ciertas funcionalidades de la hoja de cálculo *Microsoft Excel*. A su vez, se han valorado los diferentes métodos utilizados en el tratamiento térmico de imágenes procedentes de diferentes satélites, como NOAA AVHRR, MODIS, Landsat TM/ETM+, ASTER y

las obtenidas desde plataformas aerotransportadas, como ATLAS (BALLING & BRAZELL, 1988; PU & *al.*, 2006; DUAN & LI, 2016; WENG & *al.*, 2004; LU & WENG, 2006; PU & *al.*, 2006; LO, & *al.* 1997; SIDIQI & *al.*, 2016). Los resultados obtenidos demuestran la influencia de los diferentes materiales sobre la *Thermal Land Surface Temperature* (LST), especialmente en los contrastes entre áreas con vegetación y superficies artificiales (BUYANTUYEV & WU, 2010; FREY & *al.*, 2007; WENG, & SCHUBRING, 2004; WENG, 2004; AL-HAMDAN & *al.*, 2016).

### 3.1. Ocupación del suelo

Los usos del suelo y las principales estructuras urbanas se han obtenido del Urban Atlas (FIG. 2) y del índice de compacidad elaborado por el Ayuntamiento de Madrid<sup>1</sup>. Urban Atlas (EEA, 2013) ofrece una cartografía de alta resolución y comparable en más de 300 grandes ciudades de la UE. Esta información se elaboró a partir de miles de imágenes de satélites europeos y numerosas fuentes cartográficas locales, incluyendo datos del catastro, y ofrece cobertura suficiente para la cartografía detallada de las grandes zonas urbanas, con datos precisos sobre los diferentes usos (GMES, 2010). En nuestro caso la relación usos de suelo-temperatura resulta fundamental para entender la distribución e intensidad de la isla de calor (DEILAMI & *al.*, 2016; DU & *al.*, 2016).

Los usos de suelo del Urban Atlas se agruparon inicialmente en 8 categorías, simplificando las 16 iniciales en función de criterios de comportamiento térmico estimado (FIG. 3); para cada uso se cuantificaron superficies y porcentajes (ALCAIDE & *al.*, 2013; EEA, 2013). Agrupadas y cuantificadas las variables en la simplificación inicial, se generaron dos grandes agrupaciones en función del grado de permeabilidad de las superficies que permitieron mayor precisión en el análisis estadístico.

### 3.2. Temperatura del aire, humedad relativa, viento y nubosidad

La información de la temperatura del aire se ha obtenido a partir de los datos de estaciones meteorológicas repartidas por el área urbana y su entorno. El número de estaciones y su localización fueron un serio obstáculo, ya que las redes meteorológicas oficiales tienen como ob-

jetivo fundamental la caracterización del clima regional; además, la creación de una red climática dentro de la ciudad plantea multitud de problemas derivados de la misma complejidad del entramado urbano (OKE, 2006). Por ello, son numerosos los estudios que han utilizado fuentes de información no convencionales (GRIMMON, 2006; AZEVEDO & *al.*, 2016) gracias a las cuales se han podido obtener interesantes resultados. En algunos casos será necesario contar con estaciones de primer orden, sin cambio de emplazamiento y con series largas, para determinar la influencia de la urbanización como agente modificador del clima regional. Por otra parte, será muy útil disponer de redes más densas y de menor calidad pero representativas del entorno próximo, lo que permitirá analizar las diferencias climáticas intraurbanas.

En Madrid existen 3 redes pertenecientes a organismos oficiales que suministran datos diarios y horarios de las principales variables meteorológicas (FIG. 4).

- AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) que cuenta con ocho observatorios de los cuales cinco son de primer orden y cuatro de ellos (Barajas, Getafe Cuatro Vientos y Retiro) tienen series largas (desde 1961). Además, tres de ellos se localizan dentro de los límites municipales pero en áreas periféricas o en parques.
- Red de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica (9 estaciones)
- Red Municipal (siete estaciones).

Para el análisis de los datos se seleccionó el periodo 2001-2015, con series diarias y horarias de temperatura, humedad y viento. De estas series se han utilizado los máximos y mínimos diarios de temperatura, humedad relativa, viento y nubosidad ya que son consideradas variables esenciales para la estimación de la temperatura de confort. Las bases de datos fueron sometidas a un control de calidad y validación consistente en la identificación y eliminación de los datos erróneos, la sustitución de los mismos y el relleno de lagunas originales con valores estimados a partir de los observatorios vecinos en funcionamiento (BECKERS & RIXEN, 2003; HENN & *al.*, 2013). De forma complementaria se utilizaron redes no oficiales como las de Meteoclimatic y las del grupo GEOCLIMA<sup>2</sup> que, aunque tienen registros más esporádicos, forman una red de mayor densidad que las anteriores y cubren espacios urbanos más contrastados.

<sup>1</sup> Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad. Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental

<sup>2</sup> Grupo de investigación del Departamento de Geografía de la Universidad Autónoma de Madrid. Red propia integrada por cinco estaciones.

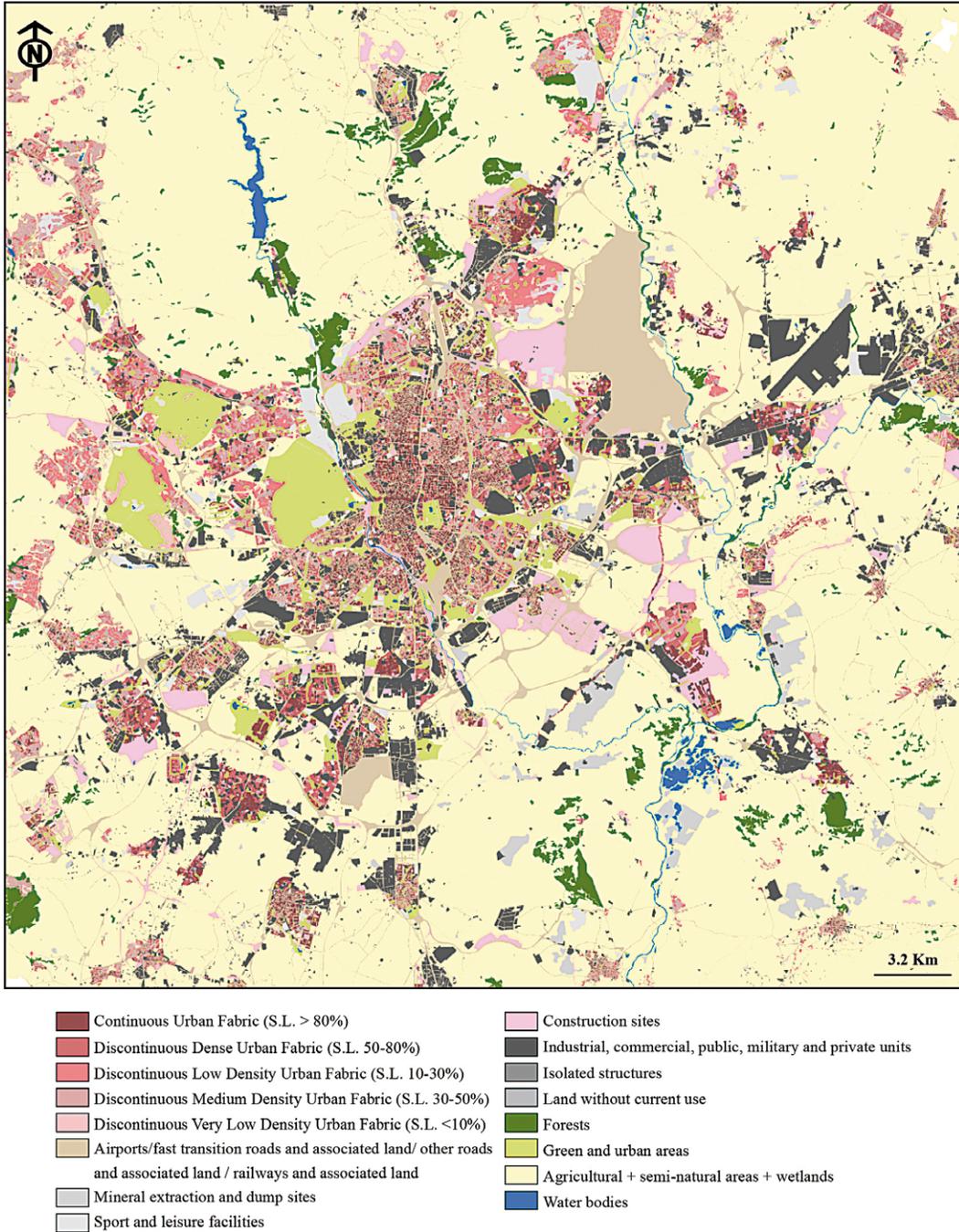


FIG. 2/ Usos de suelo del área metropolitana.

Fuente: Elaboración propia a partir de URBAN ATLAS y de la información planimétrica de la MTN200 del IGN.

Fig. 3/ Usos de suelo en función de criterios de comportamiento térmico estimado.

IMPERMEABLE		PERMEABLE		SIN DEFINIR
Urbano continuo	Vías rápidas	Zonas verdes urbanas	Agrícola	Infraestructuras aisladas
Urbano discontinuo densidad alta	Otras carreteras	Instalaciones deportivas	Baldíos improductivos	Terrenos sin uso definido
Urbano discontinuo densidad media	Ferrocarriles e infraestructuras asociadas		Bosques	Extracciones mineras
Urbano discontinuo densidad baja	Industria			Aeropuertos

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de URBAN ATLAS

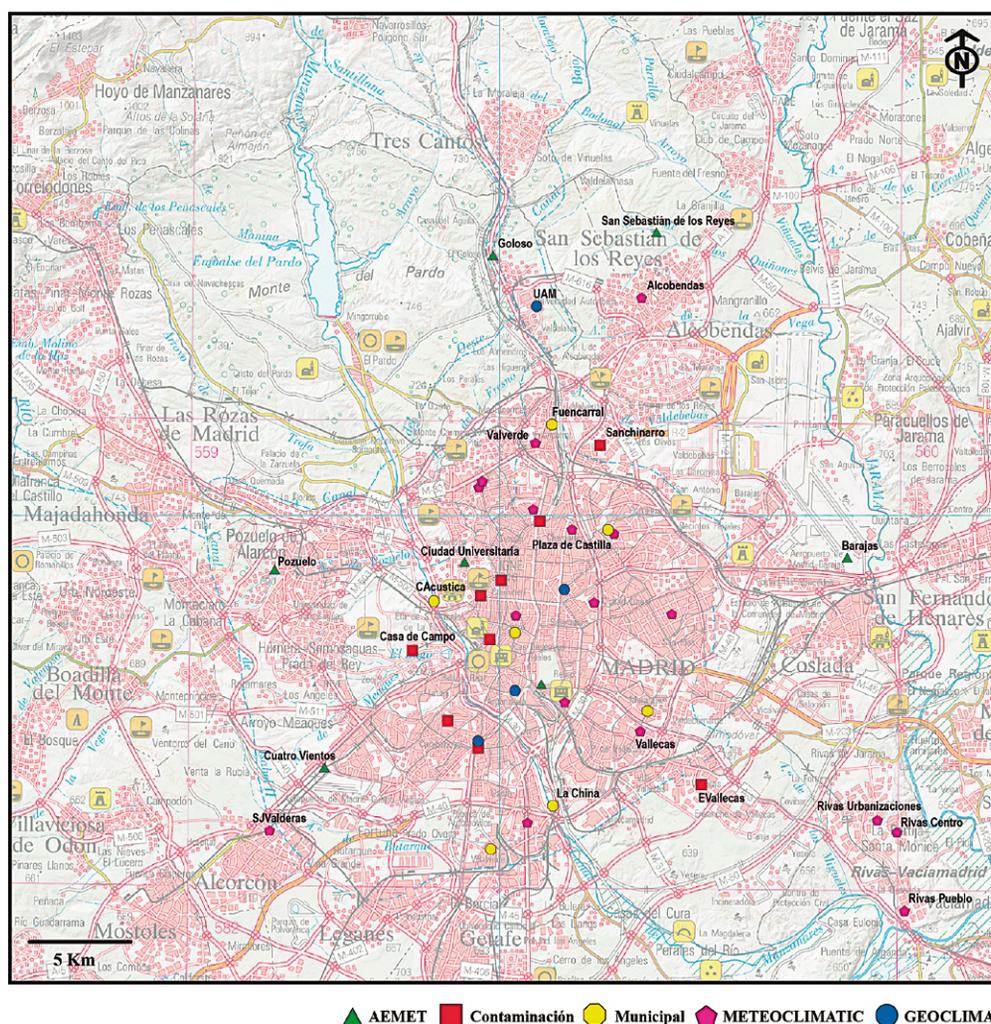


Fig. 4/ Redes meteorológicas del área de Madrid.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ayuntamiento de Madrid, AEMET, METEOCLIMATIC y GEOCLIMA.

### 3.3. Temperatura superficial (*Land Surface Temperature, LST*)

Como referencia para la obtención de la temperatura superficial se utilizó la LST procedente de los productos MODIS MOD11 (*Terra*) y MYD11 (*Aqua*). La información original se seleccionó en el visor de búsqueda y descarga de imágenes del USGS (*United States Geo-*

*logical Survey*), que cuenta con un menú de descarga que permite detectar qué imágenes tienen óptimas condiciones. La selección del cuadrante se mantuvo fija para las escenas con referencia 17/7 (Horizontal Tile Number/Vertical Tile Number), utilizando la información de temperatura superficial nocturna (hora de pasada aprox. 22:30 PM). La resolución estimada fue de 1 km, aunque está validada para 0.5 Km.

FIG. 5/ Resumen de las características de las imágenes MODIS en los registros de *Thermal Land Surface Temperature*.

A	img	fiadim	ffaim	bp	pr <sup>1</sup>	pr <sup>2</sup>	E
2000	14	17/06/2000	11/08/2000	6	6	0	2*
2001	32	02/06/2001	12/08/2001	15	12	0	5**
2002	36	02/06/2002	12/08/2002	18	18	0	0
2003	28	18/06/2003	12/08/2003	14	14	0	0
2004	23	25/06/2004	11/08/2004	12	11	0	0
2005	28	18/06/2005	12/08/2005	14	14	0	0
2006	28	18/06/2006	12/08/2006	14	14	0	0
2007	16	02/06/2007	04/08/2007	0	16	0	0
2008	14	17/06/2008	11/08/2008	0	14	0	0
2009	14	18/06/2009	12/08/2009	0	14	0	0
2010	12	26/06/2010	12/08/2010	0	12	0	0
2011	14	18/06/2011	12/08/2011	0	0	14	0
2012	14	17/06/2012	11/08/2012	0	10	4	0
2013	13	18/06/2013	12/08/2013	0	13	0	0
2014	13	18/06/2014	12/08/2014	0	13	0	0
2015	13	18/06/2015	12/08/2015	0	13	0	0

a: año; img: número de imágenes utilizadas; fiadim: fecha inicial de adquisición de las imágenes; ffaim: fecha final de adquisición de las imágenes; bp: buena precisión; pr<sup>1</sup>: precisión razonable; pr<sup>2</sup>: precisión razonable consultada en [http://landweb.nascom.nasa.gov/cgi-bin/QA\\_WWW/qaFlagPage.cgi?sat=terra](http://landweb.nascom.nasa.gov/cgi-bin/QA_WWW/qaFlagPage.cgi?sat=terra) the product Science Quality status; e: excluidas (\* nubosidad; \*\* MODIS off)

Fuente: Elaboración propia a partir de la información de las imágenes MODIS para el intervalo 2000-2015

<sup>3</sup> General Accuracy Statement, MODIS Land Team 2016.

Se descargaron un total de 312 juegos de imágenes (series de ocho días) e imágenes concretas (datos diarios para los días 12, 13, 14, 15, 16 y 17 de julio de 2015) en formato HDR (imágenes de alto rango dinámico). Cada año se descomponen en lotes o *stacks* con un mínimo de 11 *datasets* que contienen información de temperatura superficial, calidad y precisión del dato recibido, emisividad y nubosidad. El análisis de estas características permitió discriminar aquellas que cumplían unos criterios mínimos de validez (FIG. 5).

La información procedente de MODIS fue implementada en ArcGIS v.10.2 transformando los ficheros HDR referidos a las series LST\_Night\_1km MODIS\_Grid\_8 Night\_1km\_LST y LST\_Night\_1km MODIS\_Grid\_Daily Night\_1km\_LST a formato GRID. Para optimizar los cálculos y extracciones se generó una máscara con el área de trabajo y se transformaron las imágenes de la proyección sinusoidal nativa al sistema ETRS89. Posteriormente la información fue reescalada a 0.02 tal como se especifica en la guía de referencia del producto MODIS (WAN, 2006) y se realizó una conversión de grados Kelvin (imágenes originales) a grados centígrados.

Incorporada la información en ArcGIS v.10.2 se realizó una extracción múltiple de cada imagen utilizando como referencia una cuadrícula de 500X500 metros en formato *shapefile* que arrojó, para el ámbito considerado, un total de 9999 puntos. Cada punto está referido a un par de coordenadas en el que figuran los valores de temperatura en grados centígrados. Generados los ficheros *shapefile* se realizó una interpolación con los valores de cada campo lo que permitió obtener hasta 16 ficheros GRID para la noche: diaria y media de la serie de años elegida y 12 ficheros para el periodo comprendido entre el 12 y el 17 de julio de 2015.

### 3.4. Temperatura fisiológica

Como indicador de los impactos asociados a la isla de calor son muchos los autores que utilizan la temperatura fisiológica equivalente o índice PET (MATZARAKIS & *al.*, 1999; MATZARAKIS & AMELUNG, 2008; ALCOFORADO & ANDRADE, 2006; MIRZAEI & HAGHIGHAT, 2010; REN & KATXSCHNER, 2011; SANGINÉS CORAL, 2013; KETTERER & MATZARAKIS, 2014; HUANG & CADENASSO, 2016).

La PET se expresa en °C y en su cálculo interviene la temperatura del aire, la humedad y el viento, además de la radiación solar y la emitida por los materiales que componen el escenario urbano. Todas estas variables influyen en el balance de radiación entre el cuerpo humano y en su entorno y expresa, de forma mucho más realista, las sensaciones térmicas percibidas.

El índice PET ha sido calculado con el modelo de radiación y bioclimático RayMan (MATZARAKIS, 2009)<sup>4</sup> que permite la estimación de flujos de radiación y flujos térmicos. Como variables de entrada se utilizaron las series disponibles de temperatura del aire y de temperatura superficial obtenida de MODIS<sup>5</sup>, calculándose parámetros como la humedad relativa y cubierta nubosa (MATZARAKIS & AMELUNG, 2008); por último, el viento medio se calculó a partir del modelo de MARTILLI (2002 y 2015). Como valores de referencia se considera que una PET de 43°C indica que el ocupante de una sala, en la que la temperatura del aire fuese de 43°C, alcanzaría el mismo grado de estrés térmico que en las condiciones externas donde se registra el valor enunciado. A su vez, las condiciones ambientales se reducen a una temperatura media radiante igual a la del aire, una velocidad del aire de 0.1 m/s y una humedad relativa del 50%. En estas condiciones la neutralidad térmica, o lo que es lo mismo, la sensación de confort se alcanza con una PET de 20°C<sup>6</sup>.

### 3.5. Modelización espacial y análisis de correlaciones

Como paso previo a la modelización, se testeó la validez del modelo mediante un análisis de correlación múltiple entre las temperaturas mínimas medias diarias, la temperatura superficial y la humedad relativa y el índice de compacidad, el área construida densa, el área impermeable, las zonas permeables y los suelos agrícolas y forestales (FIG. 6). Este método se aplicó a los días normales de verano (temperaturas máximas en Barajas inferiores a 36,5 °C) y a los días cálidos (temperatura máxima en Barajas superior a 36,5). Los resultados obtenidos arrojaron correlaciones positivas y significativas (95%  $p < 0,05$ ) mientras que, para superficies permeables, áreas de bosque y zonas agrícolas, fueron negativos. Datos similares, pero a la inversa, presenta la humedad relativa con valores negativos en las zonas construidas y positivos en las

<sup>4</sup> <http://www.mif.uni-freiburg.de/rayman/intro.htm>.

<sup>5</sup> Debido a que se presenta un modelo nocturno prescindimos de la radiación e incorporamos la temperatura superficial.

<sup>6</sup> HÖPPE (2009) lo estima para un varón de 35 años, 1.75

metros de estatura y 75 kg de peso considerando ropa adecuada a las condiciones normales del entorno, 0.5 clo en verano y 1.8 en invierno y con una actividad reducida a un paseo tranquilo a 4 km/h y en terreno llano lo que representa una producción de calor interno equivalente a 2 metros.

FIG. 6/ Matriz de correlación simplificada entre las variables climáticas y las principales variables urbanas.

		Tmin_ver	Tmin_dc	VVdc	Hrmxmd
Compacidad	Correlación de Pearson	,607**	,598**		-0,555**
	Sig. (bilateral)	0,002	0,003		0,007
	N	23	23		22
Urbano	Correlación de Pearson	,544**	,497**	-0,373	-0,616**
	Sig. (bilateral)	0,003	0,008	0,087	0,001
	N	27	27	22	26
Permeable	Correlación de Pearson	-,522**	-,523**		0,547**
	Sig. (bilateral)	0,005	0,005		0,004
	N	27	27		26
Agrícola/ forestal	Correlación de Pearson	-,466*	-,464*		0,382
	Sig. (bilateral)	0,014	0,015		0,054
	N	27	27		26
Impermeable	Correlación de Pearson	,420*	,381*	-0,381	-0,434*
	Sig. (bilateral)	0,029	0,05	0,08	0,027
	N	27	27	22	26

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas); \*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas); Tmin\_ver: temperatura mínima de verano; Tmin\_dc: temperatura mínima días cálidos; Tmin\_jl2015: temperatura mínima julio 2015; VVdc: velocidad del viento en los días cálidos; Hrmxmd: humedad relativa máxima media; CompMd: compacidad media; permeable: usos urbanos, infraestructuras de transporte y uso industrial; impermeable: usos agrícolas, forestal y zonas verdes urbana

Fuente: Elaboración a partir de URBAN ATLAS, Ayuntamiento de Madrid y datos propios

FIG. 7/ Parámetros significativos del modelo de regresión lineal múltiple entre las variables climáticas y las urbanas.

Variable	coeficiente R	coeficiente R2	Error medio	RMSE	BIAS
Tmínima verano (°C)	0,821	0,675	1,39	2,3	-0,6
Tmínima días cálidos (°C)	0,843	0,710	1,46	2,7	0,4
Humedad relativa (%)	0,864	0,746	4,24	4,4	5,4

Fuente: Elaboración propia a partir de URBAN ATLAS

zonas verdes, agrícolas y forestales. El viento medio se correlacionó negativamente con las zonas construidas, sin embargo, los niveles de significación son muy débiles, por lo que se optó por utilizar valores medios siguiendo a MARTILLI (2002 y 2015).

Validado el método, se realizó una regresión múltiple en la que, como dependiente se consideró la variable climática correspondiente y, como predictoras, el resto; la FIG. 7 muestra los estadísticos más significativos resultantes de la correlación. El 71% de la varianza espacial queda explicada en el caso de las temperaturas y en torno al 75% en el de la humedad relativa. Se consideraron variables predictoras, una vez eliminadas aquellas que no cumplen los criterios de calidad exigidos, el índice de compacidad (potenciador térmico), el porcentaje de área impermeable (inhibidor térmico) y las superficies permeables, agrícolas y forestales y el porcentaje de suelo urbano (inhibidores de la humedad).

En el caso de la temperatura superficial obtenida de las imágenes MODIS, los datos se interpolaron considerando los centroides de la malla de referencia (50x50 m). En total se realizaron 15 interpolaciones con las medias de las imágenes para el verano (mediados de junio-mediados de agosto) en período nocturno y en el intervalo 2000-2015. Del mismo modo, se obtuvo la temperatura superficial para las olas de calor de los años 2003, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2013, 2014 y 2015. Los valores mostraron una excelente distribución espacial asegurando el control de la regularidad en la muestra de partida. Esto resultó decisivo en la elección del *krigging* como método de interpolación, ya que resulta óptimo para muestras bien distribuidas espacialmente. En el *kriggeado* se consideró como *Z value* el valor térmico y se utilizó un método ordinario con un modelo de semivariograma, generando un tamaño de celda de salida de 50X50 metros y considerando un tamaño de la muestra de 9999 puntos.

## 4. Resultados

### 4.1. Caracterización de episodios cálidos y de olas de calor

Diversos trabajos realizados recientemente en la península Ibérica muestran la existencia de una temperatura máxima diaria a partir de la cual se observa un incremento acusado de la mortalidad. Esta varía en función del área

climática en la que nos encontremos debido al factor de adaptación de la población. En el caso de Madrid, la temperatura máxima diaria de *disparo de la mortalidad* es de 36,5°C (GARCÍA HERRERA & *al.*, 2005; DÍAZ & *al.*, 2006). Esta temperatura coincide con la señalada por AEMET en un reciente estudio sobre las olas de calor en España (AEMET, 2015) y corresponde a la máxima diaria registrada en el observatorio del Aeropuerto de Barajas. Considerando este dato y analizando la serie temperaturas diarias entre 1961 y 2015, se ha realizado una delimitación térmica que ha permitido clasificar los días como:

- cálidos: cuando la temperatura máxima registrada en el observatorio de Barajas supera 36.5°C
- olas de calor: cuando durante tres o más días consecutivos la temperatura máxima se mantiene por encima de los 36.5°C.
- días normales de verano aquellos en los que la temperatura máxima no alcanza los 36,5°C.

Entre 1961 y 2015 todos los años, excepto 1977, han registrado algún día clasificado como cálido y un número muy elevado de años con olas de calor. En total se han contabilizado 634 días cálidos de los cuales 412, con una duración media de 4,7 días, han correspondido a olas de calor. Analizando la serie se observa un importante aumento a partir del quinquenio 80-85 que se mantiene hasta la actualidad, aunque no de forma regular (FIG 8).

Destacan los quinquenios 1991-1995 con 100 días cálidos y 16 olas de calor y el más reciente (2011-2015) con 102 días y 11 olas de calor. En estos dos periodos se registraron las dos olas de calor más largas, ambas comenzaron a finales de junio y se mantuvieron hasta agosto, con un total de 3 olas en 2015 y 4 en 1991. La mayor duración correspondió a la de 2015 que comenzó el 27 de junio y se mantuvo hasta el 17 de julio; un total de 21 días de los cuales 10 las temperaturas máximas superaron los 39°C y en 15 las temperaturas mínimas se mantuvieron por encima de 20°C. La situación se repitió entre el 26 y el 29 de julio y el 3 y el 7 de agosto. La de 1991 tuvo una duración de 26 días, distribuidos en cuatro episodios de 3, 10, 4 y 9 días con máximas diarias similares a la anterior pero un número de noches cálidas bastante menor. Entre 2001 y 2015 todos los años han registrado, al menos, una ola de calor y en cuatro casos con una duración superior a 9 días (FIG. 8).

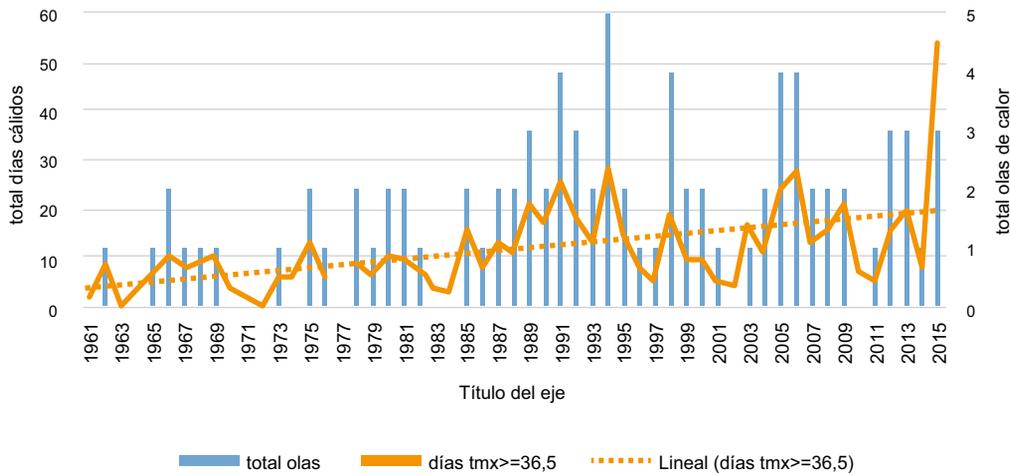


Fig. 8/ Aeropuerto de Barajas. Total de días cálidos, olas de calor y líneas de tendencia (1961-2015).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la AEMET

#### 4.2. Distribución e intensidad espacial de la isla de calor

La distribución espacial de las islas de calor nocturnas se ha obtenido a partir de la cartografía de las temperaturas mínimas diarias del aire, de la superficie y de la temperatura fisiológica en los días normales de verano y en los días cálidos. Se obtuvo como resultado un GRID con una resolución de 50X50 m para la isla superficial, para la temperatura del aire homogeneizada (red de observatorios estatal,

municipal y urbana) y para el índice PET. Las diferentes intensidades de las islas de calor se han obtenido como la diferencia entre los valores registrados en cada pixel y el valor medio correspondiente a los usos no urbanos del conjunto de la imagen. Las intensidades de cada una de las islas de calor analizadas (superficial, del aire y fisiológica), se han agrupado en cinco categorías (FIG 9) siguiendo las pautas marcadas en trabajos anteriores (FERNÁNDEZ GARCÍA, 1996). A su vez, se ha realizado una estimación porcentual de su superficie respecto al área total considerada (FIG 9).

Fig. 9/ Superficie de las distintas categorías de intensidad para las diferentes islas de calor en verano y en los días cálidos.

Tipo	Umbral	Verano (%)			Días cálidos (%)		
		ICsu	ICair	ICpet	ICsu	ICair	ICpet
<b>Débil</b>	0 a 2 °C	47,7	31,4	29,3	38,8	27,9	26,3
<b>Moderada</b>	2 a 4 °C	10,8	16,4	18,0	9,8	15,4	16,3
<b>Fuerte</b>	4 a 6 °C	0,1	8,4	9,7	1,2	11,0	10,3
<b>Muy fuerte</b>	6 a 8 °C	0,0	1,7	3,0	0,0	3,2	6,3
<b>Extremadamente fuerte</b>	> 8 °C	0,0	0,0	1,1	0,0	0,5	2,2
<b>% ocupado por la isla de calor</b>		58,6	57,9	61,1	49,8	57,3	61,4

ICsu: isla de calor superficial; ICair: isla de calor del aire; isla de calor PET

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la AEMET

Entre los aspectos más destacables señalar la extensión que ocupa la isla de calor (FIGS. 10, 11 y 12), que supone en torno al 60% de la superficie total del área metropolitana en las situaciones normales de verano (entre 57,9% y 61,1%). Esta situación varía muy poco durante los periodos cálidos, salvo en el caso de la isla de calor superficial, que disminuye un 7%. Este contraste entre el verano y los días cálidos se puede comprender si consideramos que los registros superficiales están condicionados por la naturaleza de las superficies y por la menor

capacidad de enfriamiento que tiene la ciudad compacta frente a las áreas periurbanas, con refrigeraciones más rápidas.

En el caso de la isla del aire (FIG. 9 y FIG. 11) la superficie ocupada por la isla se mantiene en los dos periodos considerados, con un ligero descenso en los periodos cálidos (57,9% y 57,3%), respectivamente) pero experimenta un incremento porcentual del 2,6% en el intervalo de fuerte y de 1,5% en el de muy fuerte.

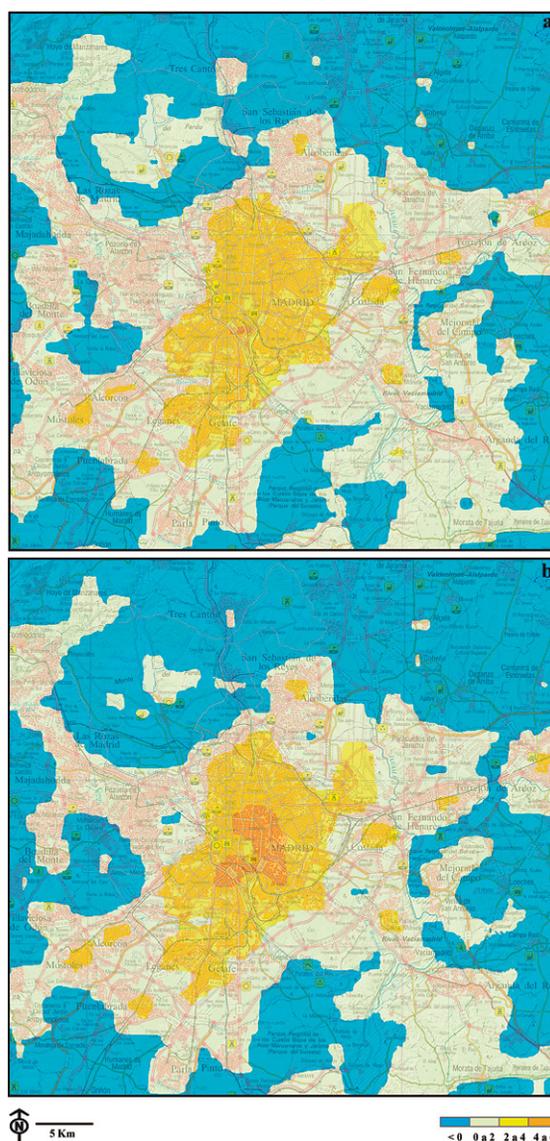


FIG. 10/ Distribución espacial de la isla de calor superficial nocturna en verano (a) y en los días cálidos (b)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos MODIS y de la Base topográfica MTN200 (IGN) de España

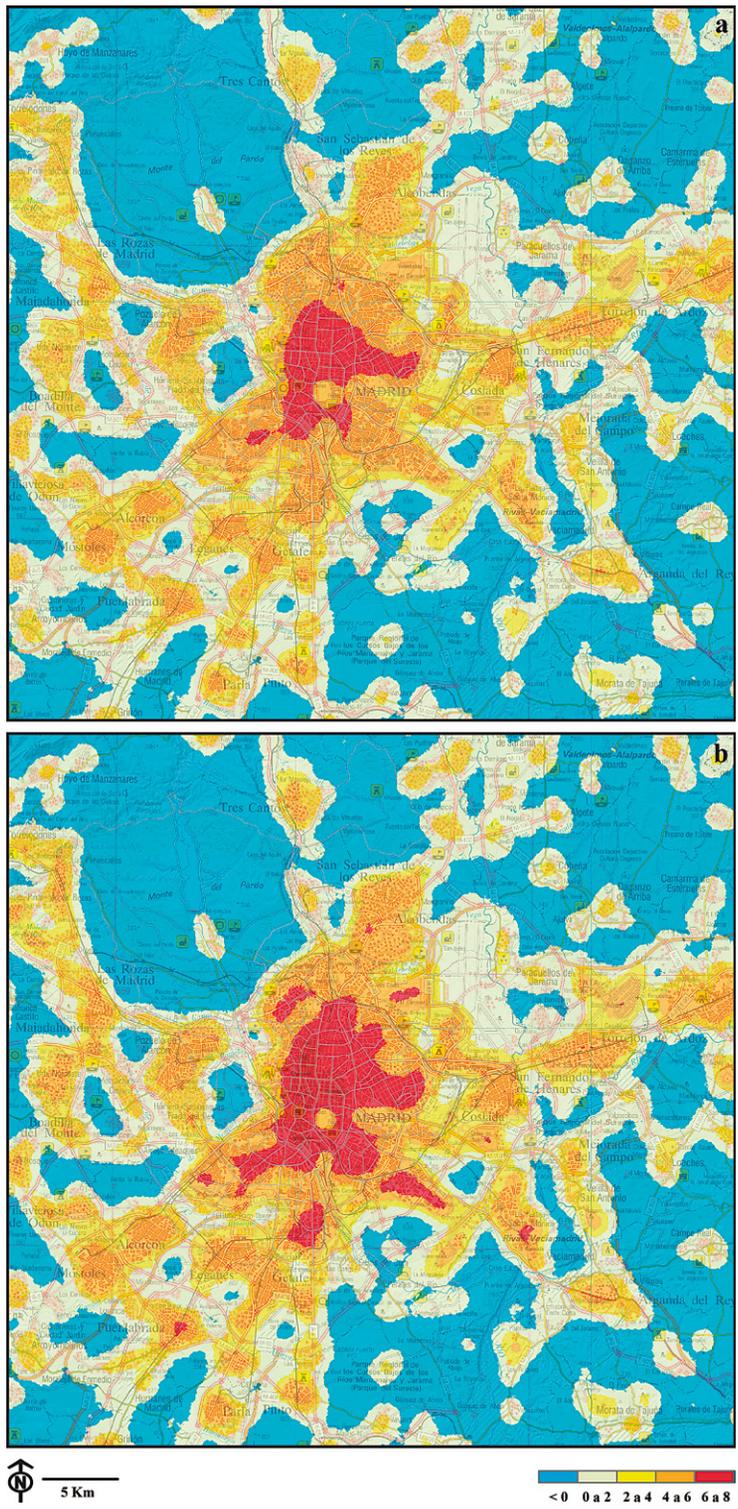


FIG. 11/ **Distribución espacial de la isla de calor del aire nocturna en verano (a) y en los días cálidos (b).**

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ayuntamiento de Madrid, AEMET, METEOCLIMATIC y GEOCLIMA y de la Base topográfica MTN200 (IGN) de España

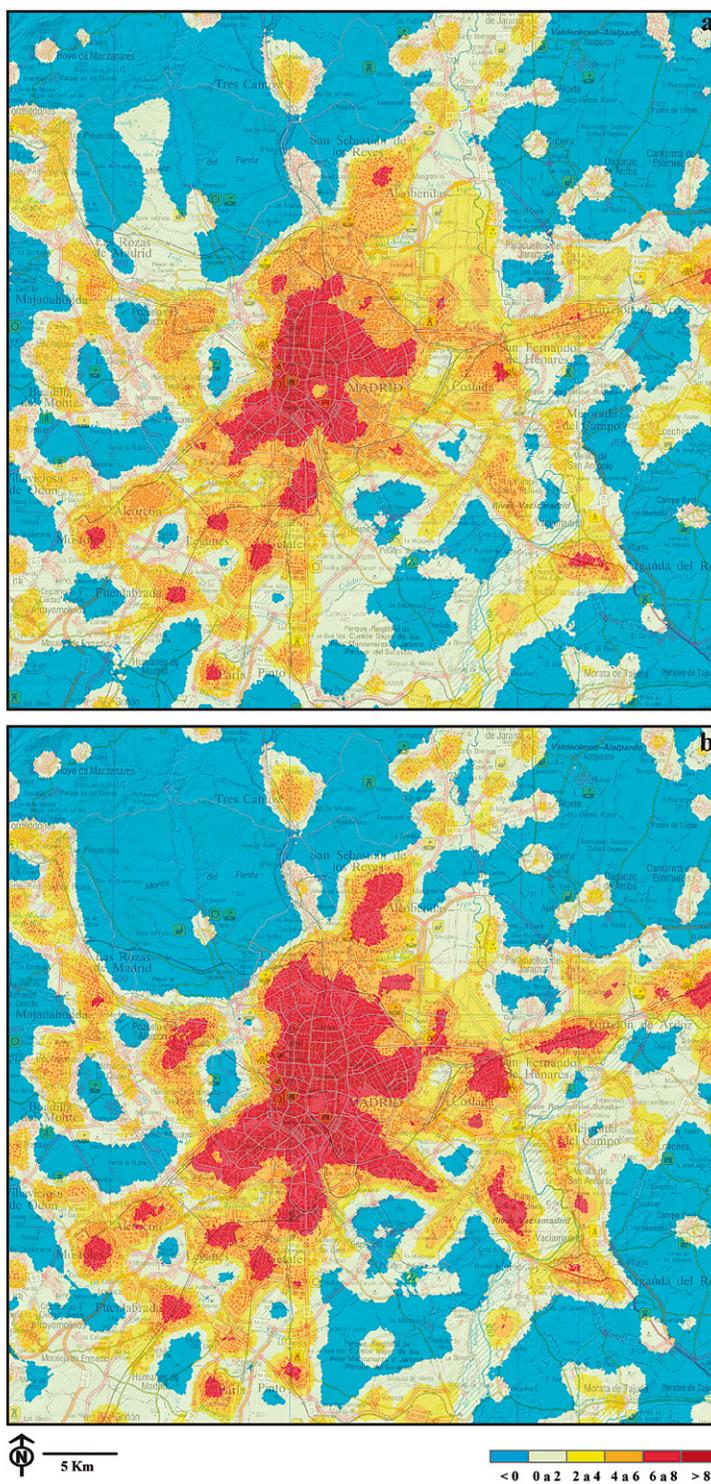


Fig. 12/ Distribución espacial de la isla de calor bioclimática nocturna en verano (a) y en los días cálidos (b).

Fuente: Elaboración a partir de datos propios y de la Base topográfica MTN200 (IGN) de España.

La isla bioclimática (FIG 9 y FIG. 12) es la que ocupa una mayor extensión con un 61,1% en los días normales de verano y un 61,4% en los días cálidos. La inclusión de otras variables como el viento, la humedad y la temperatura superficial explicaría estas diferencias respecto a las otras dos y, como señalamos anteriormente, es el mejor indicador del efecto negativo de la ciudad como factor de agudización del calor. Además, las diferencias respecto a la isla superficial y del aire, alcanzan una mayor relevancia en los días cálidos, especialmente en las categorías de fuertes y muy fuertes en las que la isla fisiológica representa el 8,5% del área ocupada por la isla, frente al 3,7% de la del aire.

#### 4.3. Intensidad e índice de impacto de la isla de calor

Para determinar el impacto de la isla de calor se han considerado dos índices, el primero

considera la intensidad de la isla de calor del aire en los días cálidos de verano y, el segundo, el estrés térmico derivado de la PET. En el primer caso, las categorías que parecen en la (FIG. 9) se han categorizado de 0 a 4 (débil=0 y muy fuerte=4) y la PET de 0 a 3 (< 20 = 0; 20 - 21 = 1; 21 - 22 = 2; > 22 = 3) utilizando como valor de referencia 20°C, que se considera como umbral a partir del cual las noches son cálidas. La suma de ambos índices nos ha permitido elaborar hasta 8 rangos de valoración de impacto de la isla de calor (FIG. 14). Destacar que, tras aplicación del índice, un 30,2% del área se incluye en alguna categoría de impacto. De esta superficie el 1,7% (4039,1 has) puede considerarse dentro de la categoría de *hot spot* y se localiza, casi en su totalidad, en el casco histórico de Madrid (FIG. 13). La modelización espacial y la representación cartográfica de este índice, resultan de especial importancia a la hora de plantear una zonificación térmica orientada a la planificación local y supramunicipal.

FIG. 13/ Índice de impacto y superficie ocupada.

Tipo	Índice	Área (Ha)	Área (%)
Nulo	0	171648,4	69,9
Débil	1	37769,1	15,4
Débil +	2	26912,1	11,0
Moderado	3	5151,4	2,1
Moderado +	4	2216,2	0,9
Fuerte	5	494,2	0,2
Fuerte +	6	690,4	0,3
Muy fuerte	7	638,3	0,3
<b>TOTAL</b>		<b>245520,3</b>	<b>100,0</b>

Fuente: Elaboración propia.

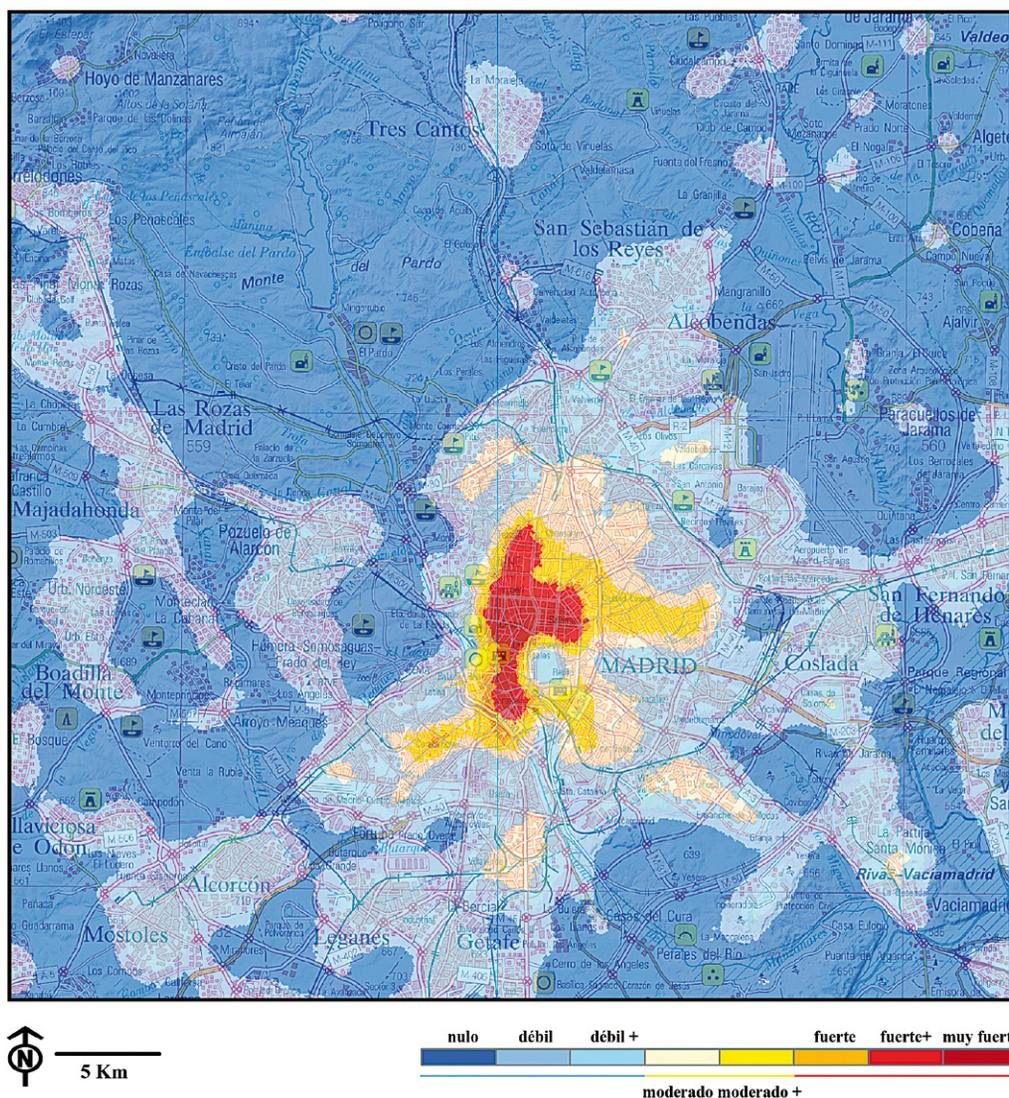


Fig. 14/ Índice de impacto de la isla de calor.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos propios y de la Base topográfica MTN200 (IGN) de España.

## 5. Conclusiones

La ciudad se configura como un espacio en el que se alteran las condiciones del clima regional y donde se generan, en muchos casos y en especial en los períodos más cálidos del verano, unas particulares condiciones climáticas. A lo anterior se suma el calor típico de los veranos de Madrid, que se agudiza como

consecuencia de la isla de calor urbana. El análisis individual y en conjunto de las islas de calor es el paso previo a la comprensión del efecto urbano y su reflejo en las variables que influyen en el clima urbano y en el bienestar de sus habitantes. Además, resulta fundamental la incorporación a las islas del aire y superficial de factores modelizados como el viento y la humedad. Los resultados obtenidos permitieron

determinar cuáles son los impactos sobre el grado de confort y bienestar de sus habitantes en periodos cálidos o de ola de calor. De lo anterior se desprende que el incremento térmico resultante debe de leerse con especial detalle, no desde los valores medios de los días cálidos, sino desde los registros extremos.

La gran extensión ocupada por la isla de calor en Madrid y su área metropolitana, ha supuesto un aumento del estrés térmico estrechamente vinculado con los intensos procesos de artificialización de las últimas décadas. No obstante, también existen amplios sectores que mantienen islas de frescor que contribuyen a refrigerar la ciudad. Por tanto, existe una evidente necesidad de incluir una regulación térmica en el planeamiento que,

necesariamente, esté asociada a una zonificación y a un exhaustivo conocimiento térmico de la ciudad y su respuesta ante fenómenos de calor extremo. Es por ello que resulta de extraordinario interés considerar la ciudad en su dimensión térmica. El trabajo propone una zonificación térmica, basada en los índices de impacto estimados, en cuatro grandes áreas: ámbitos urbanos y metropolitanos en los que se contemplen áreas verdes de cierta extensión y periféricas de compensación térmica, zonas de amortiguación térmica próximas a las áreas de urbanización más compacta; y áreas de protección o transición térmica hacia las zonas de riesgo térmico fuerte o muy fuerte (*hotspot*). La delimitación de estos sectores se considera clave para planificar medidas de regulación, prevención y mitigación frente a episodios extremos de calor.

## 6. Bibliografía

- AEMET (2015): *Olas de calor en España desde 1975*. Área de Climatología y Aplicaciones Operativas.
- EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (2017): *Climate change, impacts and vulnerability in Europe. An indicator-based report*.
- ALCAIDE MUÑOZ, J. & al. (2013): «Determinación de *green infraestructures* en Madrid y su ámbito metropolitano mediante el análisis comparativo del URBAN ATLAS y el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE)». En J. VINUESA ANGULO & al. (coords.), *Reflexiones a propósito de la Revisión General del Plan General de Madrid*, Grupo Trys. P.p. 229-253.
- AL-HAMDAN, M.Z. & al. (2016): «Using Landsat, MODIS, and a biophysical model to evaluate LST in urban centers». *Remote Sensing*, 8(11), 952-970.
- ALIZADEH-CHOOBARI, O. & al. (2016): «Inter-annual variations and trends of the urban warming in Tehran». *Atmospheric Research*, 170: 176-185.
- ALOBAYDI, D. & al. (2016): «The impact of urban form configuration on the urban heat island: The case study of Baghdad, Iraq». *Icsdec*, 2016 - Integrating Data Science, Construction and Sustainability, 145, 820-827.
- ANDRADE, M.J. & ALCOFORADO, H. (2008): *Global Warming and the Urban Heat Island*. En Marzluff, J. & al. (eds.): *Urban Ecology*. Springer. USA. Pp. 249-262.
- AYUNTAMIENTO DE MADRID. (2014): *Plan de Energía y Cambio Climático de la ciudad de Madrid-Horizonte 2020*. Madrid.
- AZEVEDO, J. A. & al. (2016): «Quantifying the daytime and night-time urban heat island in Birmingham, UK: A comparison of satellite derived land surface temperature and high resolution air temperature observations». *Remote Sensing*, 8(2): 153-156.
- BAHI, H. & al. (2016): «Effects of urbanization and seasonal cycle on the surface urban heat island patterns in the coastal growing cities: A case study of Casablanca, Morocco». *Remote Sensing*, 8(10): 829-840.
- BALLING, R.C. JR. & S.W. BRAZEL (1988): «High-resolution surface temperature patterns in a complex urban terrain». *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 54: 1289-1293.
- BECKERS, J.M. & M. RIXEN (2003): «EOF calculations and data filling for incomplete oceanographic datasets». *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20, p. 1839-1856.
- BERARDI, U. & Y. WANG (2016): «The effect of a denser city over the urban microclimate: The case of Toronto». *Sustainability*, 8(8): 822-832.
- BUYANTUYEV, A. & J. WU (2010): «Urban heat islands and landscape heterogeneity: Linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns». *Landscape Ecology*, 25: 17-33.
- CHEN, L., YU, B. & al. (2016): «Intra-urban differences of mean radiant temperature in different urban settings in shanghai and implications for heat stress under heat waves: A GIS-based approach». *Energy and Buildings*, 130: 829-842.
- CORRÉA, P. B. & al. (2016): «Estudo do fenômeno da ilha de calor na cidade de Manaus/AM: Um estudo a partir de dados de sensoriamento remoto, modelagem e estações meteorológicas». *Revista Brasileira De Meteorologia*, 31(2): 167-176.
- DEILAMI, K. & al. (2016): «Correlation or causality between land cover patterns and the urban heat island effect? evidence from Brisbane, Australia». *Remote Sensing*, 8(9): 716.
- DUAN, S. & Z. LI (2016): «Spatial downscaling of MODIS land surface temperatures using geographically weighted regression: Case study in northern China». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54 (11): 6458-6469.

- DU, H. & D. WANG & *al.* (2016): «Influences of land cover types, meteorological conditions, anthropogenic heat and urban area on surface urban heat island in the Yangtze River Delta urban agglomeration». *Science of the Total Environment*, 571: 461-470.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. & D. RASILLA (2008): «Olas de calor e influencia urbana en Madrid y su área metropolitana». *Estudios Geográficos*, LXIX, 265: 495-518.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2010): Cambio climático y espacios urbanos. En F. Fernández & E. Galán & R. Cañada (eds.). *Clima, ciudad y ecosistemas*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología AEC, Serie A, nº 7. Pp. 17-22.
- & *al.* (2013): La isla de calor en Madrid durante los periodos cálidos: evaluación de impactos y propuestas de actuación. En J. Vinuesa Angulo & D. Porras & J.M de la Riva & F. Fernández García (coords.), *Reflexiones a propósito de la Revisión General del Plan General de Madrid*, Grupo Trys. P.p. 229-253.
- FERNÁNDEZ, F. & *al.* (2016): *Estudio de detalle del clima urbano de Madrid*. Informe inédito para el Ayuntamiento de Madrid (Área de Medio Ambiente y Sostenibilidad).
- FISCHER P. & *al.* (2003): «Air pollution related deaths during the 2003 heat wave in the Netherlands». *Atmospheric Environment*, 38 (8): 1083-1085.
- FREY, C. & *al.* (2007): Urban radiation balance of two coastal cities in a hot and dry environment». *International Journal of Remote Sensing*, 28 (12): 2695-2712.
- GARCÍA PALOMARES, J. C. & J. C. ALBERI, (2005): «Mortalidad en la ciudad de Madrid durante la ola de calor del verano de 2003». *GeoFocus*, 5: 19-39.
- EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY. Mapping Guide for a European Urban Atlas. Document Version 1.1. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas/mapping-guide>, [20 de diciembre de 2015].
- HAINES, A., R.S. & *al.* (2006): «Climate Change and Human Health: Impacts, Vulnerability, and Mitigation». *Lancet*, 367 (9528): 2101-2109.
- HART, M. & D.J. SAILOR (2008): «Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island». *Journal of Theoretical and Applied Climatology*, 95: 397-406.
- HENN, B. & *al.* (2013): «Comparison of Methods for Filling Gaps in Hourly Near-Surface Air Temperature Data». *Journal of Hydrometeorology*, 14: 929-945.
- HÖPPE, P.R. (2016): «The physiological equivalent temperature – a universal index for the biome-teorological assessment of the thermal environment». *International Journal of Biometeorology*, 43: 71-75.
- HUANG, G., & CADENASSO, M. L. (2016): «People, landscape, and urban heat island: dynamics among neighborhood social conditions, land cover and surface temperatures». *Landscape Ecology*, 31(10): 2507-2515.
- KUNST, A.E. & *al.* (1993): «Outdoor air temperature and mortality in the Netherlands: a time-series analysis». *American Journal of Epidemiology*, 137: 331-341.
- LASCHEWSKI, G. & G. JENDRITZKY (2002): «Effects of the thermal environment on human health: an investigation of 30 years of daily mortality data from SW Germany». *Climate Research*, 21: 91-103.
- LO, C. P. & *al.* (1997): «Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect». *International Journal of Remote Sensing*, 18: 287-304.
- LU, D. y Q. WENG (2006): «Spectral Mixture Analysis of ASTER Images for Examining the Relationship between Urban Thermal Features and Biophysical Descriptors in Indianapolis, United States». *Remote Sensing of Environment*, 104(2): 157-167.
- MATZARAKIS, A. & *al.* (1999): «Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature». *International Journal of Biometeorology*, 43: 76-84.
- & B. AMELUNG (2008): Physiological Equivalent temperature as Indicator for Impacts of Climate Change on Thermal Comfort of Humans. En M.C. Thomson et al. (eds.), *Seasonal Forecasts, Climatic Change and Human Health*, 161 Springer Science + Business Media, Pp. 161-172.
- SAVIO, P. & *al.* (2006): *Mitigating New York City's Heat Island with Urban Forestry, Living Roofs, and Light Surfaces*. New York City Regional Heat Island Initiative, The New York State Energy Research land Development Authority. Albany NY.
- MORRIS, C.J.G. & *al.* (2001): «Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city». *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 40: 169-182.
- PU R.L.P. & *al.* (2006): «Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval». *Remote Sensing and Environment*, 104 (2): 211-225.
- RASILLA, D. & F. FERNÁNDEZ GARCÍA (2005): «A proposal of a daily relative comfort index: relationships with atmospheric circulation in the Iberian Peninsula». *Annalen der Meteorologie. Offenbach am Main (Germany)*, Deutscher Wetterdienst: 406-410.
- RUNNALLS, K.E. & T.R. OKE (2000): «Dynamics and controls of Vancouver's near-surface urban heat island». *Physical Geography*, 21: 283-304.
- SIDIQUI, P. & *al.* (2016): «Spatio-temporal mapping and monitoring of urban heat island patterns over Sydney, Australia using MODIS and Landsat-8.20». *4th International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA)*.
- SOBRINO, J.A. & *al.* (2008): «Thermal remote sensing in the framework of the SEN2FLEX project: field measurements, airborne data and applications». *International Journal of Remote Sensing*, 29 (17-18): 4961-4991.

- & *al.* (2012): «Impact of spatial resolution and satellite overpass time on evaluation of the surface urban heat island effects». *Remote Sensing of Environment*, 117: 50–56.
- SVENSSON, M. K. & I. ELIASSON (2002): «Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning». *Landscape and Urban Planning*, 61 Issue 1 (15): 37-54.
- TOMLINSON, C.J. & *al.* (2010): «Derivation of Birmingham's summer surface urban heat island from MODIS satellite images». *International Journal of Climatology*, 32 (2): 214–224.
- UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME (UN-Habitat) (2011): *Cities and Climate Change*. Earthscan, London.
- UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME (UN-Habitat) (2015): *Urban-LEDS Project Synthesis Report*. United Nations Human Settlements Programme, Nairobi.
- VANDENTORREN, S & *al.* (2004): «Mortality in 13 French cities during the August 2003 heat wave». *American Journal of Public Health*, 94 (9): 1518–1520.
- VOOGT, J.A. & T.R. OKE (2003): «Thermal remote sensing of urban areas». *Remote Sensing of Environment* (special issue on *Urban Areas*), 86: 370-384.
- WENG, Q.; LU, D. & SCHUBRING, J. (2004): «Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies». *Remote Sensing of Environment*, 89 (4), p. 467-483.