

47. Actualización de la isla de calor urbana de Madrid y su influencia en la simulación energética de edificios

Núñez Peiró, Miguel^{(1,*),} Sánchez-Guevara Sánchez, Carmen^{(1),} Neila González, F. Javier⁽¹⁾

(1) Grupo de investigación ABIO. Universidad Politécnica de Madrid.

(*) miguel.nunez@upm.es, +34 913 363 889

Resumen Pese al avance que se ha alcanzado en el conocimiento del comportamiento energético de los edificios, los archivos climáticos siguen sin contemplar los efectos de la Isla de Calor Urbana (ICU). Este fenómeno provoca un incremento generalizado de las temperaturas en el tejido urbano, variable tanto en el tiempo como en el espacio, e introduce un importante grado de imprecisión en la evaluación energética. Durante el desarrollo de este estudio se ha evidenciado la relevancia de la ICU en el comportamiento energético de los edificios, así como la imposibilidad de incorporar los estudios existentes al régimen dinámico de la simulación energética. Se considera por tanto necesario llevar a cabo una actualización de los modelos existentes, de forma que permitan su adecuación a los procesos de evaluación energética. Para esta primera fase del estudio y gracias a las actuales técnicas de geolocalización y a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se ha desarrollado una actualización de la ICU a través de mapas de isotermas. Ésta tiene como objetivo establecer el punto de partida desde el que llevar a cabo la integración de la ICU en la simulación energética.

Palabras clave Isla de calor urbana; clima urbano; Madrid; evaluación energética

1 Introducción

Hoy en día las herramientas de simulación energética juegan un papel clave a la hora de determinar las estrategias energéticas en la edificación. No sólo ayudan a mejorar la toma de decisiones en cuanto al diseño y confort de los ocupantes, sino también a establecer los tiempos de retorno de las intervenciones y seleccionar las más adecuadas tanto en el caso de nueva construcción como en la rehabilitación.

Sin embargo, continúan existiendo ciertas discrepancias entre los resultados obtenidos de la simulación y los observados en la realidad (Coakley et al., 2014). En este sentido se han producido importantes esfuerzos orientados a mejorar su precisión, existiendo una importante corriente de estudio acerca de la calibración de estos modelos en cuanto a los procesos termodinámicos, los perfiles de uso y las condiciones climáticas (Evins, 2013; Fouquier et al., 2013; Fumo, 2014).

Vinculada a ésta última se encuentra la Isla de Calor Urbana (ICU), fenómeno por el cual existen importantes diferencias de temperatura entre el paisaje construido (el urbano) y el no construido (el rural). A pesar del extenso conocimiento existente sobre la ICU, ésta no se encuentra recogida en la caracterización de los archivos climáticos, cuya escala de desarrollo es la regional. Estudios previos ya han adelantado la relevancia de este fenómeno en el comportamiento térmico de los edificios (López Moreno et al., 2015), por lo que se considera prioritario abordar la cuestión de la integración de este fenómeno en la simulación energética.

2 Antecedentes

Debido a la suma de factores que influyen en la ICU, así como a su gran variabilidad espacial y temporal, lograr tener un buen registro de este fenómeno requiere de gran cantidad de mediciones. Si bien las primeras observaciones se centran en detectar su existencia y en identificar las zonas de mayor intensidad desde una perspectiva estática (Arnfield, 2003; Santamouris, 2007, 2015), en los últimos años gran parte de los esfuerzos de investigación se han vinculado al desarrollo de modelos numéricos que permitan su estudio de forma dinámica (Mirzaei, 2010)

La ciudad de Madrid contó con el primer estudio de isla de calor en España (López Gómez et al., 1988, 1993), donde se empleó la técnica de los transectos urbanos. A éste le siguieron diversos estudios sobre cuestiones particulares del clima urbano de la ciudad (Almendros et al., 1995; Fernández García, 2001; Sobrino et al., 2009), e incluso se desarrolló un modelo numérico-teórico con el que se pretendía universalizar su comportamiento (Salamanca et al., 2010, 2011).

Estos trabajos, sin embargo, no han resultado ser compatibles con el objetivo de esta investigación, dada su antigüedad, su incapacidad para generar datos horarios, y por no ser suficientemente precisos en la escala microclimática (Grimmond et al., 2010, 2011). Siguiendo las recomendaciones que apuntan al desarrollo de modelos ajustados a los objetivos de cada investigación (Mirzaei et al., 2015), se apuesta por generar un modelo empírico con datos procedentes de puntos fijos distribuidos por la ciudad (Kolokotroni et al., 2006, 2010; Mihalakakou et al., 2002).

El presente trabajo aborda la primera fase del desarrollo de este modelo, siendo su objetivo el de actualizar el conocimiento sobre el desarrollo espacial de la ICU en diferentes momentos del año.

3 Medios y métodos

Esta investigación replica la metodología empleada por el primer estudio de la ICU de Madrid (López Gómez et al., 1988) consistente en el desarrollo de transectos urbanos. Con el objetivo de visualizar la máxima intensidad de la isla térmica, las mediciones se llevan a cabo en situaciones de tiempo anticiclónico, viento en calma, y pocas horas después del anochecer (2100 - 2300 UTC). Se ejecutan tres transectos en cada medición, contando cada uno de ellos con un recorrido de ida y otro de vuelta, y a partir de los cuales se generan los resultados de este trabajo.

En este proceso se han incorporado mejoras con respecto al primer estudio, tanto en la fase de planificación, de toma de datos y de análisis. Éstas han permitido reducir los recursos materiales y humanos necesarios para realizar este estudio, automatizar diversos procesos, y mejorar la precisión y resolución de los resultados.

3.1 Recorridos y geolocalización

Dado que los recorridos originales del estudio de 1988 son incompatibles con la actual jerarquía viaria de la ciudad, se han generado nuevos recorridos de ida y vuelta para cada uno de los transectos en base a los puntos de medición originales. Para ello, ha sido necesario generar una red de transporte digital capaz de emular las restricciones de tráfico actuales. En su desarrollo se ha empleado la extensión *Network Analyst* del software *ArcGis 10.3*. Posteriormente estos recorridos han sido integrados en una aplicación móvil para posibilitar su seguimiento y geolocalizar en cada instante la posición del vehículo.

3.2 Equipos de medición y toma de datos

Se han empleado tres sondas de temperatura y tres dataloggers para el registro de temperatura. La sonda está compuesta por un termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*) al descubierto, cuya precisión es de $\pm 0,2$ °C, y con un tiempo de respuesta $t_{90} = 60$ segundos (figura 1). Éste, con velocidades del aire superiores a 30km/h, garantiza una respuesta prácticamente inmediata, lo que ha permitido detectar diferencias de temperatura en intervalos de hasta 10 segundos.

Los recorridos se han desarrollado en coche, fijando la sonda en la parte superior del mismo, y alejada tanto de su superficie como del escape de gas. Dado que las mediciones se desarrollaron varias horas después del anochecer, no fue necesario proteger el sensor de la radiación solar.

Datalogger Testo 175 T2

Medidas: 89x53x27 mm
Canales: 2 (int/ext)
Ciclo medición: 10 s – 24 h
T. funcionamiento: -35... +55 °C
Precisión: $\pm 0,5$ °C

Sonda sensor descubierto NTC

Medidas: $\varnothing 5 \times 115$ mm
T. funcionamiento: -50... +125 °C
Precisión: $\pm 0,2$ °C
Tiempo respuesta: $t_{90} = 60$ s



Fig. 1 Especificaciones técnicas de los equipos empleados en las mediciones. Fuente: Testo AG

3.3 Herramientas de análisis, interpolación y generación de mapas

En primer lugar, se ha desarrollado un análisis de distribución de frecuencias para cada serie con el objetivo de identificar tendencias comunes entre ellas.

A continuación, se han generado mapas de isotermas mediante la técnica de análisis geoestadístico *cokrigado*. Ésta permite, mediante interpolación, predecir el valor en un punto concreto en función de los registros existentes en su entorno:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i) \quad (1)$$

Como semivariograma, que es la función que describe la correlación espacial del krigado, se ha empleado el exponencial, el cual es ampliamente utilizado en predicción meteorológica y contaminación (Palomino et al., 2015).

$$\gamma(h) = c_0 + c \left(1 - \exp\left(\frac{-h}{r}\right)\right); \quad h > 0 \quad (2)$$

Además, dado que en estudios previos de la ciudad de Madrid se demostró la influencia de las vaguadas en la generación de la ICU (Fernández García et al., 1996) se ha incorporado un *MDT* (Modelo Digital del Terreno) para aportar información sobre la altimetría. Todo ello ha sido tratado mediante el módulo *Geostatistical Analyst* de *ArcGIS 10.3*.

Además de los 101 puntos de medición de los transectos se han incorporado los datos de temperatura de seis observatorios de AEMET y de nueve del Sistema Integral de Calidad del Aire de Madrid (SICAM), por lo que este trabajo ha contado con información de un total de 116 puntos (figura 2).

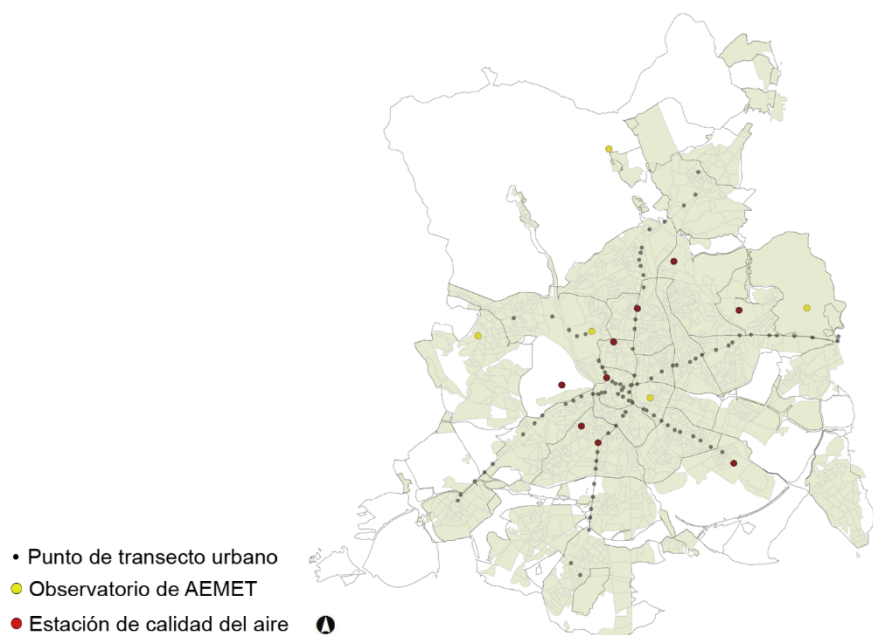


Fig 2 Puntos de medición empleados en la generación de mapas de isotermas.

4 Resultados y discusión

De julio de 2015 a abril de 2016 se realizaron cuatro mediciones nocturnas, aproximadamente un mes después de cada solsticio y equinoccio, correspondiéndose cada una de ellas con una estación del año. Todas las mediciones se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones atmosféricas (tiempo anticiclónico y viento en calma), a la misma hora (entre las 2100 y 2300 UTC), y en ellas se completaron tres transectos con idénticos recorridos.

La tabla 1 muestra un resumen de los parámetros estadísticos más importantes, empleados en el desarrollo del análisis de frecuencias y en la generación de mapas de isotermas.

Tabla 1 Resumen de parámetros estadísticos de cada medición de temperaturas

| Parámetro | 15 julio 2015 | 28 octubre 2015 | 16 febrero 2016 | 25 abril 2016 |
|---------------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Media | 31,2 | 12,8 | 2,6 | 15,6 |
| Mínima | 27,3 | 11,2 | -0,6 | 12,1 |
| P ₁₀ | 28,7 | 11,9 | 1,5 | 13,7 |
| P ₅₀ | 31,6 | 12,9 | 2,6 | 15,6 |
| P ₉₀ | 33,1 | 13,4 | 3,8 | 17,4 |
| Máxima | 33,7 | 13,8 | 5,9 | 18,0 |
| Rango | 6,4 | 2,6 | 6,5 | 5,9 |
| Desviación estándar | 1,6 | 0,6 | 1,0 | 1,3 |

4.1 Distribución de frecuencias

En la distribución de frecuencias de las temperaturas presentada en la figura 3 se puede asociar la intensidad de la isla de calor con la mayor dispersión de los datos recogidos durante las mediciones. En este sentido se observa un patrón decreciente de la intensidad de la ICU desde el verano hacia el invierno (*a-b-c*) y creciente en sentido inverso (*c-d-a*), algo a lo que ya se apuntaba en anteriores trabajos de esta investigación (Núñez Peiró et al., 2016).

Si bien se confirma que la mayor intensidad de la ICU se produce en el mes más cálido, sorprenden las grandes diferencias registradas entre la medición de octubre (*b*) y la medición de primavera (*d*), dado que ambas se realizaron en momentos del año en los que los registros históricos de temperatura son muy similares ($T_{\max}=16-20^{\circ}\text{C}$; $T_{\min}=6-7^{\circ}\text{C}$).

La explicación a este fenómeno parece encontrarse en la intensidad de la radiación solar, cuya simetría no se corresponde con la de las estaciones del año. En este sentido se observa que la ICU no tiene un comportamiento simétrico con respecto a las estaciones del año sino con respecto a los solsticios, y en función de la proximidad o lejanía a éstos se intensifica o suaviza su efecto.

En consecuencia, se podrían ordenar las observaciones de mayor a menor intensidad: la medición (*a*) se aleja del solsticio de verano 24 días, la (*d*) 57 días, la (*c*) 125 días y la (*b*) 129 días. Además, se justifica el gran parecido que muestran la medición de otoño (*b*) y de invierno (*c*), situadas de forma simétrica con respecto a los solsticios y sometidas a la misma radiación solar.

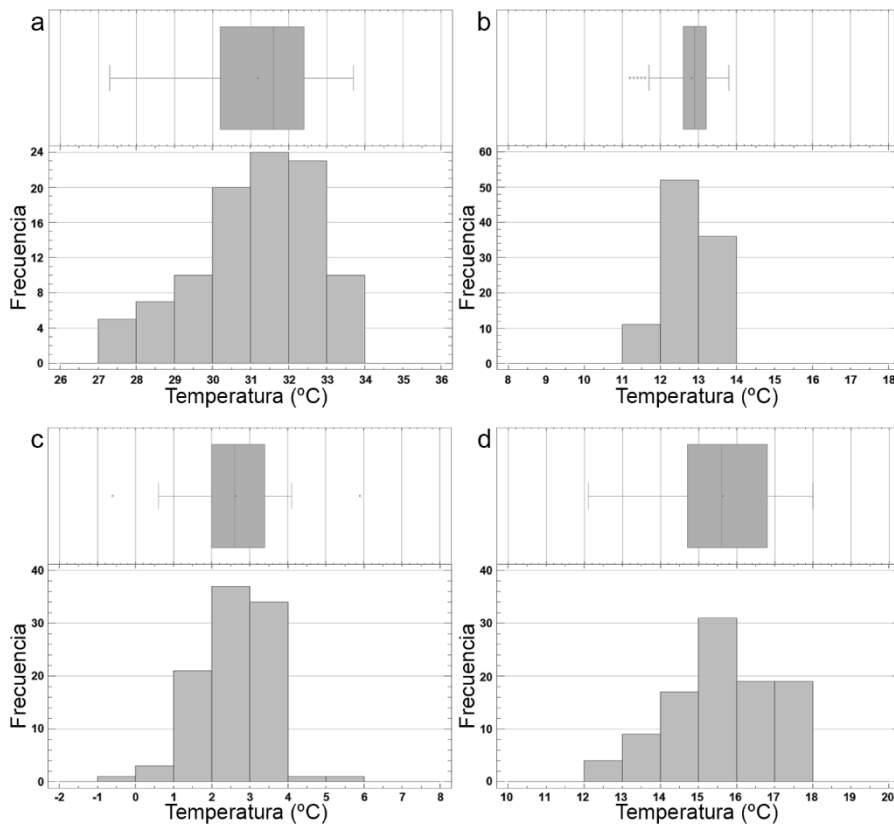


Fig. 3 Distribución de frecuencias de las temperaturas para cada una de las mediciones, y ordenadas por orden cronológico. *a*: 15 de julio de 2015; *b*: 28 de octubre de 2015; *c*: 16 de febrero de 2016; *d*: 25 de abril de 2016.

4.2 Mapas de isotermas

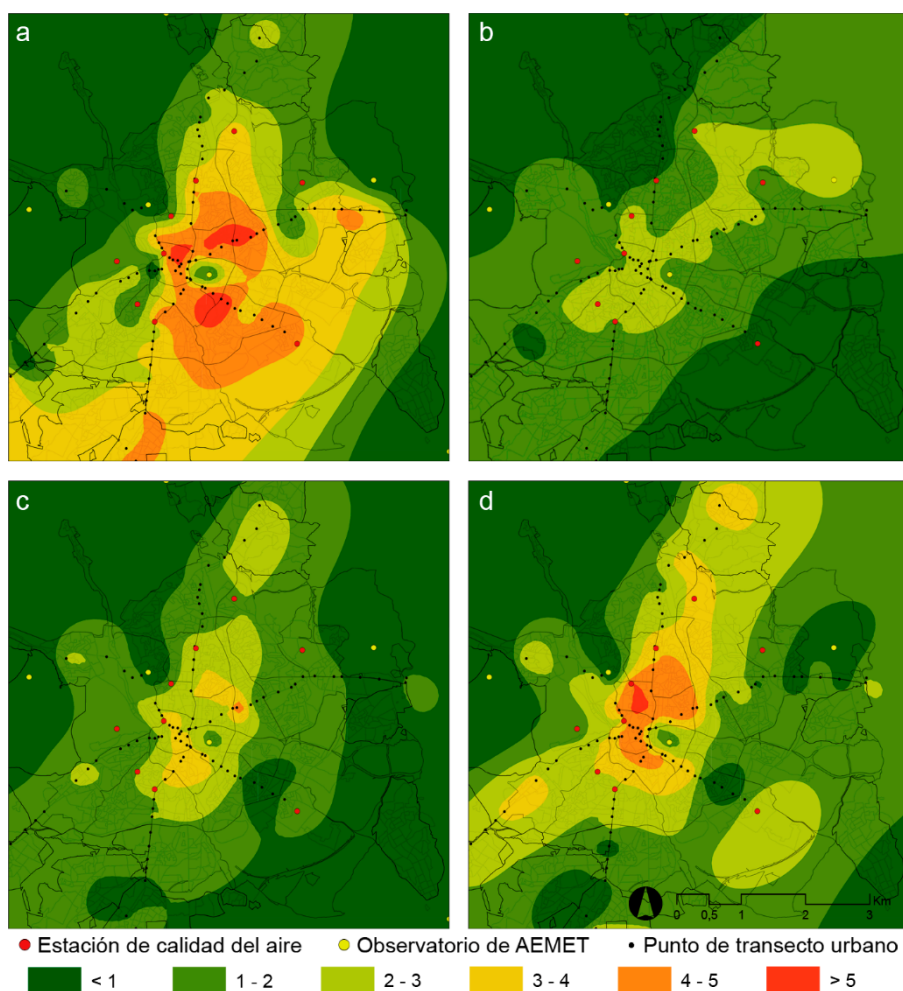


Fig. 4 Mapa de diferencia de temperaturas para cada una de las mediciones, ordenadas por orden cronológico. *a*: 15 de julio de 2015; *b*: 28 de octubre de 2015; *c*: 16 de febrero de 2016; *d*: 25 de abril de 2016.

Partiendo de los registros de temperatura recogidos durante esta campaña de medición, y siguiendo la metodología descrita en el apartado 3.3 *Tratamiento de datos*, se ha generado un mapa de isotermas para cada una de las estaciones del año (figura 4). En ellos se representa la diferencia de temperatura existente entre cada uno de los puntos de medición y un valor de referencia.

Normalmente este valor de referencia se toma de un punto situado fuera de la ciudad, en un entorno no edificado. No resulta sencillo situarlo, puesto que existen dudas sobre qué se puede considerar una ubicación rural, qué distancia a la ciudad es la idónea, o cómo asegurar que la medición de ese punto concreto es verdade-

ramente representativo del entorno no edificado. Estas discrepancias han llevado, entre otras cosas, a poner en crisis centenares de estudios sobre la isla de calor en todo el mundo (Stewart, 2011).

Otra forma de determinar el valor de referencia, cuando se desarrollan transectos urbanos, consiste en emplear el valor más bajo de las series realizadas, y a partir de éste construir los mapas de isotermas. Sin embargo, y tal y como se observa en la figura 4.c, existen casos en los que las mínimas se corresponden con atípicos. Esto no significa que sean forzosamente mediciones erróneas, pero emplearlo como referencia puede provocar distorsiones en la generación de mapas. Además, conviene señalar que, en este trabajo, los registros de temperatura más fríos nunca se encontraron en la misma ubicación, desplazándose desde Ciudad Universitaria en el oeste (verano) a la salida norte de Madrid (otoño), a las proximidades del río Jarama en el este (invierno), y a la entrada de Getafe en el sur (primavera).

En este trabajo, en lugar de establecer un valor mínimo de temperatura como referencia, se propone el empleo del primer decil de la serie como valor de referencia de la primera isoterma. Con ello se consigue relativizar el peso de los atípicos y comparar diversos mapas de isotermas entre sí con mayor facilidad.

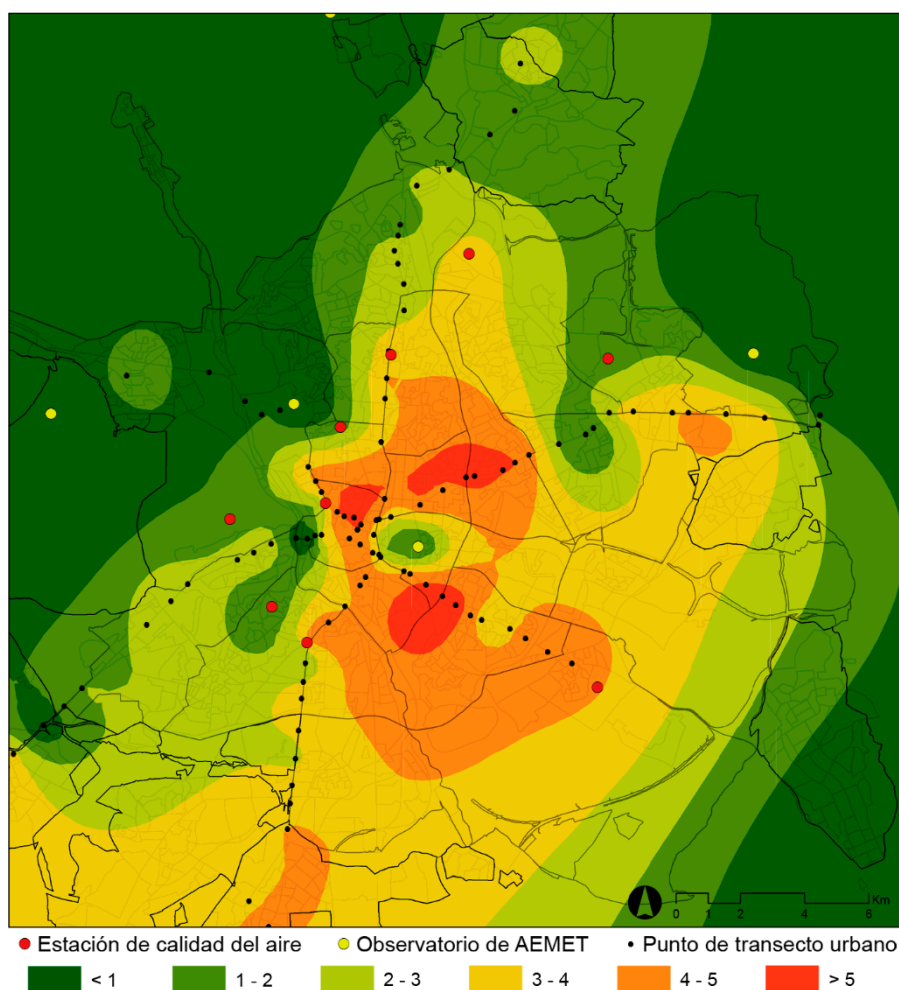


Fig. 5 Mapa basado en las variación de temperaturas en la medianoche del 15 de julio de 2015.

En la figura 5 se muestra con mayor grado de detalle la distribución espacial de temperaturas para el momento en el que se registró la mayor intensidad, el día 15 de julio de 2015. Éste se ha podido comparar con un mapa de isotermas generado a partir de los datos del día 11 de julio de 1985 (figura 6), justo 30 años antes, y obtenidos a partir de los perfiles de temperatura publicados en el primer estudio realizado en Madrid (López Gómez et al., 1988).

Se puede apreciar que la morfología de ambas es muy parecida. La distribución concéntrica de la ICU se matiza con un desarrollo más intenso en el eje NE-SW, siguiendo el nivel de urbanización de la zona. Ciudad Universitaria marca la mínima más próxima a la ciudad, y destaca en ambos casos la isla de frescor a la altura del parque de El Retiro. Se observa que, además de la ciudad de Madrid, las ciudades y pueblos situados en sus proximidades cuentan con micro-islas de calor de entre 1 y 3°C, y que existen tejidos urbanos que provocan incrementos o descensos de temperatura en ambos casos.

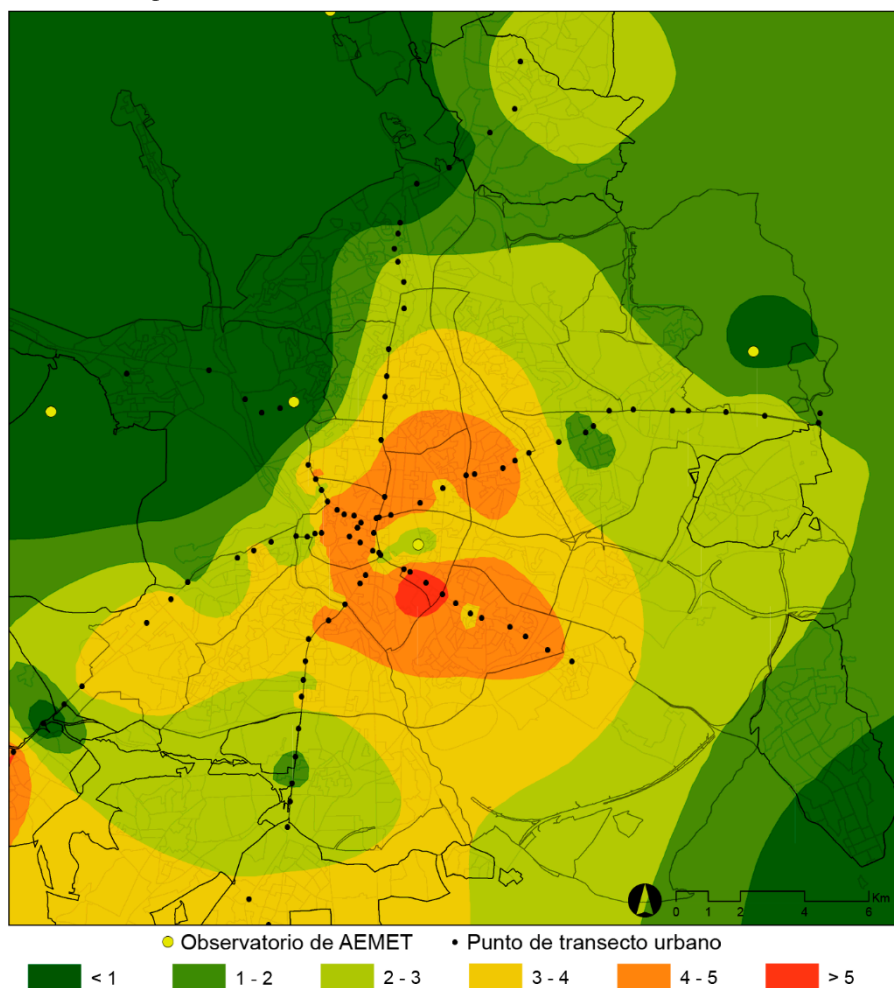


Fig. 6 Mapa basado en las diferencias de temperaturas en la medianoche del 11 de julio de 1985. Elaboración propia a partir de López Gómez et al. (1988)

Respecto a las diferencias entre ambos, resulta evidente el aumento radial de las zonas más afectadas por la ICU, ampliando su área de influencia y multiplicándose los focos más potentes donde la variación de temperatura supera los 4°C. Sin embargo, la ICU no parece haber aumentado en intensidad, manteniendo los valores máximos en el entorno de los 5-6 °C.

Todo apunta a que el crecimiento de la ciudad ha propiciado que el área de la ICU con mayor intensidad (>4°C) se extienda a otras zonas del núcleo urbano, pero esto no parece suficiente para aumentar su intensidad en los puntos en los que ya había alcanzado las cotas más altas, y donde el tejido urbano ya consolidado ha sufrido pocos cambios a lo largo de estas tres décadas.

5 Conclusiones

Esta investigación ha confirmado que la isla de calor urbana de Madrid ha evolucionado desde que se realizara el primer estudio sobre este fenómeno, publicado en 1988. En concreto, se ha observado un incremento en el área de influencia de las temperaturas más altas, si bien no parece haber aumentado su intensidad.

A pesar del importante esfuerzo humano y los recursos materiales necesarios, la metodología empleada para llevar a cabo este proceso de actualización de la ICU se ha mostrado extremadamente útil, y gracias a las mejoras incorporadas en el proceso de medición se espera poder realizar un análisis del comportamiento del clima urbano a menor escala.

La comparación de los registros obtenidos en diferentes momentos del año apunta a que la mayor intensidad se produce en el entorno del solsticio de verano, fundamentalmente debido a la mayor cantidad de radiación solar recibida. Al contrario de lo expuesto en el estudio de 1988, la intensidad de la ICU parece decrecer hasta el entorno del solsticio de invierno, donde alcanzaría su mínimo.

Los resultados de este trabajo constituyen, en definitiva, una base actualizada para la toma de decisiones de cuestiones relacionadas con la ICU. Estos resultados podrían ser usados en diversos campos relacionados con el clima urbano, y se erige como una herramienta fundamental para seleccionar los puntos más relevantes del microclima urbano. Finalmente, completa la primera etapa del desarrollo del modelo dinámico que permitirá integrar el efecto de la ICU en la evaluación energética de edificios.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Programa de I+D+I orientada a los retos de la sociedad “Retos Investigación” del Ministerio de Economía y Competitividad. Código BIA2013-41732-R, Proyecto MODIFICA: Modelo predictivo del comportamiento energético de edificios de viviendas bajo condiciones de isla de calor urbana.

Los autores también desean agradecer a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y al Sistema Integral de Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid por los datos climáticos cedidos para el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- Almendros, M. Á., & López Gómez, A. (1995). La isla de calor en Madrid y las situaciones sinópticas. *Estudios Geográficos*, 56(219), 207–221.
- Arnfield, a. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26.
- Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123–141.
- Evins, R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 230–245.
- Fernández García, F. (2001). El clima urbano de Madrid y su influencia sobre el confort térmico. *Boletín de La Real Sociedad Geográfica*, 137–138, 12.
- Fernández García, F., Almendros Coca, M. Á., & López Gómez, A. (1996). La influencia del relieve en la isla de calor de Madrid: las vaguadas del Manzanares y del Abroñigal. *Estudios Geográficos*, 57(224), 473–494.
- Fouquier, A., Robert, S., Suard, F., Stéphan, L., & Jay, A. (2013). State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 272–288.
- Fumo, N. (2014). A review on the basics of building energy estimation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 53–60.
- Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Baik, J.-J., Belcher, S. E., Beringer, J., ... Zhang, N. (2011). Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. *International Journal of Climatology*, 31(2), 244–272.
- Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Barlow, J., Baik, J.-J., Belcher, S. E., ... Zhang, N. (2010). The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First Results from Phase 1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(6), 1268–1292.
- Kolokotroni, M., Davies, M., Croxford, B., Bhuiyan, S., & Mavrogianni, A. (2010). A validated methodology for the prediction of heating and cooling energy demand for buildings within the Urban Heat Island: Case-study of London. *Solar Energy*, 84(12), 2246–2255.
- Kolokotroni, M., Giannitsaris, I., & Watkins, R. (2006). The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies. *Solar Energy*, 80(4), 383–392.
- López Gómez, A., López Gómez, J., Fernández García, F., & Arroyo Ilera, F. (1988). *El Clima urbano de Madrid: La isla de calor*. Madrid: CSIC.

Libro de Actas del 3^{er} Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones
Eco-Eficientes

- López Gómez, A., López Gómez, J., Fernández García, F., & Moreno Jiménez, A. (1993). *El Clima urbano: teledetección de la isla de calor en Madrid*. Madrid: MOPT.
- López Moreno, H., Sánchez-Guevara Sánchez, C., Román López, E., & Neila González, F. J. (2015). Thermal characterization of urban heat island according to urban morphology of Madrid. In *Proceedings of the III International Congress on Construction and Building Research*.
- Mihalakakou, G., Flocas, H. a., Santamouris, M., & Helmis, C. G. (2002). Application of Neural Networks to the Simulation of the Heat Island over Athens, Greece, Using Synoptic Types as a Predictor. *Journal of Applied Meteorology*, 41(5), 519–527.
- Mirzaei, P. A., & Haghighat, F. (2010). Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations. *Building and Environment*, 45(10), 2192–2201.
- Mirzaei, P. A., Olsthoorn, D., Torjan, M., & Haghighat, F. (2015). Urban neighborhood characteristics influence on a building indoor environment. *Sustainable Cities and Society*, 19, 403–413.
- Núñez Peiró, M., Román López, E., Sánchez-Guevara Sánchez, C., & Neila González, F. J. (2016). Hacia un modelo dinámico para la isla de calor urbana de Madrid = Towards a Dynamic Model for the Urban Heat Island of Madrid. *Anales de Edificación*, 2(1), 49–58.
- Palomino, I., Vivanco, M. G., Theobald, M., Garrido, J. L., & Martín, F. (2015). *Evaluación de la calidad del aire en España utilizando modelización combinada con mediciones. Preevaluación 2014*. Madrid.
- Salamanca, F., & Martilli, A. (2010). A new Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate simulations-part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(3–4), 345–356.
- Salamanca, F., Martilli, A., & Yagüe, C. (2011). A numerical study of the Urban Heat Island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies. *International Journal of Climatology*, 32(15), 2372–2386.
- Santamouris, M. (2007). Heat Island Research in Europe: The State of the Art. *Advances in Building Energy Research*, 1(1), 123–150.
- Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of The Total Environment*, 512–513, 582–598.
- Sobrino, J. a, Sòria, G., Romaguera, M., & Cuenca, J. (2009). Desirex 2008: Estudio de la isla de calor en la Ciudad de Madrid. *Revista de Teledetección*, 31, 80–92.
- Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31(2), 200–217.