



VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA ISLA DE CALOR URBANA DE LA CIUDAD DE ZARAGOZA (ESPAÑA)

JOSÉ M. CUADRAT^{1,2,*}, ROBERTO SERRANO-NOTIVOLI³,
SAMUEL BARRAO^{1,2}, MIGUEL ÁNGEL SAZ^{1,2},
ERNESTO TEJEDOR⁴

¹Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, España.

²Instituto Universitario de Ciencias Ambientales, Universidad de Zaragoza, España.

³Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid, España.

⁴Department of Atmospheric and Environmental Sciences, University at Albany, United States.

RESUMEN. En este artículo se analiza la intensidad y la variabilidad temporal de la isla de calor urbana (ICU) de la ciudad de Zaragoza (España) y se evalúa la acción del viento como importante factor atmosférico condicionante de la misma. A partir de los datos horarios proporcionados por la red meteorológica urbana de mesoescala de la ciudad, se calculó la diferencia de temperatura entre dos observatorios, uno urbano (Plaza Santa Marta) y otro en las afueras del área urbana (Ciudad Deportiva), en el periodo 2015-2020. Los resultados indican que la temperatura en el centro de la ciudad es, con mucha frecuencia, 1º o 2ºC más elevada que en el entorno, y en ocasiones ha llegado a superar los 8ºC. La ICU es más intensa en verano (promedios horarios de 2,5ºC) que en invierno (promedio de 2,2ºC) y es más intensa durante la noche que durante el día. El valor máximo de la ICU se alcanza en situaciones de calma atmosférica; en cambio, se debilita claramente con vientos de más de 10 km/h y llega prácticamente a desaparecer con velocidades superiores a 50 km/h.

Temporal variability of the urban heat island in Zaragoza (Spain)

ABSTRACT. We analyse the temporal intensity and variability of the urban heat island (UHI) in the city of Zaragoza (Spain), and assess the role of wind as an important atmospheric conditioning factor. Based on the time data provided by the city's urban mesoscale meteorological network, the temperature difference between two observatories, one urban (Plaza Santa Marta) and one located on the outskirts of the urban area (Ciudad Deportiva), was calculated for the 2015-2020 period. The results indicate that the temperature in the city centre is very frequently 1º or 2ºC higher than in the surroundings, sometimes even more than 8ºC higher. The UHI is more intense in summer (an average of 2.5ºC per hour) than in winter (an average of 2.2ºC per hour) and more intense during the night than during the day. The maximum UHI value is reached in calm atmospheric situations; however, this value is very limited with winds over 10 km/h and it practically disappears with wind speeds over 50 km/h.

Palabras clave: clima urbano, isla de calor urbano (ICU), velocidad del viento, Zaragoza, España.

Key words: urban climate, Urban Heat Island (UHI), wind speed, Zaragoza, Spain.

Recibido: 8 Febrero 2021

Aceptado: 30 Junio 2021

1. Introducción

Es bien conocido que las ciudades transforman el medio físico donde se asientan. Su masa compacta de edificios supone una alteración profunda del paisaje natural, la cubierta vegetal es sustituida por un substrato impermeable y las actividades de sus habitantes son una fuente considerable de calor y contaminación. Estos cambios afectan al conjunto de sus condiciones ambientales, pero de manera especial al clima, cuya consecuencia más perceptible es el desarrollo de la denominada isla de calor urbano (ICU), que se define por la mayor temperatura del aire del centro de la ciudad en relación con el espacio rural circundante (Oke, 1995). La ICU es un fenómeno de escala local o, a lo sumo regional, que puede suponer diferencias térmicas, en noches de viento en calma o muy débil y cielo despejado, de más de 7-8°C en las grandes urbes: p. ej. New York (Gedzelman *et al.*, 2003), Londres (Kolokotroni y Giridharan, 2008), París (APUR, 2012), Moscú (Lokoshchenko, 2014) o Berlín (Fenner, 2014). Por el contrario, al aumentar la velocidad del viento la ICU disminuye y llega hacerse prácticamente imperceptible. Algunos autores han sugerido la existencia de una “velocidad límite del viento” a partir de la cual la ICU es nula (Oke y Hannell, 1970). Las velocidades del viento de 35-40 km son valores de referencia de este límite crítico encontrado para ciudades muy desiguales como Seúl (Kim y Baik, 2002) y Salamanca (Alonso *et al.*, 2007). En Zaragoza es superior, y se parece más al límite de 50 Km/h encontrado en otras ciudades, como por ejemplo Buenos Aires (Camilloni y Barrucand, 2012). No obstante, se trata de valores muy dispares, no siempre fáciles de precisar, que están relacionados con las características morfológicas de cada ciudad. La intensidad de la ICU y su configuración tienen que ver con el tamaño, la población y la latitud de la ciudad (Hogan y Ferrick, 1988), y por lo general, es mayor en verano que en invierno (Morris *et al.*, 2001). Es muy evidente durante la noche, y puede llegar a desaparecer durante el día (Jauregui, 1997; Steinecke, 1999).

La ICU es una característica climática observada científicamente desde el siglo XIX en los trabajos pioneros de Howard (1818) sobre la ciudad de Londres. Desde entonces la preocupación por el conocimiento del clima urbano ha ido en aumento, y en la actualidad ocupa un lugar privilegiado como tema de estudio por la trascendencia económica y social que tiene el fenómeno urbano y la incidencia del clima sobre el confort, la salud humana y la calidad de vida (p. ej. Alcoforado y Matzarakis, 2010; Taylor *et al.*, 2015; Román *et al.*, 2017). Este interés aplicado es el que está en el origen de las primeras investigaciones del clima de la ciudad de Zaragoza, centradas primero en el análisis de la relación clima-contaminación atmosférica (Ascaso, 1969) y más tarde en las características bioclimáticas y confort urbanos (Calvo-Palacios, 1976).

Los trabajos siguientes han progresado en dos niveles de análisis: uno inicial, de estudio de los rasgos generales y patrones espaciales de las islas de calor y de sequedad, y otro más reciente, que contempla los principales factores que influyen sobre el clima de la ciudad (Cuadrat *et al.*, 1993; De la Riva *et al.*, 1997; Cuadrat *et al.*, 2005; López Martín, 2011; Cuadrat *et al.*, 2015). La metodología de trabajo se apoyó en los datos procedentes de los observatorios meteorológicos, los transectos urbanos en automóvil y el uso de imágenes de satélite. Sin embargo, esta información no permite un seguimiento continuo de la ICU, ni conocer la acción relevante que sobre la misma tienen buen número de factores, como es el caso particular del viento en Zaragoza, donde sopla con reiteración e intensidad. Para avanzar en la investigación, el año 2015 se monitorizó la ciudad con una amplia red de sensores termohigrométricos ubicados en lugares seleccionados del interior urbano y área rural circundante que permiten un examen más preciso de muchos rasgos del clima urbano todavía poco estudiados. Con estos nuevos datos, el objetivo de esa investigación es analizar en detalle la intensidad y la variabilidad en el

tiempo de la isla de calor, y evaluar la acción del viento como muy significativo factor condicionante de la misma.

2. Fuentes y Metodología

2.1. Área de estudio

Zaragoza es una ciudad compacta y multifuncional, de 716.000 habitantes (Instituto Nacional de Estadística de 2020), situada al Nordeste de España, en la zona central de la Depresión del Ebro, asentada sobre ambas márgenes de dicho río (Fig. 1). El área urbana ocupa 967 km² de una amplia zona llana, con variaciones topográficas inferiores a 100 metros entre el eje del río Ebro y la zona más elevada de la ciudad, denominada Pinares de Venecia, a 280 metros de altitud. La textura urbana es variada, pero no tiene edificios de gran altura, sólo unos pocos superan los 30 m. Tradicionalmente ha ido creciendo a partir de un extenso núcleo histórico, de alta densificación de edificios, calles estrechas y plazas sin formas definidas, en torno al cual se han desarrollado los ensanches y los nuevos barrios que añaden complejidad a la trama urbana. En los últimos años la expansión de la ciudad se realiza alrededor de nuevos suelos urbanizables de tipo residencial de baja y media densidad en el exterior del área urbana, y la recalificación de áreas estratégicas ubicadas en el interior del casco histórico.



Figura 1. Mapa de localización de Zaragoza y rosa de vientos de la ciudad.

La estructura viaria muestra un esquema radial constituido por cuatro cinturones urbanos concéntricos, vías convergentes al núcleo o radiales y ejes transversales mediante los cuales se realiza la conexión inter e intrazonal de la ciudad. La articulación de este viario está condicionada por el cruce del río Ebro que únicamente puede realizarse a través de los puentes que conectan sus márgenes y que unen los distintos barrios. Por sus grandes avenidas circulan a diario más de 30.000 vehículos; sin embargo, la organización de la red viaria evita fuertes concentraciones de tráfico en el núcleo central.

El clima es mediterráneo, con marcada influencia continental, caracterizado por la escasez de las precipitaciones (326 mm anuales), el contraste entre un largo y frío invierno (6,2°C es la temperatura media de enero) y un cálido y continuado verano (24,3°C), y reiteradas situaciones anticiclónicas, de cielo despejado y viento en calma, que propician la formación de la isla de calor. El viento tiene gran significación por la frecuencia y por la intensidad que alcanza, superior en ocasiones a 100 km/h, consecuencia de un claro efecto orográfico (Cuadrat, 1999): los diferentes flujos de aire de cualquier procedencia se canalizan en el corredor abierto entre dos sobresalientes alineaciones montañosas, los Pirineos al Norte y el Sistema Ibérico al Sur, y adquiere dos claras componentes, Noroeste y Sureste (Fig. 1).

2.2. Bases de datos

Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado la información horaria de temperaturas desde febrero del año 2015 a marzo de 2020, procedente de la red de sensores termohigrométricos instalados por el Departamento de Geografía de la Universidad de Zaragoza, en colaboración con el Departamento de Medio Ambiente del Ayuntamiento de Zaragoza y con la Agencia Estatal de Meteorología. Los aparatos de medición están colocados en postes públicos, aproximadamente a 3 m del suelo. Son del tipo HOBO Pro v2, con sensor de temperatura y humedad, y un data-logger para el almacenamiento de la información. Su rango de funcionamiento en las temperaturas es de los -40°C a los 70°C, con una precisión de 0,04°C y una resolución de 0,02 grados. Para protegerlos de la radiación solar directa y del efecto de la lluvia, los sensores están colocados dentro de un soporte tipo M-RSA.

La red está formada por 24 sensores, ubicados en lugares representativos de distintos ambientes de la urbe y su periferia inmediata siguiendo los criterios definidos por Steward y Oke (2012), que clasifica los espacios urbanos en Zonas Climáticas Locales (Local Climate Zones, LCZ) según la trama de la ciudad (Fig. 2). Los datos registrados por esta red han sido sometidos a un riguroso control de calidad para evaluar la presencia de lagunas de información, datos aberrantes e inhomogeneidades. Para ello se ha creado un paquete de funciones en lenguaje R, de código abierto, que consiguen minimizar la presencia de errores en la base de datos y garantizan su consistencia. Los pasos seguidos han sido los siguientes:

- 1) En primer lugar, se ha realizado la detección de datos repetidos y observaciones anormales. Para ello se han aplicado los métodos de Tukey (rango intercuartílico) y Chauvenet (desviación típica) para evitar marcar como outliers datos que son correctos. Además, se ha utilizado como referencia la media para cada hora del año de todos los sensores para comparar con cada dato y eliminar posibles datos aberrantes.
- 2) A continuación, se ha analizado la variabilidad horaria de las observaciones con la finalidad de evitar posibles saltos con valores ilógicos en la serie temporal de datos. Se han encontrado descensos térmicos bruscos de más de 10°C, sobre todo en verano, provocados por situaciones atmosféricas con episodios de tormentas fuertes; por este motivo, se estableció un umbral límite de 8°C para señalar los datos erróneos, y además se hizo una completa revisión de los mismos para evitar excluir datos reales.

Mayores detalles sobre el proceso aplicado a la base de datos pueden consultarse en Tejedor *et al.* (2016).

La base de datos creada es la fuente básica de esta investigación, y ha permitido también las primeras aproximaciones al análisis de las olas de calor y el confort térmico (Tejedor *et al.*, 2016), además del estudio de las relaciones entre los extremos térmicos y las enfermedades cardiorrespiratorias (Barrao *et al.*, 2020). Para determinar la influencia de la velocidad del viento sobre la intensidad de la isla de calor zaragozana se han utilizado los datos horarios del periodo 2015-2020 del observatorio

oficial de la Agencia Estatal de Meteorología, instalado en el aeropuerto de Zaragoza, a 249 m de altitud s.n.m, y a 10 km de distancia de la capital. El anemocinemógrafo climatológico se encuentra a 10 m del suelo, en área despejada y libre de obstáculos.



Figura 2. A la izquierda, red de sensores termo-higrométricos de la ciudad de Zaragoza y detalle de la localización del observatorio urbano (Plaza de Santa Marta) y del observatorio rural (Ciudad Deportiva del Real Zaragoza) utilizados en el trabajo. Fuente: Imagen extraída de Google Earth. A la derecha, soporte protector del termohigrómetro instalado en la Ciudad Deportiva del Real Zaragoza.

2.3. Metodología

La isla de calor urbana resulta del hecho de que la temperatura del aire de la ciudad suele ser más elevada que la temperatura del espacio no urbano próximo (Oke, 1996). Siguiendo la misma fuente, la diferencia térmica entre el sector más cálido de la ciudad y el espacio rural limítrofe define la intensidad de la isla de calor.

Formalmente:

$$\Delta T_{u-r} = T_u - T_r$$

donde ΔT_{u-r} es la intensidad de la isla de calor, T_u la temperatura del punto urbano y T_r la temperatura del punto rural.

Como han señalado Steward (2010) y Martín-Vide *et al.* (2015a), se debe prestar especial atención a la selección de estos puntos y procurar que sean térmica y geográficamente comparables para que la diferencia entre ambos exprese el efecto de la ciudad, que constituye nuestro objetivo. En el presente estudio, se ha utilizado la información térmica de dos sensores: uno urbano, localizado en la Plaza de Santa Marta, y otro rural, instalado en la Ciudad Deportiva del Real Zaragoza.

- 1) El sensor de la Plaza de Santa Marta es puramente urbano, en pleno centro histórico, muy representativo del corazón de la ciudad, a 214 m. de altitud (24 m superior al cauce del río Ebro), en una LCZ del tipo *compact mid-rise* (LCZ-2), espacio densamente urbanizado, edificios de mediana altitud (4-5 plantas), poco arbolado, suelo en su mayor parte pavimentado y tráfico

muy restringido. Como indican todos los estudios previos, forma parte del entorno más cálido de Zaragoza (Cuadrat *et al.*, 2005; López Martín, 2011).

- 2) El sensor de la Ciudad Deportiva del Real Zaragoza es representativo del medio rural. Se localiza a 3 km de distancia, al sudoeste de la ciudad, a una altitud 40 m superior al sensor urbano. Se localiza en un espacio abierto, en una LCZ del tipo C (*Bush, scrub*), con arbustos y árboles leñosos cortos, contiguos a unas instalaciones deportivas y prácticamente sin tráfico rodado. Comparte las condiciones climáticas generales de Zaragoza y está expuesta al viento dominante del Oeste sin interferencias de la ciudad.

El cálculo de la intensidad de la ICU, su frecuencia y sus variaciones temporales se ha realizado con los datos horarios del periodo 2015-2019. En el caso de las variaciones diarias, debido al amplio rango de intensidades, los datos se dividieron en observaciones diurnas (10:00 a 18:00 h) y observaciones nocturnas (20:00 a 06:00 h). Al seleccionar estos momentos se evitan parcialmente las condiciones de radiación que pueden causar anomalías térmicas debido a las sombras que se proyectan al amanecer y al atardecer.

3. Resultados y Discusión

3.1. Frecuencia de la isla de calor urbana

Para el conjunto de los cinco años analizados se calculó la distribución de frecuencias de los valores de las diferencias entre las temperaturas horarias del observatorio urbano (Plaza de Santa Marta) y del observatorio rural (Ciudad Deportiva), y se trazó el histograma correspondiente que se muestra en la Figura 3. La temperatura en la Plaza de Santa Marta fue inferior a la de la Ciudad Deportiva solo el 16 % de las horas; en las 84 % restantes la temperatura fue igual o superior en la ciudad, lo cual indica claramente la existencia de una anomalía térmica positiva muy visible en la urbe respecto al medio rural circundante.

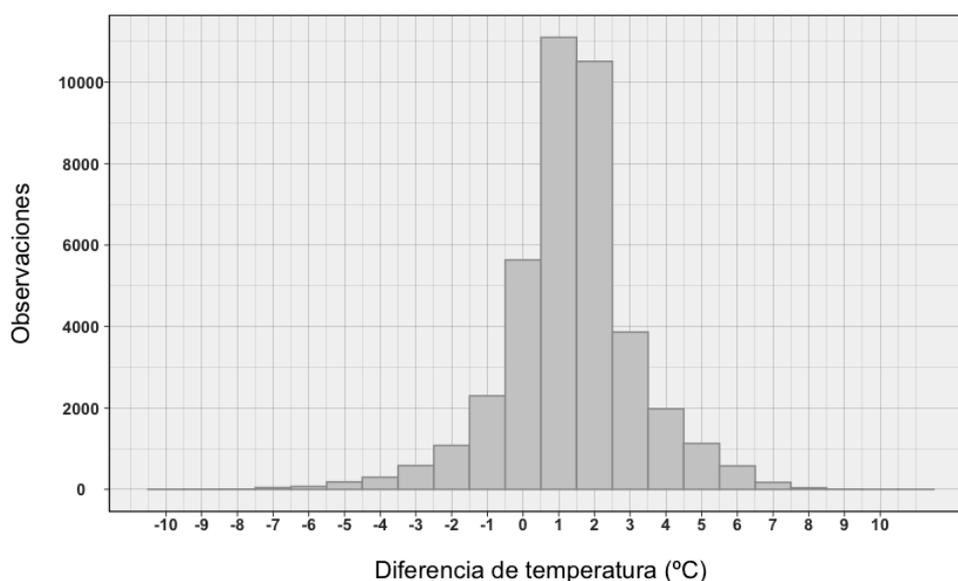


Figura 3. Histograma de las diferencias entre las temperaturas horarias del observatorio urbano (Plaza de Santa Marta) y las del observatorio rural (Ciudad Deportiva), en el periodo 2015-2020. Eje de abscisas: diferencias de temperatura, en °C; eje de ordenadas: número absoluto de casos.

Los intervalos de clase de mayor frecuencia son 1° y 2°C, con el 29 % de casos. El dato es digno de destacar y es acorde con los promedios esperados en una ciudad de estas características (Fernández *et al.*, 1998). El resto de intervalos es bastante menor, aunque en varios momentos las diferencias ciudad-campo han superado los 8°C; y en el caso excepcional del día 9 de junio de 2019 se llegaron a alcanzar los 10,5°C, a las 20.00h, como consecuencia de un particular episodio tormentoso, acompañado de precipitación y descenso de las temperaturas, que tuvo mayor incidencia en el sur de la ciudad. Con bastante menos frecuencia el centro urbano está más frío que el entorno rural. En este caso, las diferencias más habituales son de 1° y 2°C en favor del medio rural; aunque también se han observado anomalías térmicas negativas de hasta 5°C, en el 2% de las ocasiones, o cercanas a los 6°C, en algún momento muy puntual.

3.2. Intensidad de la isla de calor urbana

La isla de calor es un fenómeno esencialmente nocturno, cuando la energía almacenada en el interior de la ciudad es remitida a la atmósfera limitando su enfriamiento. Por el contrario, durante el día las diferencias campo-ciudad se reducen y la isla puede llegar a desaparecer e incluso provocar una verdadera isla de frescor. Estos contrastes térmicos están relacionados con el distinto ritmo de calentamiento y enfriamiento de las áreas urbanas y rurales, y lógicamente con el ciclo diario y anual de la radiación solar.

En la capital zaragozana la intensidad máxima de la isla de calor se alcanza a primeras horas de la noche, alrededor de las 21-22 horas (más del 70 % de los casos), con valores promedio superiores a los 2°C (véase la Fig. 4); la intensidad de la isla disminuye lentamente hacia el amanecer y por la mañana desaparece con rapidez cuando la zona rural comienza a recibir radiación y el ascenso de la temperatura en ella aumenta más deprisa que en la ciudad. Durante las horas centrales del día, entre las 11 y 13 horas, el efecto de sombra de los edificios frente a la radiación más directa que recibe el medio rural, invierte la situación y se origina una débil isla de frescor, inferior a 1°C. Por la tarde, la isla de calor se recupera al mismo ritmo que se produjo el descenso de la mañana, hasta llegar la noche, momento en que se inicia un nuevo ciclo. La evolución observada guarda consonancia con los resultados de estudios previos realizados de la ICU de Zaragoza (Cuadrat, 2004; López Martín, 2011), pero siempre con matices como consecuencia de las distintas fuentes utilizadas y los años estudiados.

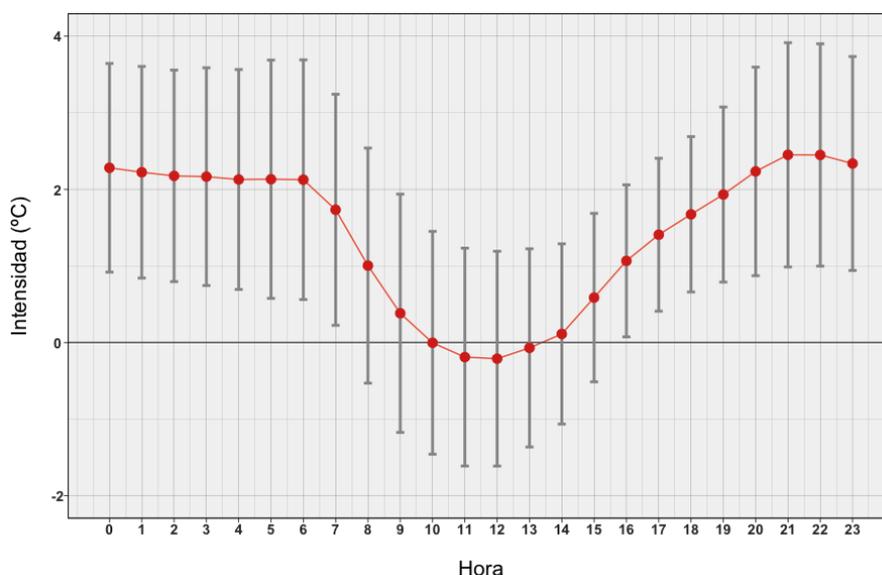


Figura 4. Variaciones horarias medias de la intensidad de la isla de calor (línea roja continua: media; líneas verticales: desviación estándar).

La división en observaciones diurnas (10:00 a 18:00 h) y observaciones nocturnas (20:00 a 06:00 h) revela más detalles de la variación diaria de la isla de calor porque elimina las horas cercanas al amanecer y al atardecer, cuando las condiciones de radiación pueden distorsionar las temperaturas. De hecho, dependiendo de la hora, el día, la estación y la disposición de los edificios, pueden surgir particularidades climáticas muy locales no relacionadas con los factores climáticos generales de la ciudad. En el periodo estudiado, la intensidad de la ICU es más elevada por la noche (1,7°C) que por el día (0,9°C). Como se observa en los diagramas de la Figura 5, durante las horas nocturnas el 50 % de la intensidad de la ICU cambia de 1,4°C a 2,9°C, mientras que durante el día lo hace de -0,2°C a 1,5°C. Se observa, además, mayor dispersión de los datos en el caso diurno, lo cual indica también la mayor variabilidad que en ese momento tiene la intensidad de la isla. Este patrón, con pocas variaciones, responde al esquema general explicado por Oke (1996), y se repite en trabajos similares publicados en ciudades tan diferentes como Lisboa (Lopes *et al.*, 2013; Alcoforado *et al.*, 2014) o Berlín (Fenner *et al.*, 2014), p. ej.; pero en todos los casos se concluye que estos resultados esconden grandes diferencias temporales y espaciales que exigen ser analizados con estudios de mayor detalle.

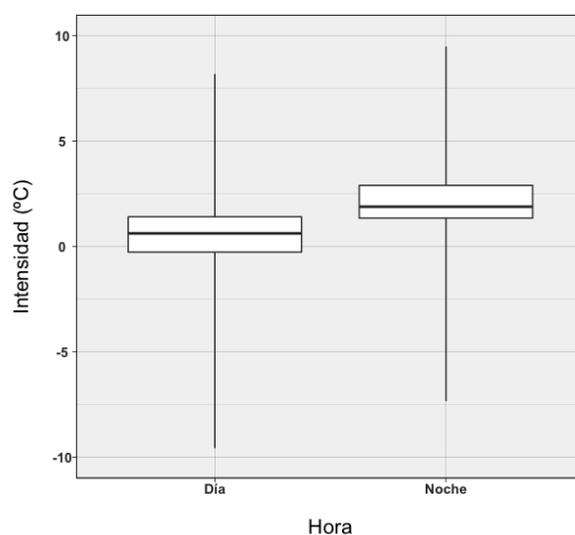


Figura 5. Variabilidad observada de la intensidad de la isla de calor urbana diurna (10:00 a 18:00 h) y nocturna (20:00 a 06:00 h) de la ciudad de Zaragoza.

3.3. Variabilidad estacional de la isla de calor urbana

Las diferencias de temperatura del aire entre el centro de la ciudad y el espacio rural de su entorno también muestran considerables variaciones estacionales. La característica principal es que las mayores diferencias ocurren en verano, se reducen en invierno y alcanzan los valores más bajos en primavera y otoño (Fig. 6). En los meses de junio, julio y agosto la intensidad de la isla de calor alcanza promedios de 2,5°C, con máximos absolutos nocturnos de 8°C. En esta época del año son frecuentes las situaciones atmosféricas anticiclónicas, acompañadas de muchas horas de sol, que unidas a la capacidad de acumulación y también generación de calor de la ciudad, son la causa del incremento de la ICU. En sentido contrario, también es en este periodo cuando es más frecuente la formación de islas de frescor, próximas a -0,5°C. Ocurre al final de la mañana, cuando la radiación solar incide de manera directa sobre el medio rural, mientras que las sombras proyectadas por los edificios se cruzan parcialmente con la radiación solar que llega al interior de la urbe; como consecuencia, la temperatura del aire aumenta con mayor lentitud dentro del contexto urbano en comparación con las áreas rurales. En invierno, las condiciones favorables a la formación de la ICU son menos comunes. De diciembre a febrero predominan también las situaciones anticiclónicas; sin embargo, la intensidad de la ICU es más débil y menos frecuente que en verano. Probablemente una de las causas principales sean las nieblas que se

forman en el Valle del Ebro por la estabilidad atmosférica, las cuales mitigan la radiación solar y las diferencias térmicas ciudad-campo. En otoño y primavera las intensidades de la ICU, por lo general, son menores.

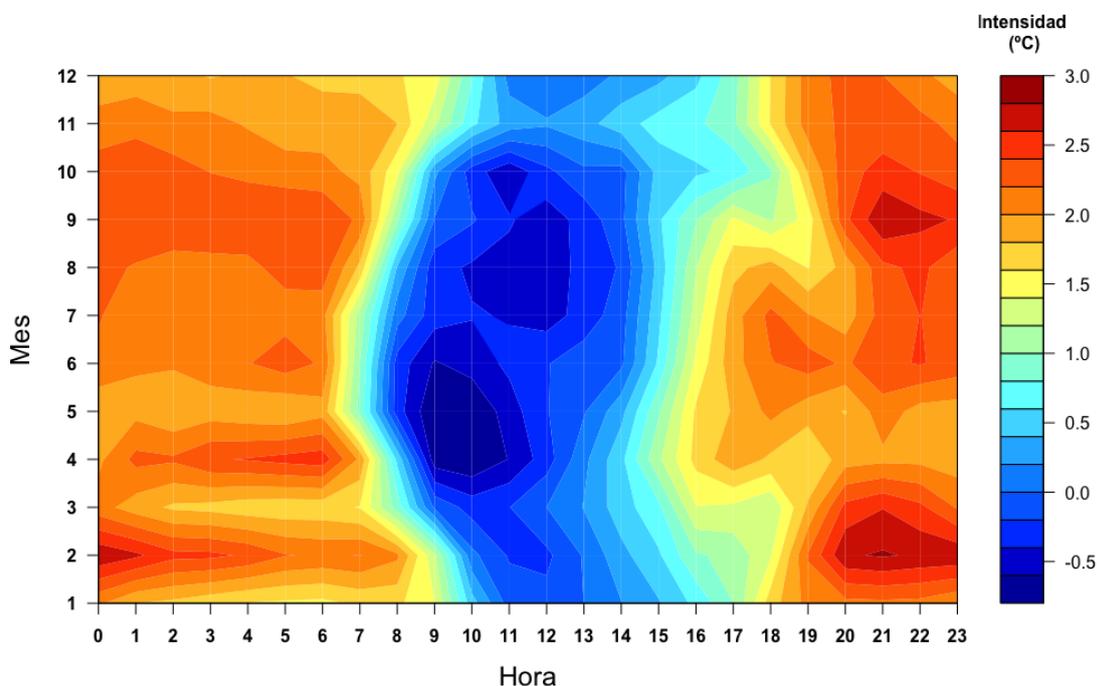


Figura 6. Intensidad media mensual y horaria de la isla de calor urbana en Zaragoza (2015-2020).

Estas diferencias estacionales se reconocen muy bien cuando se observa la evolución de la intensidad de la isla de calor en los dos meses extremos del año, enero y junio (Fig. 7). La amplitud del ciclo diario en el mes de junio es superior al de enero como resultado de las mayores intensidades de la isla de calor por la noche y una apreciable isla de frescor por el día. En junio, poco después del amanecer, la temperatura del medio rural, por la menor modificación de la radiación incidente y práctica ausencia de sombras, está en promedio unas décimas de grado más elevada que el interior de la ciudad y se genera una isla de frescor durante 3-4 horas. La situación cambia al final de la tarde y por la noche. En este momento, la gran inercia calórica de la ciudad retrasa el enfriamiento del aire y se crea una permanente isla de calor de varias horas, cuyos valores rebasan los 2,5°C. En enero el ciclo es bastante similar, pero las diferencias térmicas campo-ciudad son menores: la isla de calor alcanza una intensidad de 2,2°C unas pocas horas al comienzo de la noche, y la isla de frescor de mediodía es casi nula.

Coinciden estos resultados con la mayoría de los estudios de clima urbano: la ICU es un fenómeno nocturno, cuyo valor máximo aparece pocas horas después de la puesta del sol y puede perdurar hasta cerca del amanecer. Estacionalmente, en Zaragoza la intensidad de la isla de calor se incrementa en verano, al igual que ocurre en buen número de ciudades; sin embargo, existen notables diferencias según las regiones, no siempre fáciles de explicar: en Madrid (Fernández, 2009; Yagüe *et al.*, 1991) y Lisboa (Alcoforado *et al.*, 2014), por ejemplo, la ICU es mayor en verano; en Barcelona (Martín-Vide *et al.*, 2015b) es más intensa en invierno; y en ocasiones, existe bi-estacionalidad, con máximos entre otoño-verano, como ocurre en Nueva York (Gedzelman *et al.*, 2003). De hecho, la variación estacional tiende a depender de la ubicación de la ciudad, con sus factores atmosféricos y geográficos condicionantes; y aunque existen muchos puntos en común, el clima urbano es bastante específico para cada ciudad.

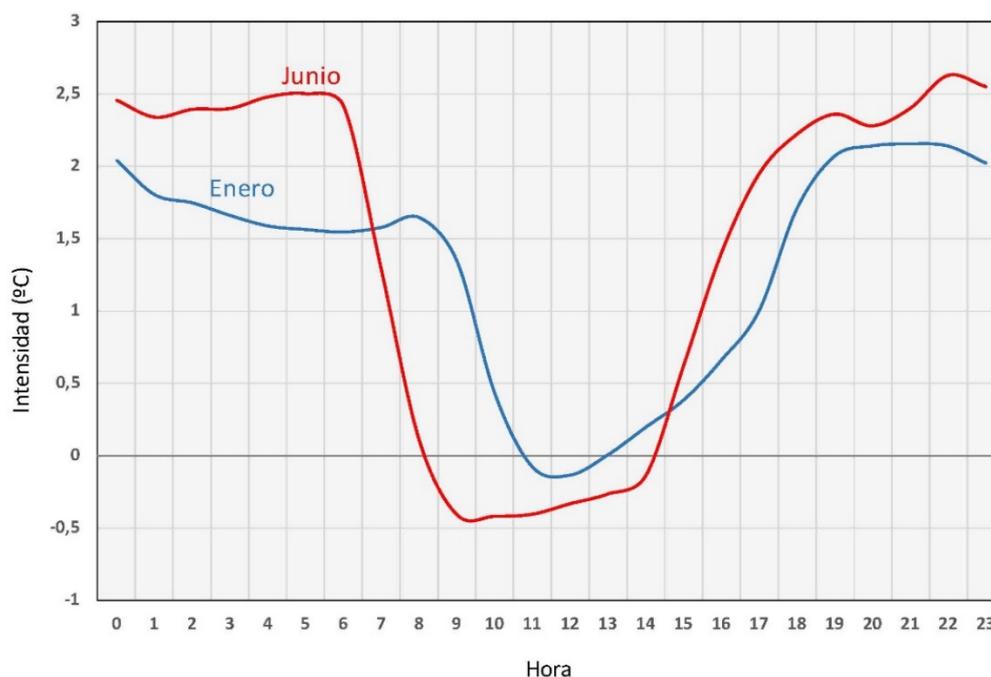


Figura 7. Variación horaria de la isla de calor urbana en junio y enero (periodo 2015-2020).

3.4. La isla de calor y la acción del viento

La ICU está condicionada por muchos factores, pero de manera especial por el viento, del cual depende una parte fundamental de sus cambios de magnitud y frecuencia. La intensidad máxima de la isla de calor se alcanza en noches de tiempo estable, viento en calma o flojo y cielo despejado, características que corresponden a situaciones atmosféricas de tipo anticiclónico; en sentido opuesto, el tiempo perturbado, la nubosidad, lluvia y viento son factores negativos que debilitan la isla y pueden hacerla desaparecer. En el caso de Zaragoza, el viento es uno de los elementos más genuinos del clima por la frecuencia con la que sopla y por la intensidad que en ocasiones alcanza. Sus mecanismos son, especialmente, un efecto topográfico: los diferentes flujos de aire de cualquier procedencia se canalizan y aumentan su velocidad en el corredor abierto entre los Pirineos y el Sistema Ibérico, adquiriendo dos claras componentes oeste-noroeste, al que se denomina cierzo, y este-sureste, llamado bochorno. Por esta razón, las rosas de los vientos se deforman y alargan en el sentido NO-SE, que es precisamente el de la dirección del río Ebro (Fig. 1).

La influencia de la velocidad del viento sobre la ICU se ilustra en la Figura 8, y confirma que los valores más altos de la isla de calor se alcanzan con viento en calma o muy débil. En efecto, en ausencia de viento o sopro de una ligera brisa, las diferencias térmicas campo-ciudad alcanzan su máximo desarrollo, más de 7°C en ocasiones, y tiene promedios de 2,7°C (Tabla 1). Las velocidades bajas, inferiores a 10 km/h, implican una alta variabilidad, aunque siempre dominando las intensidades positivas. A partir de este valor se produce una reducción esperada de la intensidad de la ICU, pero aún puede sobrepasar los 4°C y mantiene promedios de 1,57°C. Con velocidades superiores a 50 km/h la ICU prácticamente desaparece, aunque no llega a ser nula, lo cual significa que el efecto refugio de la ciudad, con su morfología y sus edificios, es sin duda importante. En general, la tasa media de descenso de la ICU es de -0,02°C por cada km/h de incremento en velocidad del viento, aunque con gran variabilidad por debajo de 10 km/h y muy estable por encima de 30 km/h, mostrando una distribución más similar a una exponencial negativa que a una relación completamente lineal.

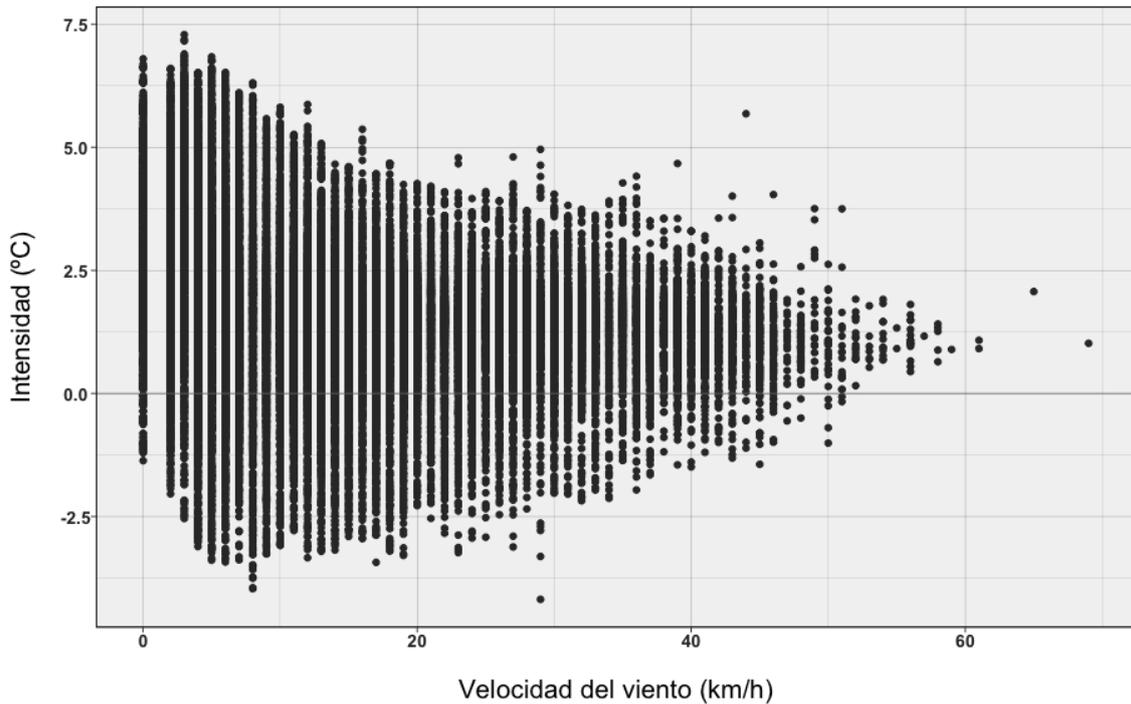


Figura 8. Intensidad de la isla de calor urbana de Zaragoza y su relación con la velocidad del viento.

Tabla 1. Velocidades del viento y valores promedio de la isla de calor. (VEL: velocidad del viento en Km/h. MED: intensidad media de la isla de calor. SD: desviación estándar. OBS: número de observaciones. CV: coeficiente de variación.).

VEL	MED	SD	OBS	CV
0	2,70	1,72	821	63,82
2 - 5	2,35	1,96	5113	83,16
5 - 10	1,57	1,75	6884	111,19
10 - 15	1,27	1,40	5938	110,26
15 - 20	1,14	1,27	4659	111,39
20 - 25	1,18	1,14	3394	96,93
25 - 30	1,22	1,05	3055	86,22
30 - 50	1,17	0,85	4573	72,65
> 50	1,12	0,42	87	37,85

4. Conclusiones

La ICU de Zaragoza reúne todas las generalizaciones empíricas indicadas por Oke (1982) en el ámbito del clima urbano: 1) La intensidad de la isla de calor urbana es mayor por la noche. 2) La isla de calor urbana puede desaparecer durante el día y la ciudad puede ser más fresca que los alrededores rurales. 3) La intensidad de la isla de calor urbana es mayor en verano. 4) La isla de calor urbano disminuye al aumentar la velocidad del viento.

Este fenómeno no es constante ni tiene siempre la misma magnitud: factores geográfico-urbanos, factores meteorológicos, referidos al estado del tiempo, y factores temporales, como la hora del día o la estación del año, son los que definen sus variaciones y rasgos esenciales. En la capital zaragozana, en este periodo de estudio 2015-2020, la temperatura en el centro de la ciudad es con mucha frecuencia 1 o 2°C más elevada que en el entorno, y en ocasiones muy puntuales, ha llegado a superar los 8°C. Las mayores diferencias entre el observatorio urbano y el observatorio rural se alcanzan 2-3 horas más tarde de la puesta de sol, persisten varias horas (en particular en verano) y disminuyen lentamente hacia el amanecer.

De estos valores se concluye, asimismo, otro rasgo muy común en los núcleos urbanos: en el interior de Zaragoza hay menor contraste térmico, pues las amplitudes diarias son menores; por el contrario, en el medio rural se comprueba una mayor amplitud, ya que en los momentos centrales del día las temperaturas suelen ser algo más altas y por la noche sensiblemente más frías.

La influencia del viento sobre la ICU es también muy evidente. En situaciones de calma atmosférica o ligera brisa la isla de calor alcanza su máxima intensidad, pero se debilita claramente conforme aumenta la velocidad del viento. El valor de 50 km/h puede fijarse como referencia de límite crítico a partir del cual la ICU se vuelve nula; no obstante, siempre permanece una débil isla por el efecto abrigo que genera la ciudad frente al medio rural.

Un aspecto a resaltar es la importancia que tiene la selección adecuada de los observatorios meteorológicos utilizados para comparar las temperaturas de la ciudad y del espacio no urbano próximo. Posiblemente es una de las tareas más difíciles en el análisis de la ICU. En este estudio se han elegido dos puntos que consideramos térmica y geográficamente correctos, porque respetan los requisitos exigidos en este tipo de estudios: el primero está ubicado en un lugar central y denso de la urbe, y el segundo en un medio rural, abierto y alejado de la influencia urbana. Lógicamente, la elección de otros puntos de observación puede introducir pequeños cambios en los resultados finales, sin embargo, los rasgos fundamentales de la isla de calor están bien definidos en esta investigación.

Los resultados de esta investigación suponen un paso más en el conocimiento de la ICU de Zaragoza y confirman la importancia del fenómeno en términos de calentamiento nocturno en el centro de la ciudad por contraste con el espacio periurbano. Buena parte de los estudios previos de la ICU zaragozana se han apoyado en los registros térmicos directos obtenidos en recorridos del área urbana y su periferia. Esta metodología utilizada hasta ahora ha servido para determinar la configuración de la isla de calor, conocer la ubicación de los valores máximos de la misma y observar la diversidad microclimática de la ciudad. La recién instalación de la red de sensores termohigrométricos amplía las posibilidades de estudio y ha permitido en esta investigación estimar con cierto detalle la intensidad de la ICU y analizar su variabilidad en el tiempo; además de explicar la importante acción condicionante del viento. La suma de todo este conocimiento facilita emprender nuevos objetivos por las implicaciones que esta característica climática urbana tiene sobre cuestiones ambientales relevantes como el confort térmico, la salud humana, el consumo de energía o la calidad de vida en nuestras ciudades.

Referencias

- Alcoforado, M.J., Matzarakis, A. 2010. Planning with urban climate in different climatic zones. *Geographica* 57, 5-39. http://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.201057808
- Alcoforado, M.J., Lopes, A., Lima, E., Canário, P. 2014. Lisboa Heat Island. Statistical study (2004-2014). *Finisterra* 98, 61-80. <https://doi.org/10.18055/Finis6456>
- Alonso, M.S., Fidalgo, M.R., Labajo, J.L. 2007. The urban heat island in Salamanca (Spain) and its relationship to meteorological parameters. *Climate Research* 34, 39-46. <https://doi.org/10.3354/cr034039>
- Ascaso, A. 1969. Contaminación y contaminadores atmosféricos. El problema en Zaragoza. *Las Ciencias* 1, 22-34.
- Barrao, S., Cuadrat, J.M., Saz, M.A., Serrano-Notivoli, R., Tejedor, E. 2020. Olas de calor y olas de frío en la ciudad de Zaragoza (España) y sus efectos sobre las enfermedades cardiorrespiratorias, 2011-2015. En: *Crisis y espacios de oportunidad. Retos para la Geografía*. Asociación Española de Geografía, Valencia, págs. 343-358. ISBN: 978-84-947 787-2-8.
- Calvo-Palacios, J.L. 1976. Aportación metodológica al estudio geográfico del microclima urbano. *Boletín de la Real Sociedad Geográfica* 42, 95-110.
- Camilloni, I., Barrucand, M. 2012. Temporal variability of the Buenos Aires, Argentina, urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology* 107, 47-58. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0459-z>

- Cuadrat, J.M., Vicente-Serrano, S., Saz, M.A. 2005. Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): la isla de calor y sus factores condicionantes. *Boletín de la AGE* 40, 311-327. <https://bage.age-geografía.es/ojs/index.php/bage/article/view/2019>
- Cuadrat, J.M. 2004. Patrones temporales de la isla de calor urbana de Zaragoza. En: M.C. Faus (Coord.), *Aportaciones geográficas en homenaje al profesor Higuera*. Universidad de Zaragoza. Zaragoza, págs. 63-70. ISBN: 84-96214-32-X.
- Cuadrat, J.M. 1999. El clima de Aragón. Institución Fernando El Católico. Zaragoza. ISBN 84-88305-72-9.
- Cuadrat, J.M., De La Riva, J., López, F., Martí, A. 1993. El medio ambiente urbano en Zaragoza. Observaciones sobre la isla de calor. *Anales Universidad Complutense* 13, 127-138. <https://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/AGUC9393110127A>
- Cuadrat, J.M., Vicente-Serrano, S., Saz, M.A. 2015. Influence of different factors on relative air humidity in Zaragoza, Spain. *Frontiers in Earth Science* 3 (10). <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00010>
- De La Riva, J., Cuadrat, J.M., López, F., Martí A. 1997. Aplicación de las imágenes Landsat TM al estudio de la isla de calor térmica de Zaragoza. *Geographica* 35, 24-36. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1997351701
- Fenner, D., Meier, F., Scherer, D., Polze, A. 2014. Spatial and temporal air temperature variability in Berlin, Germany, during the years 2001-2010. *Urban Climate* 10, 308-331. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.02.004>
- Fernández, F. 2009. Ciudad y cambio climático: aspectos generales y aplicación al área metropolitana de Madrid. *Investigaciones Geográficas* 49, 173-195. <https://doi.org/10.14198/INGEO2009.49.09>
- Fernández, F., Galán, E., Cañada, R. 1998. *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas*. Editorial Parteluz, 215 p. Madrid, ISBN: 84-8230-016-4.
- Gedzelman, S.D., Austin, S., Cermak, R. N., Stefano, R., Partridge, S., Quesenberry, S., Robinson, D.A. 2003. Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City. *Theoretical and Applied Climatology* 75, 29-42. <https://doi.org/10.1007/s00704-002-0724-2>
- Hogan, A.W., Ferrick, M.G. 1988. Observations in nonurban heat islands. *Journal of Applied Meteorology* 37, 232-236. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1998\)037<0232:OINHI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1998)037<0232:OINHI>2.0.CO;2)
- Howard, L. 1818. *The Climate of London*. Longman, London., 221 p.
- Jauregui, E. 1997. Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment* 31, 3821-3831. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00136-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00136-2)
- Kim, Y.H., Baik, J.J. 2002. Maximum urban heat island intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology* 41, 651-659. <https://doi.org/10.1175/1520-0450>
- Kolokotroni, M., Giridharan, R. 2008. Urban heat island intensity in London: an investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy* 82, 986-998. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.004>
- Lokoshchenko, M.A. 2014. Urban heat island in Moscow. *Urban Climate* 10 (3), 550-562. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.01.008>
- Lopes, A., Alves, E., Alcoforado, M.J., Machete, R. 2013. Lisbon Urban Heat Island Updated: New Highlights about the Relationships between Thermal Patterns and Wind Regimes. *Advances in Meteorology* 15, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2013/487695>
- López-Martín, F. 2011. *Clima urbano y ciudad. El caso de Zaragoza*. Universidad San Jorge-Colegio de Geógrafos. Zaragoza, 118 p. ISBN: 978-84-615-2098-5.
- Martín-Vide, J., Sarricolea, P., Moreno-García, M.C. 2015a. On the definition of urban heat island intensity: the “rural” reference. *Frontiers in Earth Science* 3, 3 p. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00024>
- Martín-Vide, J., Cordobilla, M.J., Artola, V.M., Moreno-García, M.C. 2015b. *La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático*. Barcelona, Área Metropolitana de Barcelona. 120 p.

- Morris, C.J., Simmonds, I., Plummer, N. 2001. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology* 40, 169-182. <https://doi.org/10.1175/1520-0450>
- Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108, 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T.R. 1995. *The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects*. En: J.E. Cermak, A.G. Davenport, E.J. Plate, D.X., Viegas, (Eds.). *Wind Climate in Cities*. Kluwer-Academic Publ. Norwell, 81-107. ISBN 978-94-017-3686-2
- Oke, T.R. 1996. *Boundary layer climates*. 2nd ed. Routledge, London. ISBN 0-415-04319-0.
- Oke, T.R., Hannell, F.G. 1970. *The form of the urban heat island in Hamilton, Canada*. WMO Tech Note 108, págs. 113–126.
- Román, E., Gómez, G., de Luxán, M. 2017. *Urban Heat Island of Madrid and its influence over Urban Thermal Comfort*. En: P. Mercader-Moyano (Ed.). *Sustainable Development and Renovation in Architecture, Urbanism and Engineering*. Springer, Cham, pp 415-425. http://doi.org/10.1007/978-3-319-51442-0_34
- Steinecke, K. 1999. Urban climatological studies in the Reykjavík subarctic environment, Iceland. *Atmospheric Environment* 33, 4157-4162. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00158-2)
- Stewart, I., Oke, T.R. 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin American Meteorological Society* 93 (12), 1879-1900. <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Stewart, I.D. 2010. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology* 31, 200-217. <https://doi.org/10.1002/joc.2141>
- Taylor, J., Wilkinson, P., Davies, M., Armstrong, B., Chalabi, Z., Mavrogianni, A., Symonds, P., Oikonomou, E., Bohnenstengel, S. 2015. Mapping the effects of urban heat island, housing, and age on excess heat-related mortality in London. *Urban Climate* 14, pp.517-528. <http://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.08.001>
- Tejedor, E., Cuadrat, J.M., Saz, M.A., Serrano-Notivol, R., López, N., Aladrén, M. 2016. *Islas de calor y confort térmico en Zaragoza durante la ola de calor de julio de 2015*. En: J. Olcina, A. Rico, E. Moltó (Eds.). *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio*. Asociación Española de Climatología. Vol. 10. Alicante, págs. 141-152. <http://doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-13>
- Yagüe, C., Zurita, E., Martínez, A. 1991. Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmospheric Environment* 25B, 327-332. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(91\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0957-1272(91)90004-X)