

VARIABILIDAD ESTACIONAL DE LA ICU EN ZARAGOZA (ESPAÑA) MEDIANTE EL USO DE UNA RED CLIMÁTICA URBANA

Samuel BARRAO SIMORTE¹, Roberto SERRANO-NOTIVOLI², José María CUADRAT PRATS¹, Miguel Ángel SAZ SÁNCHEZ¹

¹*Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza.*

²*Departamento de Geografía. Universidad Autónoma de Madrid.*

sbarrao@unizar.es, roberto.serrano@uam.es, cuadrat@unizar.es,
masaz@unizar.es

RESUMEN

Los estudios sobre la isla de calor urbana (ICU) son de gran importancia en el contexto de cambio climático y el impacto que tiene sobre la población. Estos espacios urbanos donde se concentra la mayor parte de la población del planeta, no solo sufren el aumento de la temperatura o los eventos térmicos extremos, sino que se intensifican por la presencia de superficies artificiales. En este trabajo se realiza un análisis de la variabilidad estacional de la ICU en el área urbana de Zaragoza (España), utilizando una red de observatorios compuesta por 21 sensores que registran temperatura y humedad relativa cada hora desde marzo de 2015 hasta enero de 2022. Debido al elevado volumen de información que generan este tipo de redes de alta resolución espacial y temporal, se aplicó un control de calidad exhaustivo. Los resultados indican que se eliminaron un 1,6% de las observaciones registradas, principalmente a causa de valores fuera de rango y por problemas en el registro del sensor. Respecto al análisis de la ICU, muestra un patrón centro-periferia clásico con valores de intensidad en torno a 2°C, pero con variaciones matizadas por la estructura urbana. También se observaron variaciones estacionales que intensifican estos patrones, especialmente en invierno y otoño durante la noche y normalmente en momentos de anticiclón, donde la intensidad puede alcanzar los 4°C.

Palabras clave: Clima urbano, Isla de calor urbana, Red de clima urbano, Variabilidad estacional.

ABSTRACT

Urban heat island (UHI) studies are of great importance in the context of climate change and its impact on the population. These urban spaces, where most of the planet's population is concentrated, not only suffer from temperature increase or extreme thermal events, but are intensified by the presence of artificial surfaces. In this work, an analysis of the seasonal variability of the UHI in the urban area of Zaragoza (Spain) is carried out, using a network of observatories composed of 21 sensors that record temperature and relative humidity every hour from March 2015 to January 2022. Due to the high volume of information generated by this type of high spatial and temporal resolution networks, an exhaustive quality control was applied. The results indicate that 1.6% of the recorded observations were eliminated, mainly

due to out-of-range values and problems in the sensor registration. Regarding the UHI analysis, it shows a classic center-periphery pattern with intensity values around 2°C, but with variations nuanced by the urban structure. Seasonal variations were also observed that intensify these patterns, especially in winter and autumn during the night and usually at times of anticyclone, where the intensity can reach 4°C.

Key words: Urban climate, Urban heat island, Urban climate network, Seasonal variability, Seasonal variability.

1. INTRODUCCIÓN

La isla de calor urbana (ICU) es un fenómeno conocido (Oke, 1973, 1982; Stewart, 2011) que cuantifica cómo las zonas urbanas son más cálidas que su entorno periurbano o rural más próximo. Esta modificación directa o indirecta del clima se produce especialmente en ciudades, donde el aumento de la urbanización y la concentración de la población provoca que los habitantes modifiquen su entorno inmediato. Además, los cambios en el uso del suelo alteran el balance energético de la superficie y favorecen una mayor diferencia entre las temperaturas dentro y fuera de la ciudad (Oke, 1982).

Estudios cuantificaron diferencias de temperatura de hasta 10 °C (Alcoforado et al., 2014; Warren et al., 2016) dependiendo del tamaño de la ciudad, la morfología urbana, el uso del suelo y las condiciones meteorológicas concretas (Peng et al., 2018; Yue et al., 2019). Estas diferencias se producen principalmente por la noche, cuando la energía absorbida por los edificios y las superficies de hormigón durante el día se libera a la atmósfera en forma de calor. Además, la estructura y la intensidad de las ICU están definidas por la propia ciudad y suelen presentar variaciones espaciales (Stewart y Oke, 2012).

Este fenómeno tiene efectos potencialmente perjudiciales para la salud de los habitantes de las ciudades. Un riesgo creciente que se agrava durante los episodios de olas de calor (Royé et al., 2020; 2021). En decir, las olas de calor no solo aumentan la temperatura, sino que también intensifican la diferencia de temperatura entre las zonas urbanas y las rurales causada por la ICU. Ya que eventos térmicos extremos serán cada vez más frecuentes en el escenario actual de cambio climático (Olcina Cantos et al., 2019), se debe prestar atención a los graves riesgos para la salud a los que se enfrentan la población. Por lo tanto, se necesitan estudios más detallados para comprender la heterogeneidad de este fenómeno para reducir el impacto y la vulnerabilidad de la población urbana. Para poder informar y mejorar las estrategias de adaptación y llevar a cabo proyectos de mitigación sobre los efectos negativos de la ICU.

Sin embargo, estos estudios requieren una información rigurosa que abarque las ICU desde una perspectiva temporal y espacial completa y detallada. Tradicionalmente, debido a la escasa disponibilidad de sensores, los estudios urbanos se limitaban a comparar un sensor urbano dentro de la ciudad con un sensor exterior en zonas rurales (Stewart, 2011). También es corriente la aplicación de transectos urbanos con mediciones de temperatura casi continuas, que se realizan durante un periodo determinado para analizar la configuración espacial del ICU. En el caso de Zaragoza,

se ha analizado la frecuencia e intensidad del fenómeno mediante esta técnica desde 1990 (Cuadrat Prats et al., 1993, 2005, 2015; Saz Sánchez et al., 2003). Aunque los estudios del clima urbano han mejorado notablemente, la obtención de datos atmosféricos a partir de redes de observación con alta resolución espacial y durante largos periodos de tiempo sigue siendo un reto de investigación debido a la dificultad de mantener redes extensas en el tiempo y a la diversidad de entornos urbanos. Algunos de los avances relacionados con la teledetección tienen ciertas limitaciones, ya que analizan la temperatura superficial de los materiales y no la temperatura del aire (Yue et al., 2019). Además, los tiempos de retorno muy espaciados, la disponibilidad de imágenes o la falta de datos en el ciclo diario, representan un verdadero problema. De igual manera, las redes tradicionales de observación meteorológica también presentan otros inconvenientes, ya que a menudo las series de datos climáticos urbanos largas y completas proceden de fuera de la zona urbana (aeropuertos) y es difícil determinar la verdadera representatividad. Y aunque hoy en día muchas ciudades cuentan con al menos una estación dentro de su entorno urbano, esta sigue siendo deficiente para un análisis detallado de la realidad urbana. Afortunadamente, una tendencia creciente de despliegue de redes meteorológicas urbanas está cambiando esta situación (Vardoulakis et al., 2013; Warren et al., 2016). El desarrollo y la progresión de los sensores de bajo coste y su calidad contrastada ofrecen nuevas oportunidades para las redes urbanas (Meier et al., 2017), lo que es clave en los estudios climáticos urbanos. Permitiendo desarrollar estudios más completos en los que se puede analizar la variabilidad temporal de la ICU a diferentes escalas, tanto temporal como espacial.

2. MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

La ciudad de Zaragoza está situada en el noreste de la península Ibérica (Figura 1) y es el quinto municipio español en número de habitantes, en torno a 714.000 habitantes (2020). Su ubicación en la zona central de la Depresión del Ebro, en la confluencia de los ríos Ebro, Gállego y Huerva, distinguen las características físicas y climáticas de la ciudad. Con una altitud media de 180 m, su topografía no muestra grandes contrastes. Un terreno llano por lo general, sobre todo en el sector norte hasta el escarpe de yesos. Mientras que en el sur, surgen ligeras elevaciones en forma de terraza conforme se alejan del Ebro (Cuadrat Prats et al., 2015). El clima de la zona es mediterráneo con influencia continental, con predominio de situaciones anticiclónicas durante las estaciones de verano e invierno (Cuadrat Prats et al., 1993, 2015). Este carácter continental provoca marcados contrastes térmicos estacionales y diarios, alcanzando una oscilación térmica media de más de 10 °C en los meses de verano. El viento es otro factor notable en el clima de Zaragoza. Este frecuente viento del noroeste (“cierzo”), alcanza una gran velocidad debido a la aceleración que sufre al encajonarse en el Valle del Ebro y es capaz de suavizar la ICU, llegando a hacerla desaparecer a velocidades elevadas.

2.2. Datos

La red climática urbana que se utiliza en esta comunicación está constituida por 21 sensores termohigrométricos que se distribuyen por toda la ciudad y su entorno

periurbano más cercano (Figura 1). Se buscó que los sensores estuvieran ubicados en lugares representativos de los entornos climáticos más característicos de la ciudad. Sirviendo como referencia la clasificación de las Zonas Climáticas Locales de Stewart & Oke, 2012. El mantenimiento de los sensores, la recogida de datos y su posterior análisis son realizados por el grupo de investigación Clima, Agua y Cambio Global de la Universidad de Zaragoza, en colaboración del departamento de Medio Ambiente y Sostenibilidad del Ayuntamiento de Zaragoza.

Respecto a las características del sensor, son dispositivos de medición HOBO pro v2 y HOBO MX2301 que registran los valores de temperatura y humedad a escala horaria desde marzo de 2015 (Tejedor et al., 2016). Su rango de funcionamiento en temperatura es de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en humedad de 0 a 100 %, con una precisión de $0,21\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 2,5 %, respectivamente, y una resolución de $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el caso de la temperatura. Disponen de un data-logger para el almacenamiento de la información y de una cubierta protectora para la radiación solar directa y el efecto de la lluvia.

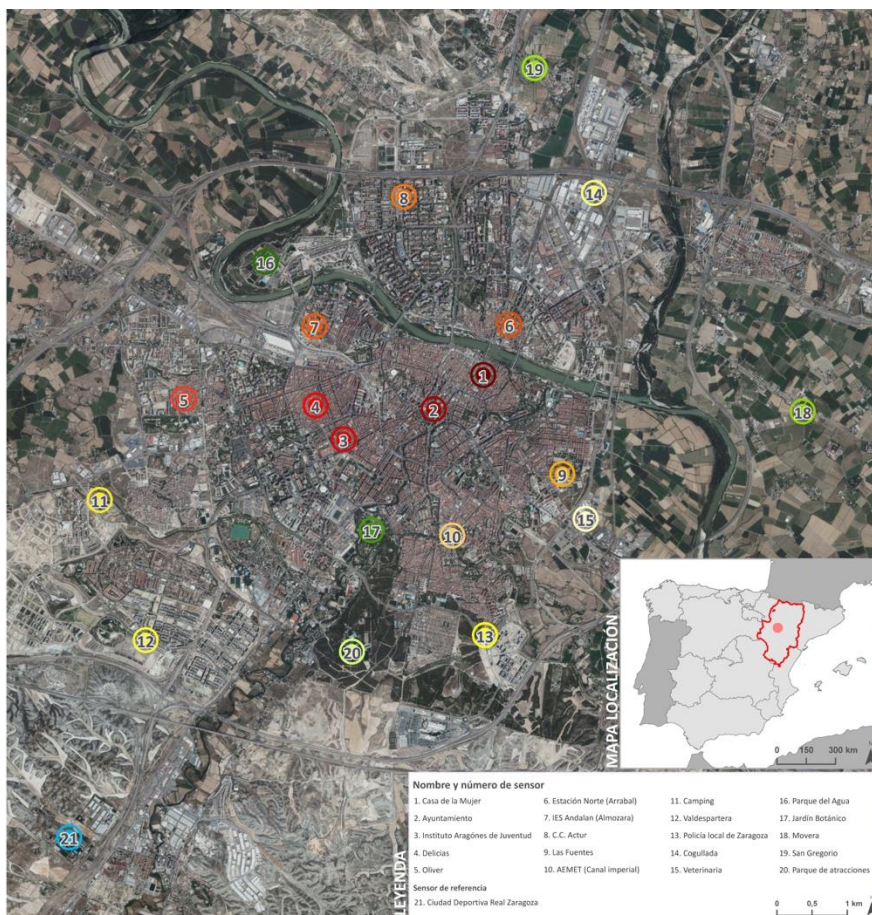


Fig. 1: Localización de la ciudad de Zaragoza. Fuente: Instituto Geográfico Nacional, 2012.

2.3. Metodología

2.3.a. Control de calidad

Debido a la diversidad de espacios que conforman el entramado urbano y al elevado volumen de información que generan este tipo de redes, se consideró especialmente relevante la necesidad de aplicar un control de calidad detallado. Dicho control aplica un enfoque multinivel, desarrollado en R y complementado con controles manuales. Además, este control tiene en cuenta las particularidades de las bases de datos climáticas horarias (Beck et al., 2018).

El control detecta principalmente outliers muy abruptos que se salen de los valores climáticos normales del área de estudio ($> 50^{\circ}\text{C} < -20^{\circ}\text{C}$). Y también outliers específicos, relacionados con el comportamiento conjunto de toda la red. De este modo, se rastrean todas aquellas observaciones que superen $\pm 3\sigma$ la media de toda la red para una misma hora y son eliminadas. Además, el control se complementa con el estudio de la variabilidad horaria y el cálculo de situaciones sinópticas para precisar la búsqueda de observaciones erróneas. Permitiendo la identificación de situaciones atmosféricas (nieblas, convección, precipitaciones convectivas, etc.) que no quedan recogidas en la monitorización meteorológica habitual. Facilitando la explicación de las observaciones sospechosas que no se justifican con la variabilidad natural del clima. Es decir, observaciones consideradas como erróneas por una elevada variabilidad horaria se comprueba que son realmente correctas y que se deben a una situación atmosférica natural. Por ejemplo, tormentas de verano al atardecer que en un breve intervalo de tiempo pueden hacer descender la temperatura más de 10°C . O nieblas en invierno en torno a mediodía que cuando se disipan se produce un aumento considerable de la temperatura.

2.3.b. Análisis de la variabilidad estacional

Una vez aplicado el control de calidad y eliminadas las observaciones sospechosas se lleva a cabo un análisis detallado de la ICU en la zona de estudio. Gracias al elevado número de estaciones que conforman la red y la resolución temporal de sus mediciones, es posible describir el comportamiento climático de Zaragoza detalladamente. Aunque en esta comunicación nos centraremos en la variabilidad estacional.

En primer lugar, para analizar la ICU se ha aplicado el procedimiento básico en este tipo de estudios (Stewart, 2011) que consiste en la comparación de las series de datos urbanas frente a las series rurales más cercanas. Para ello se escogió una estación rural de referencia fuera del área de influencia urbana (Figura 1). Este sensor (S21), está situado al sur de Zaragoza en el municipio próximo de Cuarte de Huerva, a unos 10 km del centro urbano de la ciudad. Se caracteriza por ser un espacio abierto y controlado donde el efecto urbano y la ICU no son apreciables.

El objetivo es poder realizar un análisis espacial-temporal que permita analizar el efecto de la morfología urbana y de los diferentes espacios de la ciudad, al mismo tiempo que la notable variabilidad temporal diurna de la ICU para cada estación del año. En cuanto a la delimitación del periodo diurno y nocturno, se ha dividido en nocturno (20:00-6:00) y diurno (10:00-18:00) (Alcoforado et al., 2014). Los amplios márgenes permiten identificar claramente ambos periodos del día para todas las

estaciones, teniendo en cuenta que durante las estaciones más opuestas los límites temporales de la salida y la puesta del sol varían.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos tras la aplicación del control de calidad para el periodo completo de estudio, desde marzo de 2015 hasta enero de 2022, abarca un total de más de un millón de observaciones horarias (1164241 observaciones). De las cuales un 3,3% se corresponde con datos faltantes, debido a interrupciones en el registro de los sensores o a períodos de sustitución y calibración (Tabla 1). Además, los datos marcados como sospechosos y posteriormente eliminados de la base de datos fueron el 1,4% de las observaciones totales, 16523 datos.

Sensor	N Datos	NA	Outlier1	Outlier2	Repetidos	Salto	Total
S01	60.168	1,3	0,003	0,09	0	0	0,1
S02	60.168	8,2	0	0,09	0	0,3	0,4
S03	51.162	0,01	0	0	0	0	0
S04	60.168	11,7	0	0,002	0	0	0,002
S05	51.162	0,01	0	0,2	0	0	0,2
S06	60.168	10,7	0,4	1,4	0	0	1,8
S07	51.162	0,01	0	0,006	0	0	0,006
S08	60.168	5,2	0	0,02	0	0	0,02
S09	60.168	0,02	0	0,07	0	0	0,07
S10	60.168	0,01	3,6	1,01	0	0	4,7
S11	60.168	0,01	0	0,01	0	0	0,01
S12	60.168	0,01	0	0,003	0	0	0,003
S13	60.168	0,02	0	0,03	0	3,4	3,4
S14	51.162	0,02	0	0,02	0	0,0	0,0
S15	24.179	0,01	0	1,53	0	0,0	1,5
S16	60.168	0,01	0	0,14	0	0,0	0,1
S17	60.168	9,86	0,6	6,93	0	0,1	7,6
S18	60.168	8,42	0,5	0,23	0	0,1	0,8
S19	60.168	0,01	0	0,5	0	0	0,5
S20	32.894	16,4	0	0,8	0	0	0,8
S21	60.168	0,01	1,2	1,9	0	3,4	6,6
RED	1.164.241	3,3	0,3	0,7	0	0,4	1,4

Tabla 1: Porcentaje de observaciones eliminadas, por sensor y total de la red de sensores. Además, se incluye el porcentaje de datos faltantes (NA). Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del control muestran como, pese al reducido número de observaciones erróneas en la base de datos, el error más habitual está relacionado con la detección de outliers (1%, 12.158 observaciones). Entendiendo como outlier, tanto los valores más extremos del primer paso (Outlier 1), que suponen un 0,7%. Como los outliers más específicos en relación con la aplicación de la desviación estándar (Outlier 2), un 0,3%. Sin embargo, no se han detectado valores repetidos. Y el apartado de variabilidad horaria o saltos, que incluía las situaciones sinópticas, ha detectado 4.3650 (0,4%) observaciones erróneas. Si analizamos los errores por sensor solo seis de los veintiún sensores superan el umbral del 1% de observaciones eliminadas.

Para comprobar que no existía un sesgo temporal en la ocurrencia de observaciones erróneas que pudiera influir en el análisis estacional, se han contabilizado el número total de observaciones eliminadas por mes (Figura 2). La distribución temporal de las observaciones erróneas detectadas muestra que la mayoría se eliminaron al principio del periodo de registro (33,73% en el primer año). Estacionalmente no hay un periodo concreto de la serie temporal en el que se concentre el número de observaciones eliminadas, aunque se observa una ligera agrupación en los meses de otoño y verano.

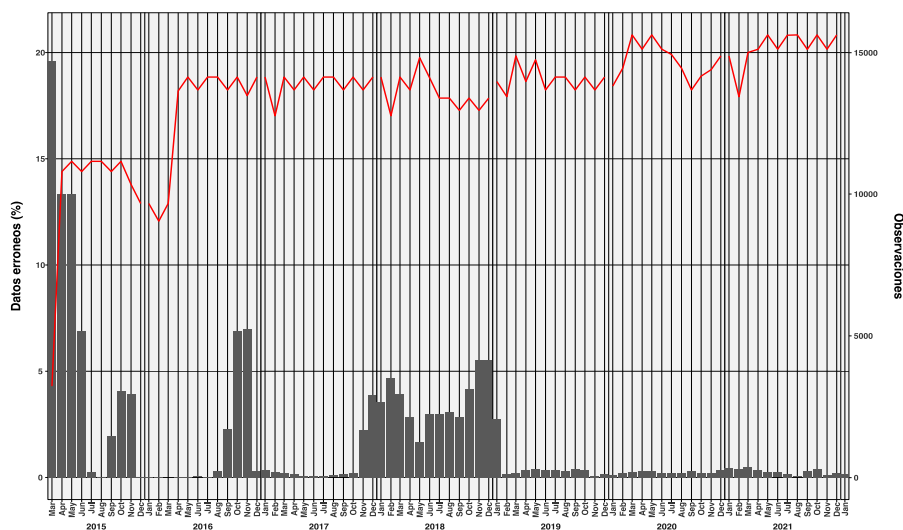


Fig. 2: Porcentaje de observaciones eliminadas y número total de observaciones por mes para toda la red. Fuente: Elaboración propia.

Respecto al análisis de la variabilidad estacional, la figura 3 muestra la variación diurna y nocturna de la intensidad de la ICU para cada estación del año y para cada sensor de la red. Indicando que la intensidad es mayor durante la noche que durante el día en todos los sensores. Alcanzando valores que pueden llegar a 2 °C de media por encima de los valores diurnos. Durante la noche, el comportamiento de la ICU se aprecia fácilmente con un gradiente descendente de la temperatura desde los sensores más urbanos (colores rojos) hasta los rurales y más alejados (colores amarillos y verdes), con algunas excepciones (S15, S16). Durante el día, el comportamiento de la ICU es diverso dependiendo del sensor. Es decir, las diferencias entre centro y periferia son notables durante la noche y más irregulares durante el día, dependiendo de las características de la ubicación de cada sensor. El ejemplo más claro del efecto de la ICU es el caso del sensor del centro de la ciudad (S01), una zona densamente edificada y una morfología muy compacta con poca vegetación. Con valores en torno a 0° C y 1° C en las horas centrales del día. Mientras por la noche la intensidad aumenta hasta superar los 2 °C. En el lado opuesto, las estaciones más alejadas de la ciudad (S19) y los grandes parques metropolitanos (S16) donde el efecto de la ICU es menor con una intensidad nula o cercana a 0 °C tanto de noche como de día.

En verano, estas diferencias diurnas son las más contrastadas de todo el año y los valores de la ICU pueden diferir de un sensor a otro. Por la noche, la intensidad de la ICU es más estable y los rangos se acortan para todos los sensores concentrando la variabilidad. En el caso de otoño e invierno, la situación es diferente y los valores de la ICU nocturnos son los más altos, con valores máximos que pueden superar los 4°C de intensidad.

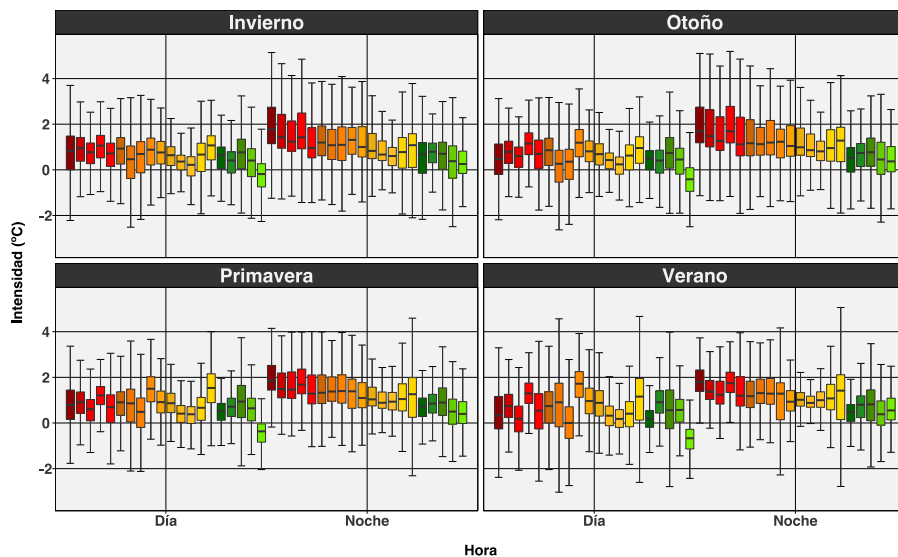


Fig. 3: Intensidad estacional de la ICU en los diferentes sensores de la red, durante el día (10:00-18:00) y la noche (20:00-6:00). Los colores de cada sensor se relacionan con los del mapa de la figura 1. Fuente: Elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

Para el estudio del clima urbano, el uso de una red de sensores específica en la ciudad es una ventaja muy por encima de las bases de datos globales, e incluso regionales, ya que permite una descripción mucho más detallada de comportamientos climáticos a escala local que no son visibles con el uso de estaciones meteorológicas convencionales (Muller et al., 2013). Aun así, esta continuidad en la red de sensores no es siempre perfecta. Obligando al desarrollo de un control de calidad exhaustivo que permita identificar errores y eliminar observaciones sospechosas. Siendo una parte esencial del análisis climático y que merece especial interés.

El control ha eliminado todas aquellas observaciones erróneas que no corresponden con la variabilidad natural del clima, aunque suponen una presencia muy reducida (1,4%). Además, se comprobó que no existe un sesgo estacional de las observaciones eliminadas. Las cuales se concentran principalmente al inicio de la base de datos y disminuyen conforme se ha avanzado y se han incorporado más sensores.

Tras el control, la base de datos ha permitido desarrollar un análisis detallado de la ICU. Esta caracterización ha comprobado como se producen en Zaragoza los modelos

de variación centro-periferia característicos de la ICU, ya observados en muchas otras ciudades (Alcoforado et al., 2014; Núñez-Peiró et al., 2021; Vardoulakis et al., 2013) y en trabajos previos en esta misma ciudad (Cuadrat Prats et al., 1993, 2014, 2021; Tejedor et al., 2016). Pero en esta ocasión, gracias al elevado número de sensores de la red y la resolución horaria disponible, se han analizado particularidades de la ICU que hasta ahora no se habían estudiado en Zaragoza con tanto detalle.

También se apreciaron las diferentes magnitudes de intensidad que la ICU alcanza en los distintos espacios de una ciudad. Logrando caracterizar no solo aquellas zonas más céntricas como las más cálidas, como ya sabíamos, sino diferenciando dentro de las mismas aquellas que debido a la densidad de edificación, el entramado urbano o el tipo y material de construcción adquieren los valores más elevados de intensidad, como pueden ser el S01, el S04 o el S05. Mientras que en el caso opuesto también pudimos apreciar diferencias en aquellos lugares donde el efecto de la ICU es menor y observar otros condicionantes más allá de la lejanía al centro de la ciudad, como pueden ser la densidad de edificación, la presencia de espacios abiertos o la presencia de la vegetación frente a los suelos impermeables construidos. Como es el caso del sensor S16 y S17 y la importancia de las infraestructuras verdes urbanas (Nastran et al., 2019).

Finalmente, el uso de una red de sensores en la ciudad de Zaragoza nos ha permitido observar diferencias en la distribución de los valores climáticos que no hubieran sido posibles con las estaciones oficiales disponibles. Y por tanto ser útil en la planificación urbana ante los retos del cambio climático. Como la mejora de los planes de actuación ante impactos térmicos para la salud (Royé et al., 2021) o el desarrollo de estrategias para la mitigación de este fenómeno (Akbari & Kolokotsa, 2016).

5. CONCLUSIONES

Utilizando una red de 21 sensores en la ciudad de Zaragoza (España) con registros horarios de temperatura y humedad, se aplicó un control de calidad para depurar la información y obtener una base de datos climática urbana. Con esta base de datos se realizó un análisis de la variabilidad horaria y estacional de la ICU. Los resultados obtenidos del control de calidad mostraron un porcentaje de eliminación escaso, eliminado de la base de datos un 1,4% de las observaciones registradas. Principalmente debido a errores relacionados con outliers y la variabilidad horaria.

El estudio de la ICU reveló que, en las zonas más urbanas donde abunda una elevada densidad de urbana, una mayor compacidad y una escasa presencia de cubierta vegetal, registran valores de intensidad de la ICU más elevados en torno a los 2° C principalmente por la noche. Los espacios más alejados del centro de la ciudad, como barrios rurales, o con elevada presencia vegetal, como los parques urbanos, registraron intensidad en torno a 0° C con una variabilidad horaria escasa mostrando una menor influencia de la ICU.

Estas diferencias de intensidad de la temperatura centro-periferia son mayores especialmente durante la noche y en las estaciones de invierno y otoño, alcanzando intensidades superiores a 4° C en los sensores más urbanos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Medioambiente y Sostenibilidad del Ayuntamiento de Zaragoza, su colaboración en la instalación y mantenimiento de la red de sensores urbanos. Además, los autores cuentan con el apoyo del Gobierno de Aragón a través del "Programa de grupos de investigación" (grupo H09_20R, "Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales"). Además, los autores de la investigación agradecen la colaboración del Instituto Universitarios de Ciencias Ambientales (IUCA) del cual son miembros.

REFERENCIAS

- Akbari, H., Kolokotsa, D., 2016. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy Build.* 133, 834–842. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.067>
- Alcoforado, M.J., Lopes, A., Alves, E., Canário, P., 2014. Lisbon Heat Island. *Finisterra XLIX*, 61–80.
- Beck, C., Straub, A., Breitner, S., Cyrus, J., Philipp, A., Rathmann, J., Schneider, A., Wolf, K., Jacobeit, J., 2018. Air temperature characteristics of local climate zones in the Augsburg urban area (Bavaria, southern Germany) under varying synoptic conditions. *Urban Clim.* 25, 152–166. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.04.007>
- Cuadrat Prats, J.M., De la Riva, J., Lopez, F., Marti, A., 1993. El medio ambiente urbano en Zaragoza. Observaciones sobre la “isla de calor.” *An. Geogr. la Univ. Complut.* 127–138.
- Cuadrat Prats, J.M., Saz Sánchez, M.Á., Serrano-Notivoli, R., Tejedor, E., 2014. El clima del término municipal de Zaragoza en el contexto del cambio global, Ayuntamiento de Zaragoza. *Agenda 21. Zaragoza*.
- Cuadrat Prats, J.M., Serrano-Notivoli, R., Barrao, S., Saz Sánchez, M.Á., Tejedor, E., 2021. Temporal variability of the urban heat island in Zaragoza (Spain). *Cuad. Investig. Geográfica 0*. <https://doi.org/10.18172/CIG.5022>
- Cuadrat Prats, J.M., Vicente-Serrano, S., Saz Sánchez, M.Á., 2015. Influence of different factors on relative air humidity in Zaragoza, Spain. *Front. Earth Sci.* 3, 1–8. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00010>
- Cuadrat Prats, J.M., Vicente Serrano, S., Saz Sánchez, M.Á., 2005. Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): la isla de calor y sus factores condicionantes. *Boletín la Asoc. Geógrafos Españoles* 311–327.
- Meier, F., Fenner, D., Grassmann, T., Otto, M., Scherer, D., 2017. Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. *Urban Clim.* 19, 170–191. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.01.006>
- Muller, C.L., Chapman, L., Grimmond, C.S.B., Young, D.T., Cai, X., 2013. Sensors and the city: A review of urban meteorological networks. *Int. J. Climatol.* 33, 1585–1600. <https://doi.org/10.1002/joc.3678>
- Nastran, M., Kopal, M., Eler, K., 2019. Urban heat islands in relation to green land use in European cities. *Urban For. Urban Green.* 37, 33–41. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2018.01.008>
- Núñez-Peiró, M., Sánchez-Guevara Sánchez, C., Neila González, F.J., 2021. Hourly

- evolution of intra-urban temperature variability across the local climate zones. The case of Madrid. *Urban Clim.* 39. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100921>
- Oke, T., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 108, 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T., 1973. City size and the urban heat island. *Atmos. Environ.* 7, 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Olcina Cantos, J., Serrano-Notivoli, R., Miró, J., Meseguer-Ruiz, O., 2019. Tropical nights on the Spanish Mediterranean coast, 1950–2014. *Clim. Res.* 78, 225–236. <https://doi.org/10.3354/cr01569>
- Peng, J., Jia, J., Liu, Y., Li, H., Wu, J., 2018. Seasonal contrast of the dominant factors for spatial distribution of land surface temperature in urban areas. *Remote Sens. Environ.* 215, 255–267. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.06.010>
- Royé, D., Codesido, R., Tobías, A., Taracido, M., 2020. Heat wave intensity and daily mortality in four of the largest cities of Spain. *Environ. Res.* 182. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109027>
- Royé, D., Sera, F., Tobías, A., Lowe, R., Gasparrini, A., Pascal, M., De’Donato, F., Nunes, B., Teixeira, J.P., 2021. Effects of Hot Nights on Mortality in Southern Europe. *Epidemiology* 487–498. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000001359>
- Saz Sánchez, M.Á., Vicente-Serrano, S., Serrano, J., Prats, C., 2003. Spatial patterns estimation of urban heat island of Zaragoza (Spain) using GIS. *5th Int. Conf. Urban Clim.* 4.
- Stewart, I., 2011. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *Int. J. Climatol.* 31, 200–217. <https://doi.org/10.1002/joc.2141>
- Stewart, I., Oke, T., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Tejedor, E., Cuadrat Prats, J.M., Saz Sánchez, M.Á., Serrano-Notivoli, R., López, N., Aladrén, M., 2016. Islas de calor y confort térmico en Zaragoza durante la ola de calor de julio de 2015. *Clima, Sociedad, Riesgos y Ordenación Del Territorio.* 141–151. <https://doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-13>.
- Vardoulakis, E., Karamanis, D., Fotiadi, A., Mihalakakou, G., 2013. The urban heat island effect in a small Mediterranean city of high summer temperatures and cooling energy demands. *Sol. Energy* 94, 128–144. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.016>
- Warren, E.L., Young, D.T., Chapman, L., Muller, C., Grimmond, C.S.B., Cai, X., 2016. The Birmingham Urban Climate Laboratory-A high density, urban meteorological dataset, from 2012–2014. *Sci. Data* 3, 1–8. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.38>
- Yue, W., Liu, X., Zhou, Y., Liu, Y., 2019. Impacts of urban configuration on urban heat island: An empirical study in China mega-cities. *Sci. Total Environ.* 671, 1036–1046. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.03.421>