



Mapeando el calor urbano: desarrollo de cartografías térmicas abiertas en Zaragoza

Mapping urban heat: development of open thermal mapping in Zaragoza

Historial del Artículo

Recibido:

25 de octubre de 2024

Revisado:

23 de diciembre de 2024

Aceptado:

10 de julio de 2025

Samuel Barrao Simorte , Universidad de Zaragoza, España

Roberto Serrano Notivoli , Universidad de Zaragoza, España

Miguel Ángel Saz Sánchez , Universidad de Zaragoza, España

José María Cuadrat Prats , Universidad de Zaragoza, España

*Contacto: sbarrao@unizar.es

Palabras clave

Cartografía, datos abiertos, isla de calor urbano, Zaragoza

RESUMEN

Este artículo presenta un estudio detallado sobre la distribución térmica en la ciudad de Zaragoza, utilizando métodos avanzados de interpolación para generar mapas de temperatura a alta resolución a escala estacional. El análisis revela una clara diferencia entre las zonas urbanas y rurales, con una mayor concentración de calor en el entorno urbano. Se detectaron variaciones de hasta 1,8 °C en las temperaturas máximas y hasta 3,5 °C en las mínimas entre ambas zonas, destacando el efecto de la Isla de Calor Urbana (ICU), que llega a incrementar hasta más de 2 °C las temperaturas nocturnas en invierno en algunos sectores de la ciudad.

El estudio proporciona una herramienta de gran utilidad para la gestión climática urbana, poniendo a disposición cartografías térmicas abiertas, es decir, mapas de libre acceso a través de un visor interactivo desarrollado por el Ayuntamiento de Zaragoza¹, que permite visualizar de manera accesible para toda la ciudadanía las áreas más afectadas por las variaciones térmicas. Esta investigación no solo aporta un diagnóstico preciso de la situación actual, sino que subraya la creciente relevancia de estudiar el clima urbano en un contexto de triple crisis planetaria y su impacto en la población urbana.

Keywords

Mapping, open data, urban heat island, Zaragoza

ABSTRACT

This article presents a detailed study on the thermal distribution in the city of Zaragoza, using advanced interpolation methods to generate high-resolution seasonal temperature maps. The analysis reveals a clear distinction between urban and rural areas, with a higher concentration of heat in the urban environment. Temperature variations of up to 1.8 °C in maximum temperatures and up to 3.5 °C in minimum temperatures were detected between the two areas, highlighting the Urban Heat Island (UHI) effect, which increases nighttime temperatures by more than 2 °C during winter in some parts of the city.

The study provides a highly valuable tool for urban climate management by offering open thermal cartographies—that is, freely accessible maps available through an interactive viewer developed by the Zaragoza City Council. This platform allows all citizens to easily visualize the areas most affected by thermal variations. This research not only provides an accurate diagnosis of the current situation but also emphasizes the growing importance of studying urban climates in the context of a triple planetary crisis and its impact on the urban population.

¹ Sitio web <https://www.zaragoza.es/sede/portal/idezar/mapa/islas-de-calor/>

Introducción

En las últimas décadas, el estudio del clima urbano ha cobrado una importancia creciente debido a la aceleración del cambio climático y su impacto en las ciudades, donde ya habita más de la mitad de la población mundial (Moreno-Monroy et al., 2021). La climatología urbana es una componente esencial para la comprensión de los problemas que se manifiestan en los entornos urbanos. Las ciudades no solo son centros neurálgicos de actividad económica y social, sino también puntos clave de interacción entre la actividad humana y el ambiente, lo que las convierte en uno de los entornos más vulnerables a los efectos del cambio climático (Masson et al., 2020).

Las ciudades modifican las características generales del clima regional sobre el espacio en el que se asientan, principalmente en el caso de la temperatura, debido a los cambios en el comportamiento radiativo de las superficies debido a la presencia de edificios y superficies impermeables, la eliminación casi total de la vegetación y las láminas de agua, así como por la propia actividad humana generadora de calor (Oke et al., 2017). Uno de los ejemplos más destacados es la formación de las islas de calor urbanas (Cuadrat et al., 2022; Oke, 1982), áreas dentro de las ciudades que presentan temperaturas significativamente más elevadas que las zonas rurales circundantes. Las islas de calor urbanas tienen efectos directos sobre la salud de la población, especialmente durante las olas de calor, cuando las temperaturas elevadas pueden llevar a un aumento de enfermedades relacionadas con el calor, estrés térmico e, incluso, mortalidad (Gasparrini et al., 2015; Royé et al., 2021).

El cambio climático ha exacerbado estos riesgos, aumentando la frecuencia y la intensidad de los fenómenos climáticos extremos, como las olas de calor y las sequías (Serrano-Notivoli et al., 2022). En las ciudades, estas condiciones se agravan por las características físicas de los entornos urbanos, lo que incrementa la vulnerabilidad de sus habitantes. Aquellas personas que ya se encuentran en situación de riesgo, como los ancianos, los niños o las personas con enfermedades crónicas, son las más afectadas por el estrés térmico y la falta de confort ambiental (Quintana-Talvac et al., 2021; Sarricolea et al., 2022). De este modo, el estudio del clima urbano no solo permite entender mejor estos fenómenos, sino que es crucial para el diseño de estrategias de mitigación y adaptación que protejan la salud y el bienestar de los ciudadanos (Salvia et al., 2021).

En este sentido, los ayuntamientos y las administraciones locales desempeñan un papel fundamental. Las políticas públicas y la planificación urbana son herramientas clave para mitigar los efectos adversos del cambio climático y mejorar las condiciones de vida en las ciudades (Pietrapertosa et al., 2023; Reckien et al., 2018). Sin embargo, para que estas políticas sean efectivas, es imprescindible contar con datos climáticos urbanos de alta calidad. El acceso a información precisa y detallada sobre la distribución espacial de las temperaturas dentro de la ciudad, es crucial para una planificación urbana efectiva. Los estudios sobre el clima urbano pueden proporcionar estos datos a través de la creación de cartografías térmicas y modelos climáticos locales, que permiten identificar con precisión las zonas más vulnerables y desarrollar políticas específicas para mitigar los efectos del cambio climático (Smith Guerra et al., 2023; Smith Guerra & Henríquez Ruiz, 2021).

No obstante, obtener bases de datos climáticas completas y de calidad para desarrollar cartografías precisas representa un desafío. Los métodos tradicionales de recolección de datos climáticos en áreas urbanas a menudo carecen de la resolución espacial necesaria para captar la variabilidad climática a nivel local (Stewart, 2011). En este escenario, la teledetección ha demostrado ser una herramienta prometedora (Voogt & Oke, 2003), aunque aún enfrenta limitaciones en cuanto a la resolución requerida para estos fines. Como solución clave, la instalación de redes de sensores urbanos permite la obtención de datos climáticos con una alta resolución tanto espacial como temporal (Bassett et al., 2016; Šćerov et al., 2019; Warren et al., 2016), lo que brinda una mayor precisión en el análisis.

En este contexto, el acceso abierto a los datos climáticos adquiere una relevancia fundamental. La ciencia abierta y la disponibilidad de información pública no solo fortalecen la transparencia y la reproducibilidad de la investigación, sino que también facilitan la participación activa de la ciudadanía en la comprensión y gestión del entorno urbano. En el ámbito de la climatología urbana, ofrecer cartografías térmicas accesibles y visuales permite democratizar el conocimiento, empoderando a la población con herramientas concretas para entender los riesgos a los que están expuestos y participar de manera informada en los procesos de adaptación y mitigación. Así, los datos abiertos se convierten en un puente entre la investigación científica y la acción colectiva frente al cambio climático.

El objetivo de este trabajo es explicar cómo se desarrollan y aplican cartografías térmicas estacionales de alta resolución en la ciudad de Zaragoza, que se ofrecen de manera

gratuita a través de un visor público. Se presenta el modelo de interpolación empleado para la creación de los mapas estacionales, junto con las covariables utilizadas en dicho modelo y el proceso de obtención de los datos de temperatura del aire que sirven como base para la interpolación. Estas cartografías, que permiten visualizar la distribución de la temperatura urbana y la formación de islas de calor, no solo están diseñadas para servir a los planificadores urbanos y a los entes públicos en la toma de decisiones, sino que también tienen como objetivo ofrecer información accesible y útil a los ciudadanos. De este modo, se busca fomentar una planificación urbana más equitativa, eficiente y resiliente frente a los desafíos climáticos actuales, asegurando que tanto los responsables políticos como los ciudadanos tengan las herramientas necesarias para enfrentar los efectos del cambio climático de manera justa y sostenible.

Materiales y métodos

Área de estudio

La ciudad de Zaragoza (Figura 1) es un punto neurálgico situado en el noreste de la península ibérica (España). Una metrópoli regional en el sur de Europa que se sitúa entre las 100 principales ciudades en la jerarquía europea (Rozenblat & Cicille, 2004). Con un total de 673.010 habitantes (Instituto Geográfico Nacional, 2022) es la quinta ciudad más poblada de España y es el octavo término municipal del país. La ciudad se extiende a lo

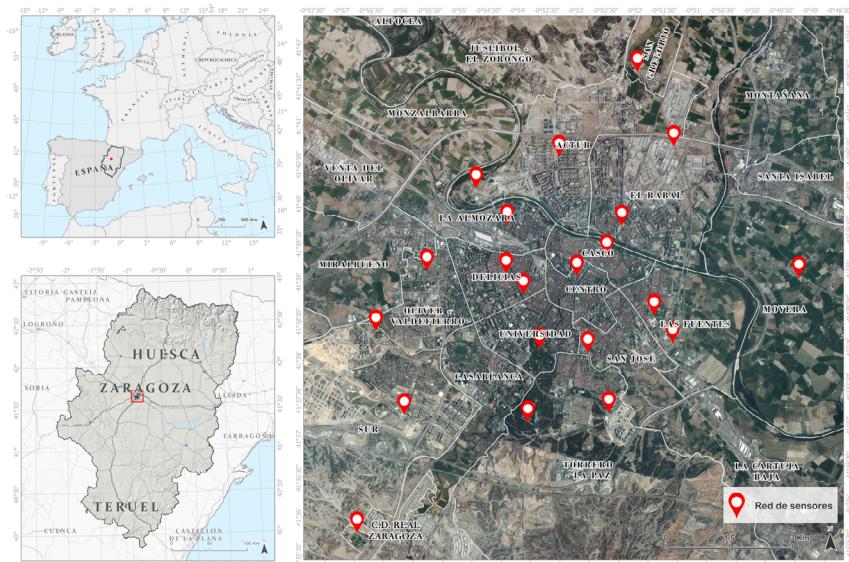
largo de 968 km² en la zona central de la depresión del Ebro, en la confluencia de los ríos Ebro, Gállego y Huerva.

La mayor parte de la ciudad ocupa una amplia zona llana, en torno a los 200 m de altitud, sin relieves contrastados donde levemente destacan terrazas fluviales y pequeñas elevaciones en la zona sur que no superan los 280 m. La textura urbana es variada y muestra algunos de los rasgos característicos de las ciudades españolas (Cardesín Díaz & Araujo, 2017). El clima de la zona es mediterráneo continental con un notable predominio de situaciones anticiclónicas tanto en verano como en invierno, lo que propicia la formación de la isla de calor (Cuadrat et al., 1993). Por consiguiente, la oscilación térmica es considerable y se alcanzan temperaturas medias que varían entre los 6°C de invierno y 24°C en verano (Cuadrat et al., 2014). El viento, denominado “cierzo”, debido a su frecuencia e intensidad es otro factor notable en el clima de Zaragoza. Este viento del noroeste que alcanza una gran velocidad al atravesar el valle es capaz de reducir la isla de calor urbana, incluso desaparecer a velocidades elevadas (Cuadrat et al., 2021).

Datos

En primer lugar, en el apartado meteorológico, la red de observación climática (Figura 1) utilizada incluye 21 sensores termohigrométricos distribuidos en Zaragoza y sus alrededores, espacios característicos del entorno urbano seleccionados de acuerdo con la clasificación de

Figura 1. Mapas de localización de la ciudad de Zaragoza, y mapa de la ciudad con topónimos de referencia de barrios urbanos y la localización de la red de sensores



Zonas Climáticas Locales de Stewart & Oke (2012). Estos sensores (modelos HOBOpro U23 v2 y HOBO MX2301), ampliamente utilizados en estudios de climatología urbana (Amorim & Dubreuil, 2017; Chapman et al., 2015), registraron temperatura y humedad a escala horaria desde marzo de 2015.

Los datos obtenidos fueron sometidos a controles de calidad rigurosos para eliminar *outliers* y errores de medición (Barrao et al., 2022). Las observaciones extremas fueron descartadas, y se ajustaron valores anómalos a tres desviaciones estándar para garantizar la precisión. Además, se analizaron patrones de repetición y desajustes horarios para identificar posibles anomalías relacionadas con fenómenos climáticos específicos, como nieblas o lluvias. Con los datos de las bases obtenidas, se calcularon los promedios estacionales y la intensidad de la isla de calor urbano. Esta última se determinó restando los valores registrados por el sensor 21, ubicado en las afueras de la ciudad, lejos de la influencia urbana, al resto de sensores. Posteriormente, para realizar la interpolación y subir los resultados al visor del Ayuntamiento de Zaragoza, se seleccionaron las estaciones, comenzando por el invierno de 2022.

En segundo lugar, para mejorar el modelo de interpolación, se integraron covariables auxiliares (Figura 2), categorizadas en variables satelitales y territoriales. Estas covariables permiten una representación más precisa de las características urbanas que afectan a la distribución de la temperatura.

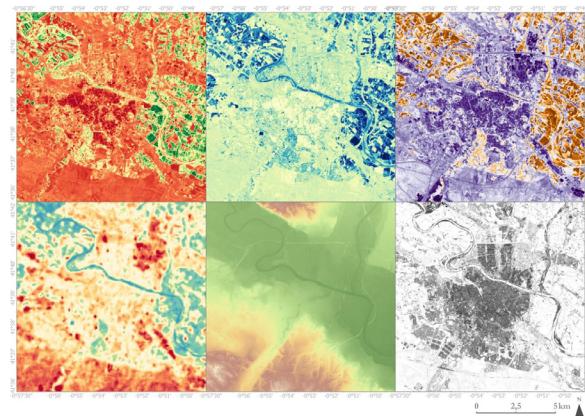
Obtenidas de Google Earth Engine (GEE) y el programa Landsat, las variables satelitales son esenciales para el análisis espacial. Se emplearon imágenes de Landsat 8 y 9, ya que eran las que más se ajustaban al periodo de estudio de la red de sensores y la resolución espacial necesaria. Se utilizaron productos de nivel 2 con correcciones atmosféricas para reflejar las condiciones del terreno, despreciando aquellas imágenes con presencia de nubes u otros artefactos. El análisis de la vegetación, las masas de agua y el suelo construido es un componente clave. Se utilizó el Green Leaf Index [GLI] (Louhaichi et al., 2001) para evaluar la vegetación y su efecto en la temperatura circundante. El Normalized Difference Turbidity Index [NDTI] (Lacaux et al., 2007) ayudó a identificar las masas de agua y su relación con la regulación térmica. Además, el Normalized Built-up Area Index [NBAI] (Waqar et al., 2012) permitió cuantificar áreas urbanizadas y pavimentadas, asociadas con mayores temperaturas.

Las temperaturas de superficie (LST, Land Surface Temperature) fueron analizadas usando la banda 10

del sensor TIR de Landsat-8. Aunque las áreas urbanas retienen calor, el cual se libera posteriormente, estos datos permiten identificar patrones intraurbanos de la isla de calor superficial urbana en los momentos de máxima radiación solar.

Las covariables territoriales aportan información estática sobre la morfología urbana. Entre ellas destaca el Modelo Digital de Terreno [MDT], del Instituto Geográfico Nacional de España, que ofrece una representación precisa de la elevación del terreno y proporciona información crítica para el análisis climático, y el Sky View Factor (SVF), un indicador que representa la relación entre el área de cielo visible y el total del cielo en un espacio concreto (Svensson, 2004). Este índice se ha utilizado comúnmente para indicar el impacto que tiene la morfología urbana en las diferencias térmicas del aire en el interior de los espacios urbanos (Chen et al., 2012; Dirksen et al., 2019). El SVF se calculó utilizando un algoritmo de código abierto y gratuito SAGA-GIS (Conrad et al., 2015).

Figura 2. Covariables utilizadas en el modelo de interpolación. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: a) GLI, b) NDTI, c) NBAI, d) LST, e) MDT y f) SVF



Interpolación espacial

Uno de los métodos geoestadísticos más populares para la interpolación es el *kriging* (Nikoloudakis et al., 2020). A diferencia de otras técnicas, el *kriging* considera tanto la tendencia espacial como la estructura de correlación entre las observaciones, lo que permite realizar estimaciones más precisas y proporcionar medidas de incertidumbre asociadas (Li & Heap, 2014). En este estudio, se utilizó una variante del *kriging* llamada *cokriging*, que combina información de múltiples variables para mejorar las estimaciones espaciales. Esta técnica permite usar una o

varias variables secundarias relacionadas con la variable de interés, lo que aumenta la precisión de la interpolación (Smoliak et al., 2015).

El *cokriging* es especialmente útil cuando la variable secundaria aporta información adicional sobre la estructura espacial y la correlación, lo que ayuda a reducir la incertidumbre en las estimaciones y a obtener resultados más precisos. Además, el *cokriging* puede mitigar la falta de datos en áreas específicas, aprovechando la información disponible en las variables secundarias (Zhang et al., 2011). En este caso, las covariables descritas previamente no se incorporaron directamente al modelo, sino a través de un análisis de componentes principales (PCA). Se seleccionaron los tres primeros componentes principales para cada estación y año, ya que, en la mayoría de los casos, estos explicaban más del 90 % de la varianza total. La única excepción fue el invierno, en el que la varianza explicada se situaba en torno al 85 % en todos los años analizados. El análisis se llevó a cabo en R, un *software* de código abierto que ofrece potentes herramientas para análisis estadístico y geoespacial. Para la implementación del modelo, se utilizó el paquete *automap* (Hiemstra et al., 2009).

Para evaluar el rendimiento del modelo, se aplicó la técnica de validación cruzada conocida como Leave One Station Out Cross Validation [LOOCV]. Este método consiste en excluir una estación de la red, construir el modelo con el resto de las estaciones, y luego predecir el valor de la variable de interés en la estación excluida. El error se calcula comparando la predicción con el valor real en esa estación. Este proceso se repite para todas las estaciones del conjunto de datos, excluyendo una estación diferente en cada iteración. Finalmente, los errores obtenidos en cada iteración se promedian para obtener una medida global del rendimiento del modelo. LOOCV utiliza todos los puntos de datos disponibles, proporcionando una evaluación más robusta y ayudando a evitar problemas de sobreajuste o subajuste.

Resultados

Error de la interpolación

El modelo de interpolación aplicado mediante *cokriging* fue validado utilizando la técnica de LOOCV, obteniendo una medida global del rendimiento. Los errores mostraron una desviación estándar baja, lo que indica que el modelo predice con precisión las temperaturas en la mayoría

de las estaciones. El error cuadrático medio (RMSE) fue de 0,3 °C, mientras que el error medio absoluto (MAE) alcanzó 0,23 °C, lo que demuestra que las predicciones se ajustan bien a los valores observados. Estas métricas son fundamentales para evaluar la precisión del modelo: un RMSE bajo indica un buen ajuste, mientras que un MAE bajo sugiere que las predicciones son confiables en promedio.

Sin embargo, estas cifras reflejan el rendimiento del modelo en su conjunto. Al analizar las áreas con mayor error en los mapas interpolados, se observó que las zonas exteriores a las áreas urbanas mostraron una mayor dispersión, especialmente aquellas con menor densidad de sensores o con una topografía compleja. Este fenómeno podría deberse a la falta de datos representativos en estas áreas, lo que complica la interpolación precisa.

Al desglosar los resultados por estaciones, se observó que el error es significativamente menor en invierno, pero aumenta en verano, alcanzando su valor más alto en la interpolación de las temperaturas máximas. De este modo, el modelo funcionó mejor con temperaturas bajas, mientras que, en estaciones como primavera y otoño, con temperaturas más moderadas, se observaron valores de error intermedios. Este patrón fue más marcado en la predicción de la temperatura media, en comparación con la temperatura mínima, que mostró errores más elevados. La mayor discrepancia en la predicción de la temperatura mínima podría deberse a su relación con las condiciones nocturnas y el fenómeno de la ICU. Durante la noche, las diferencias entre el centro de la ciudad y las áreas circundantes se acentúan, lo que genera mayor variabilidad y complica la predicción de las temperaturas mínimas, resultando en mayores errores. En contraste, la temperatura media, al reflejar un rango más amplio de condiciones climáticas a lo largo del día, se predice con mayor precisión que las temperaturas extremas, como la máxima o mínima.

Este análisis resalta la importancia de tener en cuenta las particularidades estacionales y las características de cada variable para mejorar la precisión de los modelos de predicción, lo que puede mejorar la precisión de futuras interpolaciones.

Mapas estacionales de temperatura

La representación de las temperaturas desde el invierno de 2022 hasta la primavera de 2024 se ha realizado mediante una serie de mapas estacionales que pueden consultarse

en el visor interactivo². Estos mapas (Figura 3) muestran la distribución espacial de la temperatura máxima, media y mínima para cada estación, permitiendo visualizar cómo varía el patrón térmico en la ciudad de Zaragoza a lo largo del tiempo. El enfoque de mostrar estos datos en mapas estacionales es crucial para captar las fluctuaciones del clima urbano, aunque plantea desafíos cartográficos debido a la complejidad de representar adecuadamente las transiciones térmicas entre áreas urbanas y rurales.

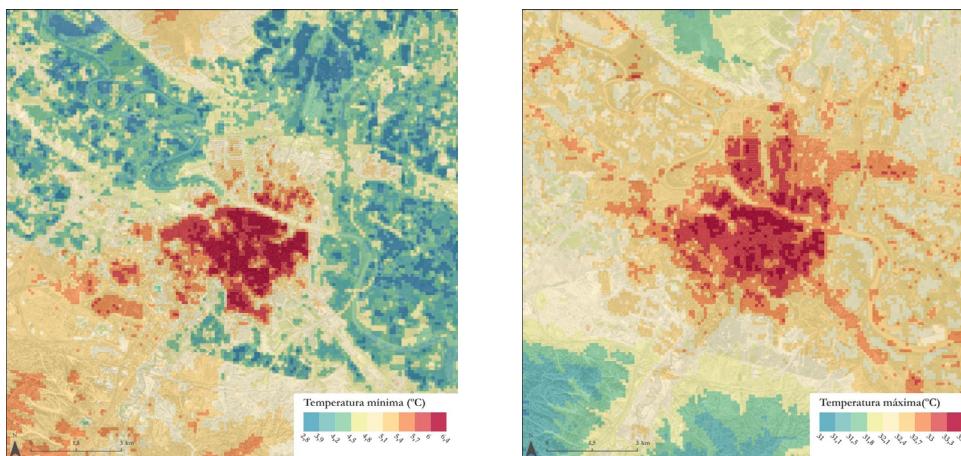
Los mapas describieron cómo las variables térmicas en Zaragoza presentan no solo diferencias en magnitud, sino también en distribución espacial. Los mapas estacionales del visor muestran que la variabilidad térmica es más pronunciada en las temperaturas mínimas, con diferencias que alcanzan los 4 °C entre áreas urbanas y rurales, mientras que las medias y máximas presentan rangos entorno a los 2 °C. En las temperaturas mínimas, se observa la típica forma de la ICU, con un centro más cálido, y temperaturas que disminuyen conforme se alejan de las áreas urbanas densas. Este patrón concéntrico es más pronunciado en la margen derecha del río Ebro, donde se ha concentrado el desarrollo urbano. Las áreas urbanas muestran mayores variaciones térmicas en comparación con las áreas rurales, debido a la inercia térmica de los materiales de construcción y la diversidad espacial.

La radiación solar y las características urbanas, como la rugosidad del terreno y la sombra, influyen en estas variaciones de temperatura. Las áreas rurales, más expuestas al sol, muestran temperaturas más homogéneas, aunque

también influyen la vegetación y el riego. En las zonas urbanas, se crean pequeñas islas de frescor en espacios verdes, donde las temperaturas pueden ser hasta 1 °C más bajas que en los alrededores más cercanos. Las plazas arboladas también presentan descensos menores de temperatura. En cuanto a la temperatura media, su distribución también es concéntrica, pero con un rango de variación menor, en torno a 2 °C. No se observa una diferencia tan marcada en la margen izquierda del río Ebro, y las zonas de nueva construcción al suroeste muestran una mayor homogeneidad térmica.

Las temperaturas máximas presentan una distribución diferente, con las zonas más cálidas desplazándose hacia el sureste de Zaragoza. Este corredor térmico se origina en el este de los barrios céntricos, se intensifica en áreas de Las Fuentes y San José. Este fenómeno ha sido documentado en estudios anteriores (Cuadrat et al., 2022; Cuadrat & Vicente-Serrano, 2003), que lo atribuyen a la dinámica atmosférica local, especialmente a los vientos predominantes del noroeste (cierzo). Además, la presencia de los ríos Ebro y Huerva contribuye a la canalización del aire, influyendo en la distribución del calor. La dirección del viento juega un papel clave en la variación térmica: el cierzo desplaza las temperaturas más cálidas hacia el este, mientras que los vientos del sureste (bochorno) las mueven hacia el noroeste. La interacción entre estos factores atmosféricos y la topografía local es determinante en la distribución térmica de la ciudad, particularmente en las temperaturas máximas.

Figura 3. Cartografía de temperatura urbana consultada en el visor cartográfico del Ayuntamiento de Zaragoza. a) Temperatura mínima promedio de invierno del año 2024. b) Temperatura máxima promedio de verano del año 2023



Fuente: Ayuntamiento de Zaragoza (s. f.).

² Sitio web <https://www.zaragoza.es/sede/portal/idezar/mapa/islas-de-calor/>

A nivel estacional, la disparidad térmica es más evidente en invierno, cuando las áreas urbanizadas presentan consistentemente los deciles más altos de temperatura, especialmente en las mínimas. Este fenómeno es comúnmente atribuido a la retención de calor en las superficies urbanas, que sigue siendo perceptible incluso durante las noches frías. En cambio, durante el verano, aunque las ciudades siguen mostrando temperaturas más altas, el valle del Ebro en su conjunto experimenta un calentamiento generalizado, con zonas rurales que alcanzan temperaturas cercanas a las urbanas debido a las características climáticas regionales.

Durante el otoño y la primavera, las diferencias térmicas se suavizan, aunque siguen siendo evidentes en las zonas donde la vegetación tiene un papel dominante. En primavera, los cultivos de regadío y las áreas ribereñas, muestran temperaturas mínimas más bajas debido al ciclo fenológico de las especies locales, que incrementan su actividad biológica en esta época. En estos meses, las áreas con mayor vegetación contribuyen a un efecto de enfriamiento local, en contraste con las zonas urbanas, donde la vegetación gestionada (parques y jardines) tiene una influencia limitada en la moderación de las temperaturas. Durante el invierno, sin embargo, este efecto de enfriamiento vegetal es menos evidente, ya que la caída de hojas y la inactividad biológica reducen su capacidad de modulación térmica.

Mapas estacionales de intensidad de la ICU

Este apartado se enfoca en el análisis del fenómeno de la ICU (Figura 4), con especial atención a su variación estacional

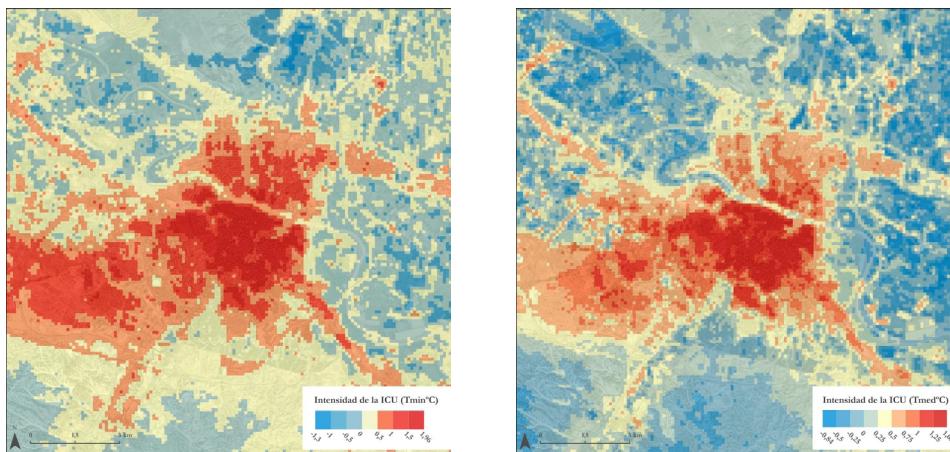
y características. A pesar de haber sido mencionado previamente en los mapas, aquí se aborda de manera específica su comportamiento estacional.

La intensidad de la ICU varía según la temperatura analizada. Generalmente, es más elevada para las temperaturas mínimas, como ya se ha comentado, ya que están relacionadas con la noche. En cambio, los mapas de temperaturas máximas no presentan gradientes urbanos-rurales tan marcados y son más homogéneos.

Estacionalmente, durante el verano y la primavera, la intensidad de la ICU en las máximas aumenta, especialmente en el sureste y centro de la ciudad. Esto está vinculado con el viento del noroeste que influye en la distribución de la ICU, más notable en verano. La relación entre la ICU diurna y la radiación solar también se destaca: en verano, los materiales urbanos retienen más calor, aumentando la intensidad de la ICU durante el día, mientras que, en invierno, la menor radiación solar y mayores vientos reducen la intensidad.

En cuanto a las temperaturas medias, los valores de intensidad son menos abruptos, con una mayor homogeneidad en la distribución. El 85,2 % de los píxeles se concentran en un rango de -0,25 a 0,75 °C, lo que indica una ICU menos marcada que en el caso de las mínimas o máximas. En los mapas de temperaturas mínimas, se aprecia claramente la ICU en el núcleo central de la ciudad, con intensidades superiores a los 1,75 °C, llegando a más de 2 °C en invierno según el año. Este comportamiento es común en otras ciudades y destaca las diferencias intraurbanas (Dobrovolný & Krahula, 2015; Salamanca et al., 2012),

Figura 4. Cartografía de la intensidad de la ICU (°C) consultada en el visor cartográfico del Ayuntamiento de Zaragoza. a) Intensidad mínima promedio de otoño del año 2024. b) Intensidad media promedio de primavera del año 2024



Fuente: Ayuntamiento de Zaragoza (s. f.).

influenciadas por las distintas cubiertas urbanas. También se observan intensidades negativas en algunas zonas agrícolas, posiblemente debido a subestimaciones del modelo al no estar bien representadas por la falta de sensores en entornos de cultivo.

Las mayores intensidades se registran en invierno para las temperaturas mínimas como se aprecia en la Figura 4, debido a las inversiones térmicas comunes en el valle del Ebro. Estas inversiones atrapan el aire frío cerca de la superficie, lo que retiene el calor liberado por los materiales urbanos y mantiene las temperaturas elevadas en las noches invernales. Asimismo, el rango de valores de las temperaturas mínimas es más amplio, lo que permite observar mejor las diferencias intraurbanas y destacando el efecto refrescante de los parques y zonas verdes en el núcleo urbano.

Visualización en el visor

Los resultados de la interpolación y los mapas generados fueron integrados en un visor interactivo proporcionado por el Ayuntamiento de Zaragoza. Este visor permite a los usuarios explorar los mapas de temperatura con una resolución espacial detallada de 100 metros. Los datos de temperatura están categorizados según rangos definidos de acuerdo con las estaciones del año y las variaciones térmicas registradas. Para la temperatura del aire (renombrada como temperatura ambiental), se establecieron intervalos específicos (Tabla 1) en función de la variable, la estación y el año, debido a la gran variabilidad de combinaciones, lo que complicaba la creación de leyendas comunes y fáciles de interpretar.

Desde una perspectiva cartográfica, los intervalos específicos permitieron una representación visual clara y precisa de las fluctuaciones térmicas a lo largo de diferentes estaciones y años. La consistencia en los incrementos de los intervalos facilita la comparación entre períodos, siendo clave en la interpretación de los mapas y en la comunicación de estos datos. El diseño de estos intervalos es crucial para la divulgación científica, ya que una cartografía bien estructurada permite que tanto expertos como el público en general interpreten de manera intuitiva la información climática presentada. Al ajustar las leyendas de acuerdo con las estaciones y los años, los mapas se vuelven herramientas eficaces para transmitir información compleja de forma accesible y comprensible.

Por otro lado, los mapas de intensidad de la ICU utilizan una leyenda única, con un rango que va desde los -2,5 °C hasta los 3 °C. Con saltos de intervalos en aumento de 0,5 °C.

Esto permite comparar todos los mapas independientemente de la estación del año o la variable analizada.

Las leyendas utilizadas en el visor están codificadas por colores para facilitar la interpretación de los mapas. Se emplea una escala de colores que va del azul, para las zonas más frías, al rojo oscuro, para las áreas con mayores temperaturas. Esta gradación permite identificar rápidamente los focos de la isla de calor urbana. Además, el visor permite visualizar capas adicionales, como las áreas verdes o las infraestructuras urbanas, lo que facilita un análisis más contextualizado de las variaciones térmicas. Por último, el visor ofrece la posibilidad de realizar consultas específicas por zonas de la ciudad, seleccionando puntos concretos para obtener información detallada sobre la temperatura y otros datos climáticos en un determinado período de tiempo.

Discusión

Los resultados obtenidos en esta investigación sobre la temperatura urbana y la ICU en Zaragoza se enmarcan dentro de un contexto más amplio de estudios sobre el clima urbano y sus implicaciones. La evidencia empírica de que las zonas urbanas presentan temperaturas significativamente más altas en comparación con las rurales se alinea con investigaciones previas que han documentado el efecto de la ICU en diversas ciudades alrededor del mundo (Alcoforado et al., 2014; Amorim & Dubreuil, 2017; Hu et al., 2016) y también en Zaragoza (Cuadrat et al., 2022; Saz et al., 2003). Este fenómeno, impulsado por la infraestructura urbana, la reducción de la vegetación y el cambio en el uso del suelo, genera importantes implicaciones para la planificación urbana, la adaptación al cambio climático y la lucha contra la triple crisis planetaria.

La validación del modelo de *cokriging* mediante la técnica de validación LOOCV proporciona una medida confiable de la capacidad predictiva del modelo, lo que respalda la necesidad de utilizar técnicas avanzadas de interpolación en estudios climáticos. Este enfoque se justifica en la literatura, donde se ha demostrado que métodos estadísticos robustos pueden mejorar significativamente la precisión de las predicciones de temperatura en entornos urbanos (Shi et al., 2018; Straub et al., 2019). El bajo RMSE obtenido en esta investigación refleja la capacidad del modelo para capturar la variabilidad térmica de Zaragoza, en línea con los hallazgos de estudios previos que destacan la importancia de considerar la heterogeneidad espacial en la evaluación del clima urbano (Saz et al., 2003; Vicente-Serrano et al., 2005, 2003).

Tabla 1

Intervalos de la leyenda para cada mapa de estacional, por cada estación, variable (°C) y año

Variable	Estación	Año	Intervalos								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
TMAX	INV	2022	11,25	11,5	11,75	12	12,25	12,5	12,75	13	
TMED	INV	2022	7	7,25	7,5	7,75	8	8,25	8,5	8,75	9
TMIN	INV	2022	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
TMAX	PRI	2022	19,5	19,75	20	20,25	20,5	20,75	21	21,25	21,5
TMED	PRI	2022	14	14,25	14,5	14,75	15	15,25	15,5	15,75	16
TMIN	PRI	2022	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12
TMAX_	VER	2022	33,5	33,75	34	34,25	34,5	34,75	35	35,25	35,5
TMED	VER	2022	26	26,25	26,5	26,75	27	27,25	27,5	27,75	28
TMIN	VER	2022	18	18,5	19	19,5	20	20,5	21	21,5	22
TMAX	OTO	2022	22,6	22,8	23	23,2	23,4	23,6	23,8	24	
TMED	OTO	2022	17	17,25	17,5	17,75	18	18,25	18,5	18,75	19
TMIN	OTO	2022	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15		
TMAX	INV	2023	11,6	11,7	11,8	11,9	12	12,1	12,2	12,3	12,4
TMED	INV	2023	6,25	6,5	6,75	7	7,25	7,5	7,75	8	8,25
TMIN	INV	2023	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
TMAX	PRI	2023	22,25	22,5	22,75	23	23,25	23,5	23,75	24	
TMED	PRI	2023	15,75	16	16,25	16,5	16,75	17	17,25	17,5	17,75
TMIN	PRI	2023	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5
TMAX	VER	2023	31	31,5	31,8	32,1	32,4	32,7	33	33,3	33,6
TMED	VER	2023	24,6	24,8	25	25,2	25,4	25,6	25,8	26	26,4
TMIN	VER	2023	18	18,35	18,7	19,05	19,4	19,75	20,1	20,45	20,8
TMAX	OTO	2023	23,15	23,35	23,55	23,75	23,95	24,15	24,35	24,55	24,75
TMED	OTO	2023	17,15	17,45	17,75	18,05	18,35	18,65	18,95	19,25	19,5
TMIN	OTO	2023	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5
TMAX	INV	2024	13	13,12	13,24	13,36	13,48	13,6	13,72	13,84	13,96
TMED	INV	2024	7,5	7,75	8	8,25	8,5	8,75	9	9,25	9,5
TMIN	INV	2024	3,9	4,2	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7	6	6,4
TMAX	PRI	2024	20,5	20,75	21	21,25	21,5	21,75	22	22,25	22,5
TMED	PRI	2024	14,5	14,75	15	15,25	15,5	15,75	16	16,25	16,5
TMIN	PRI	2024	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5
TMAX	VER	2024	31,2	31,5	31,8	32,1	32,4	32,7	33	33,3	33,8
TMED	VER	2024	24,6	24,8	25	25,2	25,4	25,6	25,8	26	26,4
TMIN	VER	2024	17,9	18,2	18,5	18,8	19,1	19,4	19,7	20	20,4

El análisis estacional de los resultados revela patrones consistentes con la teoría acumulada sobre el comportamiento de las temperaturas urbanas. En particular, la mayor diferencia campo-ciudad en las temperaturas mínimas durante el invierno se ha documentado en otras investigaciones (Deilami et al., 2018; Giridharan & Kolokotroni, 2009) que sugieren que las áreas urbanas tienden a retener el calor durante la noche debido a la capacidad térmica de los materiales de construcción y la falta de vegetación. Este hallazgo tiene implicaciones prácticas, ya que indica la necesidad de incorporar estrategias de mitigación, como la creación de espacios verdes y el uso de materiales de construcción reflectantes, para reducir las temperaturas nocturnas en entornos urbanos.

Además, los resultados evidencian que la vegetación urbana tiene un efecto moderador sobre las temperaturas, apoyando la teoría del “enfriamiento” urbano, que sugiere que las áreas verdes pueden reducir las temperaturas extremas y mejorar la calidad de vida en las ciudades (Marando et al., 2022; Norton et al., 2015; Zöllch et al., 2016). Este enfoque es particularmente relevante para Zaragoza, donde la gestión del espacio verde y la planificación de infraestructura sostenible deben considerarse prioritarias en la formulación de políticas de mitigación. Adicionalmente, la implementación de tecnologías de enfriamiento pasivo y la elección de materiales de construcción que reflejan la radiación solar pueden contribuir a reducir el efecto de la ICU. La combinación de estas estrategias puede no solo mejorar la calidad de vida de los residentes, sino también optimizar el uso de recursos energéticos, lo que es particularmente relevante en un contexto de cambio climático.

El uso de herramientas de visualización como el visor interactivo del Ayuntamiento de Zaragoza se alinea con tendencias recientes en la comunicación científica, donde se enfatiza la importancia de hacer que la información climática sea accesible y comprensible para el público general (Camarillo-Naranjo et al., 2019; Neset et al., 2016). Al proporcionar a los ciudadanos la posibilidad de explorar y comprender las dinámicas térmicas de su entorno, se fomenta una cultura de participación y conciencia ambiental, aspectos fundamentales para el éxito de cualquier estrategia de adaptación al cambio climático. A medida que el cambio climático continúa transformando nuestras ciudades, es imperativo que los investigadores y responsables de políticas trabajen juntos para desarrollar soluciones sostenibles que aborden los

desafíos emergentes y promuevan el bienestar de las comunidades urbanas.

A pesar de los avances en ciencia abierta y en el desarrollo de herramientas para el mapeo climático urbano, todavía son muy pocas las ciudades que disponen de plataformas públicas con acceso libre a cartografías detalladas de temperatura del aire. En muchos casos, los mapas disponibles se basan en la temperatura de la superficie terrestre obtenida por satélite (Mentaschi et al., 2022), que, aunque resulta valiosa para el análisis en grandes áreas metropolitanas, presenta limitaciones en contextos urbanos más compactos, donde la resolución espacial no permite captar adecuadamente las variaciones térmicas locales. En esta línea, iniciativas como el Global Surface UHI Explorer, desarrollado por la Universidad de Yale (Chakraborty & Lee, 2019), utilizan la plataforma interactiva Google Earth Engine para ofrecer una monitorización global de la isla de calor urbana superficial en prácticamente todos los núcleos urbanos del planeta³.

Una de las iniciativas más destacadas en materia de datos abiertos es el proyecto WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools), que, aunque no se centra específicamente en mapas de temperatura del aire, ha logrado importantes avances en la generación de cartografías accesibles de las Zonas Climáticas Locales (LCZ) mediante datos satelitales estandarizados. Esta iniciativa proporciona un marco comparativo útil entre ciudades de distintas regiones, pero todavía existe una gran brecha en la disponibilidad de datos abiertos y mapas detallados de clima urbano, especialmente en países del Sur Global.

Conclusiones

Utilizando la base de datos recopilada por la red de sensores urbanos y posteriormente depurada, se calcularon los valores de temperatura máxima, media y mínima estacional desde el invierno de 2022 hasta la primavera de 2024. Estos datos fueron sometidos a un proceso de interpolación mediante un modelo *cokriging* para generar *rasters* con una resolución de 100 metros. El proceso se inició con la selección de las variables pertinentes para la interpolación. Tras una evaluación exhaustiva, se determinó que el modelo que interpoló los tres primeros componentes principales de las variables MDT, SVF, GLI, NDTI, NBAI y LST, era el más adecuado.

³ Sitio web <https://yceo.users.earthengine.app/view/uhiimap>

Los resultados de la interpolación *cokriging* mostraron que el modelo tenía una buena capacidad para predecir las temperaturas estacionales en la ciudad, con la mayoría de los errores de predicción medios cerca de cero. Sin embargo, se observó una tendencia de ligera sobreestimación en las predicciones, especialmente en la temperatura máxima. También se encontró una mayor variabilidad en las temperaturas extremas en comparación con la temperatura media, lo que destaca la dificultad de interpolar valores abruptos y extremos. El RMSE mostró que los datos presentaron un error menor a 1 °C, lo que indica una precisión aceptable en las predicciones. Además, se notó que los sensores urbanos tenían una mayor capacidad predictiva en comparación con aquellos ubicados en áreas periurbanas o en zonas con una densa cobertura vegetal. Esta variabilidad en las predicciones se debe a que estas últimas zonas estaban más alejadas de la red de sensores y no estaban adecuadamente representadas por la misma.

Al observar los patrones estacionales, se destaca un aumento de temperaturas en el entorno urbano durante el invierno, con diferencias más pronunciadas entre zonas urbanas y rurales. En verano, las temperaturas elevadas predominaban en el valle del Ebro y el efecto de la ICU se difuminaba. En otoño y primavera, las diferencias de temperatura eran menos marcadas en comparación con el comportamiento anual general. La presencia de vegetación y suelo permeable desempeñaba un papel crucial en la modulación de las temperaturas, especialmente durante las estaciones más cálidas y frías. La intensidad de la ICU ha sido más pronunciada durante el invierno para las temperaturas mínimas, lo que indica que el fenómeno de inversión térmica es un factor determinante en la dinámica térmica de la ciudad. Estas inversiones, que atrapan el aire frío cerca de la superficie, permiten que las áreas urbanizadas mantengan temperaturas más elevadas en comparación con su entorno rural.

La integración de los resultados en un visor interactivo proporciona una plataforma valiosa para la difusión de información sobre el clima urbano y su impacto en la calidad de vida. La posibilidad de acceder a datos espaciales detallados permite a los ciudadanos, investigadores y responsables de la toma de decisiones comprender mejor las dinámicas térmicas de la ciudad. Este tipo de visualización es fundamental para impulsar la participación ciudadana en la gestión ambiental y la planificación urbana, permitiendo a los ciudadanos tomar decisiones informadas sobre su entorno.

La transparencia en la comunicación de datos climáticos es crucial para sensibilizar a la población sobre los efectos

del cambio climático y fomentar la adopción de medidas de adaptación. En este contexto, la generación y difusión de cartografías abiertas, libre acceso, a través de un visor público representa un avance significativo hacia una gestión climática urbana más inclusiva y participativa.

Al poner estos mapas a disposición de toda la ciudadanía, se democratiza el acceso a la información, se promueve el diálogo entre la sociedad y los responsables de las políticas públicas, y se refuerza la capacidad de las comunidades para tomar decisiones informadas. Además, esta apertura permite evaluar cómo las políticas urbanas actuales se alinean con los patrones térmicos observados y su efectividad en la mitigación de los efectos del cambio climático. La interacción entre el desarrollo urbano y el cambio climático debe seguir siendo objeto de investigación para identificar sinergias, corregir desequilibrios y avanzar hacia ciudades más resilientes y sostenibles.

En resumen, esta investigación ha proporcionado un análisis exhaustivo del clima urbano en Zaragoza, destacando la complejidad de la ICU y la variabilidad térmica a lo largo del año. Los hallazgos resaltan la importancia de la infraestructura urbana y la vegetación en la dinámica térmica, así como la necesidad de integrar estrategias de mitigación en la planificación urbana.

A medida que las ciudades continúan creciendo y enfrentando los desafíos del cambio climático, es fundamental adoptar enfoques basados en datos que informen las decisiones de diseño y gestión, para promover comunidades más resilientes y sostenibles. La interacción entre la ciencia, la política y la participación ciudadana será esencial para construir un futuro más adaptado a las condiciones climáticas cambiantes y garantizar la calidad de vida en entornos urbanos ante el panorama actual y futuro de triple crisis planetaria.

Financiamiento

Este trabajo ha contado con el apoyo de la beca de investigación para la contratación de personal investigador predoctoral en formación para el periodo 2019-2023 (Orden IIU/796/2019), del Departamento de Ciencia, Universidad y Sociedad del Conocimiento de la Diputación General de Aragón.

Declaración de autoría

Samuel Barrao Simorte: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Software, Validación, Visualización, Redacción – borrador original y Redacción – revisión y edición.

Roberto Serrano Notivoli: Conceptualización, Curación de datos, Adquisición de fondos, Investigación, Software, Supervisión y Redacción – revisión y edición.

Miguel Ángel Saz Sánchez: Conceptualización, Adquisición de fondos, Investigación, Supervisión y Redacción – revisión y edición.

José María Cuadrat Prats: Conceptualización, Adquisición de fondos, Investigación, Administración del proyecto, Recursos, Supervisión, Visualización y Redacción – revisión y edición.

Agradecimientos

Los autores cuentan con el apoyo del Gobierno de Aragón a través del “Programa de Grupos de Investigación” (grupo S74_23R, “Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales”) y pertenecen al Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA).

Referencias bibliográficas

- Alcoforado, M. J., Lopes, A., Alves, E., & Canário, P. (2014). Lisbon Heat Island. *Finisterra*, 49(98), 61-80. <https://doi.org/10.18055/finis6456>
- Amorim, M. C. de C. T., & Dubreuil, V. (2017). Intensity of urban heat islands in tropical and temperate climates. *Climate*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/cli5040091>
- Ayuntamiento de Zaragoza. (s.f.). *Islas de calor*. <https://www.zaragoza.es/sede/portal/idezar/mapa/islas-de-calor/>
- Barrao, S., Serrano-Notivoli, R., Cuadrat, J. M., Tejedor, E., & Saz, M. Á. (2022). Characterization of the UHI in Zaragoza (Spain) using a quality-controlled hourly sensor-based urban climate network. *Urban Climate*, 44, 101207. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101207>
- Bassett, R., Cai, X.-M., Chapman, L., Heaviside, C., Thornes, J. E., Muller, C. L., Young, D. T., & Warren, E. L. (2016). Observations of urban heat island advection from a high-density monitoring network. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(699), 2434-2441. <https://doi.org/10.1002/qj.2836>
- Camarillo-Naranjo, J. M., Álvarez-Francoso, J. I., Limones-Rodríguez, N., Pita-López, M. F., & Aguilar-Alba, M. (2019). The global climate monitor system: from climate data-handling to knowledge dissemination. *International Journal of Digital Earth*, 12(4), 394-414. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1429502>
- Cardesín Díaz, J. M., & Araujo, J. M. (2017). Historic Urbanization Process in Spain (1746–2013). *Journal of Urban History*, 43(1), 33-52. <https://doi.org/10.1177/0096144215583481>
- Chakraborty, T., & Lee, X. (2019). A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 269-280. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.015>
- Chapman, L., Muller, C. L., Young, D. T., Warren, E. L., Grimmond, C. S. B., Cai, X.-M., & Ferranti, E. J. S. (2015). The birmingham urban climate laboratory: An open meteorological test bed and challenges of the Smart city. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(9), 1545-1560. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00193.1>
- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., & He, Z. (2012). Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach. *International Journal of Climatology*, 32(1), 121-136. <https://doi.org/10.1002/joc.2243>
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E. M., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991-2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- 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 de Geografía de La Universidad Complutense*, 13, 127-138. <https://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/AGUC9393110127A>
- Cuadrat, 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. In *Ayuntamiento de Zaragoza. Agenda 21*. <https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/clima.pdf>
- Cuadrat, J. M., Serrano-Notivoli, R., Barrao, S., Saz, M. Á., & Tejedor, E. (2022). Variabilidad temporal de la isla de calor urbana de la ciudad de Zaragoza (España). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 48(1), 97-110. <https://doi.org/10.18172/cig.5022>

- Cuadrat, J. M., & Vicente-Serrano, S. (2003). Surface wind direction influence on spatial patterns of urban heat island in Zaragoza (Spain). *Geophysical Research Abstracts*, 5(02509).
- Deilami, K., Kamruzzaman, M., & Liu, Y. (2018). Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67, 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.009>
- Dirksen, M., Ronda, R. J., Theeuwes, N. E., & Pagani, G. A. (2019). Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate*, 30, 100498. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498>
- Dobrovolný, P., & Krahula, L. (2015). The spatial variability of air temperature and nocturnal urban heat island intensity in the city of Brno, Czech Republic. *Moravian Geographical Reports*, 23(3), 8-16. <https://doi.org/10.1515/MGR-2015-0013>
- Gasparrini, A., Guo, Y., Hashizume, M., Lavigne, E., Zanobetti, A., Schwartz, J., Tobías, A., Tong, S., Rocklöv, J., Forsberg, B., Leone, M., De Sario, M., Bell, M. L., Guo, Y.-L., Wu, C., Kan, H., Yi, S.-M., De Sousa Zanotti Staglilio Coelho, M., Saldíva, P. H. N., ... Armstrong, B. (2015). Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *The Lancet*, 386(9991), 369-375. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
- Giridharan, R., & Kolokotroni, M. (2009). Urban heat island characteristics in London during winter. *Solar Energy*, 83(9), 1668-1682. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.06.007>
- Hiemstra, P. H., Pebesma, E. J., Twenhöfel, C. J. W., & Heuvelink, G. B. M. (2009). Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch radioactivity monitoring network. *Computers & Geosciences*, 35(8), 1711-1721. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.10.011>
- Hu, X.-M., Xue, M., Klein, P. M., Illston, B. G., & Chen, S. (2016). Analysis of Urban Effects in Oklahoma City using a Dense Surface Observing Network. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(3), 723-741. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0206.1>
- Instituto Geográfico Nacional. (2022). *Cifras oficiales de población de los municipios españoles*. <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2907>
- Lacaux, J. P., Tourre, Y. M., Vignalles, C., Ndione, J. A., & Lafaye, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106(1), 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>
- Li, J., & Heap, A. D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, 53, 173-189. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- Louhaichi, M., Borman, M. M., & Johnson, D. E. (2001). Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. *Geocarto International*, 16(1), 65-70. <https://doi.org/10.1080/10106040108542184>
- Marando, F., Heris, M. P., Zulian, G., Udías, A., Mentaschi, L., Chrysoulakis, N., Parastatidis, D., & Maes, J. (2022). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103564. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103564>
- Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., & Voogt, J. (2020). Urban Climates and Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources*, 45(1), 411-444. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623>
- Mentaschi, L., Duveiller, G., Zulian, G., Corbane, C., Pesaresi, M., Maes, J., ... & Feyen, L. (2022). Global long-term mapping of surface temperature shows intensified intra-city urban heat island extremes. *Global Environmental Change*, 72, 102441. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102441>
- Moreno-Monroy, A. I., Schiavina, M., & Veneri, P. (2021). Metropolitan areas in the world. Delineation and population trends. *Journal of Urban Economics*, 125, 103242. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2020.103242>
- Neset, T.-S., Opach, T., Lion, P., Lilja, A., & Johansson, J. (2016). Map-Based Web Tools Supporting Climate Change Adaptation. *The Professional Geographer*, 68(1), 103-114. <https://doi.org/10.1080/00330124.2015.1033670>

- Nikoloudakis, N., Stagakis, S., Mitraka, Z., Kamarianakis, Y., & Chrysoulakis, N. (2020). Spatial interpolation of urban air temperatures using satellite-derived predictors. *Theoretical and Applied Climatology*, 141(1-2), 657-672. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03230-3>
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127-138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>
- Oke, T. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Pietrapertosa, F., Olazabal, M., Simoes, S. G., Salvia, M., Fokaides, P. A., Ioannou, B. I., Viguié, V., Spyridaki, N.-A., De Gregorio-Hurtado, S., Geneletti, D., Heidrich, O., Tardieu, L., Feliu, E., Rižnar, K., Matosović, M., Balzan, M. V., Flamos, A., Šel, N. B., & Reckien, D. (2023). *Adaptation to climate change in cities of Mediterranean Europe*. *Cities*, 140, 104452. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104452>
- Quintana-Talvac, C., Corvacho-Ganahin, O., Smith, P., Sarricolea, P., Prieto, M., & Meseguer-Ruiz, O. (2021). Urban Heat Islands and Vulnerable Populations in a Mid-Size Coastal City in an Arid Environment. *Atmosphere*, 12(7), 917. <https://doi.org/10.3390/atmos12070917>
- Reckien, D., Salvia, M., Heidrich, O., Church, J. M., Pietrapertosa, F., De Gregorio-Hurtado, S., D'Alonzo, V., Foley, A., Simoes, S. G., Krkoška Lorencová, E., Orru, H., Orru, K., Wejs, A., Flacke, J., Olazabal, M., Geneletti, D., Feliu, E., Vasilie, S., Nador, C., ... Dawson, R. (2018). How are cities planning to respond to climate change? Assessment of local climate plans from 885 cities in the EU-28. *Journal of Cleaner Production*, 191, 207-219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.220>
- 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>
- Rozenblat, C., & Cicille, P. (2004). Les villes européennes: analyse comparative. *On the W@terfront. Public Art. Urban Design. Civic Participation. Urban Regeneration*, 0(5), 1-94. https://doc.rero.ch/record/5907/files/Villes_Europeennes.pdf
- Salamanca, F., Martilli, A., & Yagüe, C. (2012). 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. <https://doi.org/10.1002/joc.3398>
- Salvia, M., Olazabal, M., Fokaides, P. A., Tardieu, L., Simoes, S. G., Geneletti, D., De Gregorio Hurtado, S., Viguié, V., Spyridaki, N.-A., Pietrapertosa, F., Ioannou, B. I., Matosović, M., Flamos, A., Balzan, M. V., Feliu, E., Rižnar, K., Šel, N. B., Heidrich, O., & Reckien, D. (2021). Climate mitigation in the Mediterranean Europe: An assessment of regional and city-level plans. *Journal of Environmental Management*, 295, 113146. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113146>
- Sarricolea, P., Smith, P., Romero-Aravena, H., Serrano-Notivoli, R., Fuentealba, M., & Meseguer-Ruiz, O. (2022). Socioeconomic inequalities and the surface heat island distribution in Santiago, Chile. *Science of The Total Environment*, 832, 155152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155152>
- Saz, M. Á., Vicente-Serrano, S., Serrano, J., & Prats, C. (2003). Spatial patterns estimation of urban heat island of Zaragoza (Spain) using GIS. *5th International Conference on Urban Climate*, 4.
- Šećerov, I. B., Savić, S. M., Milošević, D. D., Arsenović, D. M., Dolinaj, D. M., & Popov, S. B. (2019). Progressing urban climate research using a high-density monitoring network system. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(2), 89. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7210-0>
- Serrano-Notivoli, R., Lemus-Canovas, M., Barrao, S., Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, O., & Tejedor, E. (2022). Heat and cold waves in mainland Spain: Origins, characteristics, and trends. *Weather and Climate Extremes*, 37, 100471. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100471>

- Shi, Y., Katschner, L., & Ng, E. (2018). Modelling the fine-scale spatiotemporal pattern of urban heat island effect using land use regression approach in a megacity. *Science of The Total Environment*, 618, 891-904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.252>
- Smith Guerra, P., & Henríquez Ruiz, C. (2021). Propuesta de un indicador para evaluar la calidad climática urbana: estudio de caso en una ciudad media mediterránea chilena. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 30(1), 144-157. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v30n1.79653>
- Smith Guerra, P., Peralta Trigo, O., Sarricolea, P., Thomas Cabrera, F., & Meseguer-Ruiz, O. (2023). Climate-sensitive planning. Opportunities through the study of LCZs in Chile. *Building and Environment*, 242, 110444. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110444>
- Smoliak, B. V., Snyder, P. K., Twine, T. E., Mykleby, P. M., & Hertel, W. F. (2015). Dense Network Observations of the Twin Cities Canopy-Layer Urban Heat Island. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(9), 1899-1917. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0239.1>
- 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. <https://doi.org/10.1002/joc.2141>
- Stewart, I. D., & Oke, T. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Straub, A., Berger, K., Breitner, S., Cyrys, J., Geruschkat, U., Jacobbeit, J., Kühlbach, B., Kusch, T., Philipp, A., Schneider, A., Umminger, R., Wolf, K., & Beck, C. (2019). Statistical modelling of spatial patterns of the urban heat island intensity in the urban environment of Augsburg, Germany. *Urban Climate*, 29, 100491. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100491>
- Svensson, M. K. (2004). Sky view factor analysis – implications for urban air temperature differences. *Meteorological Applications*, 11(3), 201-211. <https://doi.org/10.1017/S1350482704001288>
- Vicente-Serrano, S., Cuadrat, J. M., & Saz, M. Á. (2005). Spatial patterns of the urban heat island in Zaragoza (Spain). *Climate Research*, 30(1), 61-69. <https://doi.org/10.3354/cr030061>
- Vicente-Serrano, S., Cuadrat, J. M., & Saz, M. Á. (2003). Topography and vegetation cover influence on urban heat island of Zaragoza (Spain). *5th International Conference on Urban Climate*, 4.
- Voogt, J., & Oke, T. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370-384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Waqr, M. M., Mirza, J. F., Mumtaz, R., & Hussain, E. (2012). Development of new indices for extraction of built-up area and bare soil from landsat. *Open Access Scientific Reports*, 1(1). <https://www.omicsonline.org/scientific-reports/JGRS-SR136.pdf>
- Warren, E. L., Young, D. T., Chapman, L., Muller, C. L., Grimmond, C. S. B., & Cai, X.-M. (2016). The Birmingham Urban Climate Laboratory-A high density, urban meteorological dataset, from 2012-2014. *Scientific Data*, 3, 1-8. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.38>
- Zhang, K., Oswald, E. M., Brown, D. G., Brines, S. J., Gronlund, C. J., White-Newsome, J. L., Rood, R. B., & O'Neill, M. S. (2011). Geostatistical exploration of spatial variation of summertime temperatures in the Detroit metropolitan region. *Environmental Research*, 111(8), 1046-1053. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2011.08.012>
- Zölch, T., Maderspacher, J., Wamsler, C., & Pauleit, S. (2016). Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 305-316. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.09.011>