

Samuel Barrao Simorte

# Clima urbano de Zaragoza. Estudio espacio-temporal a través de una red de sensores

Director/es

Saz Sánchez, Miguel Ángel  
Cuadrat Prats, José María  
Serrano Notivoli, Roberto

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Universidad de Zaragoza  
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606



**Universidad**  
Zaragoza

Tesis Doctoral

# CLIMA URBANO DE ZARAGOZA. ESTUDIO ESPACIO-TEMPORAL A TRAVÉS DE UNA RED DE SENSORES

Autor

**Samuel Barrao Simorte**

Director/es

Saz Sánchez, Miguel Ángel  
Cuadrat Prats, José María  
Serrano Notivoli, Roberto

**UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**  
**Escuela de Doctorado**

Programa de Doctorado en Ordenación del Territorio y Medio Ambiente

2024





**Universidad**  
Zaragoza

## Tesis Doctoral

Clima urbano de Zaragoza.  
Estudio espacio-temporal a través de una red  
de sensores.

Autor

Samuel Barrao Simorte

Directores

José María Cuadrat Prats  
Miguel Ángel Saz Sánchez  
Roberto Serrano Notivoli

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio  
Facultad de Filosofía y Letras  
2024



*“Quizá la arquitectura no sea más que el arte de construir climas “que corrigen artificialmente aquello que la naturaleza presenta en su camino”, como sostenía Vitruvio”*  
Philippe Rahm



# Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de alguna manera a la realización de esta tesis. Aunque pueda parecer un trabajo en solitario, es el resultado del esfuerzo de todo un equipo.

En primer lugar, agradezco profundamente a mis directores de tesis por su orientación experta, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proceso. Quiero extender mi gratitud al Dr. José María Cuadrat Prats por su confianza desde el inicio, al Dr. Miguel Ángel Saz Sánchez por sus valiosas enseñanzas y consejos, y al Dr. Roberto Serrano Notivoli por su inestimable contribución a este proyecto.

Mi reconocimiento también se extiende a los profesores del *Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio* de la *Universidad de Zaragoza*. Todo lo que sé sobre geografía lo debo a lo que he aprendido de cada uno de ellos. Agradezco profundamente la oportunidad de formar parte del departamento y agradezco especialmente a los miembros del grupo de *Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales*, en especial a los Drs. Luis Alberto Longares, Martín de Luis Arrillaga y Alfredo Ollero Ojeda, sin su generosa contribución, este trabajo no habría sido posible. Al Dr. Francisco Pellicer Corellano por brindarme una visión única de la geografía y la ordenación que va más allá de lo que se encuentra en los libros.

También mi agradecimiento al entonces *Departamento de Innovación, Investigación y Universidad del Gobierno de Aragón*, por financiar mi contrato como investigador predoctoral, el cual marcó el inicio de todo este proyecto. Igualmente, quiero reconocer al *Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA)* por su apoyo y financiación, que ha sido fundamental en todo el proceso de investigación.

Además, quiero agradecer a mis compañeros “becarios”, tanto a aquellos que ya han concluido su camino como a los que aún están en él. Su entusiasmo, esfuerzo y dedicación, incluso desde el sótano, fueron un ejemplo fundamental para el éxito de este proyecto. Especialmente a Raúl, cuya compañía y apoyo desde el principio fueron invaluable, y a María, quien me enseñó que, a pesar de los desafíos, siempre se puede avanzar con una sonrisa.

Por último, siempre estaré agradecido a mi familia, a Lola y a todos mis seres queridos por su apoyo incondicional, comprensión y ánimos durante los momentos difíciles. Su aliento me ha impulsado a seguir adelante incluso cuando los desafíos parecían abrumadores. Todo lo que he conseguido es gracias a ellos.



# Resumen

En la actualidad, la relevancia de los estudios de climatología urbana está en aumento, impulsada por el vertiginoso crecimiento de las áreas urbanas, el incremento de la población que las habita y los desafíos inherentes al cambio climático. Es esencial comprender y mitigar los impactos climáticos en los entornos urbanos, lo que requiere disponer de datos precisos y detallados. Sin embargo, los métodos tradicionales de recolección de datos frecuentemente no ofrecen la resolución espacial necesaria para capturar la variabilidad climática a nivel local. En este contexto, la teledetección emerge como una herramienta prometedora, aunque su capacidad para proporcionar resoluciones adecuadas aún tiene limitaciones. Por consiguiente, la instalación de redes urbanas de sensores se postula como una solución clave, al permitir la obtención de datos climáticos con alta resolución espacial y temporal. Zaragoza ha implementado una red de 21 sensores desde marzo de 2015, registrando información horaria de temperatura y humedad en los espacios más característicos de la ciudad y sus alrededores.

Esta tesis propone, en primer lugar, una metodología exhaustiva de control de calidad de la red de sensores urbanos. El objetivo es obtener una base de datos climática depurada y continua para la ciudad, asegurando la coherencia y fiabilidad de los datos recolectados. Para ello, se establecen criterios rigurosos: 1) se establecen límites entre  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  basados en el historial climático de la ciudad. Cualquier valor fuera de estos límites se elimina de la base de datos; 2) se comparan las lecturas de los 21 observatorios simultáneamente y se eliminan los valores que difieran más allá de  $\pm 3$  desviaciones estándar de la media; 3) se detectan y revisan las repeticiones automáticas, descartando las provocadas por situaciones de niebla; 4) se busca cambios significativos en las temperaturas horarias consecutivas, estableciendo un umbral de  $\pm 5$  de diferencia entre una hora y la anterior. Se utiliza la evaluación sinóptica para relacionar datos sospechosos con eventos atmosféricos y se eliminan las observaciones sospechosas sin explicación meteorológica. El control de calidad llevado a cabo permitió procesar un total de 2.665.154 observaciones hasta diciembre de 2022. Se observó que un 1,6 % de las observaciones de temperatura y un 1,3 % de las observaciones de humedad fueron eliminadas durante este proceso de control. Finalmente, para evitar lagunas en la información y rellenar los valores incorrectos eliminados, se procedió a reconstruir las bases de datos depuradas.

En segundo lugar, se realizó la interpolación de la temperatura del aire máxima, media y mínima diaria utilizando un modelo *cokriging* con las bases de datos climáticas obtenidas. Este modelo, implementado mediante el paquete *automap* en R, integró covariables derivadas de imágenes satelitales (GLI, NDTI, NBAI y LST) a escala mensual, junto con variables territoriales (MDT y SVF). En lugar de emplear las variables brutas mensuales, se utilizaron los tres primeros componentes principales para cada mes del año. Como resultado de este proceso, se generaron 8.562 *rasters* de la temperatura urbana de Zaragoza, brindando una representación espacial detallada y precisa de la temperatura en la ciudad. La validación del modelo demostró su robustez para predecir las temperaturas diarias, con la mayoría de los errores medios cercanos a cero. No obstante, se observó una ligera sobreestimación en las predicciones, especialmente en la temperatura máxima. Se identificó una mayor variabilidad en las temperaturas extremas, lo cual puede plantear desafíos en la modelación de variables térmicas. A pesar de que el RMSE reveló valores más altos, la mayoría de los datos presentaron un error inferior a  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , indicando una precisión razonable en las predicciones. En relación con la evolución temporal del error, se notó un aumento durante los meses de invierno debido a la menor disponibilidad de imágenes y a la complejidad climática asociada

a esta temporada. Además, se observó un sesgo temporal en los primeros años del análisis, atribuible a la falta de datos originales. A pesar de estos desafíos, la consistencia en el rendimiento del modelo se mantuvo a lo largo del tiempo. Los resultados residuales revelaron que los sensores más recientes presentaban mayores errores, sugiriendo una influencia de la falta de datos originales en la precisión de las predicciones. A pesar de estas limitaciones, el modelo de interpolación *cokriging* demostró consistencia y capacidad para adaptarse a las condiciones climáticas urbanas en Zaragoza, lo que subraya su utilidad en la evaluación y predicción del clima en entornos urbanos.

En tercer lugar, una vez obtenidos los *rasters* de temperatura urbana, se procedió a realizar una caracterización climática exhaustiva, revelando diversos patrones sobre su comportamiento térmico en distintas escalas temporales. En los mapas anuales, se observó que el sector urbano es la zona más cálida, mientras que las áreas elevadas al noroeste y al sur muestran temperaturas más frescas. Las áreas de cultivo a lo largo de los ríos y las zonas verdes urbanas también presentan temperaturas más bajas, evidenciando el impacto de la vegetación en la temperatura local. La distribución espacial de la temperatura varió según la variable térmica analizada. Las temperaturas mínimas se concentraron mayormente en el centro urbano y disminuyeron hacia áreas menos densamente construidas, reflejando el efecto de la isla de calor urbano. Por otro lado, las temperaturas máximas mostraron un desplazamiento hacia el sureste, debido a la circulación regional predominante en la zona. En términos estacionales, se destacó un aumento de temperaturas en el entorno urbano durante el invierno, con diferencias más marcadas entre zonas urbanas y rurales. En verano, las temperaturas elevadas predominaron en el valle del Ebro, aunque el efecto de la isla de calor se atenuó. Durante otoño y primavera, las diferencias de temperatura fueron menos pronunciadas. A nivel mensual, se evidenciaron dos tendencias claras en la distribución de la temperatura: una más cálida de abril a septiembre y otra más fría de octubre a febrero. Los mapas diarios revelaron cómo los fenómenos atmosféricos impactaron en la temperatura urbana. Durante nieblas y nevadas, las diferencias entre áreas urbanas y rurales disminuyen. El flujo del viento y la precipitación también modifican la distribución de la temperatura según la intensidad y la dirección. Durante las olas de calor, la intensidad se mantiene o incrementa en ciertas áreas. El uso de un modelo de interpolación en una red urbana de sensores proporciona valiosas herramientas para caracterizar el comportamiento climático de una ciudad. Sin embargo, es importante tener en cuenta las limitaciones relacionadas con la calidad y cantidad de datos disponibles.

Por último, se llevó a cabo la clasificación de las zonas climáticas locales (LCZ) en para completar la caracterización climática. Este proceso implicó enfrentar desafíos como la disponibilidad de datos y la adaptación de metodologías existentes. Tanto los enfoques basados en teledetección como en SIG presentaban ventajas y limitaciones, por lo que seleccionar el método adecuado fue crucial para garantizar resultados precisos. Con el fin de obtener un mayor nivel de detalle, se realizó una modificación en un modelo basado en SIG, incorporando información del MDS obtenido a partir de datos LIDAR. Esta mejora permitió aumentar tanto la resolución como la precisión de la clasificación, aunque es importante destacar que este modelo no es extrapolable a otras ciudades sin un proceso de validación específico. La caracterización climática urbana basada en las LCZ obtenida proporciona una comprensión detallada de cómo influyen las características del entorno urbano en el microclima local. La clasificación de LCZ ofreció información detallada que resulta útil para la planificación urbana y el desarrollo de estrategias de adaptación al cambio climático. Además, permitió identificar áreas específicas que podrían beneficiarse de intervenciones de diseño urbano destinadas a mitigar los efectos del calor urbano y mejorar la calidad de vida de los habitantes.

# Abstract

Currently, the relevance of urban climatology studies is increasing, driven by the rapid growth of urban areas, the increasing population inhabiting them, and the inherent challenges of climate change. Understanding and mitigating climatic impacts in urban environments is essential, requiring precise and detailed data. However, traditional data collection methods often lack the necessary spatial resolution to capture local climate variability. In this context, remote sensing emerges as a promising tool, although its ability to provide adequate resolutions still has limitations. Therefore, the installation of urban sensor networks is proposed as a key solution, allowing for the acquisition of climate data with high spatial and temporal resolution. Zaragoza has implemented a network of 21 sensors since March 2015, recording hourly temperature and humidity information in the city's most characteristic spaces and surroundings.

Firstly, this thesis proposes a comprehensive methodology for quality control of the urban sensor network. The objective is to obtain a refined and continuous climate database for the city, ensuring the coherence and reliability of the collected data. To achieve this, rigorous criteria are established: 1) temperature limits between  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  based on the city's climatic history. Any value outside these limits is removed from the database; 2) simultaneous readings of the 21 observatories are compared, and values differing beyond  $\pm 3$  standard deviations from the mean are eliminated; 3) automatic repetitions are detected and reviewed, discarding those caused by fog situations; 4) significant changes in consecutive hourly temperatures are sought, establishing a threshold of  $\pm 5$  difference between one hour and the previous one. Synoptic evaluation is used to relate suspicious data to atmospheric events, and suspicious observations without meteorological explanation are eliminated. The quality control process allowed processing a total of 2,665,154 observations until December 2022. It was observed that 1.6% of temperature observations and 1.3% of humidity observations were removed during this control process. Finally, to avoid gaps in the information and fill in the incorrect values removed, the refined databases were reconstructed.

Secondly, interpolation of maximum, mean, and minimum daily air temperature was performed using a *cokriging* model with the obtained climate databases. This model, implemented using the *automap* package in R, integrated covariates derived from satellite images (GLI, NDTI, NBAI, and LST) on a monthly scale, along with territorial variables (MDT and SVF). Instead of using raw monthly variables, the first three principal components for each month of the year were used. As a result of this process, 8,562 urban temperature rasters of Zaragoza were generated, providing a detailed and accurate spatial representation of temperature in the city. Model validation demonstrated its robustness in predicting daily temperatures, with most mean errors close to zero. However, a slight overestimation in predictions was observed, especially in maximum temperature. Greater variability in extreme temperatures was identified, posing challenges in thermal variable modeling. Although RMSE revealed higher values, most data showed errors less than  $1^{\circ}\text{C}$ , indicating reasonable prediction accuracy. Regarding the temporal evolution of error, an increase was noted during winter months due to lower availability of images and the climatic complexity associated with this season. Additionally, a temporal bias was observed in the initial years of analysis, attributable to the lack of original data. Despite these challenges, consistency in model performance was maintained over time. Residual results revealed that newer sensors had higher errors, suggesting an influence of the lack of original data on prediction accuracy. Despite these limitations, the cokriging interpolation model

demonstrated consistency and the ability to adapt to urban climatic conditions in Zaragoza, highlighting its utility in urban climate assessment and prediction.

Thirdly, once the urban temperature rasters were obtained, a comprehensive climatic characterization was conducted, revealing various patterns of thermal behavior at different temporal scales. In annual maps, the urban sector was observed as the warmest zone, while elevated areas to the northwest and south showed cooler temperatures. Cultivated areas along rivers and urban green spaces also presented lower temperatures, evidencing the impact of vegetation on local temperature. The spatial distribution of temperature varied depending on the analyzed thermal variable. Minimum temperatures were mostly concentrated in the urban center and decreased towards less densely built areas, reflecting the urban heat island effect. On the other hand, maximum temperatures showed a shift towards the southeast due to the predominant regional circulation in the area. In seasonal terms, an increase in temperatures in the urban environment during winter was highlighted, with more marked differences between urban and rural areas. In summer, high temperatures predominated in the Ebro Valley, although the urban heat island effect was attenuated. During autumn and spring, temperature differences were less pronounced. At the monthly level, two clear trends in temperature distribution were evident: a warmer one from April to September and a colder one from October to February. Daily maps revealed how atmospheric phenomena impacted urban temperature. During fog and snowfall, differences between urban and rural areas decreased. Wind flow and precipitation also modified temperature distribution according to intensity and direction. During heatwaves, intensity remained or increased in certain areas. The use of an interpolation model in an urban sensor network provides valuable tools to characterize the climatic behavior of a city. However, it is important to consider limitations related to the quality and quantity of available data.

Lastly, local climate zone (LCZ) classification was carried out to complete the climatic characterization. This process involved facing challenges such as data availability and adapting existing methodologies. Both remote sensing and GIS-based approaches had advantages and limitations, so selecting the appropriate method was crucial to ensure accurate results. In order to obtain a higher level of detail, a modification was made to a GIS-based model, incorporating information from the DSM obtained from LIDAR data. This improvement allowed increasing both resolution and classification accuracy, although it is important to note that this model is not extrapolatable to other cities without specific validation. The urban climatic characterization based on LCZs provides a detailed understanding of how urban environment characteristics influence local microclimate. LCZ classification offered detailed information useful for urban planning and the development of climate change adaptation strategies. Additionally, it allowed identifying specific areas that could benefit from urban design interventions aimed at mitigating urban heat effects and improving the quality of life for inhabitants.

# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Clima urbano .....	1
1.1.1. Definición y evolución científica.....	1
1.1.2. Características del clima de las ciudades .....	4
1.1.3. La isla de calor urbano (ICU) .....	6
1.1.4. Necesidades para el estudio del clima urbano .....	8
1.1.5. Clima urbano y otras disciplinas.....	10
1.2. Los estudios sobre el clima urbano en España.....	11
1.2.1. Evolución de la climatología urbana en España.....	11
1.2.2. Características de los estudios de clima urbano en España .....	15
1.2.3. La climatología urbana actual en España.....	21
1.3. Los estudios de climatología urbana en Zaragoza.....	22
1.4. Objetivos e hipótesis.....	27
1.5. Estructura de la tesis .....	29
<b>2. CONTROL DE CALIDAD</b> .....	30
2.1. La red de sensores termohigrométricos de Zaragoza.....	30
2.1.1. Características de los sensores .....	30
2.1.2. Periodo de estudio.....	33
2.1.3. Localización y caracterización de los espacios urbanos de la red .....	33
2.2. Metodología.....	41
2.2.1. Razones para llevar a cabo un control de calidad exhaustivo .....	42
2.2.2. Síntesis del control de calidad.....	43
2.2.3. Criterios para la eliminación de observaciones no fiables.....	45
2.2.3.1. Detección de outliers genéricos .....	47
2.2.3.2. Detección de outliers específicos.....	49
2.2.3.3. Detección de valores repetidos anómalos .....	50
2.2.3.4. Detección de anomalías en la variación horaria o saltos.....	50
2.2.3.5. Análisis de situaciones sinópticas.....	51
2.3. Resultados del control de calidad.....	51
2.3.1.1. Detección de outliers genéricos .....	55
2.3.1.2. Detección de outliers específicos.....	55
2.3.1.3. Detección de valores repetidos anómalos .....	57
2.3.1.4. Detección de anomalías en la variación horaria o saltos.....	57
2.3.1.5. Análisis de situaciones sinópticas.....	58
2.4. Discusión .....	63
<b>3. INTERPOLACIÓN DE LA TEMPERATURA URBANA</b> .....	66

3.1.	Interpolación espacial en entorno urbano.....	67
3.2.	Cokriging para la espacialización de la temperatura.....	69
3.3.	Selección y creación de covariables .....	70
3.3.1.	VARIABLES SATELITALES.....	70
3.3.1.1.	Vegetación .....	73
3.3.1.2.	Masas de agua y humedad.....	74
3.3.1.3.	Suelo construido.....	76
3.3.1.4.	Temperatura de superficie (LST).....	78
3.3.2.	VARIABLES TERRITORIALES .....	79
3.3.2.1.	Modelo Digital del Terreno (MDT).....	79
3.3.2.2.	Modelo Digital de Superficies (MDS).....	80
3.3.2.3.	Altura de la edificación.....	80
3.3.2.4.	Pendiente.....	80
3.3.2.5.	Orientación.....	80
3.3.2.6.	Radiación.....	80
3.3.2.7.	Sky view factor.....	80
3.3.3.	Selección de variables.....	81
3.3.4.	Análisis de Componentes Principales (PCA).....	84
3.4.	Creación de modelo para la interpolación estacional .....	86
3.5.	Validación del modelo para la interpolación estacional .....	95
3.6.	Creación de un modelo para la interpolación diaria .....	103
3.7.	Validación del modelo para la interpolación diaria.....	110
3.8.	Discusión .....	124
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA TEMPERATURA URBANA.....</b>	<b>126</b>
4.1.	Variabilidad espacial y temporal climática en la ciudad.....	126
4.1.1.	Temperatura anual.....	126
4.1.2.	Temperatura estacional.....	139
4.1.3.	Temperatura mensual .....	144
4.1.4.	Temperatura diaria .....	151
4.1.4.1.	Niebla .....	151
4.1.4.2.	Nieve.....	155
4.1.4.3.	Viento dirección noroeste (Cierzo) .....	158
4.1.4.4.	Viento dirección sureste (Bochorno) .....	162
4.1.4.5.	Borrasca invernal .....	165
4.1.4.6.	Gota fría o DANA.....	168
4.1.4.7.	Ola de calor .....	173
4.1.4.8.	Anticiclón invernal .....	177
4.2.	Isla de calor urbano.....	180

4.3.	Discusión .....	190
<b>5.</b>	<b>ZONAS CLIMÁTICAS LOCALES EN ZARAGOZA .....</b>	<b>193</b>
5.1.	LCZ como herramienta de estudio del clima urbano y la planificación .....	193
5.2.	Desafíos en la clasificación y cartografía de LCZ .....	195
5.2.1.	Cartografía de LCZ basada en teledetección .....	196
5.2.2.	Cartografía de LCZ basada en GIS .....	200
5.2.3.	Propuesta metodológica de nuevo modelo mixto.....	203
5.3.	Caracterización climática urbana en base a la distribución de LCZ.....	207
5.4.	Discusión .....	212
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>213</b>
6.1.	Conclusiones .....	213
6.2.	Aportaciones de la tesis y futuras líneas de investigación .....	220
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>223</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>261</b>
I.	BASE DE DATOS DE PUBLICACIONES SOBRE CLIMATOLOGÍA URBANA ESPAÑOLA .....	261
II.	MAPA DE ERROR DE LA INTERPOLACIÓN MENSUAL .....	286
a.	Mapa mensual de la desviación estándar de la temperatura máxima .....	286
b.	Mapa mensual de la desviación estándar de la temperatura media.....	287
c.	Mapa mensual de la desviación estándar de la temperatura mínima.....	288



# Índice de figuras

Figura 1.1. Distribución de los estudios sobre clima urbano en ciudades españolas. Fuente: Anexo Base de datos de publicaciones sobre climatología urbana española. ....	16
Figura 1.2. Evolución anual de las variables analizadas en las publicaciones españolas sobre climatología urbana. Fuente: Anexo Base de datos de publicaciones sobre climatología urbana española.....	18
Figura 1.3. Evolución anual de las metodologías principales en las publicaciones españolas sobre climatología urbana. Fuente: Anexo Base de datos de publicaciones sobre climatología urbana española. ....	21
Figura 1.4. Comparación de análisis térmico posterior al registro de transectos urbanos entre el segundo y tercer periodo. a) Perfil térmico del transecto urbano A del día 28 de enero de 1992 (Cuadrat, De la Riva, López, et al., 1993, p. 136). b) Mapa térmico promedio de Zaragoza.(Cuadrat et al., 2002, p. 8). ....	25
Figura 2.1. Comparación de observaciones de temperatura registradas con sensor con acoplador (HOBO U23 Pro v2) y sensor con bluetooth (HOBO MX2301) mediante gráfico de caja. ....	31
Figura 2.2. a) Grafico de densidad de los datos registrados entre 2015 y 2020 por AEMET. b) Grafico de densidad de los datos registrados entre 2015 y 2020 por la red urbana. c) Gráfico de dispersión de regresión de LOESS con las variables registradas en AEMET y la red urbana. ....	32
Figura 2.3. Mapa de localización de la ciudad de Zaragoza. ....	34
Figura 2.4. Mapa de localización de la red de sensores en la ciudad de Zaragoza. ....	36
Figura 2.5. Flujo de trabajo del control de calidad de la red de sensores urbanos. Fuente: Barrao et al., 2022. ....	45
Figura 2.6. Evolución de la temperatura media, máxima y mínima desde 2015 hasta 2022 en comparación con los valores normales para el periodo de referencia 1981-2010 en la estación de Zaragoza Aeropuerto de AEMET. Los números destacados en color son la diferencia promedio para cada estación del año. Fuente: AEMET.....	48
Figura 2.7. Gráfica de barras con el porcentaje de observaciones eliminadas en cada paso del control de calidad y en cada sensor tanto para los datos de humedad como de temperatura. ....	56
Figura 2.8. Situaciones sinópticas (1 a 7) categorizadas para las fechas con los datos marcados como sospechosos por saltos horarios anómalos. Los colores representan la presión sobre el nivel del mar en hectopascales (hPa) junto a las isobaras en negrita.....	59
Figura 2.9. Distribución mensual de observaciones sospechosas detectadas y tipología de situación sinóptica asociada por color. El eje x representa la variación horaria de la humedad y el eje y representa la variación de la temperatura.....	61
Figura 2.10. Evolución mensual de observaciones eliminadas en toda la red (barras) y número de datos totales disponibles para cada mes del año (línea roja), tanto de temperatura como humedad relativa.....	63
Figura 3.1. Diagrama de flujo de trabajo para el cálculo de los indicadores satelitales que formaran partes de las covariables en el modelo de interpolación. ....	79

Figura 3.2. Variables territoriales utilizadas en la interpolación. A) MDT. B) MDS. C) Altura de edificaciones. D) Elevaciones. E) Orientaciones. F) SVF. G) Radiación solar del solsticio de verano. H) IMD de 2018.....	81
Figura 3.3. Autocorrelación de las covariables. MDT: Modelo Digital del Terreno. ORI: Orientación. PEN: Pendiente. SVF: Sky View Factor. LST: Temperatura de superficie. RAD: Radiación. NDVI: Normalized Difference Vegetation Index. GLI: Green Leaf Index. NBR: Normalized Burn Ratio. NDTI: Normalized Difference Turbidity Index. NBAI: Normalized Built-up Area Index. BUI: Built-up Index. ....	84
Figura 3.4. Formación de los tres primeros componentes principales para cada estación del año. Mediante colores se especifica la contribución de cada una de las covariables.....	86
Figura 3.5. Resultados de la interpolación de la temperatura del aire máxima, media y mínima para el promedio de invierno de 2015 a 2022. Cada interpolación esta numerada según las variables que integra el modelo de interpolación: (1) Todas las variables. (2) PCA de todas las variables. (3) Variables tradicionales: NDVI, NDWI y NDBI. (4) PCA de las variables tradicionales. (5) Variables seleccionadas: MDT, SVF, GLI, NDTI y NBAI. (6) PCA de las variables seleccionas.....	88
Figura 3.6. Resultados de la interpolación de la temperatura del aire máxima, media y mínima para el promedio de primavera de 2015 a 2022. Cada interpolación esta numerada según las variables que integra el modelo de interpolación: (1) Todas las variables. (2) PCA de todas las variables. (3) Variables tradicionales: NDVI, NDWI y NDBI. (4) PCA de las variables tradicionales. (5) Variables seleccionadas: MDT, SVF, GLI, NDTI y NBAI. (6) PCA de las variables seleccionas.....	89
Figura 3.7. Resultados de la interpolación de la temperatura del aire máxima, media y mínima para el promedio de verano de 2015 a 2022. Cada interpolación esta numerada según las variables que integra el modelo de interpolación: (1) Todas las variables. (2) PCA de todas las variables. (3) Variables tradicionales: NDVI, NDWI y NDBI. (4) PCA de las variables tradicionales. (5) Variables seleccionadas: MDT, SVF, GLI, NDTI y NBAI. (6) PCA de las variables seleccionas.....	90
Figura 3.8. Resultados de la interpolación de la temperatura del aire máxima, media y mínima para el promedio de otoño de 2015 a 2022. Cada interpolación esta numerada según las variables que integra el modelo de interpolación: (1) Todas las variables. (2) PCA de todas las variables. (3) Variables tradicionales: NDVI, NDWI y NDBI. (4) PCA de las variables tradicionales. (5) Variables seleccionadas: MDT, SVF, GLI, NDTI y NBAI. (6) PCA de las variables seleccionas.....	91
Figura 3.9. Gráfico de columnas apiladas con los valores de RMSE para cada modelo de interpolación según variable interpolada (temperatura máxima, media y mínima) y estación del año (color).....	99
Figura 3.10. Captura de imágenes Landsat en Google Earth Engine, imagen completa y recorte de Zaragoza. a) Imágenes LC09_200031_20211215 y LC08_199031_20211216, acumulación de niebla o nubes en el valle del Ebro. b) Imagen LC08_199031_20180106, cubierta totalmente por nubes. c) Imagen LC08_199031_20160202, nubes poco densas y nieblas. d) Imagen LC08_199031_20171002, pequeñas nubes aisladas y su sombra. e) Imagen LC08_199031_20171205, sin presencia de nubes. ....	105
Figura 3.11. Ejemplos de complicaciones y condicionantes en la selección de imágenes para el cálculo de productos mensuales. a) Imagen LC08_200031_20180809 completa con presencia de nubes y recorte de la zona de estudio sin nubes. b) Imagen LC08_199031_20180802 con pixeles eliminados (rojos) por la mascara de nubes y la misma	

imagen sin la mascara de nubes. c) Imagen LC08_199031_20160117 a partir de la cual se calcula la imagen de GLI y LST.....	106
Figura 3.12. Evolución temporal de las variables satelitales a escala mensual, para cada mes del año la variable representa el valor promedio mediante una línea y se añade valor máximo y mínimo como extremos del sombreado. Green Leaf Index (GLI) en rojo. Land Surface Temperature (LST) en verde. Normalized Built-up Area Index (NBAI) en azul. Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) en morado. ....	109
Figura 3.13. Gráfico de cajas con los estadísticos de error seleccionados para la interpolación diaria de las variables térmicas urbanas. ....	112
Figura 3.14. Valores mensuales de los estadísticos de error calculados para la interpolación diaria de temperatura máxima. ....	116
Figura 3.15. Valores mensuales de los estadísticos de error calculados para la interpolación diaria de temperatura media. ....	117
Figura 3.16. Valores mensuales de los estadísticos de error calculados para la interpolación diaria de temperatura mínima.....	118
Figura 3.17. Error RMSE diario desde 2015 a 2022 de la interpolación de la temperatura del aire máxima diaria. ....	120
Figura 3.18. Error RMSE diario desde 2015 a 2022 de la interpolación de la temperatura del aire media diaria.....	121
Figura 3.19. Error RMSE diario desde 2015 a 2022 de la interpolación de la temperatura del aire mínima diaria.....	122
Figura 3.20. Valores residuales resultado de la diferencia entre observaciones observadas y predichas agrupados por sensor. De arriba abajo temperatura máxima, media y mínima. ....	123
Figura 4.1. Mapa de temperatura anual media de las máximas de la ciudad de Zaragoza..	129
Figura 4.2 Mapa de temperatura anual media de las medias de la ciudad de Zaragoza.....	130
Figura 4.3. Mapa de temperatura anual media de las mínimas de la ciudad de Zaragoza. .	131
Figura 4.4. Transectos de temperatura anual media. a) Transecto A de las temperaturas máximas. b) Transecto B de las temperaturas medias. c) Transecto C de las temperaturas mínimas. ....	134
Figura 4.5. Gráfica de cajas con la temperatura anual promedio mínima (a) y máxima (b) para las distintas zonas de Zaragoza y su entorno periurbano.....	138
Figura 4.6. Mapa de temperatura estacional media de las máximas de la ciudad de Zaragoza. ....	141
Figura 4.7. Mapa de temperatura estacional media de las medias de la ciudad de Zaragoza. ....	142
Figura 4.8. Mapa de temperatura estacional media de las mínimas de la ciudad de Zaragoza. ....	143
Figura 4.9. Mapa de temperatura mensual media de las máximas de la ciudad de Zaragoza. ....	146
Figura 4.10. Mapa de temperatura mensual media de las medias de la ciudad de Zaragoza. ....	148

Figura 4.11. Mapa de temperatura mensual media de las mínimas de la ciudad de Zaragoza.	150
Figura 4.12. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 22 de diciembre de 2020 a las 06:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR. Fuente: <a href="http://www.wetterzentrale.de">www.wetterzentrale.de</a>	152
Figura 4.13. Mapa de temperatura del día 22 de diciembre de 2020, episodio de niebla sobre el valle del Ebro.	154
Figura 4.14. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 28 de febrero de 2018 a las 18:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR. Fuente: <a href="http://www.wetterzentrale.de">www.wetterzentrale.de</a>	155
Figura 4.15. Mapa de temperatura del día 28 de febrero de 2018, nevada ligera de 5 cm sobre la ciudad.	157
Figura 4.16. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 20 de marzo de 2018 a las 00:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR. Fuente: <a href="http://www.wetterzentrale.de">www.wetterzentrale.de</a>	158
Figura 4.17. Gráfica de intensidad de la isla de calor urbano en relación con la velocidad del viento, dirección y humedad relativa para los datos horarios de 2015 a 2020. Fuente: Red de sensores urbanos y AEMET.	160
Figura 4.18. Mapa de temperatura del día 20 de marzo de 2018, episodio de viento del noroeste o “Cierzo”.	161
Figura 4.19. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 4 de mayo de 2020 a las 12:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR. Fuente: <a href="http://www.wetterzentrale.de">www.wetterzentrale.de</a>	162
Figura 4.20. Mapa de temperatura del día 23 de abril de 2017, episodio de viento de sureste o “Bochorno”.	164
Figura 4.21. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 20 de enero de 2020 a las 00:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR. Fuente: <a href="http://www.wetterzentrale.de">www.wetterzentrale.de</a>	165
Figura 4.22. Mapa de temperatura del día 21 de enero de 2020, borrasca Gloria.	167
Figura 4.23. Gráfica de evolución horaria de la temperatura (°C) y precipitación (mm) del día 24 de agosto de 2022 en el observatorio de Zaragoza, Aeropuerto. Fuente: AEMET.	168
Figura 4.24. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 24 de agosto de 2022 a las 12:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR. Fuente: <a href="http://www.wetterzentrale.de">www.wetterzentrale.de</a>	169
Figura 4.25. a) Gráfica de evolución horaria de la temperatura y la humedad relativa en varios sensores de la red urbana de Zaragoza. b) Gráfica de intensidad de la isla de calor en varios sensores de la red urbana de Zaragoza. Casco Histórico (S01), Movera (S18), Parque Grande (S17) y C.D. Real Zaragoza (S21).	170
Figura 4.26. Mapa de temperatura del día 24 de agosto de 2022, episodio de DANA.	172
Figura 4.27. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 29 de junio de 2019 a las 00:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR. Fuente: <a href="http://www.wetterzentrale.de">www.wetterzentrale.de</a>	174
Figura 4.28. Mapa de temperatura del día 29 de junio de 2019, episodio de ola de calor.	176

Figura 4.29. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 30 de diciembre de 2021 a las 12:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR. Fuente: <a href="http://www.wetterzentrale.de">www.wetterzentrale.de</a> .....	177
Figura 4.30. Mapa de temperatura del día 30 de diciembre de 2021, situación de anticiclón invernal. ....	179
Figura 4.31. Gráfica de intensidad estacional de la ICU para el núcleo central de Zaragoza. ....	182
Figura 4.32. Mapa estacional de intensidad de la ICU, calculado a partir de la temperatura media de las máximas. ....	184
Figura 4.33. Mapa estacional de intensidad de la ICU, calculado a partir de la temperatura media de las medias. ....	185
Figura 4.34. Mapa estacional de intensidad de la ICU, calculado a partir de la temperatura media de las mínimas.....	186
Figura 4.35. Gráfica horaria de la intensidad de la ICU por sensor. Se incluye la desviación estándar horaria para aproximar la variabilidad de la temperatura. ....	188
Figura 4.36. Gráfica de cajas que representa la intensidad de la ICU diurna (de 10 h a 18 h) y nocturna (de 20 h a 6 h) para cada estación y todos los sensores de la red. ....	189
Figura 5.1. Definición de zonas climáticas locales (LCZ) diseñadas por Stewart y Oke. Fuente: (Stewart & Oke, 2012). ....	194
Figura 5.2. Mapa de clasificación de LCZ, siguiendo distintas metodologías. Esquina superior izquierda, producto WUDAPT de clasificación global. Esquina superior derecha, producto WUDAPT de clasificación para Europa. Esquina inferior izquierda, clasificación derivada del LCZ-Generator de WUDAPT. Esquina inferior derecha, método GIS de Oliveira, et al. (2020).....	205
Figura 5.3. Mapa de clasificación de LCZ, siguiendo la metodología modificada de Oliveira, et al. (2020a, 2020b).....	206
Figura 5.4. Gráfico de cajas con la distribución de la temperatura media de las máximas para cada LCZ y cada estación del año.....	210
Figura 5.5. Gráfico de cajas con la distribución de la temperatura media de las mínimas para cada LCZ y cada estación del año. ....	211



# Índice de tablas

Tabla 1.1. Tabla realizada por A. J. Arnfield donde muestra las principales generalizaciones empíricas analizadas por Oke (1982) sobre la ICU, y estudios posteriores que las confirman en distintas ciudades. Fuente: (Arnfield, 2003, p. 16).....	7
Tabla 2.1. Estadísticas descriptivas de las variables de temperatura registradas por la Red Urbana y AEMET, y la diferencia entre ambos registros. ....	32
Tabla 2.2. Ejemplos de diferentes codificaciones registradas por la red, según sensor y periodo de tiempo de registro. Junto con la codificación final que seguirá la base de datos climática. ....	47
Tabla 2.3. Tabla resumen con recuentos de valores originales de temperatura, datos faltantes y datos eliminados por control de calidad, en valores absolutos y porcentajes para cada sensor de la red. ....	53
Tabla 2.4. Tabla resumen con recuentos de valores originales de humedad, datos faltantes y datos eliminados por control de calidad, en valores absolutos y porcentajes para cada sensor de la red. ....	54
Tabla 3.1. Tabla resumen de los indicadores satelitales que forman parte de las covariables en el modelo de interpolación. Indicando la clase de índice que es según su tema de análisis, su nombre, fórmula con la que se ha calculado, bandas a las cuales equivalen en Landsat 8 y la bibliografía de cada índice. ....	72
Tabla 3.2. Valores de correlación entre cada una de las covariables explicativas y las variables de temperatura del aire (máxima, media y mínima) estacionalmente. Aquellos valores en gris son los valores de correlación no significativos. ....	83
Tabla 3.3. Dimensiones, eigenvalores y varianza de los PCA en las 4 estaciones. ....	85
Tabla 3.4. Resumen estadístico de las variables térmicas estacionales interpoladas en los diferentes modelos de interpolación. ....	94
Tabla 3.5. Estadísticos de error derivados del método de validación cruzada. Cada una de las columnas representa un modelo de interpolación de los 6 calculados para cada una de las variables de temperatura. Y en cada una de las filas recoge el valor de un estadístico de error para cada estación del año. Aparecen coloreados los valores de RMSE en color rojo el valor máximo y en verde el valor mínimo para cada variable interpolada en cada estación del año. ....	97
Tabla 3.6. Número de imágenes disponibles para cada mes y año para el cálculo de variables satelitales. a) Imágenes para GLI, NDTI y NBAI. b) Imágenes para LST. Se añaden en los extremos los sumatorios mensuales y anuales. ....	107
Tabla 3.7. Valores climatológicos normales (mensual/anual). Zaragoza, Aeropuerto. T: Temperatura media (°C). TM: Media de las temperaturas máximas diarias (°C). Tm: Media de las temperaturas mínimas diarias (°C). R: Precipitación media (mm). H: Humedad relativa media (%). DR: Número medio de días de precipitación superior o igual a 1 mm. DN: Número medio de días de nieve. DT: Número medio de días de tormenta. DF: Número medio de días de niebla. DH: Número medio de días de helada. DD: Número medio de días despejados. I: Número medio de horas de sol. Fuente: AEMET. ....	107
Tabla 3.8. Valores mensuales absolutos de los estadísticos de error calculados para la interpolación diaria de temperatura máxima. ....	116
Tabla 3.9. Valores mensuales absolutos de los estadísticos de error calculados para la interpolación diaria de temperatura media. ....	117

Tabla 3.10. Valores mensuales absolutos de los estadísticos de error calculados para la interpolación diaria de temperatura mínima. ....	118
Tabla 5.1. Superficie en km <sup>2</sup> de pixeles clasificados según LCZ y metodología utilizada..	199
Tabla 5.2. Estadísticos descriptivos de la temperatura media de máximas y mínimas estacionales para cada LCZ. ....	209





# 1. Introducción

La climatología urbana, como rama del estudio del clima, ha experimentado un rápido desarrollo en las últimas décadas, ocupando en la actualidad un lugar destacado en el contexto de la climatología en general. Su origen se encuentra en la necesidad de comprender las transformaciones que las áreas urbanas introducen en el clima regional, modificando significativamente algunas de sus características. Esta disciplina se ha consolidado rápidamente como un recurso fundamental en las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. Su relevancia radica en su capacidad para comprender las transformaciones climáticas locales, ofrecer orientación en la planificación urbana para la adaptación y proporcionar una perspectiva más completa sobre los efectos del cambio climático antropogénico.

La climatología urbana es una componente esencial para la comprensión de los problemas que se manifiestan en los entornos urbanos. Esta importancia se fundamenta en el continuo proceso de urbanización a nivel global, que ha transformado extensos paisajes rurales o naturales en vastos espacios construidos, donde la actividad humana alcanza su máxima intensidad. Según datos recientes, aproximadamente el 56 % de la población mundial, equivalente a 4.400 millones de habitantes, reside en zonas urbanas. Se proyecta que esta tendencia continúe su crecimiento, con una población urbana estimada que duplicará la actual para el año 2050, momento en el que se espera que casi 7 de cada 10 personas habiten en áreas urbanas (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2019). En este contexto, el clima urbano emerge como un área de investigación crítica que requiere un análisis minucioso para entender sus características y las implicaciones que tiene en la vida de millones de personas que habitan las ciudades.

## 1.1. Clima urbano

El clima urbano es un fenómeno de gran complejidad sujeto a distintos factores que van más allá de la mera fluctuación de las temperaturas. Esta tesis busca resaltar la profundidad y amplitud de los desafíos que debemos afrontar al abordar la complejidad del clima urbano en la actualidad.

### 1.1.1. Definición y evolución científica

El clima urbano se podría definir como el conjunto de condiciones atmosféricas y meteorológicas que caracterizan un área geográfica específica, en este caso el entorno de una ciudad. Las ciudades modifican los caracteres generales del clima regional sobre el espacio en el que se asientan, visible fundamentalmente en el caso de las temperaturas, estando relacionadas esas alteraciones con 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 (T. Oke et al., 2017).

En la antigüedad, pese a que no podemos hablar estudios concretos de climatología urbana, López Gómez (López-Gómez, Fernández-García, Arroyo-Ilera, et al., 1993) señalan que existía una constatación del deterioro ambiental que se experimentaba en entornos urbanos. Para los autores de la época consistía en una percepción muy ligada a la contaminación del aire, la presencia de nieblas y la menor ventilación de las calles; pero en realidad observaban las condiciones ambientales diferentes del entorno urbano. Heidorn (1978) por su parte ya había señalado que autores griegos y romanos como Hipócrates o

Seneca, escribieron sobre la atmosfera más contaminada de la ciudad frente a las villas rurales, una percepción que llevó a las sociedades urbanas a adoptar medidas de mitigación para el aumento de las temperaturas en estos espacios.

A medida que avanzaba el siglo XVIII y sobre todo tras la Revolución Industrial, el deterioro en la calidad del aire de las ciudades se incrementó significativamente. Este fenómeno se debió a la localización de las fábricas dentro de los recintos urbanos (o al crecimiento de éstas en el entorno de establecimientos fabriles) y a unos procesos de combustión basados en el uso de carbón y la madera como fuentes de energía básicas, tanto en fábricas como en viviendas. Paralelamente al proceso de industrialización, hacia finales del siglo XVIII, surgió un desarrollo y avance de la instrumentación vinculado a la Revolución Científica y a los movimientos intelectuales ilustrados europeos (Heymann, 2010), que ya habían comenzado en los siglos XV y XVI. Este avance se manifestó en la creación de instrumentos meteorológicos, muchos de los cuales fueron impulsados por diversas sociedades científicas (Howard Frisinger, 1983). Entre estos, se incluyen termómetros, barómetros y anemómetros, que posibilitaron una observación más precisa de las variables meteorológicas. Esto, a su vez, facilitó la recopilación de datos a través de redes de observación meteorológica con el objetivo de comprender y analizar el clima (Neves et al., 2017). En conjunto, estos factores representaron un punto de inflexión no solo en la climatología y la meteorología, sino también en la comprensión de la influencia de las actividades humanas y la urbanización en el clima urbano, sentando las bases y los objetivos de los estudios posteriores en este campo. El mejor ejemplo de esta época sería Luke Howard, un químico y meteorólogo británico, considerado el padre de la climatología urbana por su observación y reporte de variables meteorológicas en Londres en 1833. Howard destacó al reconocer el fenómeno de la isla de calor urbano (ICU) en su obra *The Climate of London* (1833) identificando un aumento de calor anómalo en la ciudad.

La climatología urbana moderna, tal como la conocemos hoy, tiene sus raíces en el siglo XX (Stewart, 2019). En ese momento, emergieron nuevos estudios científicos que se destacaron por enfocarse en espacios locales en lugar de abordar climatologías regionales o dinámicas atmosféricas a gran escala. Estas investigaciones marcaron un cambio respecto a las tendencias predominantes desde finales del siglo XIX hasta principios del XX, que se centraban en temas como los abordados en el *Handbook of Climatology* (von Hann, 1903), los trabajos derivados de los estudios de W. Köppen sobre los tipos de clima, o los estudios pioneros de V. Bjerknes sobre la representación cartográfica de los fenómenos atmosféricos (Bjerknes, 1921) y el comportamiento de las masas de aire. No obstante, la proliferación de estos estudios climáticos locales no solo se consolidó, sino que también dio lugar a un campo de estudio independiente de otras temáticas climatológicas. En su obra *Das Klima der bodennahen Luftschicht* (1942), Rudolf Geiger marcó un cambio significativo en los estudios climáticos al centrarse en el clima de la capa de aire cercana al suelo. Este enfoque pionero dio origen a la conceptualización del "Microclima" y a la iniciación de la "Investigación microclimática". Geiger argumentó que la capa de aire cercana al suelo, a menudo evitada en observaciones anteriores debido a las irregularidades del terreno, desempeñaba un papel crucial en la determinación de las condiciones climáticas locales. Surgió así una corriente novedosa dentro de la climatología, que, aunque no se enfoca exclusivamente en el clima urbano, lo incorpora al abordar áreas "pequeñas" cuyos climas están influenciados por la topografía o características únicas (Yoshino, 1975).

A medida que avanzaba el siglo XX, se desarrollaron innovadoras técnicas de adquisición de datos de temperatura a pequeña escala en áreas urbanas en respuesta a las limitaciones de las estaciones climatológicas tradicionales. Estas estaciones, que solían evitar influencias locales y seguir horarios inflexibles, se vieron superadas por la necesidad de

capturar de manera más precisa y detallada las condiciones climáticas en entornos urbanos. Este enfoque permitió a los investigadores medir temperaturas con flexibilidad considerando las particularidades locales como el terreno, la vegetación y las construcciones. En las décadas de 1920 a 1940, autores como Stewart D.I., basándose en la división histórica realizada por Yoshino, la denominaron periodo *Innovation in methodology* o Innovación metodológica. Un periodo en el cual se realizan los primeros transectos urbanos que, utilizando termómetros a mano o montados en vehículos, recopilaron datos de temperatura en muchos puntos dentro de la ciudad y su entorno cercano que permitieron la creación de mapas detallados de temperaturas y secciones térmicas de las ciudades. Estos datos también revelaron la estructura térmica de las áreas urbanas y cómo ésta se veía afectada por el uso del suelo y la densidad de edificación, representando un cambio significativo en la comprensión del clima urbano.

Los trabajos de Pepler (1929) y Schmidt (Schmidt, 1929) se enmarcan en esta época como hitos destacados, ya que fueron los primeros investigadores que realizaron transectos urbanos con mediciones a bordo de automóviles, recopilando datos de temperatura en entornos urbanos para aplicarlos a sus estudios, siendo Schmidt pionero al implementar esta metodología en la ciudad de Viena en 1927. Gracias a ello identificaron y cartografiaron las variaciones horizontales en el campo de temperatura de las ciudades y acuñaron por primera vez el término “*isla de calor*” en la literatura científica para describir las anomalías de temperatura observadas entre el núcleo urbano y la periferia. Estos avances marcaron un punto de inflexión en el estudio de la climatología urbana, al pasar de las observaciones puntuales de temperaturas a investigaciones donde el diseño del trabajo de campo y el enfoque experimental permitían comprender las islas de calor con mayor detalle. Esto permitió un aumento de publicaciones y estudios que nunca antes se habría registrado, no solo en Europa (Balchin & Pye, 1947; Berg & Metzler, 1934; Budel & Wolf, 1933; Sundborg, 1950), sino también en Japón (T. Kawamura, 1964; Sasakura, 1931; Takahashi, 1959) y Norteamérica (Duckworth & Sandberg, 1954; Middleton & Millar, 1936). Resultó en un periodo de auge en la experimentación, aunque no se implementó de manera uniforme a nivel mundial, y países como España se sumaron a estas prácticas años después.

Posteriormente, es relevante mencionar dos obras clásicas en la literatura científica: en primer lugar, *The Climate of Cities* de Albert Kratzer (1956), una tesis doctoral que tuvo un papel fundamental en el desarrollo de la climatología urbana moderna al ofrecer una revisión exhaustiva de los estudios de ese período. Por otro lado, Tony Chandler (1965) dejó una influencia notable con su obra sobre *The Climate of London*, que continúa siendo relevante en la actualidad. A lo largo de décadas de estudio de datos meteorológicos en Londres, Chandler identificó patrones complejos de islas de calor y dividió la ciudad en cuatro regiones climáticas urbanas con características geográficas, morfología urbana y climatología local diferenciadas. Abogó por un enfoque más cuantitativo y teórico en los estudios de islas de calor, respaldado por el crecimiento de la literatura en este campo y la necesidad de modelos analíticos basados en la física. Su trabajo representó un avance significativo en la comprensión de las islas de calor urbanas y la climatología de las ciudades.

Entre la década de 1950 y 1990, la definición de clima urbano evolucionó para reflejar una comprensión más completa de los factores que influyen en las condiciones climáticas de la ciudad. A medida que la literatura sobre islas de calor se expandía, nuevos estudios establecían conexiones más sólidas entre las causas y los efectos de la ICU. Se estaba consolidando un enfoque más analítico en la observación de la ICU, ya que los investigadores buscaban correlaciones estadísticas entre la magnitud de estas islas y diversos parámetros físicos. La comprensión de sus causas avanzó al aclarar la relación entre su magnitud y la configuración urbana, la cobertura del suelo y las condiciones atmosféricas. Además de los

elementos tradicionales como la descripción de la temperatura y la humedad, se consideraron aspectos como la calidad del aire, los cañones urbanos (calles altas y estrechas flanqueadas por edificios, limitando la circulación del aire y aumentando la retención de calor), el balance energético y la gestión o planificación de los entornos urbanos. En general, hubo un aumento en el trabajo sobre procesos meteorológicos y un esfuerzo por producir modelos físicos que relacionan la causa y el efecto. En esta período, la obra destacada es *A numerical model of the urban heat island* de Myrup, L.O. (1969), que representa la primera publicación con un modelo numérico aplicado a la ICU. Estos avances contribuyeron significativamente al entendimiento de este fenómeno y la mejora en la modelización de los fenómenos asociados.

Con la llegada del siglo XXI, la fase descriptiva y experimental de la disciplina está en su mayoría completada, y se enfoca en la consolidación de la comprensión de fenómenos y procesos, junto con el desarrollo de modelos sofisticados para simular los climas en entornos urbanos. Los avances tecnológicos, como la computación de alto rendimiento y la teledetección, han supuesto mejoras significativas en la medición y predicción del clima urbano. Sumado a esto, han surgido diversas redes de investigación y asociaciones, entre las que destaca la *International Association for Urban Climate* (IAUC), creada en el año 2000. Este hito fue la culminación de décadas de conferencias internacionales sobre clima urbano que se llevaron a cabo desde los años 60, especialmente las *International Conference on Urban Climatology* (ICUC) como Kyoto (1989), Dakha (1993) o Sidney (1999). También emergen nuevos proyectos internacionales que tienen como foco central la investigación climática urbana, presentando propuestas innovadoras que incorporan los avances tecnológicos más recientes. Desde la proliferación de satélites de observación terrestre hasta la implementación de modelos climáticos de última generación, la recopilación y análisis de datos climáticos urbanos han alcanzado niveles sin precedentes. Por ejemplo, el proyecto *World Urban Database and Access Portal Tools* (WUDAPT) incorpora estas innovaciones con el objetivo de proporcionar información sobre las características urbanas para los estudios climáticos, meteorológicos y ambientales a nivel mundial.

Después de casi dos siglos de investigaciones, nuestro conocimiento sobre el clima urbano ha experimentado una evolución considerable desde los primeros trabajos de Howard en 1833. En la actualidad, nos encontramos ante un panorama enriquecido por los antecedentes y periodos previos de investigación, que han contribuido a la formación de un sólido cuerpo teórico para el estudio climático de las ciudades y su entorno.

Pero ¿cómo definimos en la actualidad el concepto de clima urbano a partir de los antecedentes y períodos previos de investigación? En su libro *Urban Climates* (2017), Oke define la climatología urbana como “el estudio de las propiedades físicas, químicas y biológicas, así como de los procesos que afectan la atmósfera de los entornos urbanos”. Pero no se detiene en una simple definición y se enfoca en transmitir que esta disciplina se debe centrar en comprender los patrones climáticos característicos de las zonas urbanas, lo que incluye: la descripción cuantitativa de estos climas, la explicación de fenómenos climáticos mediante el conocimiento meteorológico y la aplicación de datos climáticos para abordar problemas prácticos. Alentando a conseguir e integrar observaciones climáticas locales con las características específicas del lugar y comprender los procesos de influencia. Lo que explica los patrones climáticos urbanos en función de procesos meteorológicos y comprender cómo funcionan los sistemas climáticos en esos entornos.

### **1.1.2. Características del clima de las ciudades**

El clima de las ciudades, en su diversidad y singularidad, es el resultado de una compleja interacción entre la actividad humana y la configuración de la estructura urbana.

Sin embargo, comprenderlo implica atender a las características propias de las ciudades, como: la densidad de edificación, la disposición de calles, la topografía urbana, los materiales de construcción, el efecto de la radiación y las sombras o la presencia de áreas verdes y masas de agua.

La densidad de edificación, que incluye la cantidad y altura de los edificios, no solo aumenta la rugosidad aerodinámica de la superficie, sino que puede crear lo que se conoce como cañones urbanos (T. Oke, 1981). Estos cañones canalizan y concentran el viento y la energía solar entre los edificios altos y las estructuras urbanas, lo que a menudo resulta en temperaturas más elevadas, cambios en las intensidades del viento y un descenso de la calidad del aire, en comparación con áreas menos densamente construidas o pobladas. Por otro lado, la disposición de las calles, su orientación y su amplitud también desempeñan un papel importante. Calles estrechas y alineadas pueden aumentar la retención de calor, mientras que calles más amplias permiten una mejor circulación del aire y por tanto una menor acumulación de calor.

La topografía urbana puede afectar la circulación del aire y la temperatura: las áreas más altas suelen ser más frescas debido a la circulación del aire, mientras que las áreas en valles pueden experimentar acumulación de calor. Sin embargo, la influencia del relieve es menor y únicamente destaca, por ejemplo, durante situaciones anticiclónicas donde las inversiones térmicas se pueden asociar a vaguadas u hondonadas de fondo de valle.

En entornos urbanos, la modificación local del clima es significativa debido a la construcción de calles y edificios con materiales como el hormigón o el asfalto. Estos materiales, con alta conductividad térmica y capacidad calorífica, almacenan calor durante el día y lo liberan gradualmente por la noche, creando un balance de energía que difiere de las áreas circundantes (T. Oke & Fuggle, 1972). La radiación solar entrante se ve afectada por la presencia de contaminantes y los juegos de sombras que el entramado urbano provoca, al igual que la radiación infrarroja saliente que queda atrapada y no se libera del mismo modo que a cielo descubierto por lo que la ciudad almacena mayor cantidad de calor (D. Li et al., 2015). Además, la disminución de la humedad debido a la rápida escorrentía del agua en áreas urbanas reduce el flujo de calor latente (Pearlmutter et al., 2009), lo que resulta en un predominio del calor sensible y un cambio en el balance energético.

En contraposición al resto de factores, la presencia de áreas verdes, como parques y espacios con vegetación, tiene un efecto refrescante en el clima urbano siendo islas de frescor en cuanto a temperatura y humedad. La vegetación proporciona sombra y libera humedad a través de la evapotranspiración, lo que ayuda a reducir la temperatura en áreas no pavimentadas y edificadas. Un descenso de la temperatura que difiere según las características de las zonas verdes, pero que puede suponer un descenso medio de 1°C (Bowler et al., 2010). López Gómez y su equipo ya registraron en sus primeros estudios de Madrid (López-Gómez, 1988) diferencias durante noches de temperaturas bajas y cielos despejados, cuando más se acentúan las diferencias térmicas, valores menores entre 1 y 2 °C y mayores en torno a 5 y 6 °C. En Arizona se demostró que la colocación de zonas verdes puede disminuir en promedio entre 1 y 2 °C de la temperatura superficial localmente (Y. Zhang et al., 2017).

En resumen, la configuración de la estructura urbana tiene un impacto significativo en el clima de una ciudad. Comprender cómo estos factores interactúan es esencial para la planificación urbana sostenible y la mitigación de los efectos negativos del aumento de la temperatura urbana y la ICU. En consecuencia, en el año 2012 Stewart y Oke desarrollaron el concepto de zonas climáticas locales (LCZ, por sus siglas en inglés *Local Climate Zones*). Un buen ejemplo de cómo las características del clima de las ciudades se correlacionan con las

características estructurales urbanas. Estas LCZ son una herramienta de clasificación que surgió con el objetivo de proporcionar una mejor comprensión de la diversidad climática dentro de las áreas urbanas. Permiten categorizar y describir diferentes tipos de entornos urbanos en función de sus características como la estructura superficial, la cobertura y la actividad humana. Al comprender cómo estas características urbanas se asocian con la temperatura dando lugar a las LCZ, los planificadores urbanos pueden tomar decisiones más informadas para mitigar los efectos de la ICU, el cambio climático o mejorar aspectos de la ecología del paisaje urbano (Stewart & Oke, 2012).

### **1.1.3. La isla de calor urbano (ICU)**

La ICU es un fenómeno climático ampliamente estudiado en el campo de la climatología urbana (ver punto 1.1.1). Este fenómeno se manifiesta como un incremento de las temperaturas en áreas urbanas en comparación con sus entornos rurales circundantes. De hecho, la ICU es considerada uno de los ejemplos mejor documentados de la influencia humana en el clima a escala regional-local (Arnfield, 2003; T. Oke et al., 2017; Stewart, 2019).

Este efecto, que suele ser más pronunciado en las ciudades, pero que puede afectar a cualquier tipo de asentamiento independientemente de su tamaño, aunque con distinta intensidad (Dienst et al., 2019), tiene un impacto significativo en la calidad de vida, la salud pública y el medio ambiente. Por esta razón, ha sido objeto de investigaciones exhaustivas desde que se popularizó su estudio a mediados del siglo XX.

En cuanto a las particularidades de la ICU, destaca en primer lugar un incremento más pronunciado de la temperatura en el núcleo central de la ciudad, creando una imagen térmica aislada con una forma característica de “*isla*”. Sin embargo, esto no es siempre así y tanto su magnitud como su forma puede variar según el tipo de ciudad y sus características específicas. Factores como la morfología urbana, el tamaño de la ciudad, su altitud o su proximidad al mar pueden influir en la intensidad de la ICU. Por ejemplo, las ciudades costeras debido a las brisas del mar, la mayor presencia de humedad o la propia inercia térmica del agua del mar, hacen que la intensidad de la ICU sea menor que las de otras ciudades de interior (He et al., 2020).

Otro factor importante es el viento. Análisis previos sobre la influencia de la intensidad y dirección del viento que ejercen sobre la ICU en la ciudad de Zaragoza (Cuadrat et al., 2022) demuestran que, en ausencia de viento o con una brisa ligera, las diferencias de temperatura entre la ciudad y el entorno rural alcanzan su valor máximo, superando ocasionalmente los 7°C y teniendo un promedio de 2,7°C. Cuando la velocidad del viento es baja, por debajo de 10 km/h, se observa una alta variabilidad en la intensidad de la ICU, pero las temperaturas más cálidas siguen predominando. A partir de los 10 km/h, se produce una reducción esperada en la intensidad de la ICU, pero aún puede superar los 4°C, manteniendo un promedio de 1,57°C. Con velocidades del viento superiores a 50 km/h, la ICU prácticamente desaparece, aunque no llega a ser nula, lo que resalta la influencia del entorno urbano, su morfología y edificios. Resultados similares también se han podido observar en otras ciudades como Melbourne (Morris et al., 2001), Oklahoma (X.-M. Hu et al., 2016) o Seúl (Ngarambe et al., 2020), incluso en el caso de las brisas marinas (X.-M. Hu & Xue, 2016).

Aspectos como el tamaño de la ciudad o la población son otros de los factores que desde un principio se relacionaron con la ICU (T. Oke, 1973). En estudios posteriores, descubrió que la magnitud de la ICU no estaba directamente relacionada con la población de la ciudad, sino más bien con la geometría urbana (T. Oke, 1981), y que la población era solo un sustituto de la estructura de las áreas urbanas. Este interés en las causas físicas que no

solo dan lugar a la formación, sino también a las características y particularidades de la ICU, generó la semilla de numerosos estudios adicionales en busca de los principios y fundamentos de la ICU. Es por ello que, durante los años posteriores, se identificaron patrones comunes en las características de la ICU. Sin embargo, es importante tener en cuenta las particularidades de cada ciudad y el clima regional de la zona en la que se encuentra, ya que no siempre se pueden aplicar patrones universales a todas las ciudades. Cada lugar puede presentar sus propias peculiaridades y no necesariamente cumplir con un patrón específico.

Para resumir las principales generalizaciones sobre la ICU, podemos utilizar la revisión científica realizada por John Arnfield (Arnfield, 2003), cuyo resumen se puede encontrar en la Tabla 1.1. Esta muestra las descripciones originales realizadas por Oke en 1982 sobre las principales características de la ICU y respaldadas por numerosas publicaciones posteriores en otras ciudades. De acuerdo con los hallazgos, se ha observado que la ICU tiende a alcanzar sus mayores niveles de intensidad en situaciones de escaso viento, bajo cielos despejados o con una menor exposición a la radiación solar, condiciones anticiclónicas, durante la temporada de verano y en ciudades de mayor tamaño y densidad poblacional. En contraste, durante el día, es posible que la temperatura en la ciudad sea más fresca que en sus alrededores, un fenómeno que se conoce como “*isla de frío urbana*”. Arnfield (2003) ya concluyó que, en regiones tropicales, las diferencias entre invierno y verano resultan menos significativas que los contrastes entre estaciones húmedas y secas. Esto se traduce en una mayor intensidad de la ICU en la estación seca en comparación con la estación húmeda, lo cual se relaciona con una mayor capacidad térmica en áreas rurales durante épocas de suelos húmedos.

Table III. Confirmation of UHI generalizations from Oke (1982) in empirical work from the review period

Empirical generalization	Reference
UHI intensity decreases with increasing wind speed	Ackerman (1985); Park (1986); Travis <i>et al.</i> (1987); Kidder and Essenwanger (1995); Eliasson (1996b); Ripley <i>et al.</i> (1996); Figuerola and Mazzeo (1998); Magee <i>et al.</i> (1999); Morris <i>et al.</i> (2001); Unger <i>et al.</i> (2001)
UHI intensity decreases with increasing cloud cover	Ackerman (1985); Travis <i>et al.</i> (1987); Kidder and Essenwanger (1995); Eliasson (1996b); Ripley <i>et al.</i> (1996); Figuerola and Mazzeo (1998); Magee <i>et al.</i> (1999); Morris <i>et al.</i> (2001); Unger <i>et al.</i> (2001)
UHI intensity is greatest during anticyclonic conditions	Unwin (1980); Unger (1996); Shahgedanova <i>et al.</i> (1997); Tumanov <i>et al.</i> (1999); Morris and Simmonds (2000)
UHI intensity is best developed in the summer or warm half of the year	Schmidlin (1989); Klysiak and Fortuniak (1999); Philandras <i>et al.</i> (1999); Morris <i>et al.</i> (2001)
UHI intensity tends to increase with increasing city size and/or population	Park (1986); Yamashita <i>et al.</i> (1986); Hogan and Ferrick (1998)
UHI intensity is greatest at night	Unwin (1980); Adebayo (1987); Schmidlin (1989); Djen (1992); Ripley <i>et al.</i> (1996); Jauregui (1997); Magee <i>et al.</i> (1999); Montávez <i>et al.</i> (2000); Tereshchenko and Filonov (2001)
UHI may disappear by day or the city may be cooler than the rural environs	Unwin (1980); Tapper (1990); Steinecke (1999)
Rates of heating and cooling are greater in the countryside than the city	Johnson (1985)

Copyright © 2003 Royal Meteorological Society Int. J. Climatol. 23: 1–26 (2003)

Tabla 1.1. Tabla realizada por A. J. Arnfield donde muestra las principales generalizaciones empíricas analizadas por Oke (1982) sobre la ICU, y estudios posteriores que las confirman en distintas ciudades. Fuente: (Arnfield, 2003, p. 16)

En 2019, I. D. Stewart publicó un artículo sobre la importancia de conocer los trabajos clásicos en climatología urbana para mejorar los trabajos actuales y futuros (Stewart, 2019). En esta revisión científica, se resumen algunas de las principales generalizaciones sobre la ICU, como el hecho de que su magnitud tiende a aumentar en condiciones anticiclónicas de cielo despejado, siendo más intensa durante la noche en comparación con el día. Además, se observa que esta magnitud es mayor en ciudades de latitudes medias en comparación con ciudades de latitudes más bajas. También se menciona la formación de la isla de frío durante el día y cómo la ICU eleva las temperaturas mínimas diarias del aire y reduce el rango de temperaturas diurnas.

Sin embargo, persisten cuestiones y patrones relacionados con la ICU que aún requieren una investigación más exhaustiva. Por ejemplo, la homogeneización de datos con el fin de realizar estudios comparativos que conduzcan a afirmaciones científicas sólidas no es una tarea sencilla.

La intensidad de la ICU puede variar estacionalmente dependiendo de la ubicación de la ciudad, alejándose del verano para manifestarse en otras estaciones. Esto es evidente en muchas ciudades mediterráneas, donde se registran los valores más altos en invierno (Donateo et al., 2023; Martín-Vide & Moreno-García, 2020; Papanastasiou & Kittas, 2012). Al mismo tiempo, en ciudades situadas a la misma latitud en Asia Oriental se han observado magnitudes mayores durante las noches de invierno y otoño (Y.-H. Kim & Baik, 2002; T. Shen, 2015). Incluso las proyecciones sobre escenarios futuros indican que la intensidad de la ICU será mayor en las noches de invierno, mientras que en el verano el aumento se manifestará en la isla diurna (Hamdi et al., 2015).

#### **1.1.4. Necesidades para el estudio del clima urbano**

Comprender el clima urbano en su totalidad es fundamental, ya que abarca una serie de fenómenos climáticos, incluyendo la ICU, que afectan directamente a los habitantes. Por lo tanto, su estudio no se limita únicamente a la ICU, sino que integra una gama de variables y condiciones que influyen en la planificación urbana, la salud pública y la sostenibilidad. En este contexto, las redes de medición meteorológicas se vuelven herramientas esenciales para comprender y abordar de manera integral los desafíos climáticos en entornos urbanos, siendo esencial contar con sistemas fiables para investigar a fondo estos fenómenos (Barrao, Serrano-Notivoli, Cuadrat, et al., 2022).

La obtención de datos meteorológicos en áreas urbanas se enfrenta a una serie de desafíos específicos: en primer lugar, la urbanización conlleva la creación de microclimas locales, que pueden variar considerablemente en comparación con las áreas rurales circundantes. Estos fenómenos requieren redes de medición específicas y la aplicación de técnicas de observación adaptadas para capturar la complejidad de los patrones climáticos en las ciudades. Las redes tradicionales de observación meteorológica, diseñadas principalmente para detectar condiciones meteorológicas a escala sinóptica, no son adecuadas para análisis urbanos e intraurbanos detallados. Además, las series de datos climáticos a menudo provienen de áreas circundantes a la ciudad, como aeropuertos, lo que plantea interrogantes sobre su representatividad como fuente de datos urbana ya que el efecto urbano puede desdibujarse al alejarnos del centro de la ciudad se encuentre la estación. Aunque muchas ciudades hoy cuentan con, al menos, una estación dentro de la ciudad, ésta sigue siendo insuficiente para un análisis detallado del mosaico urbano (Stewart, 2011).

La densidad de la red también es un desafío, ya que las áreas urbanas pueden ser extensas y heterogéneas, lo que dificulta la distribución efectiva de estaciones. Esto a menudo

conduce a espacios entre estaciones que no capturan con precisión la variabilidad climática a nivel local. La falta de instrumentos meteorológicos estratégicamente ubicados puede dar lugar a lagunas en la recopilación de datos.

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. En muchos casos, el punto de referencia utilizado era un aeropuerto metropolitano, un entorno que no siempre representa de manera adecuada el entorno rural circundante. En otros enfoques, se implementan transectos urbanos con mediciones de temperatura casi continuas durante un período de tiempo específico (Romero Rodríguez et al., 2020), realizando diferentes recorridos por la ciudad para analizar la configuración espacial de la UHI, mejorando la resolución espacial, pero condicionando la resolución temporal.

A pesar de los avances significativos en la investigación del clima urbano, el suministro de datos atmosféricos a partir de redes de observación con alta resolución espacial y durante largos períodos de tiempo sigue siendo un desafío de investigación debido a la dificultad para mantener redes extensas en el tiempo con la resolución espacial adecuada para captar la diversidad de entornos urbanos. Afortunadamente, una tendencia creciente de despliegue de redes meteorológicas urbanas está cambiando esta situación. El desarrollo y progresión de sensores de bajo coste y su calidad contrastada ofrecen nuevas oportunidades para las redes urbanas, obteniendo información a escala horaria o inferior, clave en los estudios de clima urbano.

Respecto a estas nuevas redes de observación es importante destacar la relevancia de la instrumentación adecuada. En la “*Guía de instrumentos y métodos de observación Volumen III*” la Organización Meteorológica Mundial (OMM) dedica el capítulo 9 a las observaciones urbanas, apartado que ofrece información de utilidad para la selección de emplazamientos de la red, los protocolos de instalación de los observatorios y la interpretación de los datos obtenidos. Los sensores utilizados deben ser especialmente diseñados para las condiciones específicas de las áreas urbanas y deben ser calibrados de manera precisa y constante para garantizar la fiabilidad de los datos. La ubicación también debe considerarse cuidadosamente, ya que obstáculos físicos como edificios y árboles pueden interferir con las mediciones, distorsionando los datos recopilados ya sea por la sombra que produzcan o por la irradiación que emitan.

También contamos con los avances en el campo de la teledetección y los estudios de temperatura de superficie (Voogt & Oke, 2003; Zhou et al., 2019). Pero hay que señalar que este tipo de estudios se centran en la temperatura superficial de los materiales y no en la temperatura del aire, dos variables distintas y no siempre bien correlacionadas (Adão et al., 2023; Hereher & El Kenawy, 2022) Aunque permiten una resolución espacial continua y detallada que, dependiendo del sensor, abarca desde las decenas de metros a kilómetros, esta escala muchas veces no encaja con las dimensiones de las ciudades medianas o pequeñas, que dependen totalmente del número de píxeles que cubren el área urbana y por tanto se difumina la heterogeneidad de sus diferentes espacios urbanos. Además, la falta de información continua en el tiempo con tiempos de retorno y disponibilidad de imágenes muy espaciados, así como la falta de datos sobre el ciclo diario, supone un verdadero problema.

En resumen, la problemática de obtener mediciones meteorológicas y datos climáticos en entornos urbanos radica en: 1) la necesidad de adaptar y expandir las redes de medición, trazar protocolos de diseño de red que presten especial atención a la ubicación de

los sensores, 2) garantizar la precisión de los instrumentos y 3) desarrollar controles de calidad que evalúen la validez de los datos.

Superar estos obstáculos es esencial para obtener bases de datos climáticas urbanas que puedan ser utilizadas en estudios posteriores, así como para tomar decisiones efectivas en la planificación urbana y la mitigación de los impactos del clima en las ciudades y sus habitantes.

### **1.1.5. Clima urbano y otras disciplinas**

Los estudios de climatología urbana trascienden los límites de la climatología al entrelazarse con diversas disciplinas, desempeñando un papel fundamental en áreas como la arquitectura, la planificación urbana, la salud pública y la sostenibilidad ambiental. Estas investigaciones no solo se centran en comprender los patrones atmosféricos locales en entornos urbanos, sino también en cómo estos afectan a la calidad del aire, el confort térmico, la distribución de la energía y la infraestructura urbana. Además, la interacción con la actividad humana, como el uso del suelo, el transporte y la densidad poblacional, ofrece valiosos recursos para abordar desafíos socioeconómicos y ambientales. El potencial de estos estudios para nutrir otras materias es enorme, ya que sus hallazgos pueden informar políticas públicas, diseño de edificaciones, estrategias de adaptación al cambio climático y medidas de mitigación de impactos ambientales, impulsando así un desarrollo urbano más sostenible y resiliente. Por ello, en este apartado se abordarán algunas de estas interrelaciones interdisciplinarias.

Por un lado, la relación entre el clima urbano y la salud pública es innegable. Las altas temperaturas, la calidad del aire y los patrones de ventilación en las ciudades pueden influir en la salud de los habitantes. Son muchos los estudios que avalan los efectos perjudiciales en la salud por la exposición a temperaturas extremas y a la contaminación del aire en áreas urbanas (Gasparrini et al., 2015; Íñiguez et al., 2021; Royé et al., 2020; Tobías et al., 2023), y comprender cómo estas condiciones climáticas se relacionan con diversas patologías es esencial para la toma de decisiones en materia de salud pública (Costello et al., 2009).

Por otro lado, el clima urbano tiene un papel fundamental en la creación de desequilibrios intraurbanos. No todas las áreas urbanas experimentan los mismos efectos de la ICU y la exposición a condiciones climáticas extremas puede variar ampliamente según la ubicación dentro de la ciudad (Conlon et al., 2020; Harlan et al., 2006). Esto puede llevar a disparidades en la calidad de vida y a la marginalización de comunidades desfavorecidas, lo que subraya la importancia de considerar el clima urbano en el desarrollo de políticas de equidad (Brunckhorst et al., 2023). Es fundamental considerar que, aunque el clima de una ciudad pueda impactar de manera uniforme en diversas áreas urbanas, estas zonas no necesariamente ofrecen las mismas condiciones para que su población se adapte a variaciones de temperatura de la misma manera. Esto puede dar lugar a disparidades, donde algunas comunidades enfrentan mayores desafíos para atenuar el impacto de las olas de calor en comparación con otras con mayores recursos, lo que a su vez contribuye a desequilibrios territoriales, una menor cohesión social y una mayor vulnerabilidad.

El planeamiento territorial es otra de las áreas en la que el clima urbano desempeña un papel crucial (Smith Guerra et al., 2023). Comprender las características climáticas de una ciudad es esencial para el diseño de espacios urbanos que sean sostenibles, resistentes a las condiciones climáticas y que promuevan la calidad de vida de sus habitantes (Geneletti & Zardo, 2016). Además, la planificación territorial puede contribuir a mitigar los efectos de la ICU (Mahmuda & Webb, 2016) y promover un entorno más habitable (Středová et al., 2015).

Comprender cómo el entorno construido y las condiciones climáticas locales influyen en la vulnerabilidad de la población es esencial para la planificación, la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático en entornos urbanos.

En resumen, el estudio del clima urbano es un campo interdisciplinar que no solo se concentra en las características climáticas de las ciudades, sino que también tiene un impacto significativo en la salud pública, la equidad intraurbana, la cohesión social, el planeamiento territorial y la vulnerabilidad de las comunidades urbanas. Estas conexiones multidisciplinares subrayan la importancia de investigar y desarrollar redes de sensores confiables para abordar de manera integral los desafíos climáticos en las ciudades.

## **1.2. Los estudios sobre el clima urbano en España**

El estudio de la climatología urbana en España ha experimentado un desarrollo notable en las últimas décadas, sin embargo, su reconocimiento y consolidación como disciplina científica llegó más tarde en comparación con otras regiones del mundo. Países europeos como Inglaterra o Alemania, y en otros continentes como Estados Unidos o Japón, comenzaron a publicar sus estudios a principios del siglo XX (ver 1.1.1). A pesar de partir con retraso, el creciente interés en este tipo de investigaciones urbanas ha propiciado un rápido avance en la investigación climática en el contexto español. Un “boom” que diversas publicaciones historiográficas (Bejarano Mederos, 2002; Fernández-García, 2016; Moreno-García, 2007, 1998) sitúan en la década de los 90 y finales de los 80. Este empuje se vio impulsado en gran medida por la progresiva atención que en España se dio a la climatología durante aquella época, cuando surgió el grupo de trabajo de Climatología de la Asociación Española de Geografía en 1994 y, posteriormente, la Asociación Española de Climatología en 1997. Una relevancia que persiste en la actualidad y que desafíos como el cambio climático, junto con la necesidad de comprender y mitigar sus impactos en el clima urbano, han mantenido a esta disciplina en un estado de constante evolución.

Para conocer como se ha desarrollado esta disciplina en España, se ha realizado un exhaustivo recuento bibliográfico de las principales publicaciones realizadas en el ámbito español sobre clima urbano. Esta tarea compleja implicó la recopilación de investigaciones desde mediados del siglo XX hasta la actualidad, procedentes de diversas fuentes como revistas científicas, libros y actas de congresos. Utilizando los fondos disponibles de la biblioteca de la Universidad de Zaragoza y diversas bases de datos bibliográficas web como: *Scopus*, *Web of Science*, *Google Scholar*, *Dialnet* y *ISOC* del CSIC. En total, se han identificado 251 publicaciones, las cuales han sido incluidas en una base de datos simplificada disponible en los Anexos (*Base de datos de publicaciones sobre climatología urbana española*). Esta base de datos proporciona información detallada sobre cada publicación, incluyendo el año de publicación, los autores, el título, la ciudad analizada, la variable investigada y la metodología utilizada para la adquisición de datos. Textos como las anteriormente citadas investigaciones historiográficas sobre la evolución de esta disciplina, revisiones bibliográficas o biografías académicas de autores destacados han sido fuentes fundamentales de publicaciones. Sin embargo, aunque se han añadido las publicaciones citadas en dichos documentos no todas han podido ser consultadas de forma directa. No obstante, 182 sí que han sido consultadas y el resto son referencias.

### **1.2.1. Evolución de la climatología urbana en España**

En base a los trabajos publicados que se han consultado y que se han incorporado en esta revisión, sin tener en cuenta posibles investigaciones previas o proyectos de los cuales no se conserva documentación, los primeros estudios publicados en España sobre clima

urbano se llevaron a cabo en Madrid, centrándose especialmente en la caracterización de la ICU. Estos estudios se llevaron a cabo en el departamento de Geografía de la Universidad Autónoma de Madrid, bajo la dirección del profesor Antonio López Gómez y el posterior trabajo de su grupo de investigación con autores como Felipe Fernández García, Miguel Ángel Almendros Coca o Fernando Arroyo Ilera. López Gómez fue una figura pionera en este campo, consolidando una línea de investigación que se remonta a los años 50, cuando se abordaron de manera aislada y dispersa los primeros estudios relacionando el cambio climático con el crecimiento urbano (López-Gómez, 1954, 1961), particularmente en el entorno de la estación del Retiro. López Gómez se centró en los factores naturales para explorar la influencia del proceso de urbanización en el clima de la ciudad. Su influencia en la climatología urbana española es sobresaliente y numerosos autores han destacado su relevancia (Arroyo-Ilera, 2001; Arroyo-Ilera & Fernández-García, 2018; Cañada-Torrecilla & Fernández-García, 2003; Fernández-García, 2002; Rosselló Verger, 2003). También sobresale la figura de Felipe Fernández García con más de 50 publicaciones en torno al estudio del clima de Madrid (Fernández-García, 2009; Fernández-García & Rasilla-Álvarez, 2008) y tantos otros en torno a la contaminación del aire (Fernández-García, 1998a; Martilli et al., 2021).

Ambos autores son los artífices de publicaciones clave como "La isla de calor en Madrid: avance de un estudio de clima urbano" (López-Gómez & Fernández-García, 1984) o "Madrid: microclima y medio ambiente" (Fernández-García, 1984). Publicaciones que marcan el inicio de la climatología urbana en España. Durante esta etapa inicial que abarcaría hasta finales de los años 80, se observa un interés destacado en la ICU y su configuración. Se comienza a experimentar con metodologías que incluyen la comparación entre varios observatorios rurales y urbanos, pero sobre todo se destaca el diseño de campañas de mediciones mediante transectos urbanos. Por ejemplo, la primera publicación que utilizó un transecto urbano en España se llevó a cabo en Madrid (López-Gómez, 1988), abarcando tres rutas diferentes que se realizaron cerca de un centenar de recorridos, recogiendo más de cien registros por recorrido. Estas se efectuaban durante la noche y en diferentes momentos del año, bajo diversas condiciones sinópticas, con el objetivo de observar los distintos comportamientos de la ICU. Con el paso de los años, esta metodología se estandariza y se refina, mejorando las observaciones utilizadas en la década posterior.

Durante estos primeros años, otras ciudades como Zaragoza (Calvo-Palacios, 1976; Cuadrat, 1989), Valencia (Albero & Calvo, 1981; Meliá et al., 1989), Logroño (García-Ruiz et al., 1989) o Barcelona (Moreno-García, 1987) también cuentan con publicaciones sobre el clima de sus respectivas localidades. Un ejemplo destacado es la ciudad de Tarragona, que cuenta con el primer estudio de tesis doctoral sobre el clima urbano de una ciudad española (Brunet-India, 1989). La mayoría de estos estudios adaptan las metodologías desarrolladas en los trabajos de Madrid, pero siguen siendo pioneros en sus respectivas ubicaciones. Además, también se investigan otras variables distintas a la ICU, como es el caso del viento (Albero & Calvo, 1981; Cano & Maqueda, 1984; Fernández-García, 1982). Por último, es importante destacar que la falta de publicaciones durante este período no debe interpretarse como un periodo de inactividad. De hecho, según señalan algunos autores (Moreno-García, 2007, 1998), fue un periodo de intensa actividad investigadora. Durante la década de los 80, se llevaron a cabo la mayoría de las campañas de medición que servirían como base para los futuros trabajos publicados en la siguiente década.

La siguiente etapa, la década de los 90, supuso el auge de la climatología urbana en España. Mientras que en la década anterior se registraron un total de 14 publicaciones, en esta etapa se contabilizaron 92. Simultáneamente, las lagunas en el mapa de estudios español fueron reduciéndose, extendiendo la investigación a regiones previamente no estudiadas, esto

se traduce en un aumento de 7 a 49 ciudades analizadas a finales de la década. Incluso muchas de estas ciudades cuentan con más de un estudio y de una variable analizada.

Sin embargo, dos hitos en particular marcaron un punto de inflexión en la historia de esta disciplina a nivel español: 1) La publicación de “El clima de las ciudades españolas” y 2) la organización de la IV Reunión Nacional de Clima.

En primer lugar, la publicación en 1993 del primer libro sobre clima urbano en España, titulado “El clima de las ciudades españolas”, coordinado por Antonio López Gómez, surgió como resultado de la primera reunión científica celebrada en España sobre el clima urbano en el Instituto Juan Sebastián Elcano (CSIC). En el libro se analizan 14 ciudades españolas distribuidas en cuatro capítulos. La ciudad de Madrid (López-Gómez, Fernández-García, & Arroyo-Ilera, 1993b) ocupa la mayor parte del libro e incluye observaciones obtenidas mediante diversas metodologías y se abordan diversas variables más allá de ICU, como la precipitación o el confort térmico, e incluso se consideran ciudades limítrofes como Alcalá de Henares o Aranjuez. Asimismo, destaca el capítulo sobre las ciudades catalanas (Martín-Vide, 1993), que recopila los primeros resultados publicados a principios de los años 90 (Carreras Verdaguer et al., 1990; Martín-Vide, 1992; Moreno-García, 1991b), no solo para Barcelona, principal área de estudio, sino también para ciudades cercanas en su área metropolitana como Hospitalet de Llobregat o Molins de Rei. Tampoco se olvidan las investigaciones realizadas en Tarragona. El libro también incluye un capítulo sobre las ciudades del valle del Ebro (Cuadrat, 1993), que reúne los principales estudios que ya habían comenzado en la década anterior en Zaragoza y Logroño, además de incluir las ciudades de Huesca y Teruel. Por último, se presenta un capítulo que integra los primeros estudios realizados en otras ciudades españolas (López-Gómez, Fernández-García, & Arroyo-Ilera, 1993a), un total de 8 en aquel momento, que estaban en sus etapas iniciales de investigación.

En segundo lugar, en enero de 1998, el Grupo de Climatología de la Asociación Española de Geografía organizó la IV Reunión Nacional de Clima en la Universidad Autónoma de Madrid, seguida por la publicación posterior "*Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas*" (Cañada-Torrecilla et al., 1998). Esta publicación contó con la participación de más de cuarenta especialistas de diversas disciplinas, tanto de varios países como de organismos oficiales, así como de investigadores de la mayoría de las universidades españolas que trabajaban en esta disciplina en aquel momento. El evento no solo sirvió como plataforma para mostrar las investigaciones españolas y estimular nuevos proyectos, sino también como fuente de numerosas publicaciones. Entre las 44 contribuciones que se incluyen en el libro, destacan las recogidas en el capítulo 3 dedicado al clima urbano en España, que cuenta con 13 contribuciones donde se analizan nuevas ciudades como Girona (Soler Temprano, 1998), A Coruña (Miragaya Veras & Martí Ezpeleta, 1998) o Granada (Montávez Gómez et al., 1998). En total, se presentaron investigaciones sobre el clima de 14 ciudades españolas diferentes, abordando no solo aspectos como la ICU o la temperatura, sino también aspectos relacionados con el confort, la planificación o la contaminación. Además, se mostraron nuevas metodologías más allá de los transectos, como la teledetección o las campañas de medición mediante infrarrojos que al final de esta década su uso estaba ya extendido e implementado en muchos estudios.

Con la llegada del siglo XXI y durante la primera década, el auge previo se mantiene en los primeros años de esta nueva época. Eventos como la *5th International Conference on Urban Climate* de la *The International Association for Urban Climate (IAUC)*, celebrada en Polonia en 2003, permitieron exponer a nivel global los avances alcanzados en España en este campo. En la base de datos se recopilan 6 publicaciones relacionadas con este congreso, las cuales analizan las ciudades de Madrid (Fernández-García & Montávez Gómez, 2003), Barcelona

(Martín-Vide & Moreno-García, 2003), Granada (Montávez Gómez et al., 2003b, 2003a) y Zaragoza (Saz et al., 2003; Vicente-Serrano et al., 2003). A pesar del elevado número de publicaciones durante esta época, un total de 70 se observa que a medida que avanzan los años, disminuye. A partir de 2005 y hasta finales de la década, solo se publican 15 artículos.

Este período también se caracteriza por ser una fase de transición, donde la mayoría de las grandes ciudades españolas ya cuentan con estudios de clima. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se centran en la presencia y delimitación de la ICU y no profundizan en otros aspectos del clima urbano. Son solo unas pocas ciudades las que concentran las investigaciones y profundizan más en las características del clima urbano, mientras que pocos estudios abordan el clima urbano en su conjunto o utilizan variables más allá de la temperatura (Azorín-Molina & Martín-Vide, 2007; Rodríguez et al., 2001; Tejeda Martínez et al., 2004). A pesar de la gran cantidad de estudios sobre ciudades individuales, son escasos los estudios que comparan los resultados obtenidos o cuyo objetivo sea observar patrones comunes de comportamiento entre varias ciudades de diferentes ámbitos (Fernández-García, 2009; Fernández-García & Rasilla-Álvarez, 2008). Esto se debe en parte a la falta de homogeneidad en las campañas de medición (Moreno-García, 2007) y a la ausencia de una unidad metodológica que permita crear bases de datos comparables, pero también a la falta de grandes proyectos a nivel estatal en torno a esta disciplina. Además, en el contexto español, existe una falta de interés generalizado por comprender las causas y los factores responsables de las características que adquiere el clima en los espacios urbanos y no son muchos los artículos que lo tratan de forma directa (Alonso García et al., 2007; Caballero, 2004; Cuadrat et al., 2005; Miragaya Veras, 2003).

La segunda década del siglo XXI hasta la actualidad marca un nuevo período en el que el número de publicaciones, aunque más bajo en comparación con otras épocas, se mantiene constante, con un promedio de alrededor de 4 publicaciones por año, sumando un total de 43. Además, la década comienza con la celebración en Madrid del VII Coloquio de la Asociación Española de Climatología (AEC), bajo el título "*Clima, ciudad y ecosistemas*" (Fernández-García et al., 2010), doce años después del encuentro en la misma ciudad del grupo de Climatología de la AGE. Aunque en esta ocasión el número de ponencias relacionadas con el clima de las ciudades españolas no fue tan numeroso. En esta etapa, las tendencias que ya apuntaban en la pasada década son más notorias. Las metodologías tradicionales de obtención de datos, como los transectos urbanos o la comparación de observatorios urbanos y rurales, van disminuyendo, mientras que nuevas técnicas como la teledetección con nuevos satélites y sensores (Rasilla-Álvarez et al., 2015; Sobrino et al., 2012), así como el diseño de redes urbanas densas de bajo coste (Casas-Castillo et al., 2010; Tejedor et al., 2016), están cada vez más en auge. Incluso, métodos como la modelización atmosférica (de la Paz et al., 2016; García-Díez et al., 2016; Martilli, 2012) o el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la caracterización de la ICU (Fernández-García & Rasilla-Álvarez, 2008; Lana et al., 2018; Saz et al., 2003) están cada vez más presentes. Estas técnicas y métodos permiten explorar otros aspectos del clima urbano y características de la ICU que anteriormente no habían sido investigados, como su relación con la diversidad de espacios urbanos y sus características, lo que conlleva a mejorar la resolución a escala intraurbana.

Un ejemplo destacado de avance metodológico en las últimas dos décadas y la creciente incorporación de estudios de temperatura de superficie es el proyecto DESIREX 2008 (*Dual-use European Security IR Experiment 2008*), lanzado en 2008 como parte del programa de *Reorientación de la Fase de Consolidación de Fuegosat del Programa Earth Watch* de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés *European Space Agency*). Este proyecto (Sobrino et al., 2009) consistió en una campaña experimental de medición en Madrid, donde

diversos tipos de sensores recopilaron datos de temperatura del aire y de la superficie. Una serie de mediciones hiperespectrales, espaciales e in situ coordinadas al mismo tiempo para evaluar la ICU y el comportamiento térmico urbano. Creando bases de datos de temperatura de superficie (LST, por sus siglas en inglés *Land Surface Temperature*) y temperatura del aire a una elevada resolución espacial (0 a 30 m) para poder estudiar la variabilidad urbana en detalle. Y realizar validaciones sobre los productos derivados de ICU con estaciones meteorológicas urbanas y campañas de campo. Todo ello para estudiar el balance energético de las ciudades y mejorar las políticas de eficiencia energética. Toda esta valiosa información climática fue aprovechada en posteriores análisis climáticos de la ciudad (de la Rubia, 2020; Salamanca et al., 2012; Sobrino & Oltra-Carrió, 2012).

### 1.2.2. Características de los estudios de clima urbano en España

En este apartado, se emplea la base de datos bibliográfica (Anexo *Base de datos de publicaciones sobre climatología urbana española*) para examinar aspectos fundamentales de los estudios españoles, tales como las ciudades analizadas, las variables estudiadas y las metodologías utilizadas. Antes de avanzar, es importante tener en cuenta algunas consideraciones previas. Aunque se han analizado un total de 251 publicaciones, es posible que no todas proporcionen datos sobre cada aspecto investigado. Por ejemplo, es posible que no se conozca la metodología utilizada si no se pudo acceder al documento, aunque sí se tenga información sobre la ciudad debido al título o la referencia de la publicación. Además, muchas de las publicaciones consultadas no cuentan con estas variables ya que se han categorizado como estudios *teóricos*, lo que incluye investigaciones bibliográficas (Marías Martínez, 2004; Moreno-García, 1990, 1992), historiográficas o epistemológicas (Fernández-García, 2016; López-Gómez, 1995; Moreno-García, 1991c, 1997, 2007, 1998), homenajes a autores destacados (Arroyo-Ilera & Fernández-García, 2018; Cañada-Torrecilla & Fernández-García, 2003), conceptos sobre climatología urbana o como estos se relacionan con otros aspectos de la climatología general (Fernández-García, 1998b; Gavira, 1943; López-Gómez, 1985; Martín-Vide, 2017; Moreno-García, 2012) o comprobación de modelos físicos urbanos que no se centran en una ciudad específica o en datos observacionales (Martilli, 2012; Montávez Gómez et al., 2008). Por otro lado, un mismo estudio puede analizar varias ciudades, variables o metodologías, lo que lleva a contabilizar todas ellas. Asimismo, puede haber publicaciones de un mismo autor o grupo de investigación que, aunque diferentes, estudien la misma ciudad con los mismos datos y la misma metodología, pero variando la escala temporal o el canal de publicación, como un libro, una revista científica o un acta de congreso. Por todas estas razones, se contabilizan un total de 279 ciudades, 312 variables y 230 metodologías.

Como punto de partida de este análisis, la Figura 1.1 muestra en un mapa la distribución de todos los estudios publicados sobre clima urbano en España. Destacan cuatro ciudades principalmente por su número de publicaciones: Madrid (67), Barcelona (31), Zaragoza (29) y Valencia (20). Madrid sobresale como el principal foco de estudios sobre clima urbano en España, siendo pionera en este tipo de investigaciones (López-Gómez, 1961) y un constante núcleo de análisis del clima urbano y precursor de metodologías (López-Gómez, 1988; Sobrino et al., 2009), especialmente para el estudio de la ICU, pero también el confort térmico y la contaminación. Barcelona, como la segunda ciudad más grande de España, ocupa el segundo lugar en número de publicaciones (Martín-Vide et al., 1998; Martín-Vide & Moreno-García, 2020; Moreno-García, 1991a, 2022; Moreno-García & Serra Pardo, 2016), abordando no solo la ICU, sino también otros aspectos como la precipitación y la presión atmosférica. Tanto Madrid como Barcelona y su interés por el clima generan estudios en ciudades cercanas a sus áreas metropolitanas; por ejemplo, Madrid tiene 6 estudios en ciudades contiguas en el sector este, desde Alcobendas hasta Arganda del Rey

(Bello-Fuentes, 1995; Fernández-García et al., 1992; Rodríguez-Gómez et al., 2022), mientras que Barcelona cuenta con 10 estudios adicionales en 7 ciudades cercanas (Algaba et al., 1993; Martín-Vide et al., 1992; Moreno-García & Serra Pardo, 2017; Pérez González & Pérez Jiménez, 1998). Zaragoza (ver apartado 1.3), con una tradición en esta disciplina desde los años 70 (Calvo-Palacios, 1976; Cuadrat, 1989), ha evolucionado con el tiempo y se ha adaptado a nuevas metodologías, lo que se traduce en una tercera posición con 29 estudios. Valencia también es un destacado foco de investigación urbana en España, especialmente en estudios pioneros sobre el viento (Albero & Calvo, 1981; Pérez-Cueva, 1993), aunque se observa una disminución en publicaciones desde el año 2001, con solo 2 contabilizadas hasta la actualidad.

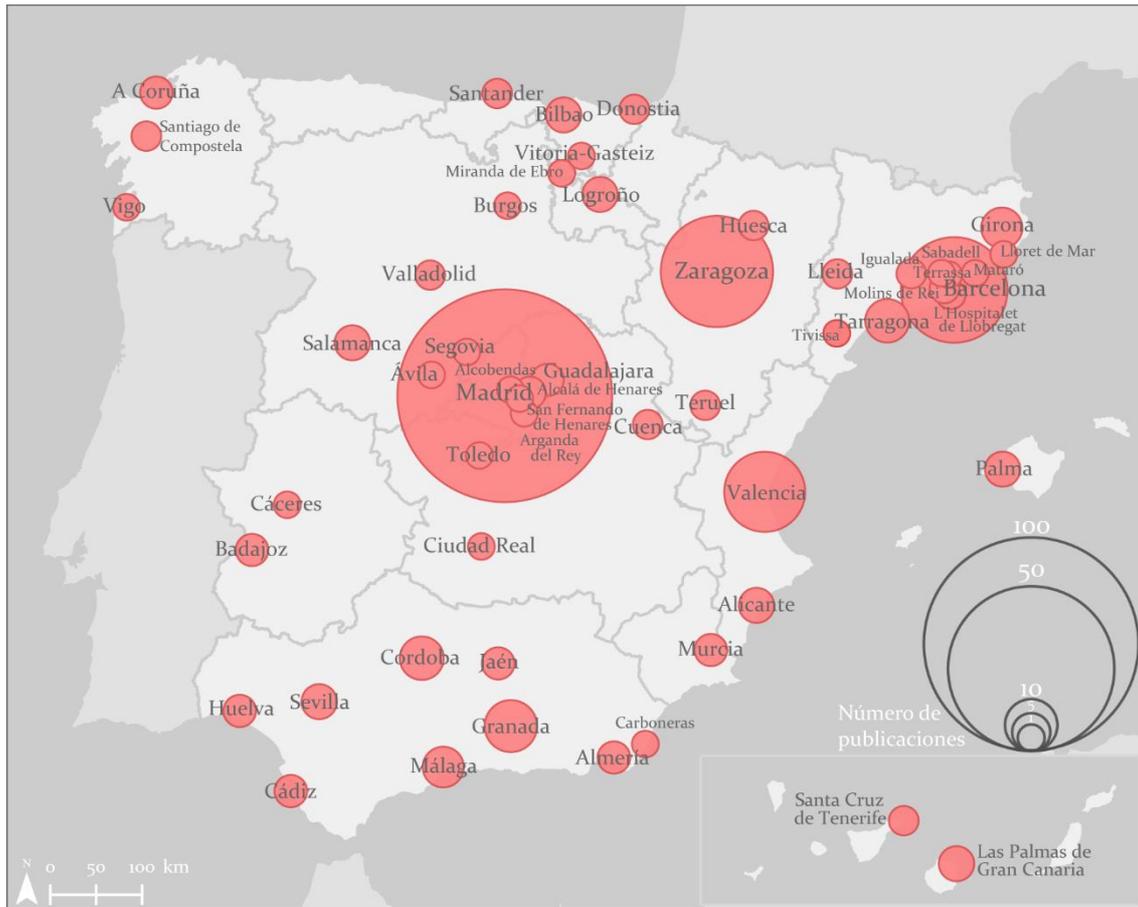


Figura 1.1. Distribución de los estudios sobre clima urbano en ciudades españolas. Fuente: Anexo Base de datos de publicaciones sobre climatología urbana española.

El resto del mapa muestra una amplia distribución de los estudios en España, con un total de 51 ciudades analizadas que concentran 132 estudios. Las principales ciudades españolas, ya sea por su tamaño o población, cuentan con al menos un estudio, mayormente centrados en la ICU. Sin embargo, hay algunas disimetrías en ciertas partes de la geografía española, mientras que el eje mediterráneo hasta Andalucía tiene un gran número de estudios, unos 60, distribuidos en 13 ciudades diferentes, zonas del interior peninsular como ambas Castillas y Extremadura cuentan con solo 20 estudios en 11 ciudades. Parte del norte de España, incluyendo País Vasco, Cantabria y La Rioja, tiene 14 estudios, mientras que otras comunidades vecinas como Navarra o Asturias no tienen estudios registrados en este análisis bibliográfico. De las capitales provinciales, 40 han sido estudiadas, mientras que 12 no tienen ninguna publicación registrada. A lo que se suma una falta de investigaciones en poblaciones rurales o pequeños núcleos, a pesar de que también experimentan modificaciones climáticas

locales y presentan ICU, como ya se ha comprobado en el caso de Carboneras en Almería (Moreno-García & Martín-Vide, 2007) o Tivissa en Tarragona (Dienst et al., 2019), ambas con menos de 10.000 habitantes.

Tras el análisis de las ciudades, la Figura 1.2 dirige la atención hacia las principales variables estudiadas en las publicaciones. Se observa un claro predominio de la temperatura del aire y los estudios de la ICU. De las 312 variables identificadas, 151 están relacionadas con análisis de la temperatura del aire, representando casi el 49% de todas las publicaciones analizadas. Esta predominancia refleja un enfoque mayoritario en la ciencia española hacia los estudios de este carácter térmico, tal y como Moreno-García (2007) señalaba como un desafío a abordar para diversificar los tipos de investigaciones y avanzar en otros aspectos del clima urbano menos explorados. Además de estos análisis, se registraron 33 publicaciones (10,5 %) que examinaban la temperatura de la superficie, ya sea mediante técnicas de teledetección o mediciones por infrarrojos. Todos estos artículos están también relacionados con la ICU, ya sea para su detección, medición de intensidad o evolución temporal, permitiendo además analizar cómo este fenómeno varía en relación con las diferentes cubiertas del suelo urbano. Sin embargo, esto supone que cerca del 60% de las publicaciones españolas se centran en el estudio de fenómeno urbano. No obstante, otras variables también han sido objeto de estudio. Por ejemplo, la precipitación y la humedad relativa agrupan 23 y 15 publicaciones respectivamente. En el caso de la humedad, pocos estudios se centran exclusivamente en esta medida (Brunet-India, 1993; Cuadrat Prats et al., 2015), siendo en su mayoría un valor complementario en cálculos de confort térmico o análisis derivados. En cuanto a la precipitación, los estudios se han centrado en la percepción diaria durante la década de los 90 (López Martín, 1995; Martín-Vide et al., 1998), y en años recientes se han relacionado más con análisis de riesgo y la planificación ante eventos excepcionales (Casas-Castillo et al., 2010; Cutillas-Lozano et al., 2023; Lana et al., 2018). Por otro lado, el viento, otra variable estudiada, principalmente en los años 80 y 90, ha sido objeto de análisis descriptivos y poco más que complementarios a otras variables (Cano & Maqueda, 1984; Cuadrat & Vicente-Serrano, 2003; Fernández-García, 1982). Además, se han incluido estudios teóricos que representan el 15% de todas las publicaciones, así como una categoría de "otras variables" que abarca aspectos poco explorados como la niebla (Fernández-García, 1984; López Martín, 2011), la presión (Rodríguez et al., 2001), la radiación (Martín-Vide, 1993), el confort térmico (Fernández-García, 2001; Gómez et al., 2001; Martí Ezpeleta & Royé, 2021; Pérez-Cueva & Canet Molla, 1998), el gradiente térmico en altura (Cañada-Torrecilla & Almendros, 1998), y otras variables atmosféricas (Banks et al., 2015). La presencia temporal de estas variables coincide con las etapas más prolíficas en estudios, reflejando la búsqueda de nuevas dimensiones del clima urbano aún no analizadas.

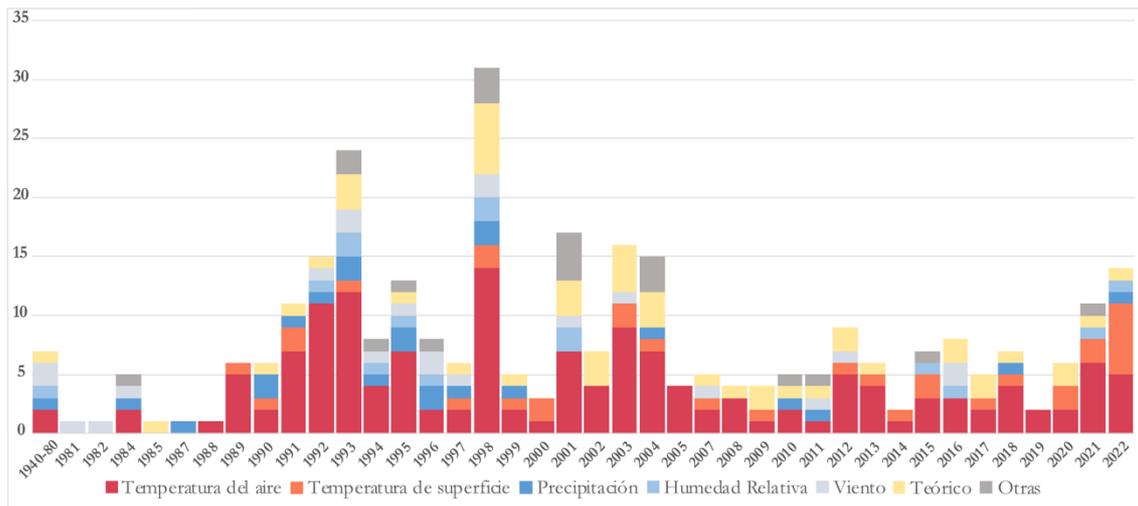


Figura 1.2. Evolución anual de las variables analizadas en las publicaciones españolas sobre climatología urbana. Fuente: Anexo Base de datos de publicaciones sobre climatología urbana española.

Para concluir, se ha registrado en la base de datos la metodología principal empleada en cada estudio. Esta se refiere al proceso o técnica mediante la cual se recopilan los datos observacionales de las variables climáticas urbanas, que posteriormente son utilizados en el análisis. Su evolución temporal, como se aprecia en la Figura 1.3, es notable, y los aspectos fundamentales se observan tanto en el análisis histórico de esta disciplina a nivel español (consultar 1.2.1) como global (consultar 1.1.1). Como primera técnica identificada se destaca el uso de un observatorio urbano, siendo esta la metodología empleada en el primer estudio de climatología urbana aplicado a una ciudad española (López-Gómez, 1961). Esta técnica representa un punto de partida sencillo para comprender el clima de una ciudad, permitiendo observar cómo las modificaciones urbanas afectan a las mediciones registradas. Inicialmente, el objetivo principal de las publicaciones era identificar relaciones entre el crecimiento y urbanización de la ciudad con las variaciones en las series históricas de los observatorios urbanos (Cuadrat, 1989). Además, se emplea esta técnica cuando la variable analizada es complicada de registrar si no es un observatorio convencional, como la precipitación (Almendros & Fernández-García, 1996) o la presión atmosférica (Rodríguez et al., 2001). Posteriormente, se procedió a agregar más observatorios para cuantificar las diferencias climáticas entre la ciudad y su entorno regional. Esta metodología se basaba en la utilización de uno o varios observatorios en el interior y otros en las afueras, como localidades rurales, periurbanas o aeropuertos, con un fin muy claro que era identificar la ICU (Alonso García et al., 2003; García Barrón et al., 2005; Martín-Vide & Moreno-García, 2020). Aunque también hay otras variables analizadas como el viento o la humedad (Brunet-India, 1993, 2001). Otra técnica fundamental, que supuso un hito en la investigación (López-Gómez, 1988), fue la realización de transectos urbanos, ya sea en automóvil o a pie (Almendros, 1992), que consistía en tomar mediciones a lo largo de trayectos predefinidos para capturar información térmica en puntos específicos. Utilizando sensores, termohigrómetros e incluso termómetros de infrarrojos (Martí Ezpeleta & Miragaya Veras, 1998) se realizaban campañas de medición para captar datos en momentos específicos. Esta técnica se refinó con el paso de los años, y desde sus inicios hasta el apogeo de los años 90 y principios de los 2000, esta metodología se estandarizó y se establecieron protocolos de medición. Sin embargo, en ocasiones no fue suficiente para realizar promedios o comparaciones entre transectos, ya sea dentro de una misma ciudad o entre diferentes localidades. Fue una metodología completamente orientada a identificar y caracterizar el comportamiento de la ICU en áreas urbanas (Cuadrat, De la Riva, López Martín, & Martí Ezpeleta, 1993; García-Ruiz et al., 1989;

Hernández et al., 2001; Moreno-García, 1991b; Pérez-Cueva, 1993), lo que permitió el desarrollo posterior de mapas de ICU (Almendros, 2004; Cuadrat et al., 2002; Fernández-García, 2009; Saz et al., 2003) que se ajustaban a momentos o situaciones específicas, como diferentes condiciones sinópticas que se buscaban identificar (Almendros & López-Gómez, 1995). Estas tres metodologías fueron los principales enfoques científicos hasta la segunda década del siglo XXI, momento a partir del cual su uso ha disminuido. En total, estas tres técnicas representan el 70 % de todas las técnicas registradas en la base de datos. Los transectos urbanos destacan como la técnica más utilizada, con 86 registros, pero desde el año 2010 solo se han contabilizado 8 (Acero et al., 2013; Alomar Garau & Llop Garau, 2018; Taulé Codinach, 2022). Esta tendencia descendente también se observa en la comparación de varias estaciones, aunque en menor medida, con 11 publicaciones registradas en ambas décadas del siglo XXI.

En cambio, no todas las tendencias son negativas y el uso de otras técnicas se ha intensificado con los años, motivadas principalmente por la dificultad para obtener información climática en entornos urbanos. El auge de la información satelital y la evolución de los sensores térmicos han dado lugar a una nueva aplicación de la teledetección en la climatología urbana, aunque hay que retroceder más de 30 años para poder observar el primer estudio que implementó la teledetección en España (Caselles Miralles et al., 1989). Actualmente es la tercera metodología más utilizada con 31 publicaciones registradas. Desde aquel momento el número de publicaciones ha aumentado incorporando también los avances que se han producido en la tecnología satelital y la incorporación de nuevos sensores, plataformas o satélites. Por ejemplo, se pueden mencionar el sensor AVHRR de los satélites de la NOAA (Caselles Miralles et al., 1991; López-García et al., 1991; Ruescas Orient et al., 2003), las bandas térmicas de diversos satélites *Landsat* (De la Riva et al., 1997; Lemus-Canovas et al., 2020) o el satélite Sentinel-3, uno de los más recientes (Hidalgo-García, 2022; Hidalgo-García & Arco-Díaz, 2022a). Además, existen sensores aerotransportados (Fernández-García et al., 1999; López-Gómez et al., 1998) y mediciones de campo utilizando termómetros de infrarrojos (Martí Ezpeleta & Miragaya Veras, 1998). Incluso se ha comenzado a explorar los usos de drones y sus aplicaciones mediante sensores térmicos en los espacios urbanos (Videras-Rodríguez et al., 2022). Sin embargo, es importante señalar que estos estudios se centran en la temperatura superficial de los materiales, no en la temperatura del aire, por lo que están analizando la isla de calor urbano superficial o SUHI (por sus siglas en inglés *Surface Urban Heat Island*), no la ICU a pesar de que tengan ciertas correlaciones (Barrao et al., 2021; López-Gómez et al., 1990). Aunque permiten una resolución espacial detallada y continua, esta escala a menudo no se ajusta a las dimensiones de ciudades medianas o pequeñas (Sobrino et al., 2012), ya que dependen totalmente de la resolución de la imagen del satélite, difuminando en muchos casos la heterogeneidad de los diferentes espacios urbanos, lo que impide estudios detallados a escala intraurbana. Además, la falta de información continua en el tiempo, con tiempos de retorno variables que pueden abarcar desde días hasta semanas, y la disponibilidad de imágenes muy espaciadas debido a la presencia de nubes u otros fenómenos atmosféricos junto con la carencia de datos sobre el ciclo diario, dificultan el uso de esta información. En cualquier caso y a pesar de estas limitaciones, la integración de estas metodologías en los estudios de clima urbano permite realizar comparaciones entre diferentes ciudades bajo las mismas condiciones metodológicas (Hidalgo-García, 2022; Rodríguez-Gómez et al., 2022) algo realmente complicado de realizar con redes convencionales de observación, análisis espacio-temporales amplios y explorar cómo las diferencias en las temperaturas urbanas se relacionan con diversas características espaciales en los entornos urbanos (Boegh et al., 2002; Hidalgo-García & Arco-Díaz, 2022b).

En las últimas dos décadas, se ha observado un creciente interés en técnicas relacionadas con la obtención de información precisa en entornos urbanos. Si bien la

teledetección ha permitido mejoras significativas en la obtención espacial de datos a través de imágenes continuas, las demandas actuales han destacado la necesidad de una mayor resolución temporal. Este requisito se vincula estrechamente con la necesidad de comprender la evolución del ciclo diario del clima urbano, para lo cual se requieren conjuntos de datos más extensos y frecuentes. La creación de redes urbanas de medición ha surgido como respuesta a esta necesidad. Estas redes pueden clasificarse en dos categorías principales: aquellas que se han establecido mediante la integración de datos de múltiples fuentes preexistentes y aquellas que han sido diseñadas y planificadas específicamente para recopilar información sobre el clima urbano de una determinada ciudad. Estas metodologías, más recientes, han emergido como resultado directo de la demanda de información evidenciada por investigaciones de décadas previas. Es relevante destacar que, aunque estas técnicas representan aproximadamente el 7 % del total de publicaciones, su impacto y relevancia son significativos. En particular, 7 en el caso de redes de distintos observatorios y 9 en el caso de una red urbana propia. En la actualidad, solo algunas ciudades, como Madrid (Fernández-García & Rasilla-Álvarez, 2008), Zaragoza (Barrao, Serrano-Notivoli, Cuadrat, et al., 2022; Tejedor et al., 2016) y Barcelona (Casas-Castillo et al., 2010; Lana et al., 2018), han implementado redes urbanas de medición. En el caso de Barcelona, la atención se centra en la precipitación, mientras que en Zaragoza y Madrid se enfoca en la temperatura y la humedad. Estos esfuerzos destacan la importancia de adaptar las metodologías de medición a las necesidades climáticas específicas de cada área urbana, lo que subraya la relevancia y la necesidad continua de investigación.

En los últimos años, se ha observado un aumento significativo en la presencia de la modelización en las publicaciones científicas españolas. Aunque esta técnica no está directamente enfocada en la obtención de datos climáticos como otras metodologías, su importancia, características específicas y creciente utilización la han consolidado como un método relevante en el estudio del clima urbano. Desde una perspectiva más física y atmosférica, se ha observado un aumento en el número de publicaciones centradas en la modelización de variables climáticas dentro del entorno urbano, como la temperatura en los "cañones" urbanos (Montávez Gómez et al., 2000) o la capa límite atmosférica (Banks et al., 2015). Especialmente, se ha prestado atención a la temperatura urbana y a la distribución espacial de la ICU (Montávez Gómez et al., 2004; Núñez-Peiró et al., 2021), utilizando modelos de simulación atmosférica como el *Weather Research and Forecasting* (WRF), con trabajos destacados en la ciudad de Madrid (de la Paz et al., 2016; Martilli et al., 2021; Ribeiro et al., 2021).

Finalmente, se ha agregado una categoría adicional denominada "Otras", que, a pesar de su escasa presencia en las publicaciones, no carece de importancia. Estas metodologías son muy diversas y algunas están estrechamente relacionadas con el tipo de publicación que abordan. Entre ellas se incluyen la "Campana de Mediciones Puntuales", que engloba estudios que realizan mediciones concretas de variables específicas, pero que no pueden clasificarse como transectos u observatorios fijos (Caballero, 2004; Tejeda Martínez et al., 2004). Asimismo, se encuentran las "Combinaciones de metodologías", que exhiben una variedad de variables y técnicas analizadas, como en el caso de todas las publicaciones relacionadas con la campaña de medición DESIREX2008 (Salamanca et al., 2012; T. Shen, 2015; Sobrino & Oltra-Carrió, 2012). Además, se consideró el uso del modelo climático "UrbClim", desarrollado por la organización independiente de investigación VITO, que permite simular y estudiar el efecto de la ICU y otras variables con una resolución mínima de al menos 100 metros en entornos urbanos. Aunque este modelo podría clasificarse dentro del apartado de modelización, se ha mantenido como una categoría individual debido a la singularidad de los datos que produce y a su creciente uso a nivel mundial, aunque su presencia en publicaciones científicas españolas sea limitada (Martí Ezpeleta & Royé, 2021). También se han incluido

metodologías de trabajo que son comunes a todas las ciencias y no específicas de la climatología, como la “*Revisión Bibliográfica*” (Marías Martínez, 2004; Moreno-García, 1990, 1992) y la “*Percepción mediante encuestas*” (López Martín, 1995; Martín-Vide, 1990), que están estrechamente ligadas al tipo de publicación que las utiliza.

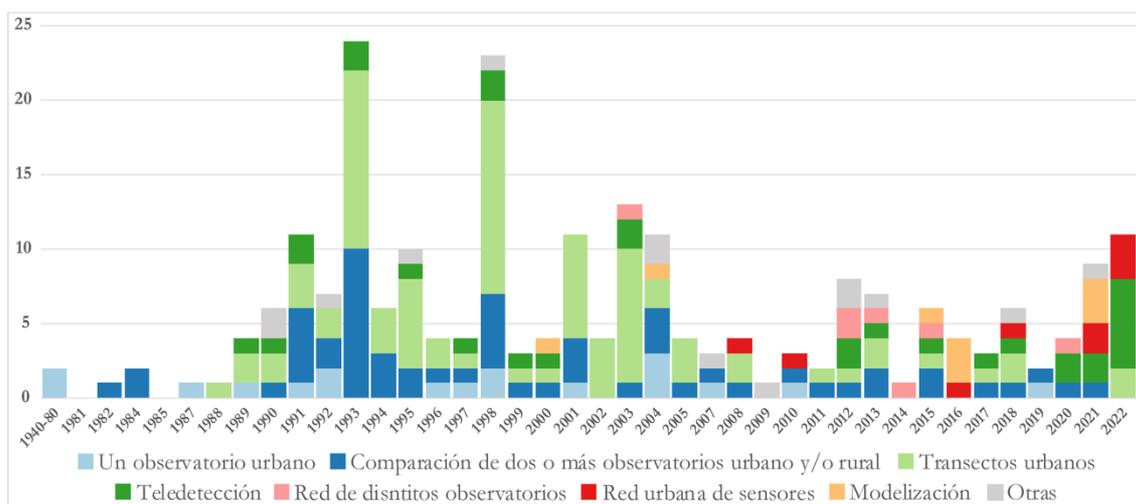


Figura 1.3. Evolución anual de las metodologías principales en las publicaciones españolas sobre climatología urbana. Fuente: Anexo Base de datos de publicaciones sobre climatología urbana española.

### 1.2.3. La climatología urbana actual en España

A pesar de haber realizado una revisión histórica exhaustiva de la climatología urbana, es fundamental abordar la situación actual de los estudios en este campo. Comprender las principales líneas de investigación y las tendencias predominantes en el contexto español es crucial para establecer un marco adecuado para la elaboración de esta tesis. Esto permite contextualizar esta investigación dentro del panorama actual de la climatología urbana en España e identificar áreas de interés y oportunidades para contribuir al avance del conocimiento en este campo. Incluso se incluyen citas complementarias que no se han incluido en la base de datos bibliográfica, debido a su actualidad o que la climatología urbana dentro del estudio era simplemente una variable adicional y no el cuerpo del trabajo.

Entre las ideas principales que podemos extraer de las publicaciones analizadas anteriormente se puede comenzar por el enfoque casi monotemático, tanto pasado como actual, sobre la caracterización del fenómeno de la ICU. Esto hace que el panorama actual adolezca de una escasa diversidad temática con falta de estudios que traten el clima urbano en su conjunto o que utilicen otras variables más allá de la temperatura. Además de la dificultad de la obtención de datos con una resolución temporal y espacial adecuada debido a la falta de redes de observación con la densidad adecuada para estudiar el clima de una ciudad. Un problema que se sigue observando en los estudios actuales y que dificulta la capacidad de replicar estudios y poder comparar información entre ciudades ya que cada ciudad trabaja con redes propias con características propias ya sea en los protocolos de diseño de la red, su instalación o las características del propio sensor junto a la selección de variables estudiadas.

Los estudios actuales muestran una tendencia hacia la utilización de datos climáticos urbanos como una pieza integral en análisis multidisciplinares. A diferencia de centrarse exclusivamente en la climatología intrínseca de los espacios urbanos, la investigación

contemporánea tiende a explorar cómo el clima de la ciudad se entrelaza con otras temáticas. En lugar de abordar directamente las variables meteorológicas y los procesos físicos que definen el clima urbano, los estudios recientes aprovechan la información climática urbana para examinar su relación con áreas como la salud pública, el turismo, la sostenibilidad y la planificación urbana. Este enfoque multidisciplinario permite una comprensión más amplia de los impactos del clima urbano en la sociedad y el entorno. Sin embargo, es esencial destacar la necesidad de investigaciones específicas que aborden la climatología de los espacios urbanos desde una perspectiva más detallada. Comprender las variables meteorológicas, geográficas y los procesos físicos en el contexto urbano es crucial para una comprensión más completa de cómo todos estos componentes dan forma al clima de la ciudad y, en última instancia, influyen diversos aspectos de la vida urbana. Por ello esta tesis busca dar respuesta a esta necesidad de información climática urbana, donde todos los aspectos que intervienen en la caracterización del clima urbano se analicen para crear una base de datos que luego pueda ser utilizada en posteriores estudios.

Dentro de las numerosas disciplinas con las que el clima urbano se relaciona, destaca especialmente la interacción con la salud, donde se explora cómo las condiciones climáticas afectan a aspectos que van desde los ingresos hospitalarios hasta tasas de mortalidad (Carmona et al., 2016; Íñiguez et al., 2021; Y. Kim et al., 2019; Tobías et al., 2023). Las condiciones extremas de calor experimentadas en varias ciudades españolas en los últimos años han demostrado aumentar el riesgo de eventos cardiovasculares agudos (Salvador et al., 2023) y la mortalidad (Royé et al., 2020). Además, se observa un creciente interés en comprender cómo el clima de las ciudades se vincula con la industria turística, explorando la integración de variables climáticas en índices turísticos (Díaz-Poso, Royé, et al., 2023; Millán-López & Fernández-García, 2018) y evaluando cómo el cambio climático puede afectar al turismo en estos entornos (Martínez-Ibarra, 2015; Millán-López, 2019). Otro eje crucial de investigación se centra en la mitigación y adaptación al cambio climático en entornos urbanos (Gandini et al., 2021; Hidalgo-García & Rezapouraghdam, 2023; Martínez-Juarez et al., 2019; Pietrapertosa et al., 2023; Salvia et al., 2021). Esto va más allá de la propuesta de soluciones, abarcando la evaluación futura de estas medidas y la identificación de áreas urbanas más vulnerables a los impactos climáticos adversos. Una perspectiva emergente, fuertemente ligada a la arquitectura y el urbanismo, involucra la incorporación de variables climáticas y conceptos climáticos en temas relacionados con la eficiencia energética y el confort térmico de edificaciones y espacios urbanos (Alvarez et al., 2021; Aram, Solgi, Higuera-García, et al., 2020; Lomba-Fernández et al., 2019; Rodríguez Algeciras & Matzarakis, 2016). Este enfoque refleja la creciente conciencia de la importancia de diseñar entornos urbanos sostenibles y resilientes, considerando las condiciones climáticas locales. En resumen, la investigación del clima urbano en España se ha diversificado y expandido, abordando no solo la climatología intrínseca de las ciudades, sino también su interconexión con áreas cruciales. Este enfoque integral contribuye a comprender mejor los complejos procesos físicos que definen el clima urbano y su influencia en la sociedad contemporánea.

### **1.3. Los estudios de climatología urbana en Zaragoza**

Dentro del ámbito de la investigación sobre el microclima urbano en España, la ciudad de Zaragoza ha destacado a lo largo del tiempo como un laboratorio de vanguardia y un foco de estudio significativo. Al realizar un exhaustivo análisis bibliográfico de las investigaciones y publicaciones llevadas a cabo en esta localidad, se distinguen claramente cuatro períodos o fases que delinean el desarrollo y la evolución de este campo de estudio en el contexto zaragozano.

Una primera etapa que marca el punto de partida fue cuando surgieron los primeros estudios que observaron las condiciones climáticas específicas de la ciudad, junto con una serie de factores y fenómenos asociados, como la contaminación o la salubridad del ambiente urbano, e identificaron que dependían de las características urbanas de Zaragoza. Estas primeras investigaciones afloraron en torno a la década de 1970, una de las primeras publicaciones (Ascaso, 1969) muestra un enfoque centrado en abordar la problemática de la contaminación atmosférica en entornos urbanos. Esta contaminación estaba estrechamente relacionada con el comportamiento de variables meteorológicas como el viento y la temperatura, las cuales estaban influenciadas por la estructura misma de la ciudad, explicando de forma indirecta algunas singularidades del clima de Zaragoza. Este enfoque inicial experimentó una evolución, en la cual el geógrafo Calvo Palacios ayudó a sentar las bases para el estudio del clima en la ciudad (Calvo-Palacios, 1976). Incorporó a sus investigaciones obras internacionales muy relevantes (ver apartado 1.1.1) como las de Chandler sobre Londres (Chandler, 1965) o los trabajos de Geiger (Geiger, 1942) que introdujeron el concepto de microclima. Consciente del impacto directo del clima urbano en la calidad de vida de las personas, dirigió su atención hacia temas como las características bioclimáticas, el confort térmico y el bienestar. Para él, la climatología no era solo un estudio meteorológico, sino una herramienta para comprender cómo el clima afecta a las personas en su entorno cotidiano. Desde esta perspectiva, defendió el papel crucial de la Geografía en los estudios de clima local. Así, su enfoque integrador abordaba tanto aspectos físicos como sociales, reconociendo la interacción compleja entre el entorno construido y el clima.

Después del periodo inicial, comienza a finales de la década de los años 80 un segundo periodo donde se establecen los fundamentos de la climatología urbana zaragozana. Este evoluciona en línea con la corriente predominante de investigación en España en la década de 1980, siguiendo la trayectoria marcada por Madrid y el equipo de López Gómez. En este momento, el diseño de los estudios en Zaragoza adquiere impulso, liderado por el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza, y el trabajo del Dr. José María Cuadrat Prats. Durante estos años se sentaron las bases de las futuras publicaciones mediante la aplicación de nuevas técnicas de medición, la recopilación de observaciones y la adopción de nuevas metodologías para el análisis de la ICU. Una de las primeras publicaciones fue el detallado estudio del clima de Zaragoza (Cuadrat, 1989), en el cual se analizan los datos de la estación urbana de referencia para la ciudad y se calculan las tendencias de la temperatura anual y estacional. Este proyecto estaba estrechamente vinculado al interés de la época por la variabilidad climática y las primeras investigaciones sobre el cambio climático. Sin embargo, en este estudio ya se empieza a hacer referencia al efecto urbano en la temperatura, incluyendo términos como la isla de calor. Además, para argumentar este fenómeno, se comparó la estación con dos estaciones cercanas pero alejadas del efecto urbano en ese momento (Aula Dei y Aeropuerto).

Como resultado de estas investigaciones, en 1993, se produjeron las primeras publicaciones que abordaron el fenómeno de la ICU en la ciudad de Zaragoza. Es relevante señalar la estrecha vinculación con el equipo de investigación en Madrid, ya que estas primeras obras sobre Zaragoza surgen de su colaboración (López-Gómez, Fernández-García, Arroyo-Ilera, et al., 1993) que, en forma de capítulo, no solo se analizaba Zaragoza sino que se abordaban también los análisis climáticos de las ciudades de Logroño, Huesca y Teruel (Cuadrat, 1993). La primera publicación en solitario (Cuadrat, De la Riva, López, et al., 1993), se presentó en forma de artículo en los Anales de Geografía de la Universidad Complutense, publicación del departamento del cual formaba parte López Gómez. El objetivo fundamental de estas publicaciones iniciales fue el estudio detallado de la ICU y sus rasgos característicos, incluyendo la frecuencia e intensidad del fenómeno, su configuración

espacial en el plano horizontal, la localización del máximo térmico y el análisis de sus variaciones temporales.

Durante este periodo, se destaca un cambio metodológico en los análisis climáticos urbanos, centrándose principalmente en la obtención de observaciones. La mayoría de las publicaciones iniciales (Cuadrat, 2004; Cuadrat, De la Riva, López Martín, & Martí, 1993; Cuadrat, De la Riva, López, et al., 1993) parten de un análisis enfocado en la comparación de las condiciones climáticas campo-ciudad. Se utilizaron dos estaciones de referencia proporcionadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET): una ubicada en el centro de la ciudad y otra en el aeropuerto de Zaragoza. Estas estaciones ya habían sido empleadas en investigaciones previas, y se contaba con un conocimiento sólido sobre el comportamiento climático de la ciudad (Cuadrat, 1989).

Sin embargo, durante este periodo se da un paso adelante significativo. Zaragoza, como todas las ciudades españolas de la época, carecía de una red de estaciones meteorológicas adecuadas para abordar de manera exhaustiva el estudio del clima. Para superar esta limitación, se optó por la ampliamente utilizada técnica de los transectos urbanos, que ya había comenzado a utilizarse en otras ciudades como Madrid (López-Gómez, 1988) o Barcelona (Moreno-García, 1994). A través de estos primeros recorridos urbanos, se realizaron mediciones utilizando termohigrómetros digitales Hanna (HI-8564) a lo largo de las principales vías de desarrollo de la ciudad. Inicialmente, estos transectos abarcaban una longitud de aproximadamente 80 km y comprendían alrededor de 82 puntos de medición (Cuadrat, De la Riva, López, et al., 1993). Por lo general, estos recorridos se efectuaban de manera simultánea en varias direcciones, aproximadamente entre tres y cuatro horas después de la puesta de sol, lo que proporcionaba una instantánea termohigrométrica fija de la ciudad en ese momento. Los análisis de los resultados obtenidos en el trabajo de campo permitieron identificar la existencia de una ICU nocturna en la ciudad, la cual variaba en intensidad en función de las condiciones atmosféricas (Cuadrat, 1993; Cuadrat, De la Riva, López Martín, & Martí, 1993). En días anticiclónicos invernales, esta ICU alcanzaba su máxima magnitud, con diferencias de temperatura en torno a los 5°C en comparación con áreas más alejadas de la ciudad (Cuadrat, De la Riva, López, et al., 1993).

Además, en relación a la metodología y sus avances en este periodo no se puede obviar que Zaragoza se situó entre las primeras ciudades en España, junto con Madrid y Valencia, que incorporaron la teledetección en sus investigaciones sobre clima urbano (Caselles Miralles et al., 1989; López-Gómez et al., 1990). En el primer estudio publicado en 1997, se utilizaron dos imágenes del sensor *Thematic Mapper* de *Landsat 5*, una tomada en abril y otra en julio de 1992 (De la Riva et al., 1997). Estas imágenes permitieron observar por primera vez la Isla de Calor Superficial, aunque su intensidad era menor y estaba más difuminada en comparación con la ICU obtenida a partir de los transectos nocturnos. Los autores llegaron a la conclusión de que los factores que explicaban el patrón térmico observado estaban vinculados principalmente al comportamiento diferencial de las diversas cubiertas urbanas, influenciado por sus propiedades, especialmente la inercia térmica, y su exposición a la luz solar, en relación con la rugosidad de la superficie. Estos aspectos no habían sido previamente analizados con los transectos o los sensores, lo que demuestra la contribución significativa de esta nueva metodología.

Tras los primeros estudios y los avances posteriores, a principios de la década de 2000, la investigación sobre el clima urbano en Zaragoza experimentó una nueva fase de desarrollo. Los resultados obtenidos demostraron la utilidad de la información recopilada para la planificación urbana y coincidieron con los primeros signos de una mayor conciencia ambiental en esa época. Estos avances llevaron a que las investigaciones se orientaran hacia

la colaboración con la planificación urbana y las administraciones públicas. En la mayoría de los casos, esta colaboración estuvo vinculada a los planes del Programa 21 de las Naciones Unidas, que buscaban promover el desarrollo sostenible y que surgieron en la conferencia de Río de 1992. De esta manera, se llevaron a cabo diversas investigaciones encargadas por el Ayuntamiento de Zaragoza en el marco de los planes de la Agenda 21 y el Plan Estratégico de Zaragoza. Estas iniciativas representaron un paso significativo hacia la integración de los conocimientos sobre el clima urbano en la planificación y desarrollo sostenible de la ciudad (Cuadrat et al., 2002, 2014; Cuadrat, Saz, et al., 2015).

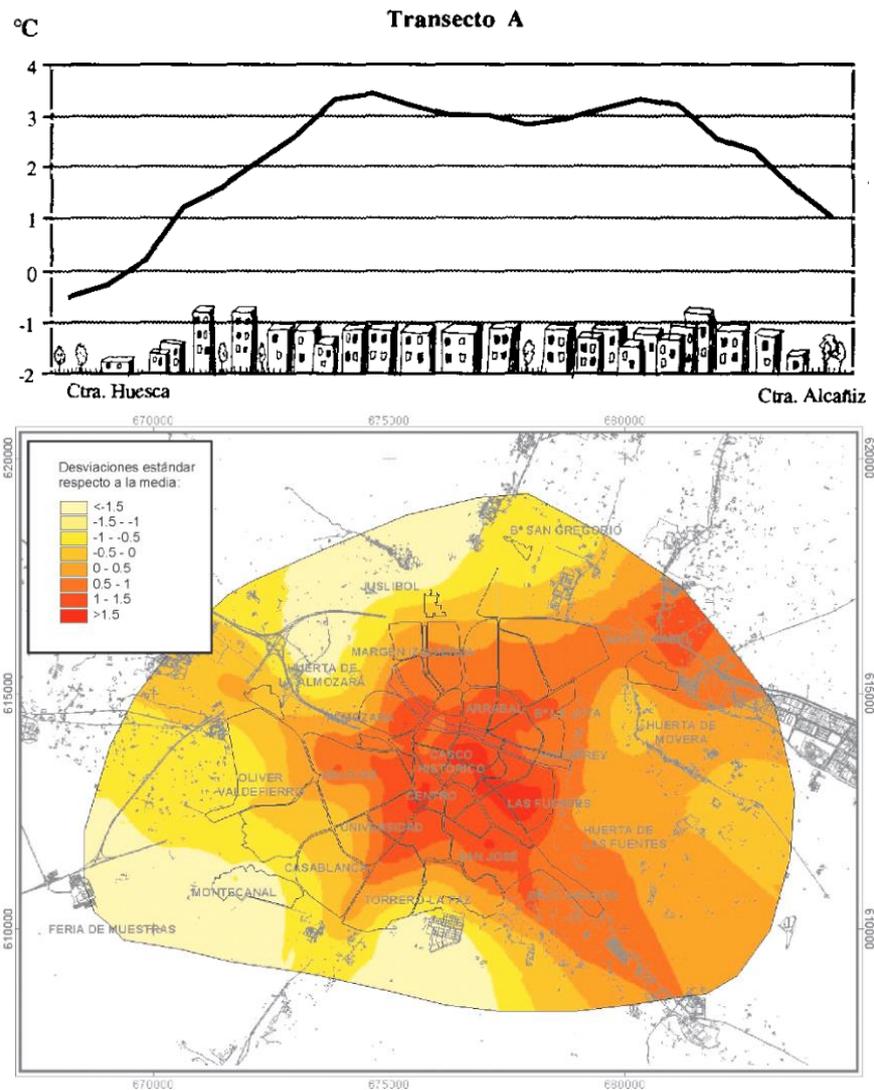


Figura 1.4. Comparación de análisis térmico posterior al registro de transectos urbanos entre el segundo y tercer periodo. a) Perfil térmico del transecto urbano A del día 28 de enero de 1992 (Cuadrat, De la Riva, López, et al., 1993, p. 136). b) Mapa térmico promedio de Zaragoza.(Cuadrat et al., 2002, p. 8).

En el ámbito metodológico de este periodo, es notable la sistematización de los transectos urbanos, lo que implicó la depuración de los protocolos de obtención de información y un incremento en las campañas de medición. Esto se tradujo en un aumento tanto en el número de puntos de observación como de distancia recorrida. Por ejemplo, el número de puntos pasó de alrededor de 80 en el periodo anterior a más de 200, y la distancia recorrida aumentó de aproximadamente 80km a más de 100 km (Saz et al., 2003; Vicente-Serrano et al., 2005). Respecto al cambio de los transectos, también evolucionaron los análisis

posteriores realizados con los datos recopilados (Figura 1.4). En el caso de Zaragoza, destaca como pionera en el uso de los SIG como herramienta de modelización (Saz et al., 2003; Vicente-Serrano et al., 2005, 2003). A través de esta innovación, se aprovechó la información recopilada de los transectos y las mediciones para llevar a cabo una interpolación mediante el método de *Ordinary Kriging*. Esta técnica estadística permitió estimar los valores de temperatura ponderando las observaciones circundantes, lo que resultó en la obtención de *grids* completos y estandarizados de temperatura y humedad para la ciudad, con una resolución de 30 metros.

A través del uso de los SIG se generaron mapas térmicos que revelaron los patrones espaciales de la temperatura urbana en la ciudad de Zaragoza. Estos mapas proporcionaron una visión detallada de la distribución térmica en el entorno urbano. En el análisis de estos datos, se identificaron diversos factores que explicaban estos patrones climáticos (Cuadrat et al., 2005). Entre ellos, se destacaron la densidad urbana, los materiales de construcción utilizados en los edificios, la presencia de vegetación en diferentes zonas y las características topográficas de la ciudad, todos los cuales ejercían una influencia significativa en las condiciones climáticas urbanas. Con la creciente relevancia de los estudios sobre el Cambio Climático y los diferentes informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), también se abordaron las tendencias futuras del clima en la ciudad. Este enfoque adquirió una importancia fundamental para definir estrategias de adaptación y mitigación, y fue el objetivo principal para el cual se llevaron a cabo estos proyectos de investigación. El análisis de las tendencias climáticas futuras se convirtió en un recurso esencial para la toma de decisiones y la planificación a largo plazo (Cuadrat et al., 2002, 2014; Cuadrat, Saz, et al., 2015).

La última etapa de esta evolución sobre la investigación del clima urbano en Zaragoza puede situarse alrededor del año 2015 y continúa hasta el momento actual. Todo comenzó con la colaboración del grupo de investigación *Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales*, de la Universidad de Zaragoza, con el departamento de Medio Ambiente y Sostenibilidad del Ayuntamiento de Zaragoza, lo que resultó en uno de los avances más significativos en los sistemas de medición del clima urbano de la ciudad. Hasta ese momento, la metodología de trabajo se basaba en datos provenientes de observatorios meteorológicos, transectos urbanos realizados en automóvil y el uso de imágenes de satélite. Sin embargo, esta información no permitía un seguimiento continuo de la ICU ni proporcionaba una comprensión completa de la influencia de numerosos factores en este fenómeno. Gracias a esta colaboración, a partir del año 2015, se implementó un monitoreo continuo de la ciudad mediante una extensa red de sensores termohigrométricos ubicados en lugares estratégicos dentro del área urbana y en la zona rural circundante.

La implantación de esta red de sensores marcó un hito al permitir un examen mucho más preciso de numerosos aspectos del clima urbano que hasta ese momento habían recibido una atención limitada. La disponibilidad de estos nuevos conjuntos de datos amplió considerablemente las oportunidades de investigación y abrió la puerta a nuevos análisis con premisas que previamente se veían limitadas por restricciones metodológicas. El enfoque se orientó hacia el análisis detallado de la intensidad y la variabilidad temporal de la ICU, lo que contribuyó de manera notable a la comprensión más profunda de este fenómeno climático en la ciudad de Zaragoza (Cuadrat et al., 2022; Tejedor et al., 2016). Un trabajo y una línea de investigación que continúan en la actualidad, con nuevas aportaciones y nuevos enfoques (Barrao et al., 2021, 2019; Barrao, Serrano-Notivoli, Cuadrat, et al., 2022; Barrao, Serrano-Notivoli, Saz, et al., 2022),

Independientemente de la época o el periodo que se ha analizado, es importante destacar que todos estos estudios no se limitaron únicamente a la descripción del fenómeno de la ICU, su distribución y sus variaciones temporales. A partir de estos análisis, surgieron investigaciones adicionales que se enfocaron en explorar el comportamiento de otras variables climáticas en el contexto urbano, como la humedad (Cuadrat, Vicente-Serrano, et al., 2015) y el viento (Cuadrat & Vicente-Serrano, 2003; López Martín, 1998). La última de estas variables es particularmente relevante debido a su presencia significativa en la ciudad de Zaragoza y sus efectos sobre la ICU. Además, se llevaron a cabo análisis de otros aspectos relacionados con el clima, como el riesgo climático (López Martín, 1997), con un enfoque más específico en las precipitaciones y las ráfagas de viento. El objetivo era establecer umbrales o límites a partir de los cuales estas variables climáticas representaban un mayor riesgo para la ciudad. Otro aspecto de estudio importante fue la percepción del clima en la ciudad (López Martín, 1995). Este aspecto, que generalmente no recibía tanta atención, se vinculó estrechamente con las precipitaciones y su distribución semanal. Este enfoque tenía el propósito de analizar las pautas de comportamiento de la población, ya que en base a cómo perciben y sus experiencias actúan en consonancia.

Gracias a todo este marco epistemológico la tesis doctoral se sitúa en un contexto más actual de los estudios de clima urbano en Zaragoza y representa un paso adelante en la evolución de esta trayectoria investigadora. Se nutre no solo de la sólida base de conocimientos acumulados a lo largo de investigaciones previas, sino también de manera destacada de la red de sensores implementada en la ciudad. La utilización de esta red ha sido un componente fundamental, permitiendo la creación de bases de datos climáticas urbanas que, de otra forma, no habrían sido posibles. Estas bases de datos ofrecen una representación espacial excepcional de los entornos urbanos y periurbanos más significativos de la ciudad, además de abarcar un período temporal que es difícil de encontrar en series climáticas urbanas en cualquier parte del mundo. Este esfuerzo en la investigación y los datos generados poseen un potencial significativo en términos de su impacto en la planificación urbana y los estudios climáticos urbanos. Es relevante destacar que la integración de estos datos con la información satelital, como ya se realizó en 1997 (De la Riva et al., 1997), y los avances en teledetección han abierto nuevas perspectivas en el campo de la climatología urbana. La mejora en la resolución y precisión de los sensores, así como la capacidad de combinar datos de sensores terrestres y satelitales, han generado nuevas oportunidades que esta tesis aprovecha para comprender el clima urbano en una escala y resolución que anteriormente no habían sido posibles.

#### 1.4. Objetivos e hipótesis

El **objetivo principal** de esta tesis es realizar un análisis detallado del clima urbano de la ciudad de Zaragoza a partir de los datos de una red urbana termohigrométrica de alta densidad en términos temporales y espaciales. El desarrollo de este objetivo general implica la creación de una base de datos robusta, la formulación de modelos específicos para comprender la dinámica de la temperatura urbana y la evaluación de las variaciones climáticas dentro del entorno urbano. Para ello, se definen los siguientes objetivos específicos:

**Obj 1:** Recopilar, depurar y almacenar un gran volumen de datos climáticos de alta resolución temporal. Usando la metodología adecuada y desarrollando un control de calidad específico para redes urbanas de alta densidad.

**Obj 2:** Desarrollar modelos de interpolación espacial aplicados a climatología urbana que utilicen los datos recopilados para representar con precisión el clima en diferentes partes de la ciudad, considerando factores explicativos o covariables como

la urbanización, las diferentes coberturas urbanas o las características geográficas locales.

**Obj 3:** Realizar una caracterización climática detallada de la ciudad de Zaragoza, utilizando los resultados obtenidos a partir de un modelo de interpolación urbano centrado especialmente en el comportamiento térmico. Se analizará el comportamiento de la ciudad en diferentes escalas temporales, incluyendo análisis diurnos, estacionales y anuales. Esto permitirá identificar patrones climáticos a corto y largo plazo, así como evaluar la variabilidad climática bajo condiciones climáticas específicas.

**Obj 4:** Clasificar de manera detallada las LCZ dentro de la ciudad de Zaragoza, mejorando los métodos previos existentes y utilizando información de mayor detalle como los productos derivados de LIDAR o imágenes Satélite.

**Obj 5:** Utilizar la modelización del clima urbano para verificar la precisión de las clasificaciones de LCZ al permitir la comprobación del comportamiento climático espacial y temporal de los diferentes espacios urbanos clasificados.

Hay una clara interdependencia entre estos objetivos. Por lo tanto, alcanzar el objetivo 1 es crucial para avanzar hacia el objetivo 2, el cual a su vez sienta las bases para el objetivo 3. De manera similar, el logro del objetivo 5 depende de los objetivos 3 y 4. Los resultados de cada análisis realizado en estos objetivos nos ayudarán a comprobar las siguientes **hipótesis**:

**H 1:** La temperatura urbana en Zaragoza muestra una variabilidad que se asemeja a los patrones típicos observados en otras ciudades, definidos por el efecto isla de calor urbano, aunque acentuada por la singularidad de los factores climáticos y geográficos característicos de la región. La alta resolución espacial y temporal de los datos climáticos permite discernir situaciones específicas, identificando patrones a nivel intraurbano del efecto isla de calor y destacando áreas más favorables a eventos climáticos.

**H 2:** El diseño de un control de calidad exhaustivo para redes de observación de alta resolución urbanas desempeña un papel esencial en el diseño y mejora de las redes climáticas intraurbanas. Este control permite obtener bases de datos de mayor precisión y utilidad para abordar los desafíos urbanos relacionados con el clima.

**H 3:** La modelización espacial de la temperatura urbana, al incorporar covariables no convencionales como datos derivados de la teledetección o de los SIG, permite una mejor comprensión y predicción de los patrones térmicos en zonas urbanas, especialmente durante eventos extremos (olas de calor, tormentas o viento) o situaciones sinópticas concretas.

**H 4:** Los modelos de clasificación generalistas de las LCZ no son aplicables de manera efectiva a estudios de detalle de clima urbano en ciudades medias o pequeñas. En cambio, una clasificación personalizada proporciona resultados significativamente más confiables y precisos en la caracterización de las LCZ, ya que considera las particularidades únicas de cada entorno urbano y su influencia en el microclima local.

## 1.5. Estructura de la tesis

La estructura de la tesis se divide en dos principales apartados: **Modelización de la temperatura urbana de Zaragoza** y **Análisis del clima urbano de Zaragoza**. El primer apartado comprende el **Capítulo 2**, en el cual se presenta la red de sensores urbanos utilizada y se describe cómo se crean las bases de datos climáticas urbanas, prestando especial atención al control de calidad desarrollado en relación con la hipótesis 2. A continuación, el **Capítulo 3** explica la interpolación de la temperatura urbana a partir de las bases de datos de la red de sensores y las covariables relacionadas con las características urbanas de la ciudad, utilizando un modelo de *cokriging* para cumplir con la hipótesis 3. De esta manera, en el primer apartado se logran satisfacer los objetivos 1 y 2 de la tesis. El **Capítulo 4**, que presenta los resultados del apartado anterior, se dedica al análisis de la distribución espacial y temporal de la temperatura urbana, considerando diferentes escalas temporales y examinando el comportamiento de la ICU, así como la temperatura durante eventos diarios concretos. Esto permite abordar el objetivo 3 de la tesis. El **Capítulo 5**, junto con el Capítulo 4, conforma el segundo apartado de la tesis. En este capítulo, la investigación se centra en la creación de las LCZ, tanto en su desarrollo como en su caracterización climática del espacio urbano. Esto se alinea con el cumplimiento de los objetivos 4 y 5, al mismo tiempo que aborda la hipótesis 4. Finalmente, el **Capítulo 6** presenta las conclusiones finales y las líneas futuras de actuación. Este capítulo sirve para responder a la hipótesis 1 de la tesis, destacando las implicaciones clave de la investigación y ofreciendo una visión de cómo esta contribución puede avanzar en futuros estudios en el campo del clima urbano en Zaragoza y más allá.

## 2. Control de calidad

La construcción de una base de datos climáticos sólida y consistente es un aspecto crucial en la investigación climática (Serrano-Notivoli, 2017), tanto en entornos urbanos como rurales. La calidad de los datos climáticos es fundamental para garantizar la fiabilidad y la utilidad de esta información posteriormente. Si bien hemos destacado previamente la importancia de las redes de sensores de medición urbana y la oportunidad que ofrece la ciudad de Zaragoza para llevar a cabo investigaciones de clima urbano de alta calidad debido a su resolución espacial y temporal, es igualmente fundamental enfocarse en el desarrollo de controles de calidad para estas redes urbanas.

Esto se debe a que, en este contexto, se genera un gran volumen de datos, los cuales a menudo no forman parte de redes meteorológicas homologadas de referencia, como es AEMET en España. Estos datos pueden estar expuestos a diversas fuentes potenciales de error, como la ubicación del sensor, la interacción con elementos circundantes, problemas de batería o dificultades técnicas, lo que puede implicar problemas de fiabilidad. Por lo tanto, implementar rigurosos controles de calidad se convierte en un requisito esencial para garantizar la precisión y la utilidad de los datos recopilados en investigaciones de clima urbano.

### 2.1. La red de sensores termohigrométricos de Zaragoza

La red de sensores termohigrométricos utilizada en este estudio es gestionada por el grupo de investigación Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza. Esta red de sensores se estableció en 2015 en colaboración con el Servicio de Medio Ambiente y Sostenibilidad del Ayuntamiento de Zaragoza, como se detalla en la sección 1.2.2 (*Los estudios de climatología urbana en Zaragoza*). Actualmente, la red está compuesta por un total de 22 sensores operativos, aunque en este trabajo se han empleado 21 de ellos. El último sensor se instaló a finales de 2022, y debido a la corta longitud de la serie temporal de datos, no se incluyó en el análisis.

#### 2.1.1. Características de los sensores

La red de sensores se compone de dispositivos de medición HOBO U23 Pro v2 y HOBO MX2301, diseñados para registrar la temperatura y la humedad relativa del aire. Estos sensores ofrecen un amplio rango de funcionamiento en cuanto a temperatura, abarcando desde los  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta los  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y en humedad, desde 0% hasta 100%, con una precisión de  $0,21\text{ }^{\circ}\text{C}$  y 2,5 %, respectivamente. Además, cuentan con una resolución de  $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que permite mediciones detalladas y precisas. Para el almacenamiento de los datos, cada sensor está equipado con un data-logger y, para protegerlos de la radiación solar directa y la lluvia, se emplea un soporte M-RSA. Es importante señalar que existe una diferencia entre los modelos U23 y MX2301 en cuanto al método de descarga de datos. Los sensores U23 requieren un acoplador y un ordenador para la descarga, mientras que los sensores MX2301 aprovechan la tecnología Bluetooth, lo que facilita la descarga de datos a cierta distancia mediante un dispositivo móvil.

En la implementación inicial de la red, todos los sensores de registro eran del modelo U23. Sin embargo, según la disponibilidad de financiación, se optó por incorporar sensores MX2301 para mejorar la eficiencia y comodidad en la descarga de datos, a pesar de que estos últimos consumen más energía debido a su conectividad Bluetooth. Para evitar pérdidas de datos y aprovechar la oportunidad de calibración entre ambos tipos de sensores, se

duplicaron los sensores en algunas de las localizaciones, contando actualmente con ambos modelos de sensor diez estaciones. Estas se encuentran, principalmente, en áreas de difícil acceso o que presentan desafíos en términos de descarga de datos, lo que asegura la disponibilidad de información precisa en todas las circunstancias.

Con el propósito de realizar comparaciones significativas del rendimiento entre ambos modelos de sensor se seleccionaron cuatro sensores ubicados en puntos estratégicos de la ciudad: Casa de la Mujer, Delicias, Jardín Botánico y Veterinaria. Estas mediciones comparadas se llevaron a cabo en intervalos temporales que abarcan desde septiembre de 2021 hasta enero de 2022, acumulando un total de 11.509 observaciones.

El análisis revela una robusta similitud en los valores registrados por los diferentes modelos de sensor, con una diferencia promedio de la temperatura de tan solo 0,09 °C. En cuanto a la humedad, la disparidad es mínima, situándose en un 0,55 %. Estos resultados se reflejan también en la Figura 2.1 donde se pueden diferenciar la mediana o la media en el caso de la temperatura, con una diferencia de apenas 0,09 °C en ambos estadísticos y siendo el valor del sensor bluetooth ligeramente inferior. En el caso de la humedad la diferencia de medias es de 0,55 % y de 1,03 % en el caso de la mediana. Es crucial destacar que, a pesar de tratarse de datos no normales, presentan un extraordinario coeficiente de correlación. El test de Spearman arroja un valor excepcionalmente alto de 0,99 y 0,98 en temperatura y humedad respectivamente, subrayando la consistencia y confiabilidad de las mediciones. Este hallazgo refuerza la validez y robustez de nuestros resultados, respaldando la conclusión de que la elección de sensores diversos no compromete la integridad de los datos recopilados.

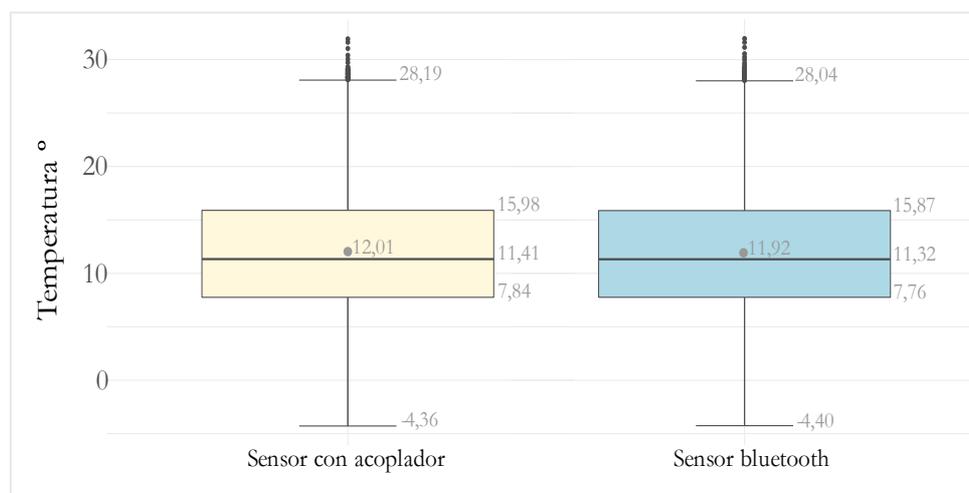


Figura 2.1. Comparación de observaciones de temperatura registradas con sensor con acoplador (HOBO U23 Pro v2) y sensor con bluetooth (HOBO MX2301) mediante gráfico de caja.

Además, cabe mencionar la existencia de redes complementarias como la gestionada por el Departamento de Medio Ambiente y Sostenibilidad del Ayuntamiento de Zaragoza, la Red Automática de Calidad del Aire, que consta de ocho estaciones remotas dedicadas a la medición de contaminantes atmosféricos, pero también registran variables climáticas como la temperatura y la humedad. Asimismo, la red de sensores de la AEMET, con dos estaciones en la ciudad, Aeropuerto y Valdespartera, contribuye a enriquecer la información climática disponible. Estas redes interconectadas proporcionan una fuente valiosa de datos para las investigaciones de climatología urbana en Zaragoza y respaldan análisis más completos y precisos. Sin embargo, en este estudio no se emplearán como parte integral del análisis, sino que serán utilizadas como fuentes adicionales de información y para la calibración de los sensores de la red urbana.

En consecuencia, se colocó un sensor de la red junto al sensor de AEMET en Valdespartera para verificar su funcionamiento. De esta manera, ambos sensores registraron datos simultáneamente en el mismo lugar, lo que permitió llevar a cabo un análisis comparativo a lo largo de cinco años de registros de temperatura. Los resultados obtenidos revelaron una diferencia promedio de  $-0,08$  °C, indicando que el sensor de la red urbana registró ligeramente temperaturas más bajas en comparación con el sensor de referencia (Tabla 2.1). También se observó una distribución no normal en ambas bases de datos, con un sesgo hacia los valores más elevados observados. Los resultados de los test de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) y Anderson-Darling mostraron un valor de  $p$  menor a  $0,05$ , lo que sugiere que los datos no siguen una distribución normal. Además, se observó una correlación extremadamente fuerte, con un coeficiente de correlación de Spearman de  $0,999$  y un valor  $p$  prácticamente nulo, lo que señala una correlación estadísticamente significativa. En el caso del coeficiente de correlación de Kendall, los resultados fueron muy similares, mostrando una correlación muy sólida con un valor de  $0,98$ . Estos hallazgos respaldan la precisión y la consistencia de los registros del sensor de la red urbana en comparación con el sensor de referencia de AEMET (Figura 2.2).

<b>Diferencia Red Urbana y AEMet</b>		<b>Temperatura °C Red Urbana</b>		<b>Temperatura °C AEMet</b>	
<b>Min.</b>	-4,73	<b>Min.</b>	-4,32	<b>Min.</b>	-4,40
<b>1st Qr</b>	-0,20	<b>1st Qr</b>	10,00	<b>1st Qr</b>	10
<b>Median</b>	-0,03	<b>Median</b>	15,70	<b>Median</b>	15,70
<b>Mean</b>	-0,09	<b>Mean</b>	16,28	<b>Mean</b>	16,36
<b>3rd Qr</b>	0,08	<b>3rd Qr</b>	21,84	<b>3rd Qr</b>	21,90
<b>Max.</b>	3,10	<b>Max.</b>	42,80	<b>Max.</b>	43,30

Tabla 2.1. Estadísticas descriptivas de las variables de temperatura registradas por la Red Urbana y AEMET, y la diferencia entre ambos registros.

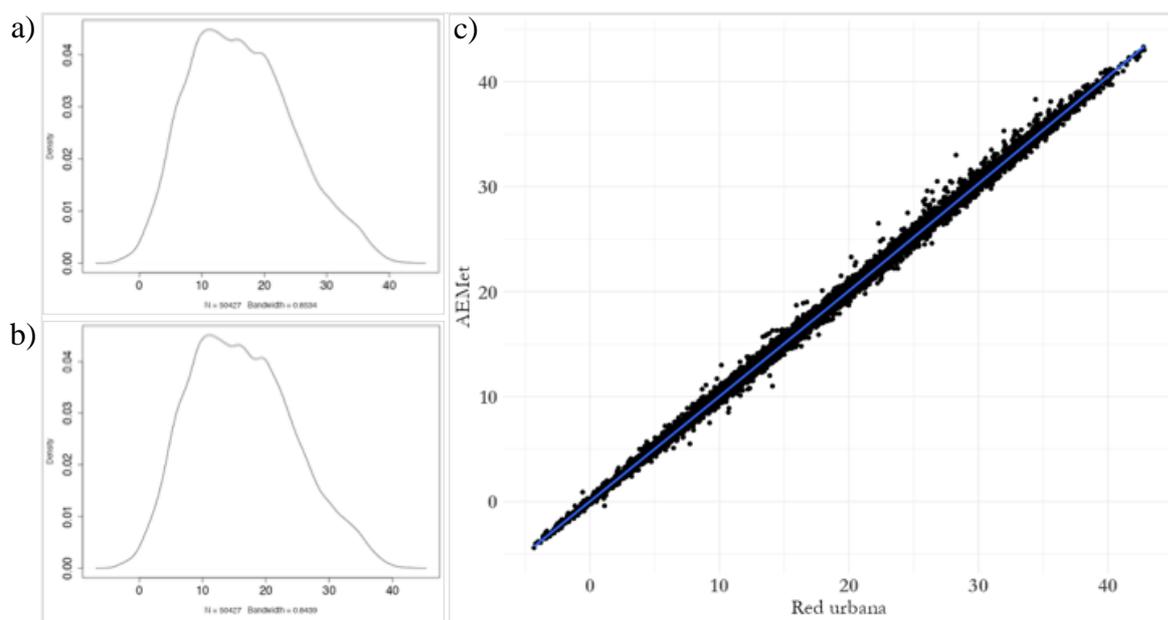


Figura 2.2. a) Gráfico de densidad de los datos registrados entre 2015 y 2020 por AEMET. b) Gráfico de densidad de los datos registrados entre 2015 y 2020 por la red urbana. c) Gráfico de dispersión de regresión de LOESS con las variables registradas en AEMET y la red urbana.

### **2.1.2. Periodo de estudio**

El período de estudio abordado en este trabajo se inicia el 23 de marzo de 2015, fecha en la que se instaló la primera red de sensores, y concluye el 31 de diciembre de 2022, con el propósito de abarcar un año completo de datos antes de la presentación de la tesis.

Los sensores se configuraron para registrar observaciones en intervalos horarios, lo que ha resultado en la recopilación de más de dos millones de observaciones si sumamos todos los datos obtenidos a lo largo de este período. Es importante señalar que no todos los sensores de la red se instalaron al mismo tiempo, lo que da lugar a cuatro etapas temporales distintas. En la primera etapa, se colocaron inicialmente 15 sensores, la cifra más alta instalada simultáneamente. Luego, a partir del 1 de abril de 2016, se comenzó a registrar datos en cuatro nuevos sensores. Por último, el 2 de mayo de 2019 se añadió el sensor número 20, y el 30 de abril de 2019 se instaló el último sensor utilizado en esta red de observación.

Para la codificación de los sensores, se optó por utilizar topónimos reconocibles y representativos de las áreas donde estaban ubicados los observatorios. Estos nombres se abreviaron y se les añadió un número que reflejaba su distancia con respecto al centro de la ciudad, facilitando así su identificación. El sensor central se denominó "S01" y se instaló en la Casa de la Mujer, un edificio público en el casco antiguo de la ciudad, mientras que el "S21" se ubicó en la Ciudad Deportiva del Real Zaragoza, siendo el sensor más alejado del área urbana y funcionando como punto de referencia para calcular el efecto de la ICU y su intensidad.

### **2.1.3. Localización y caracterización de los espacios urbanos de la red**

La red de 21 sensores termohigrométricos desplegada en Zaragoza (Figura 2.3) se caracteriza por una distribución cuidadosamente planificada, abarcando una diversidad de ambientes climáticos urbanos y periurbanos. La selección estratégica de ubicaciones se basó en criterios que representan la morfología variada de la ciudad y sus alrededores, considerando tanto factores locales como los estándares internacionales propuestos por Stewart y Oke (2012) para el diseño de las LCZ, como se ha diseñado en otras ciudades (Lelovics et al., 2014; Warren et al., 2016). Esta disposición estratégica de sensores proporciona una visión integral del comportamiento térmico de Zaragoza, considerando las variaciones climáticas asociadas con la morfología urbana y las tipologías climáticas locales.

De los sensores instalados, 12 se encuentran instalados en postes o casetas meteorológicas, alcanzando una altura aproximada de 3 metros sobre el nivel del suelo. Esta disposición se ha diseñado con el objetivo de minimizar la interferencia de fuentes locales de calor, como aires acondicionados y farolas, así como para prevenir la influencia de superficies que podrían irradiar calor y turbulencia, como paredes y tejados, especialmente durante las horas nocturnas. Adicionalmente, los 9 sensores restantes han sido colocados en estructuras ubicadas sobre tejados o balcones, alcanzando alturas que no superan los 15 metros. Es importante destacar que, aunque estos sensores están a una mayor altura, se ha garantizado que estén lo suficientemente alejados o aislados de las paredes o techos circundantes para evitar cualquier alteración en los datos registrados. Esta precaución busca mantener la integridad de las mediciones y garantizar la representatividad de las condiciones climáticas locales en cada ubicación.

La elección de ubicaciones se benefició de la experiencia previa del grupo de investigación, que había realizado estudios sobre la isla de calor urbana en Zaragoza durante la década de los 2000 (Cuadrat et al., 2002, 2014; Cuadrat, De la Riva, López Martín, & Martí,

1993). Estos estudios, vinculados estrechamente a los resultados iniciales obtenidos a través de transectos urbanos, proporcionaron valiosos mapas de la isla de calor en la ciudad. La selección de lugares se benefició de este conocimiento local, combinándolo con criterios internacionales provenientes de manuales de la OMM (2014; 2017, 2018) y estudios bibliográficos, como los de Stewart (2011), que han señalado la importancia de rigurosidad en los registros de datos climáticos urbanos.



Figura 2.3. Mapa de localización de la ciudad de Zaragoza.

La configuración espacial de los sensores se presenta en el mapa de la Figura 2.4, donde se agrupan en 4 anillos, reflejando diferentes distancias al centro de la ciudad y características comunes de los entornos urbanos que ocupan. Estos anillos comparten características morfológicas urbanas similares, desde áreas densamente urbanizadas hasta entornos típicos del periurbano. Además, servirán para explicar las tipologías urbanas típicas que podemos encontrar en la ciudad de Zaragoza. Es relevante señalar que la homogeneidad no es una característica universal en todos los espacios, y en diversos lugares podemos identificar singularidades distintivas, ya sea en términos constructivos, materiales de construcción o usos del suelo.

En el **primer anillo (S01-S05)**, próximo al centro, los sensores se localizan en entornos densamente urbanizados, caracterizados por la predominancia de superficies impermeables y una escasa presencia de vegetación. Los sensores **S01** y **S02** se ubican en el núcleo central de la ciudad, abarcando el casco antiguo y el Paseo de la Independencia.

El casco antiguo de Zaragoza (**S01**), delimitado por las antiguas murallas medievales, que hoy en día se reconocen a través de la calle Coso, se distingue por su intrincado diseño de plazas y callejones estrechos. Este laberinto urbano es el resultado de siglos de historia, reflejando las influencias urbanísticas de los diversos habitantes y su cultura a lo largo del tiempo, desde los orígenes íberos y la colonia romana hasta el dominio árabe que perduró desde el 714 d.C. Durante los cuatro siglos de dominio árabe, la concepción de las calles evolucionó, abandonando el trazado ortogonal romano para adoptar un diseño quebrado donde abundaban los callejones sin salida. Además, se produjo una transformación en la morfología de las plazas, que solían formarse en las intersecciones, siendo reemplazadas por sutiles ensanchamientos de las calles (Yeste Navarro, 1993). En la actualidad, este espacio se

caracteriza por una densidad urbana y constructiva significativa, albergando construcciones históricas y edificaciones residenciales antiguas que no sobrepasan los 4 o 5 pisos. Se han llevado a cabo diversas intervenciones para la rehabilitación de estos inmuebles, destacando los esfuerzos por preservar y revitalizar el patrimonio arquitectónico. Además, se ha implementado la peatonalización de varias calles, pero la presencia de vegetación en esta área sigue siendo escasa.

Por otro lado, el Paseo de la Independencia (**S02**), arteria principal e histórica de la ciudad, refleja las características de los ensanches burgueses urbanos del siglo XIX (Monclús Fraga et al., 2012; Yeste Navarro, 2004). A diferencia del casco antiguo, este espacio se distingue por una trama de calles en forma de cuadrícula y la presencia de vegetación ornamental, aunque escasa, tan solo reseñable en algunas plazas a modo de pequeños parques urbanos, como es el caso de la Plaza de los Sitios. Los edificios en esta zona, con una clara influencia de la reforma urbana del siglo XIX y manifestando características arquitectónicas francesas, presentan una calidad constructiva superior y alturas levemente mayores en comparación con los del casco antiguo. La configuración urbana actual combina estos edificios de carácter histórico con nuevas construcciones de mayor altura y diseño contemporáneo. Estas nuevas estructuras, además de destinarse a fines residenciales, albergan funciones comerciales, financieras, gubernamentales y de oficinas, contribuyendo a la diversificación funcional del área.

Inmediato al centro de la ciudad en su parte suroccidental, nos encontramos con los sensores **S03**, **S04** y **S05**, ubicados en las inmediaciones de los barrios de Delicias y Oliver-Valdefierro. Estas zonas urbanas surgieron en la segunda mitad del siglo XX estrechamente vinculadas al crecimiento urbano y al desarrollo industrial experimentado por Zaragoza en ese período. Este desarrollo respondió a una creciente demanda de empleo, atrayendo a un gran número de inmigrantes procedentes del mundo rural (Germán Zubero, 1989). Sin embargo, la ciudad no pudo proporcionar viviendas adecuadas para esta población, lo que llevó a la creación espontánea de barrios en las fincas rurales circundantes. Los terratenientes y empresarios, percibiendo una oportunidad, adquirieron, parcelaron y vendieron estos terrenos, generando beneficios económicos, pero también dando lugar a la construcción caótica de viviendas en solares de dimensiones reducidas (Ezquerria, 2020).

Esta etapa inicial se caracterizó por la promoción de construcciones asequibles, con pequeñas viviendas unifamiliares que evolucionaron hacia edificaciones de cuatro alturas, comúnmente construidas con ladrillo rojo y de una simplicidad extrema (Monclús Fraga et al., 2012). En los años sesenta, con la plena integración de estos barrios en la ciudad, se vivió un "boom" urbanístico marcado por la construcción de imponentes bloques de diez alturas y manzanas cerradas de estructura predominantemente de cemento.

Este auge urbanístico fue respaldado por el Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) de Emilio Larrodera en 1968 (De Miguel González, 2014). La ciudad experimentó una intensa actividad edificatoria, caracterizada por la sustitución de edificaciones, construcción en solares vacíos y el relleno de pastillas de suelo en el tejido urbano existente. Los barrios residenciales unifamiliares que aún subsistían en estas áreas fueron transformados en viviendas colectivas en forma de manzanas cerradas con patios interiores, con alturas ajustadas al ancho de la calle que generalmente no sobrepasaban la 5 plantas, multiplicando así la capacidad habitacional. Este proceso, a menudo liderado por pequeños promotores, se materializaba mediante la obtención de suelo edificable a cambio de la realización de obras.

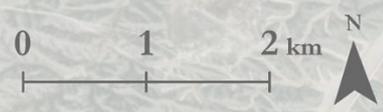


**Número y nombre del sensor**

- |                               |                         |                         |                          |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 Casa de la Mujer            | 6 Estación Norte        | 11 Camping              | 16 Parque del Agua       |
| 2 Ayuntamiento (Casa Jiménez) | 7 IES Andalán           | 12 Valdespartera        | 17 Jardín Botánico       |
| 3 Inst. Aragonés de Juventud  | 8 C.C. Actur            | 13 Policía Local        | 18 Movera                |
| 4 Delicias                    | 9 Las Fuentes           | 14 Cogullada            | 19 San Gregorio          |
| 5 Oliver                      | 10 AEMet Canal Imperial | 15 Facultad Veterinaria | 20 Parque de atracciones |

**Sensor de referencia**

- 21 Ciudad Deportiva del Real Zaragoza





**U23 Pro v2**  
Adaptador



21

**MX2301A**  
Bluetooth



10

*Figura 2.4. Mapa de localización de la red de sensores en la ciudad de Zaragoza.*

Autor: Samuel Barrao Simorte  
Fuente: Esri, Maxar, Earthstar Geographics and the GIS User Community.  
Imágenes ©2023 Google, Airbus, Maxar Technologies, Instituto Geográfico Nacional.

Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Según los datos del Padrón Municipal en enero de 2021 (Oficina de Organización y Servicios Generales & Observatorio Municipal de Estadística, 2021), la Junta Municipal de las Delicias destaca como la de mayor densidad de población, alcanzando los 31.539 habitantes por kilómetro cuadrado. Esta área presenta en la actualidad no solo una significativa densidad demográfica, sino también una marcada presencia de residentes extranjeros y una población notablemente envejecida. De acuerdo con los datos, más de 3 millones de metros cuadrados albergan a 103.592 habitantes, lo que equivale al 0,3% de la superficie total del municipio, concentrando al 14% de la población municipal. En el caso del barrio Oliver, en conjunto con Valdefierro, la población asciende a 32.517 habitantes en poco más de 4 km<sup>2</sup>, generando una densidad de 7.493 hab/km<sup>2</sup>.

Cabe destacar la ubicación del sensor **S03** en los márgenes de la Ciudad Jardín, un enclave peculiar dentro del barrio de las Delicias que se distingue notablemente de su entorno urbano circundante. Este rincón, gestado en 1936 se caracteriza por parcelas con viviendas unifamiliares de baja altura y jardines (Monclús Fraga et al., 2012), y sobresale al mantener una notoria ausencia de grandes obras de construcción en las últimas décadas.

El **segundo anillo (S06 a S10)** abarca áreas en general de menor densidad de edificación, caracterizadas por estructuras viarias más amplias y una mayor presencia de suelos permeables y vegetación en comparación con el anillo anterior, pero también zonas como el Barrio de San José o el de Las Fuentes, que en muchas ocasiones comparten características similares a las que hemos visto anteriormente en Delicias y Oliver-Valdefierro. Este sector también engloba además zonas dedicadas a otras actividades que complementan el uso residencial, como centros comerciales, edificios administrativos o estaciones de transporte, diversificando así las funciones urbanas presentes en este anillo y la morfología edificatoria. La disposición de calles más amplias no solo facilita la circulación vehicular y peatonal, sino que también permite una mayor integración de áreas verdes, contribuyendo a una mayor circulación del aire, una menor acumulación del calor y una mayor iluminación natural.

En este anillo, los sensores **S06, S09 y S010** están ubicados en proximidades de los barrios del Arrabal, Las Fuentes y San José – Torrero, respectivamente. Estos barrios, con bastantes similitudes como señalábamos antes con los barrios de Delicias y Oliver, tienen su origen también en asentamientos espontáneos en respuesta a la demanda de mano de obra y reflejan el crecimiento periférico de la ciudad. Pero con una diferencia, la participación activa de empresas, fábricas e industrias en la construcción de viviendas para sus empleados impulsó el desarrollo urbano en estas áreas. Por ejemplo, el crecimiento del barrio de San José está estrechamente vinculado al establecimiento de la empresa GIESA en el entorno de la calle Miguel Servet, del mismo modo que Tranvías de Zaragoza en Las Fuentes. En el caso del Arrabal y su núcleo más antiguo, se destaca su característica configuración medieval, considerándose en ciertos aspectos un segundo casco histórico en la margen izquierda del Ebro (Berruete-Martínez et al., 2010). El auge del ferrocarril y la construcción de la primera estación del tren, ahora convertida en un centro cívico que alberga el sensor **S06**, así como la instalación de diversas fábricas e industrias a principios del siglo XX, como la industria harinera de los Solans o La Azucarera del Gállego en la actual avenida de Cataluña, impulsaron aún más su desarrollo.

El resto de sensores que conforman este grupo (**S07 y S08**) se encuentran en áreas que divergen de la tradición histórica y urbanística de los anteriores. Estas zonas presentan encajan dentro de los barrios de parcelación periférica o promoción pública que se desarrollaron desde los años 70 hasta la actualidad en la ciudad. Una serie de espacios que pese a sus similitudes cuentan con matices y diferencias características de sus distintas etapas

constructivas. Es fundamental señalar que el cambio cuantitativo y cualitativo en el urbanismo zaragozano se manifestó con los nuevos Planes Parciales (*Plan General de Ordenación Urbana de Zaragoza*, 1999; *Plan General de Ordenación Urbana de Zaragoza*, 2007) a partir de los años 70, ejecutados en barrios como la Romareda, Universidad, Monsalud, Almozara (S07), Miraflores, la Jota, Actur (S08), entre otros. Ya no se trata de dar soluciones habitacionales a la población procedente del medio rural, como había sido el origen de los barrios anteriores u otros barrios del primer anillo como Delicias, sino de dar cobijo a los descendientes de éstos. Esta transformación se tradujo en la adopción generalizada de estructuras urbanas más abiertas, de mayor altura y con menor densidad de construcción, conformando un modelo de desarrollo vertical para Zaragoza en contradicción con la tendencia europea, y en respuesta a la abundancia de suelo, espacio y agua de la zona.

El **tercer anillo (S11 a S15)** sigue la pauta de disminución de la densidad de edificación y de urbanismo más compacto a medida que nos alejamos del centro de la ciudad. Aunque comparte similitudes con el anillo 2, en este caso, la densidad de edificación es aún menor. Los sensores **S11**, **S12** y **S13** se encuentran en espacios urbanos a modo de nuevos ensanches residenciales (Monclús Fraga et al., 2012), donde resalta la planificación urbana en el diseño del viario y las edificaciones, generando morfologías comunes.

Estas áreas se distinguen por ser barrios de nueva creación, con menos de dos décadas de existencia, siendo los más recientes construidos en la ciudad y representando las últimas expansiones urbanas de Zaragoza, principalmente en el entorno sur. Entre ellos se encuentran Valdespartera (**S12**), Arco Sur, Rosales del Canal (**S11**) o Parque Venecia (**S13**). Estos barrios aún cuentan con zonas en construcción y se caracterizan por la presencia destacada de viviendas de protección oficial en bloques de más de 8 pisos de altura, con múltiples habitaciones y terrazas. La disposición alrededor de patios centrales abiertos, que a menudo cuentan con espacios ajardinados o piscinas comunitarias, es una característica distintiva.

Se observa una mayor presencia de zonas verdes, espacios ajardinados y parques en comparación con los anillos anteriores. Sin embargo, la vegetación aún es joven, con abundancia de áreas de césped, herbáceas y árboles jóvenes. Además, destaca la presencia de fuentes y láminas de agua, elementos que mejoran la calidad del entorno urbano. Este cambio en la tipología de espacios urbanos refleja la evolución de la planificación y el diseño urbano en la ciudad de Zaragoza, priorizando aspectos como la sostenibilidad, la calidad de vida y la integración de áreas verdes en los nuevos desarrollos urbanos.

El sensor **S11**, ubicado en el camping de Zaragoza, representa la morfología característica de la suburbanización y las nuevas periferias del modelo de ciudad dispersa (Moliní & Salgado, 2010). Se distingue por la presencia de edificios residenciales de una o pocas viviendas, a menudo con jardines y espacios amplios agrupados en urbanizaciones. Este tipo de configuración es típico del barrio de Montecanal, situado en las cercanías del camping.

Por otro lado, los sensores **S14** y **S15**, aunque se encuentran en el mismo anillo debido a su distancia respecto al centro de la ciudad, se caracterizan por ser espacios donde el uso principal del suelo no es residencial y se encuentran en el límite de la ciudad. El sensor **S15** se localiza en las inmediaciones del campus de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Zaragoza, un espacio que se caracteriza por la alternancia de edificios departamentales y aulas, que se destacan por su extensión en lugar de su altura, no superando las 4 plantas. Este entorno está salpicado con corrales, establos y suelo permeable, donde se encuentran los animales, en una zona de transición hacia los espacios tradicionales de huerta de la ciudad.

El sensor **S14** se encuentra en el área del polígono industrial de Cogullada, uno de los principales polígonos industriales de Zaragoza, establecido en la década de 1960. Este polígono se distingue en la actualidad por su enfoque logístico y de almacenaje, quedando minimizada la presencia de complejos industriales, marcando una tendencia observada en la mayoría de las ciudades medianas españolas, donde los polígonos industriales han evolucionado en los últimos años, alejándose de su función tradicional vinculada a la producción y adquiriendo relevancia como espacios de actividad económica, especialmente en el sector logístico, convertido en uno de los impulsores económicos clave de la ciudad. Esta transformación ha llevado a una zonificación funcional de estas áreas, ubicadas en las periferias, asumiendo un papel estratégico en las estructuras urbanas (Andrés-López, 2019). Las edificaciones características del polígono incluyen naves con estructuras metálicas y de hormigón, con cubiertas claras de chapa metálica. Es notable destacar que estas construcciones coexisten con zonas de antiguas naves industriales de ladrillo y antiguas vías, evidenciando el abandono de infraestructuras pasadas. Este cambio en la función y configuración de los polígonos industriales no solo refleja las dinámicas económicas contemporáneas sino también la adaptabilidad de las áreas industriales a las nuevas demandas logísticas y de almacenamiento en el contexto urbano actual.

El **cuarto anillo (S16 a S20)** abarca las áreas más distantes del centro urbano y se caracteriza por entornos menos urbanizados con una notoria presencia de suelos permeables y cobertura vegetal. En este anillo, encontramos la representación de barrios rurales que forman parte del típico espacio metropolitano en la periferia urbana, una característica compartida con otras ciudades. Dos ejemplos notables en este contexto son el barrio de San Gregorio (**S19**) y el de Movera (**S18**).

El barrio de San Gregorio, un pequeño enclave rural al norte de la ciudad con aproximadamente 2 km<sup>2</sup> y 600 habitantes (Oficina de Organización y Servicios Generales & Observatorio Municipal de Estadística, 2021). Las condiciones de su localización llevaron a la decisión de construir un hospital para tuberculoso en 1955, actualmente conocido como hospital Royo Villanova, un ejemplo de cómo la climatología se relaciona con el urbanismo y la planificación urbana. La morfología urbana destaca por viviendas tradicionales de una o dos plantas, principalmente unifamiliares, distribuidas en torno a tres calles paralelas y una transversal en el extremo este. En la parte norte, nuevas construcciones se presentan en forma de adosados unifamiliares de dos plantas con zonas ajardinadas. En conjunto, San Gregorio se caracteriza por un equilibrio entre áreas agrícolas con campos cultivados en regadío y zonas residenciales.

En el caso de Movera, otro barrio rural en las afueras de Zaragoza en la margen izquierda del río Ebro, al este de la ciudad, ha experimentado transformaciones a lo largo del tiempo debido al crecimiento urbano, especialmente a partir de los años 50 (Perez Vitaller, 2013). Aunque ha incorporado elementos urbanos, aún conserva elementos rurales y espacios naturales distintivos. Movera se desarrolla de manera lineal en torno a la carretera local en dirección a Pastriz. Las casas, siguiendo la misma estructura que San Gregorio, muestran una mayor presencia de nuevas residencias tipo adosado unifamiliar en las zonas más alejadas al este y oeste, manteniendo un desarrollo lineal en torno a una carretera que sirve como eje principal, flanqueado al norte y sur por cultivos herbáceos de regadío.

Los sensores restantes (**S16**, **S17** y **S18**) se encuentran en áreas mayormente no construidas, abarcando espacios urbanos anteriormente no identificados, que corresponden a zonas verdes urbanas. En concreto, estos sensores están ubicados en los dos principales parques metropolitanos de la ciudad, que constituyen las principales infraestructuras verdes

de Zaragoza: el Parque del Agua Luis Buñuel (**S16**) y el Parque Grande José Antonio Labordeta (**S17**).

El Parque Grande José Antonio Labordeta, inaugurado en 1929, ocupa aproximadamente 40 hectáreas dentro de la ciudad, aunque en sus inicios estaba en la periferia urbana (*Plan Director del Parque Grande José Antonio Labordeta*, 2010). Su diseño tradicional sigue las corrientes del paisajismo de la época y destaca por sus áreas arboladas, jardines de estilo francés, láminas de agua, fuentes, canales y un tramo del río Huerva antes de quedar soterrado por la ciudad. El parque cuenta con tramos asfaltados y pequeñas construcciones históricas, como kioscos o casas tradicionales, con fines culturales. A medida que el parque avanza hacia el sur y aumenta su altitud al encontrarse con partes de los montes de Torrero, se integra en una masa boscosa conocida como Pinares de Venecia, principalmente compuesta por el pino carrasco (*Pinus halepensis*), una especie de repoblación común en la región mediterránea debido a su adaptabilidad a climas secos y suelos pobres. El sensor **S20** se ubica en esta área boscosa como representante de un espacio natural urbano.

Por otro lado, el Parque Metropolitano del Agua Luis Buñuel, creado en 2008 durante la Expo Zaragoza, se extiende por más de 1.200 hectáreas e integra el parque urbano en el meandro de Ranillas al este de la ciudad (Pellicer Corellano & Monclús Fraga, 2006). Está completamente relacionado con el río, presentando vegetación y sistemas ribereños con árboles típicos de la ribera, como el olmo, el sauce y el chopo. Cuenta con canales que aseguran la constante presencia de masas de agua y permiten la inundación parcial de la zona en momentos de riada del Ebro, fomentando aún más su interacción con el río. Además, se alternan zonas ajardinadas, huertos urbanos, cañizales y matorrales de ribera, con pequeñas construcciones que ofrecen diversos servicios y áreas pavimentadas con estacionamientos. Un proceso de rehabilitación de las riberas del Ebro que no solo abarcó el parque y que gracias a la Expo se reconstruyó para Zaragoza un espacio verde sin precedentes de más de 9 km de recorrido siguiendo la ribera en ambas orillas del río (Pellicer Corellano, 2015). Este parque representa un enfoque más contemporáneo en la planificación urbana, integrando la naturaleza de manera activa en el entorno urbano y proporcionando áreas de recreación diversificadas.

Finalmente, el sensor **S21**, ubicado en la periferia no urbanizada, no está asociado a ningún anillo y funciona como un observatorio rural para fines de comparación con los entornos urbanos. Se encuentra en las cercanías de la Ciudad Deportiva del Real Zaragoza, un complejo deportivo próximo al municipio de Cuarte de Huerva, al sur de la ciudad, aproximadamente a 9 km en línea recta desde el sensor más céntrico de la ciudad, S01 Casa de la Mujer. Este espacio, a pesar de contar con pequeñas construcciones y campos de césped, representa principalmente el típico entorno natural de las llanuras esteparias en suelos de yesos y calizas de la zona, intercaladas con vales destinadas a tierras de labor. La elección de este lugar se debe a su baja presencia de personas, la distancia a la ciudad y evitar los posibles efectos urbanos en el clima local, ya sea por los vientos característicos del noroeste (cierzo) que desplazan la isla hacia el sureste o por los vientos cálidos estivales del sureste (bochorno) que la desplazan hacia el noroeste. Este sensor proporciona una perspectiva diferente de la de los entornos urbanos estudiados, permitiendo evaluar las diferencias en el impacto ambiental y climático entre las áreas urbanas y rurales circundantes.

## 2.2. Metodología

Como decíamos anteriormente, la fiabilidad de los datos capturados por la red de sensores termohigrométricos desplegados en la ciudad de Zaragoza constituye un aspecto fundamental para la validez y utilidad de cualquier investigación climática posterior. En este

contexto, la presente sección se centra en la metodología empleada para diseñar y aplicar un sistema de control de calidad que asegure la integridad y confiabilidad de la información obtenida. En la metodología de control de calidad, se exploran detalladamente los parámetros críticos y los diversos pasos realizados para la obtención de una base de datos climática urbana útil. Este análisis no solo busca mejorar la calidad intrínseca de los datos, sino también sentar las bases para investigaciones futuras y replicables en otras ciudades y redes de sensores urbanas.

### **2.2.1. Razones para llevar a cabo un control de calidad exhaustivo**

La creciente expansión de redes de observación climática, especialmente aquellas no homologadas y de bajo coste, ha generado un notable interés en la comunidad científica. Estas redes, empleadas en estudios de climatología urbana (Bassett et al., 2016, 2020; Johnson et al., 2020; Smoliak et al., 2015; Warren et al., 2016) y calidad del aire (Carvlin et al., 2017; Duvall et al., 2016; Kang et al., 2022), representan una herramienta fundamental en comparación con otras redes oficiales que, a menudo, carecen de resolución espacial en entornos urbanos, limitando su representatividad para la diversidad de espacios urbanos y sus patrones climáticos. Además, su diseño orientado a la detección de condiciones meteorológicas sinópticas las hace inadecuadas para análisis específicos urbanos o intraurbanos.

Estudios recientes, como los realizados por Stewart (2011), Muller (Muller et al., 2013a, 2013b) y otros investigadores (X. Chen & Yang, 2022; Šećerov et al., 2019), han subrayado la importancia de las redes de observación climática de alta densidad espacial, particularmente en la climatología urbana, donde la variabilidad microclimática es fundamental para entender el comportamiento climático en entornos urbanos diversos. Sin embargo, también destaca que su utilidad se ve comprometida si no se implementa un control de calidad exhaustivo y un buen diseño de implantación de la red. La fiabilidad y precisión de los datos son aspectos cruciales para garantizar la validez de los resultados obtenidos.

En este contexto, es imperativo destacar la importancia crucial de implementar un control de calidad exhaustivo. A continuación, se explorarán las razones fundamentales que respaldan esta práctica, identificando errores comunes y subrayando su relevancia en diversos contextos:

#### **1. La necesidad de fiabilidad en las bases de datos climáticas:**

La utilidad de los datos climáticos depende en gran medida de su fiabilidad. Aunque los sensores HOBO ofrecen precisión y especificaciones técnicas detalladas (como se detalla en la sección 2.1.1), las redes no homologadas y de bajo coste pueden enfrentar limitaciones en la precisión instrumental y la calibración. Un control de calidad robusto se vuelve esencial para preservar la validez de los resultados obtenidos. La fiabilidad de los datos es crucial para la comprensión precisa de los patrones climáticos, y cualquier incertidumbre puede comprometer la exactitud de los modelos climáticos.

#### **2. Errores comunes en redes de alta densidad:**

Las redes climáticas de alta densidad pueden enfrentar desafíos específicos derivados del tamaño de la red y la ubicación de sus sensores. Errores como variaciones en la calidad de los instrumentos y la falta de estandarización. Errores comunes incluyen la falta de calibración regular, variabilidad en la ubicación de los sensores y la carencia

de procedimientos normalizados de medición. La falta de homogeneidad en las observaciones climáticas puede introducir sesgos significativos en los análisis a largo plazo, destacando la necesidad de un control de calidad efectivo para mitigar todos estos riesgos.

### 3. Desafíos en redes de bajo coste:

Las redes de bajo coste, aunque económicamente accesibles, presentan desafíos adicionales. Sensores menos costosos pueden tener una vida útil limitada y ser propensos a la deriva en la precisión con el tiempo. Un problema común en estos sensores es la descarga de la batería cuando no cuentan con fuentes de alimentación continua, lo que puede resultar en la alteración del registro o la falta de datos recogidos. Un control de calidad constante se vuelve esencial para abordar estos desafíos.

### 4. Rol del control de calidad en la reproducibilidad y comparabilidad:

La reproducibilidad y comparabilidad de los datos climáticos son esenciales para la validez científica. Un control de calidad sólido no solo mejora la calidad intrínseca de los datos, sino que también facilita la replicación de estudios y la comparación entre diferentes redes y ubicaciones. Destacar la necesidad de estándares y protocolos comunes se vuelve imperativo para garantizar la comparabilidad de los datos climáticos a nivel global, fortaleciendo así la base científica y permitiendo avances significativos en la comprensión del clima de las ciudades.

En conclusión, la implementación de un control de calidad exhaustivo en redes climáticas de alta densidad compuesta por sensores no homologados y de bajo coste es esencial para garantizar la fiabilidad de los datos y preservar la validez científica. Abordar errores comunes y desafíos específicos fortalece la integridad de los conjuntos de datos climáticos, permitiendo su utilidad en diversas disciplinas y contribuyendo al avance del conocimiento climático urbano.

#### 2.2.2. Síntesis del control de calidad

En primer lugar, se lleva a cabo la detección de valores fuera de los rangos generales, también conocidos como *outliers*. Estos límites, establecidos entre  $-15\text{ °C}$  y  $50\text{ °C}$ , se basan en el historial climático de la ciudad y las características climáticas del valle medio del Ebro. Cualquier valor que exceda estos límites se elimina directamente de la base de datos horaria.

Otro aspecto crucial es la identificación de *outliers* específicos. Para ello, se compara la información registrada por los 21 observatorios simultáneamente. Un valor que difiera más allá de  $\pm 3$  desviaciones estándar de la media de todos los sensores para cada hora se consideran sospechoso y se elimina de la base de datos.

El siguiente paso implica la detección de valores repetidos. Aunque es común encontrar repeticiones en lecturas, especialmente en situaciones de estabilidad atmosférica como las nieblas, se establece un umbral de 10 repeticiones como referencia. Las repeticiones automáticas se someten a una revisión individual, teniendo en cuenta la situación atmosférica del día para tomar decisiones informadas sobre su inclusión o exclusión.

El análisis de variaciones abruptas o saltos horarios en las series climáticas constituye otro elemento crucial. Se busca identificar cambios significativos en las temperaturas horarias

consecutivas, estableciendo un umbral de más de  $\pm 5$  de diferencia entre una hora y la anterior para categorizar una observación como sospechosa. Posteriormente, los datos sospechosos se someten a una revisión detallada, considerando la situación sinóptica específica del día.

La evaluación sinóptica se introduce como una herramienta auxiliar para la toma de decisiones. Se clasifican situaciones sinópticas en base a datos de reanálisis de NOAA NCEP/NCAR y se relacionan estas situaciones con los datos catalogados como sospechosos, proporcionando un contexto adicional. Aquellas observaciones sospechosas que no puedan ser explicadas por condiciones meteorológicas del momento calculadas son eliminadas.

En resumen, este enfoque integral de control de calidad garantiza la coherencia y fiabilidad de los datos climáticos urbanos en Zaragoza. Más allá de establecer límites generales, se consideran comparaciones inter-observatorios, repeticiones y cambios abruptos, respaldados por una evaluación sinóptica que añade un nivel adicional de validación. Este proceso robusto asegura una base de datos climáticos urbanos confiable para análisis climatológicos y estudios relacionados con la variabilidad climática en la ciudad. Todos los pasos del control de calidad (Figura 2.5) así como una parte de los resultados obtenidos para las observaciones registradas hasta febrero de 2021 fueron ya publicados en el artículo *Characterization of the UHI in Zaragoza (Spain) using a quality-controlled hourly sensor-based urban climate network*, (Barrao, Serrano-Notivoli, Cuadrat, et al., 2022).

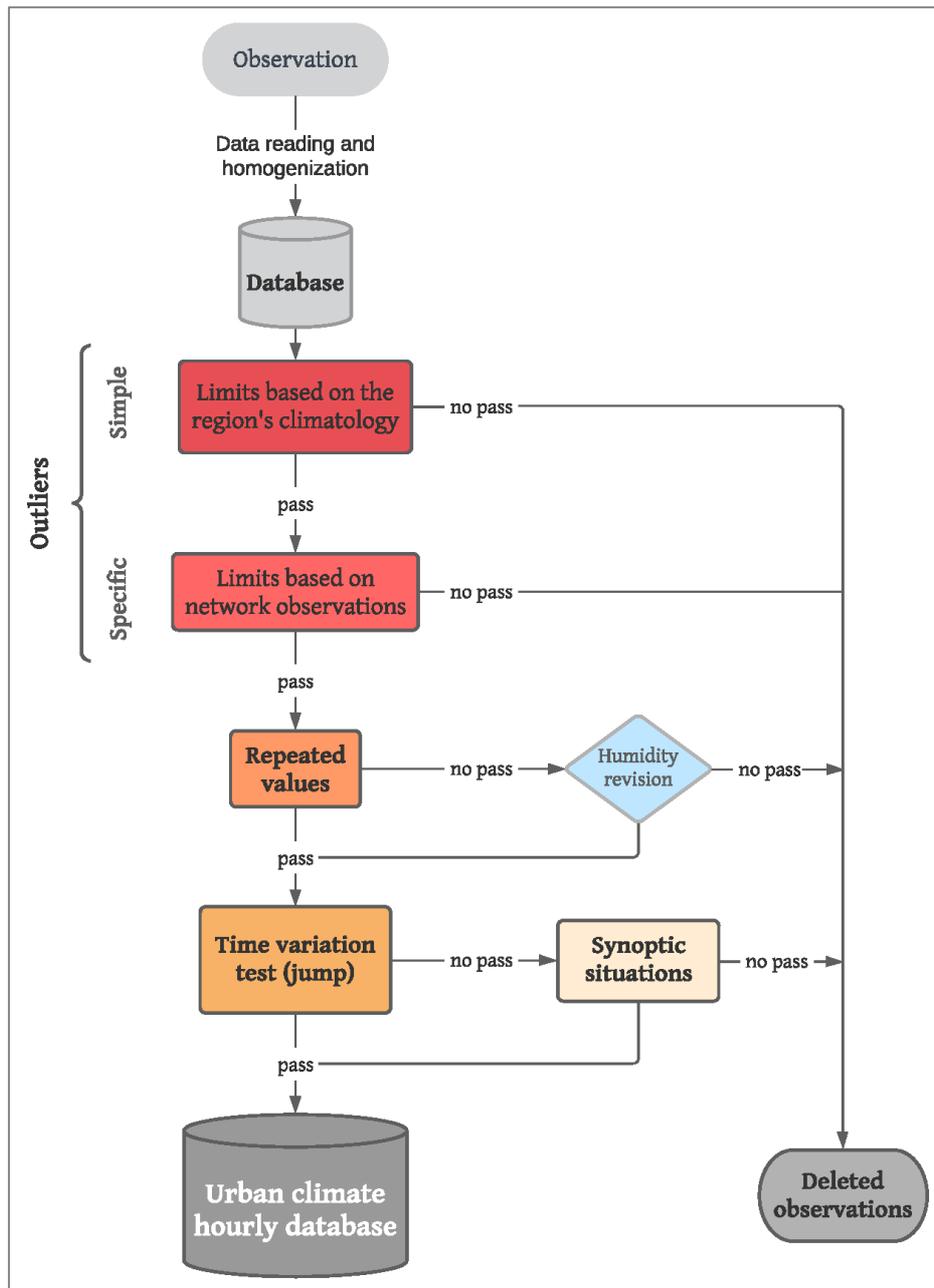


Figura 2.5. Flujo de trabajo del control de calidad de la red de sensores urbanos. Fuente: Barrao et al., 2022.

### 2.2.3. Criterios para la eliminación de observaciones no fiables

El control de calidad implementado en este trabajo se fundamenta en manuales internacionales y guías establecidas por la OMM. Se han tomado como referencia importantes documentos como la "Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos" (2014), las "Directrices para el control de la calidad y el aseguramiento de la calidad de los datos de estaciones de observación en superficie para aplicaciones climáticas" (2021, pp. 9–23), especialmente su capítulo 3 sobre los "Elementos del aseguramiento de la calidad del ciclo de vida de los datos", y la "Guía de prácticas climatológicas" (2018, pp. 44–65) que ofrece recomendaciones clave sobre la gestión de datos climáticos.

Además, se ha considerado la contribución de diversos artículos centrados en el control de calidad de bases de datos climáticas, como los trabajos de Durre et al. (2008) y Tomas-Burguera et al. (2016). Asimismo, se han tenido en cuenta documentos más recientes que abordan controles específicos para redes urbanas, como los estudios de Alerskans et al. (2022), Muller et al. (Muller et al., 2013a), y Warren et al. (2016). La importancia del metadato en los datos climáticos urbanos también ha sido subrayada, siguiendo las recomendaciones de Muller et al. (2013b). Incluso se ha explorado la literatura relacionada con el control de calidad específico para datos climáticos diarios u horarios, aunque en estos casos se trate de variables satelitales de temperatura, como se aborda en los trabajos de Durre et al. (2010) y Lott (2004).

Este extenso marco bibliográfico no solo ha proporcionado una sólida base teórica, sino que también ha permitido identificar las principales problemáticas asociadas con los errores en las bases de datos climáticas, especialmente en el ámbito urbano. Estas referencias, junto a los problemas identificados en la recogida de los datos, han sido esenciales para desarrollar consideraciones fundamentales en el diseño del control de calidad específico para bases de datos horarias, teniendo en cuenta sus particularidades y asegurando así la integridad y confiabilidad de los datos.

Dado el volumen considerable de registros generados por las estaciones, la diversidad de variables analizadas y el continuo aumento de datos, la verificación manual se revela como un método ineficiente para el control de calidad en estas redes. En lugar de depender únicamente de la intervención manual, se ha adoptado un enfoque de control total o parcialmente automatizado. Este sistema busca ser replicable en distintos sensores y redes, permitiendo su actualización para abordar nuevas problemáticas que puedan surgir con la constante incorporación de datos. La necesidad de analizar y verificar la integridad, es decir, la calidad intrínseca de los datos registrados, ha llevado a la implementación de un enfoque de control basado en varios niveles (Menne et al., 2012). Este método implica procedimientos totalmente automatizados desarrollados en el lenguaje de programación R, complementados con verificaciones manuales supervisadas. Este enfoque no solo garantiza la eficiencia y consistencia en la aplicación del control de calidad, sino que también se adapta a la dinámica cambiante de las redes y asegura la capacidad de abordar nuevas problemáticas de manera oportuna. La combinación de automatización y supervisión manual proporciona un marco robusto y adaptable para mantener la calidad y la confiabilidad de los datos en entornos de alta complejidad y volumen como los observados en estas redes.

Antes de adentrarnos en cada uno de los pasos del control de calidad, es crucial destacar que el proceso inicia con una sencilla verificación de formato. Este paso es fundamental para homogeneizar cada registro y crear una base de datos unificada, donde todos los datos compartan características uniformes, sin importar el tipo de sensor, su ubicación o la fecha de adquisición de los datos. En esta fase, se abordan problemas potenciales relacionados con el formato de fecha, zonas horarias (GMT o UTC), cambios de hora y la escala de temperatura (Celsius o Fahrenheit); como se puede apreciar en la Tabla 2.2.

Una vez establecida una base de datos única con observaciones completas y una estructura consistente, se procede a implementar una serie de procedimientos de control de calidad totalmente automatizados. Estos procedimientos tienen como objetivo identificar valores sospechosos y eliminarlos de manera eficiente.

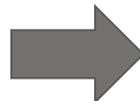
**Ejemplos de diferentes codificaciones según el sensor y el periodo de tiempo**

Fecha Tiempo GMT + 01:00	Temp °C	HR %
03/23/15 01:00:00 AM	7,167	83,322

Date Time GMT + 0200	Temp °F	RH %	DewPt °F
2018-05-02 18:00:00	71,38	31,51	39,63

Fecha Tiempo GMT + 01:00	Temp °C	HR %
02/08/20 12:00:00 a. m.	8,319	75,236

Date Time GMT + 0100	Temp °C	RH %	DewPt °C
2021-03-25 14:00:00	17,46	46,43	5,87



**Codificación final de la base de datos**

Date	Temp	Hum
2015-03-23 00:00:00	7,167	83,322

Tabla 2.2. Ejemplos de diferentes codificaciones registradas por la red, según sensor y periodo de tiempo de registro. Junto con la codificación final que seguirá la base de datos climática.

**2.2.3.1. Detección de outliers genéricos**

Después de recopilar los datos y estructurar una base de datos uniformemente codificada, el proceso de control de calidad se inicia con un paso fundamental en cualquier protocolo de depuración: la detección de valores atípicos. En una primera instancia, se procede a eliminar registros que superen los límites climáticos absolutos establecidos. Sin embargo, para determinar estos límites de manera precisa, es esencial conocer los valores climáticos característicos de la ciudad de estudio.

En este contexto, se analizan los datos diarios registrados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en el observatorio del Aeropuerto de Zaragoza. Este observatorio sirve como referencia para cualquier estudio climático básico de la ciudad y cuenta con registros disponibles desde enero de 1951, accesibles a través de la API REST de AEMET OpenData. También se utilizaron los valores normales para el periodo de referencia 1981-2010 de esta estación como comparación inicial.

En el análisis comparativo, representado en la *Figura 2.6*, se observa que el periodo de estudio de este trabajo presenta un aumento notable de las temperaturas, tanto medias como mínimas y máximas, en los últimos ocho años. Las cifras resaltadas en color rojo y azul en la gráfica muestran que la diferencia promedio de todas las temperaturas entre el periodo de referencia y cada estación del periodo de estudio es generalmente positiva, con un promedio de 1,16 °C por encima y un valor máximo de 3,33 °C alcanzado en el verano de 2022. Este aumento es especialmente evidente en el promedio de la temperatura máxima de verano, que registra una anomalía superior a los 4°C en los meses de mayo y junio de 2022. Al observar las estaciones por separado, se destaca un aumento más pronunciado en verano, con un incremento promedio de 1,55 °C, seguido por el invierno con 1,10°C. Sin embargo, tanto primavera como otoño también muestran aumentos positivos cercanos a 1 °C. Únicamente en primavera de 2016 se registra un leve descenso de la temperatura, con una disminución de -0,10 °C.

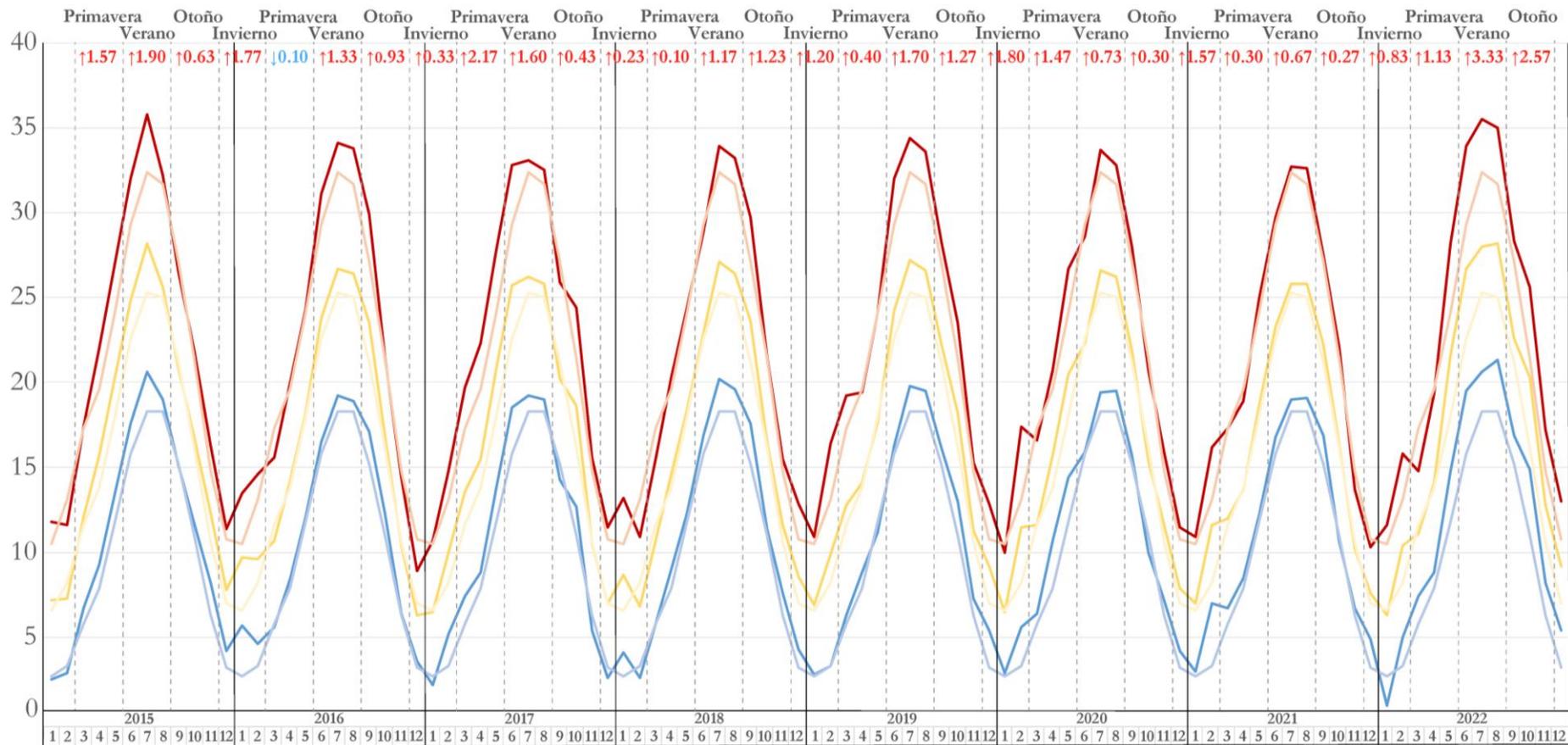


Figura 2.6. Evolución de la temperatura media, máxima y mínima desde 2015 hasta 2022 en comparación con los valores normales para el periodo de referencia 1981-2010 en la estación de Zaragoza Aeropuerto de AEMET. Los números destacados en color son la diferencia promedio para cada estación del año. Fuente: AEMET.

Estos datos ofrecen un buen ejemplo del aumento de la temperatura asociado al cambio climático, una tendencia que cobra relevancia al considerar el impacto adicional del aumento de la temperatura local generado por la propia ciudad, como se explorará más adelante en este trabajo. En el caso de la humedad la diferencia promedio es negativa, aunque son valores bajos en torno a -2,3 %, una diferencia que se intensifica en verano con un descenso de -4,46 % y se suaviza en invierno con un aumento respecto al periodo de referencia de 0,38 %.

Con el conocimiento de las características climáticas de Zaragoza y las particularidades del periodo de estudio, se procedió al cálculo de umbrales máximos y mínimos tanto para la temperatura como para la humedad. Estos umbrales se utilizarán como límites para identificar observaciones que no se ajustan al comportamiento climático típico de la zona.

Para la temperatura, se calculó el máximo absoluto de la temperatura máxima y el mínimo absoluto de la temperatura mínima en toda la serie desde 1951 hasta 2022. El resultado fue de 44,5 °C, registro alcanzado el 7 de julio de 2015 durante una ola de calor de las más intensas y duraderas de los últimos años que afectó a 30 provincias española, entre ellas a Zaragoza (Tejedor et al., 2016) en los últimos años. El mínimo absoluto fue de -11,4 °C registrado el 5 de febrero de 1963, año en el que la localidad turolense de Calamocha alcanzó la histórica cifra de -30 °C, siendo la temperatura más baja registrada por AEMET en un lugar habitado en España. Es relevante señalar que solo un 6,5 % de las temperaturas mínimas diarias registradas se sitúan por debajo de 0 °C, y este porcentaje se reduce aún más al considerar temperaturas mínimas inferiores a -5 °C, con tan solo un 0,41 % de las observaciones. Basándonos en estos datos, se decidió establecer límites de -15 °C y 50 °C para la temperatura, proporcionando un pequeño margen con respecto a las temperaturas absolutas de la serie, ligeramente mayor para las temperaturas más elevadas debido al efecto de la isla de calor urbano. En cuanto al rango observacional de la humedad relativa, se establecieron valores límite del 0 % al 100 %. Dado que esta variable se mide en porcentaje, cualquier valor fuera de estos límites se considera directamente un error del sensor.

Una vez establecidos los límites tanto para la temperatura como la humedad, se implementan en el código de R para detectar todos los valores que fuera de estos rangos y se eliminan.

#### 2.2.3.2. Detección de outliers específicos

El paso anterior constituye un control de calidad general, pero no permite un análisis detallado de los valores atípicos, pasando por alto las posibles inconsistencias presentes en la variación horaria, diaria y estacional. Por este motivo, se hace imprescindible la implementación de una detección personalizada de valores atípicos en el segundo paso del control de calidad. Este enfoque más refinado permitirá abordar de manera más específica las singularidades climáticas y los posibles errores en la recopilación de datos. Para comprender mejor este apartado, consideremos el ejemplo de registrar una temperatura de 40 °C. Esta observación durante el verano no sería considerada un error o anomalía, ya que en Zaragoza no es inhabitual alcanzar dicha cifra. Sin embargo, registrar la misma temperatura en invierno sería tan improbable que debe ser tratado como un error. En este sentido, no es suficiente establecer un límite fijo, como en el paso anterior; es necesario implementar un límite variable que se ajuste al contexto temporal de la observación en toda la red.

En este caso, se emplea un criterio de  $\pm 3$  desviaciones estándar para identificar registros que no se corresponden con la variabilidad natural de las series de temperatura o humedad. La elección de este límite se basa en ser un valor comúnmente utilizado como factor de multiplicación para la detección de valores atípicos, según investigaciones previas (Beck et al., 2018; Velleman & Hoaglin, 1981). Este límite ajustado se seleccionó cuidadosamente, ya que experimentos previos revelaron que utilizar valores más bajos generaba numerosos falsos positivos, marcando incorrectamente valores correctos como atípicos. Eliminando la propia variabilidad de la red y las diferencias climáticas del entorno urbano y periférico. Por otro lado, aumentar el umbral resultaba demasiado laxo, permitiendo que errores de registro pasaran desapercibidos e ingresaran a la base de datos. La elección de  $\pm 3$  desviaciones estándar ofrecen un equilibrio óptimo entre sensibilidad y especificidad en la identificación de valores fuera de rango específicos.

#### 2.2.3.3. Detección de valores repetidos anómalos

La repetición de unos pocos valores consecutivos puede ser relativamente común en sensores automatizados que registran datos en períodos de tiempo muy cortos, como horas. Sin embargo, cuando estas repeticiones se extienden durante períodos prolongados, a menudo indican fallos en el registro. Este aspecto se vuelve más relevante al considerar la precisión del sensor y el número de decimales. Con más de dos decimales, es muy complicado que la misma cifra se sostenga en el tiempo sin que sea atribuible a un problema del sensor u otro fallo que no pueda explicarse por la dinámica natural de la temperatura o la humedad. Establecer un número de repeticiones como umbral para identificar datos erróneos es un desafío, pero al conocer las características climáticas y los ciclos habituales de temperatura y humedad, se puede determinar un número aproximado (Serrano-Notivoli et al., 2017, 2019). En este caso, se estableció un umbral restrictivo de 6 repeticiones (mismo valor en 6 horas consecutivas, una cuarta parte del día) porque es un período en el que se espera que la temperatura y la humedad cambien incluso en condiciones extremadamente estables, como en el caso de niebla persistente o inversiones térmicas. Sin embargo, debido a fenómenos persistentes de niebla, los datos de humedad pueden mostrar más repeticiones, lo que requiere una revisión específica para evitar la eliminación de valores correctos. Es por ello que primero se identifican los valores sospechosos para luego ser revisados y, en su caso, eliminados.

#### 2.2.3.4. Detección de anomalías en la variación horaria o saltos

En la última etapa para identificar variaciones no naturales de temperatura y humedad, se analizó la variabilidad horaria de todas las mediciones calculando la diferencia entre dos valores consecutivos, también conocida como saltos. Dado que los saltos varían a lo largo del año, se estableció un umbral de  $\pm 3$  desviaciones estándar, similar a la metodología aplicada en la detección de outliers específicos, para señalar valores sospechosos. Aquellos datos que superaron este umbral fueron sometidos a una revisión manual, ya que no todos los datos sospechosos se deben necesariamente a errores no naturales; en ocasiones, pueden atribuirse a situaciones meteorológicas específicas que generan variaciones horarias bruscas en los registros bajo las condiciones adecuadas.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis detallado de las situaciones sinópticas diarias para verificar si los datos sospechosos correspondían o no a dinámicas atmosféricas que pudieran explicar cambios rápidos en los valores. Este enfoque de revisión manual, respaldado por la evaluación sinóptica, añade un nivel adicional de validación al proceso, proporcionando una forma novedosa de discernir entre variaciones naturales y posibles errores.

### 2.2.3.5. Análisis de situaciones sinópticas

Como parte del proceso para identificar saltos anómalos en las observaciones, se utilizaron situaciones sinópticas estimadas mediante el paquete R "*synoptReg*" (Lemus-Canovas et al., 2019). Este paquete facilita la obtención de una clasificación climática sinóptica de una región específica mediante el uso de tipos de circulación atmosférica y bases de datos de reanálisis de NOAA NCEP/NCAR, aplicando un enfoque basado en el Análisis de Componentes Principales (PCA por sus siglas en inglés, Principal Component Analysis).

El cálculo de situaciones sinópticas se realizó para los días marcados previamente como sospechosos en la base de datos, utilizando los umbrales propuestos en el punto anterior. Después de identificar los días sospechosos, se descargaron varias variables para cada uno de ellos, las cuales se incorporaron al modelo de cálculo de situaciones sinópticas. Estas variables incluyeron la presión media al nivel del mar, la altura geopotencial a 500 hPa y la temperatura cercana a la superficie. La elección de trabajar con cuatro componentes principales, que representan aproximadamente el 80 % de la varianza explicada, resultó en una clasificación de 7 situaciones sinópticas específicas para los periodos con datos sospechosos.

Es importante señalar que no se incorporaron más componentes de PCA, a pesar de que la varianza explicada aumentó y el número potencial de situaciones sinópticas fue mayor. Esto se debió a que las situaciones adicionales eran ligeras variaciones que no aportaban información útil para la identificación de errores, por lo que se optó por mantener un enfoque más específico y efectivo en la identificación de situaciones anómalas.

## 2.3. Resultados del control de calidad

Durante el período de estudio, que abarcó desde marzo de 2015 hasta diciembre de 2022, se registraron más de dos millones seiscientas mil observaciones horarias, incluyendo datos de temperatura y humedad relativa (2.665.154 observaciones en total). De todas estas observaciones, se identificó un 3,3 % de datos faltantes. Estos datos faltantes pueden deberse a fallos en los sensores, principalmente por falta de batería, problemas en la programación del registro, períodos de reemplazo o lapsus de tiempo entre la obtención de registros y la puesta en marcha del sensor. El total de observaciones faltantes fue de 43.701, abarcando tanto la temperatura como la humedad. La Tabla 2.3 y la Tabla 2.4 resumen los valores eliminados después de aplicar el control de calidad. En términos generales, los datos marcados como sospechosos y posteriormente eliminados representaron el 1,5 % del total de observaciones. Este porcentaje varió ligeramente, siendo del 1,6 % en el caso de las observaciones de temperatura y del 1,3 % en el caso de la humedad. En cifras absolutas, esto equivale a menos de 40.000 observaciones eliminadas en toda la red.

Los resultados obtenidos de los procedimientos de control de calidad subrayan la importancia fundamental de garantizar la integridad y fiabilidad de la información climática urbana. La identificación y gestión cuidadosa de los datos faltantes destacan la necesidad de abordar posibles fallos en los sensores y la programación del registro como descarga. Se enfatiza la importancia de prestar atención al estado de las baterías y de reducir los periodos de descarga de datos de la red para evitar la pérdida prolongada de información en caso de fallo del sensor. Actualmente los periodos de revisita de los sensores oscilan entre 3 y 6 meses. Este enfoque permite cubrir los periodos estacionales, con especial énfasis en los periodos de invierno y verano, momentos de interés espacial donde es crucial que toda la red de sensores esté operativa.

Resulta especialmente revelador que el porcentaje de datos eliminados por sospechas o irregularidades se sitúe en un modesto 1,5 %, mostrando la efectividad del protocolo de control de calidad implementado y por otro lado la fiabilidad de los sensores colocados. Este enfoque metódico no solo asegura la precisión de los resultados obtenidos, sino que también permite una interpretación más robusta de los hallazgos, generando confianza en la validez de las conclusiones derivadas de los estudios futuros de clima urbano para la ciudad. La reflexión general es que el control de calidad no es simplemente un paso técnico, sino un pilar esencial para la credibilidad de la investigación científica (Daly et al., 2005, 2004), destacando la necesidad continua de vigilancia y mejora en la gestión de datos en el ámbito de la observación ambiental.

SEN SORES			Bese de datos		N número de observaciones eliminadas en el control de					Porcentaje de observaciones eliminadas en el control					
Variable	GRUPO	NÚMERO	NOMBRE	N número observaciones	Datos no registrados	Outliers comunes	Outliers específicos	Repeticiones	Saltos	Total	Outliers comunes	Outliers específicos	Repeticiones	Saltos	Total
TEMPERATURA	1	S01	Casa de la Mujer	68184	776	2	58	0	0	60	0,003	0,09	0	0	0,09
		S02	Ayuntamiento	68184	4917	0	56	7	192	255	0	0,09	0,01	0,3	0,4
		S03	Inst. Aragonés de Juventud	59178	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		S04	Delicias	68184	7048	0	3	0	0	3	0	0,005	0	0	0,005
		S05	Oliver	59178	2275	0	42	0	0	42	0	0,07	0	0	0,07
	2	S06	Estación Norte	68184	6540	258	818	0	0	1076	0,4	1,3	0	0	1,7
		S07	IES Andalán	59178	5	0	18	0	0	18	0	0,03	0	0	0,03
		S08	C.C. Actur	68184	3122	0	16	0	0	16	0	0,03	0	0	0,03
		S09	Las Fuentes	68184	10	0	278	0	0	278	0	0,4	0	0	0,4
		S10	AEMet	68184	4	2196	605	0	0	2801	3,2	0,9	0	0	4,1
	3	S11	Camping	68184	7	0	8	0	0	8	0	0,01	0	0	0,01
		S12	Valdespartera	68184	6	0	4	0	0	4	0	0,006	0	0	0,006
		S13	Policía Local	68184	11	0	24	33	2032	2089	0	0,04	0,05	2,98	3,1
		S14	Cogullada	59178	8	0	9	0	0	9	0	0,015	0	0	0,02
		S15	Facultad Veterinaria	32195	2	0	471	0	0	471	0	1,5	0	0	1,5
	4	S16	Parque del Agua	68184	2477	0	144	0	0	144	0	0,2	0	0	0,2
		S17	Jardín Botánico	68184	6029	390	4295	0	2665	7350	0,6	6,9	0	4,3	11,8
		S18	Movera	68184	5065	326	89	0	1102	1517	0,5	0,1	0	1,7	2,4
		S19	San Gregorio	68184	6	0	349	0	0	349	0	0,5	0	0	0,5
		S20	Parque de Atracciones	40910	5386	0	38	0	0	38	0	0,1	0	0	0,1
Sensor de referencia	S21	Ciudad Deportiva Real Zaragoza	68184	4	738	1318	46	2017	4119	1,1	1,9	0,1	3,0	6,04	
<b>Total de observaciones de temperatura</b>				1332577	43701	3910	8643	86	8008	20647	0,3	0,7	0,01	0,6	1,6
<b>TOTAL RED DE SEN SORES</b>				2665154	87402	3910	15737	86	18031	37764	0,2	0,6	0,003	0,7	1,5

Tabla 2.3. Tabla resumen con recuentos de valores originales de temperatura, datos faltantes y datos eliminados por control de calidad, en valores absolutos y porcentajes para cada sensor de la red.

Variable	SEN SORES			Base de datos		Número de observaciones eliminadas en el control de					Porcentaje de observaciones eliminadas en el control					
	GRUPO	NÚMERO	NOMBRE	Número observaciones	Datos no registrados	Outliers comunes	Outliers específicos	Repeticiones	Saltos	Total	Outliers comunes	Outliers específicos	Repeticiones	Saltos	Total	
HUMEDAD	1	S01	Casa de la Mujer	68184	776	0	193	0	0	193	0	0,3	0	0	0,3	
		S02	Ayuntamiento	68184	4917	0	16	0	202	218	0	0,03	0	0,3	0,3	
		S03	Inst. Aragonés de Juventud	59178	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		S04	Delicias	68184	7048	0	4	0	0	4	4	0	0,007	0	0	0,007
		S05	Oliver	59178	2275	0	99	0	0	99	99	0	0,2	0	0	0,2
	2	S06	Estación Norte	68184	6540	0	14	0	0	14	14	0	0,02	0	0	0,02
		S07	IES Andalán	59178	5	0	22	0	0	22	22	0	0,04	0	0	0,04
		S08	C.C. Actur	68184	3122	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		S09	Las Fuentes	68184	10	0	19	0	0	19	19	0	0,03	0	0	0,03
		S10	AEMet	68184	4	0	1128	0	0	1128	1128	0	1,7	0	0	1,7
	3	S11	Camping	68184	7	0	5	0	0	5	5	0	0,007	0	0	0,007
		S12	Valdespartera	68184	6	0	4	0	0	4	4	0	0,006	0	0	0,006
		S13	Policía Local	68184	11	0	6	0	2065	2071	2071	0	0,009	0	3,03	3,04
		S14	Cogullada	59178	8	0	6	0	0	6	6	0	0,01	0	0	0,01
		S15	Facultad Veterinaria	32195	2	0	840	0	0	840	840	0	2,6	0	0	2,6
	4	S16	Parque del Agua	68184	2477	0	959	0	0	959	959	0	1,5	0	0	1,5
		S17	Jardín Botánico	68184	6029	0	3133	0	4230	7363	7363	0	5,04	0	6,8	11,8
		S18	Movera	68184	5065	0	119	0	1462	1581	1581	0	0,2	0	2,3	2,5
		S19	San Gregorio	68184	6	0	152	0	0	152	152	0	0,2	0	0	0,2
		S20	Parque de Atracciones	40910	5386	0	17	0	0	17	17	0	0,05	0	0	0,05
	Sensor de referencia	S21	Ciudad Deportiva Real Zaragoza	68184	4	0	358	0	2064	2422	2422	0	0,5	0	3,03	3,6
<b>Total de observaciones de humedad</b>				1332577	43701	0	7094	0	10023	17117	0	0,6	0	0,78	1,3	
<b>TOTAL</b>	<b>RED DE SEN SORES</b>			2665154	87402	3910	15737	86	18031	37764	0,2	0,6	0,003	0,7	1,5	

Tabla 2.4. Tabla resumen con recuentos de valores originales de humedad, datos faltantes y datos eliminados por control de calidad, en valores absolutos y porcentajes para cada sensor de la red.

### 2.3.1.1. Detección de outliers genéricos

En la primera etapa del control de calidad, donde se establecieron umbrales básicos para detectar valores atípicos, se eliminaron 3.910 observaciones en total. Este número representa el 0,2 % del total de observaciones y se limita únicamente a los datos de temperatura. Específicamente, las observaciones eliminadas en este paso del control de calidad suponen el 10,4 %, con un porcentaje notablemente diferente según la variable. Mientras que en el caso de la temperatura es del 18,9 %, en el caso de la humedad no se registró ninguna eliminación.

Este tipo de error se asocia claramente con fallos en las baterías de los sensores, ya sea debido a problemas inherentes a las baterías o a su descarga de energía. Estos errores no son eventos aislados; ocurren a partir de un punto de inflexión, relacionado con la descarga de la batería, que provoca que el sensor continúe registrando datos de manera incorrecta cuando el nivel de energía es muy bajo hasta que ya no registra más debido a la falta total de energía o al finalizar el período de registro.

Seis sensores en particular se vieron afectados, siendo cinco de ellos (S02, S06, S17, S18 y S21) los que registraron valores anómalos especialmente negativos ( $< -50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), a finales de 2016, principalmente en noviembre y diciembre. Esto se debió al mal estado de las baterías después de casi un año de funcionamiento. En el caso del S10, se observaron errores similares, pero la descarga de su batería ocurrió más tarde, a finales de 2017 y principios de 2018. Este sensor se caracteriza por mantener un error mucho más sostenido en el tiempo, lo que resalta la importancia de una revisión más frecuente de los sensores para evitar la prolongación de errores en el registro. Además, resalta uno de los principales inconvenientes de no contar con una red automática en tiempo real: el aumento del lapso de tiempo entre que se produce un error y su detección y posterior solución. Una red automática permitiría visualizar el error desde el principio y corregirlo de inmediato, evitando que se prolongue en el tiempo.

### 2.3.1.2. Detección de outliers específicos

En el paso de control de calidad relacionado con la detección de valores atípicos específicos, se eliminaron el segundo mayor número de observaciones, 15.737 en total. Esto representa el 41,7 % de las observaciones eliminadas por el control de calidad y el 0,6 % de todas las observaciones en bruto de la base de datos. Los porcentajes de eliminación son muy similares tanto para la humedad (0,6 %) como para la temperatura (0,7 %).

En comparación con el paso anterior, se eliminaron datos de todos los sensores, excepto S03, y de ambas variables (Figura 2.7). Sin embargo, la detección de errores no fue uniforme para todos los sensores, mostrando una gran heterogeneidad. Al considerar tanto los datos eliminados en humedad como en temperatura, hay dos sensores (S04 y S12) con menos de 10 errores, siete sensores (S11, S14, S08, S13, S07, S20 y S02) con menos de 100 errores, seis sensores (S05, S18, S01, S09, S19 y S06) con menos de 1.000 errores y, por último, cinco sensores (S16, S15, S21, S10 y S17) con más de 1.000 errores. Los sensores que ya se les habían detectado problemas anteriormente debido a problemas en la batería también son algunos de los que presentan mayores errores en este paso. En particular, el sensor S17 (Jardín Botánico) muestra el mayor número de datos erróneos, con 7.428 observaciones eliminadas. Le siguen el S10 (AEMET – Canal Imperial) con 1.733 observaciones y el S21 (Ciudad Deportiva del Real Zaragoza) con 1.676 observaciones. Esto se debe a que, aunque el primer paso eliminó los errores más aberrantes, algunos datos escaparon de esos límites.

Este segundo paso de control de calidad pudo identificar y corregir estos errores, mejorando la integridad de los datos restantes.

Destacar que, en el caso del S17, a los errores debidos a la falta de batería del sensor se le suma un periodo de tiempo entre 2018 y 2019 en el que la caseta meteorológica, donde se encontraba el sensor y que era propiedad de AEMET, fue retirada, llevándose consigo el sensor. Aunque el sensor fue almacenado en un edificio donde continuó registrando la temperatura y humedad, la variabilidad descendió bruscamente al tomar los datos de un entorno climáticamente regulado y no natural. Por esta razón, gran parte de este control se centra en eliminar estos datos, ya que no reflejan condiciones ambientales naturales.

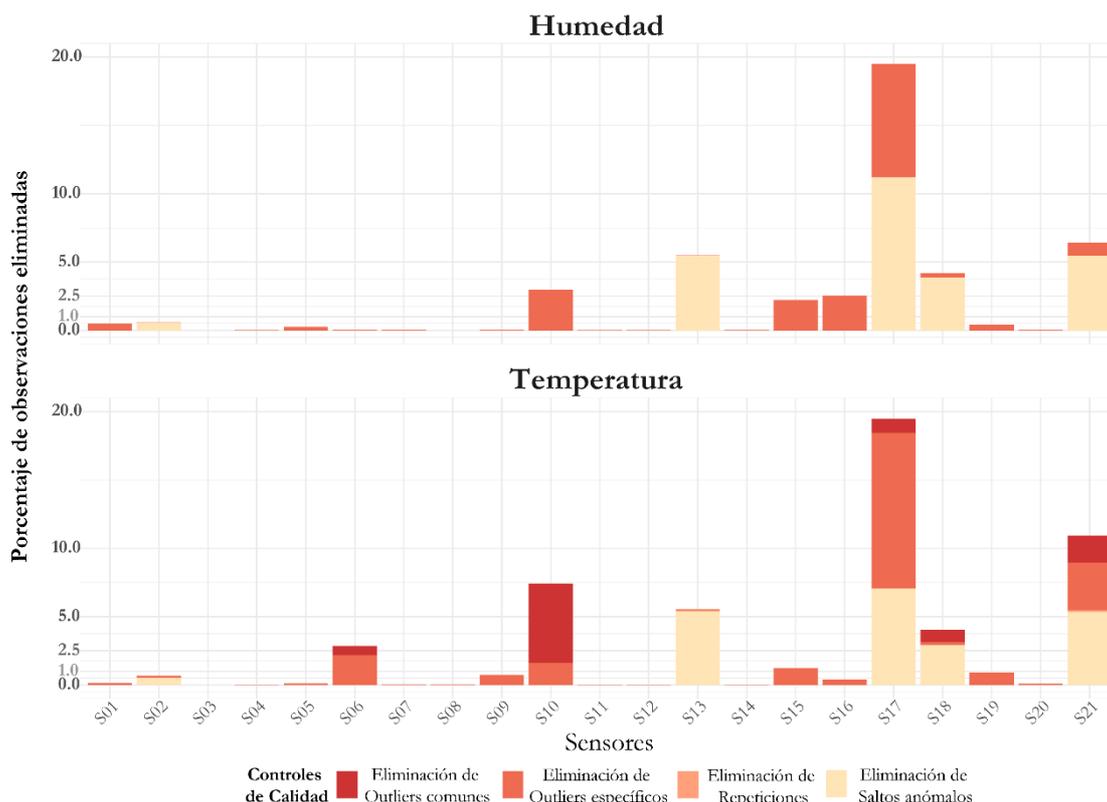


Figura 2.7. Gráfica de barras con el porcentaje de observaciones eliminadas en cada paso del control de calidad y en cada sensor tanto para los datos de humedad como de temperatura.

En cuanto a otros sensores, el S15 y S16 son el segundo y tercer sensor con el mayor número de detecciones de la variable humedad, representando un 2,6 % y un 1,5 % respectivamente, después del S17 con un 5,07 %. Creemos que esto se debe, en el caso de S15, a que está ubicado en un recinto periférico, donde la presencia de establos de animales y campos agrícolas en las cercanías podría llevar a cambios en la humedad que no se producen en otras partes de la ciudad. Estos cambios pueden ser tan significativos que la humedad registrada en ese momento se considere un error. De manera similar, el S16, situado en un gran parque urbano muy cercano al río, experimenta una mayor presencia de nieblas, zonas regadas y agua, lo que provoca que el límite móvil establecido en este paso del control de calidad genere falsos negativos. Sin embargo, el límite se ajusta de manera más precisa para que estos falsos negativos sean excepciones y el propio proceso de control no elimine valores correctos. Ya que si fuera más flexible el número de errores que formarían parte de la base de datos sería mucho mayor.

### 2.3.1.3. Detección de valores repetidos anómalos

En este contexto, es importante tener en cuenta que estábamos identificando datos que se repetían durante más de 6 horas consecutivas. En caso de detección, se creaba una base de datos con los datos sospechosos para cada sensor, recogiendo la fecha de inicio desde la cual se repetía el dato, el valor que se repetía y el número de repeticiones; a esto lo denominábamos "episodios". Inicialmente, se detectaron datos sospechosos en 14 sensores diferentes de la red, 16 si se diferencian entre temperatura y humedad. Hubo 13 sensores con sospechas en la variable humedad (S02, S03, S04, S05, S06, S07, S08, S09, S10, S11, S14, S16 y S21) y 3 en el caso de la temperatura (S02, S13 y S21).

En primer lugar, nos enfocaremos en los datos sospechosos de humedad. El número de episodios para cada sensor es muy variado, con un rango que va desde 1 en el caso del S10 hasta 55 en el S16. Sin embargo, destaca que el valor que se repite de manera constante en todos ellos es el 100 % de humedad relativa. Este patrón claro se relaciona con la presencia de nieblas. Durante los eventos de niebla, la humedad relativa del aire alcanza su máximo, y el sensor se satura al 100 % de manera sostenida hasta que la niebla desaparece, lo que puede abarcar varios días. Por lo tanto, se han registrado hasta 57 horas consecutivas (dos días y medio) en el S14, ubicado en el Polígono industrial de Cogullada, con una humedad relativa del aire del 100 %. Le sigue el S16 en el Parque del Agua, con 52 horas consecutivas. Además, se observan patrones claros relacionados con la importancia de las nieblas y su relación con la humedad. Las zonas con mayor número de episodios de humedad se encuentran principalmente en espacios abiertos, cerca del río y con presencia de zonas verdes o ajardinadas. Cabe destacar que, aunque se mencionó que siempre se registraron valores repetidos del 100 %, hay una excepción en el caso del S02. Durante un breve periodo de registro entre noviembre de 2020 y enero de 2021, los valores de humedad se registraron sin decimales, lo que generó varios episodios de humedad sostenida en situaciones de estabilidad climática con menores variaciones.

Es por todo ello que este tipo de datos sospechosos no pueden ser categorizados como errores del sensor. Son eventos meteorológicos concretos que han producido estos registros, y por ende, se mantienen en la base de datos. Ya que eliminarlos sería eliminar una parte del comportamiento de la humedad relativa del aire en la red y cómo se comporta en Zaragoza.

En el caso de la temperatura, es notablemente diferente el reducido número de episodios detectados y el limitado número de sensores afectados en comparación con la humedad. Además, la temperatura presenta un rango de valores que, en ocasiones, tiene más de dos decimales. Todo ello sumado a la dificultad para explicar eventos de excepcional estabilidad térmica sostenida sugiere la posibilidad de errores persistentes en los sensores, que mantiene de forma constante un valor erróneo durante varias horas. Por ejemplo, se identificó un valor sostenido durante 10 horas de 21,36 °C a finales de abril en el sensor S13, lo cual se atribuye a un error del sensor y no a un comportamiento térmico real.

### 2.3.1.4. Detección de anomalías en la variación horaria o saltos

Inicialmente, gracias a la elección de límites en las diferencias horarias, se identificaron un total de 8.732 observaciones como sospechosas. Estas observaciones se distribuyeron a lo largo de todos los años y meses del período de estudio, sin evidenciar un sesgo temporal. En cuanto a los datos de diferencia horaria de temperatura, estos oscilan en un rango de -15,72 °C a 11,2 °C, con un valor promedio y mediano negativos, indicando que son más abundantes los datos sospechosos relacionados con descensos abruptos de

temperatura. Un análisis mensual revela que las bajadas bruscas de temperatura se concentran en los meses de verano, de junio a agosto. Los meses de abril, mayo y septiembre también presentan principalmente valores negativos, pero con una distribución más amplia. Por otro lado, las mayores subidas horarias de temperatura se producen en los meses de invierno, específicamente en diciembre y enero, mientras que otoño y primavera muestran una distribución más amplia.

En el caso de la humedad, las diferencias son en general positivas y están relacionadas con aumentos en la humedad relativa, con un rango que va desde cambios bruscos de -56,08 % a 58,6 %. Su distribución mensual es inversa a la temperatura, pero en este caso, los cambios estacionales no son tan abruptos. Aun así, se observa una mayor concentración de valores de aumento de humedad en verano y de descensos en invierno, con una transición más gradual de negativos a positivos en primavera y una tendencia opuesta en otoño.

La revisión de estos datos generó dudas sobre su carácter anómalo, especialmente en lo que respecta al comportamiento estacional de las diferencias tanto de temperatura como de humedad, y, sobre todo, la relación inversa entre ambas variables. Se observó que los descensos bruscos de la temperatura en verano estaban relacionados con ascensos igualmente bruscos de la humedad, y viceversa en invierno. Además, al analizar las horas en las que se producían la mayoría de estos eventos, se notó que en verano se producían por la tarde, siendo más abruptos al final de la tarde con la puesta del sol. Mientras que, en invierno, se producían al final de la mañana y durante las horas centrales del día. Estos patrones llevaron a la conclusión de que muchos de estos datos sospechosos podrían atribuirse a situaciones meteorológicas específicas que generan variaciones horarias bruscas en los registros bajo condiciones atmosféricas adecuadas, en lugar de ser resultado de un error del sensor. Ejemplos como las tormentas de verano, que se desarrollan principalmente al final de la tarde, o situaciones invernales con niebla que se disipan al final de la mañana, respaldan la interpretación de que estos fenómenos son respuestas a condiciones meteorológicas particulares, contribuyendo a una comprensión más precisa de los datos observados. Para respaldar esta interpretación y determinar si realmente existían datos anómalos, se llevó a cabo un análisis de situaciones sinópticas.

#### 2.3.1.5. Análisis de situaciones sinópticas

Se identificaron siete situaciones sinópticas (Figura 2.8) que representan los patrones de circulación más relevantes en la península Ibérica para periodo que abarca las fechas catalogadas como sospechosas por su excesiva variación horaria, como se ha explicado anteriormente.

La **situación sinóptica 1** es una de las condiciones atmosféricas más características en la península ibérica, con la presencia en invierno de altas presiones de carácter subtropical. El anticiclón invernal contribuye a temperaturas suaves durante el día y noches que se caracterizan por un enfriamiento considerable debido a la pérdida de calor diurno por irradiación. Es una situación que conlleva estabilidad atmosférica, con cielos despejados y vientos apacibles. Los efectos de esta situación se traducen en oscilaciones térmicas diarias muy marcadas. Se registran temperaturas mínimas notables, favoreciendo la posibilidad de heladas en los alrededores de la ciudad, pero también temperaturas diurnas elevadas debido a la radiación directa. Además, la estabilidad atmosférica resultante propicia la formación de nieblas, particularmente en el valle del Ebro, desvaneciendo esta oscilación tan pronunciada y reduciendo el rango de temperaturas.

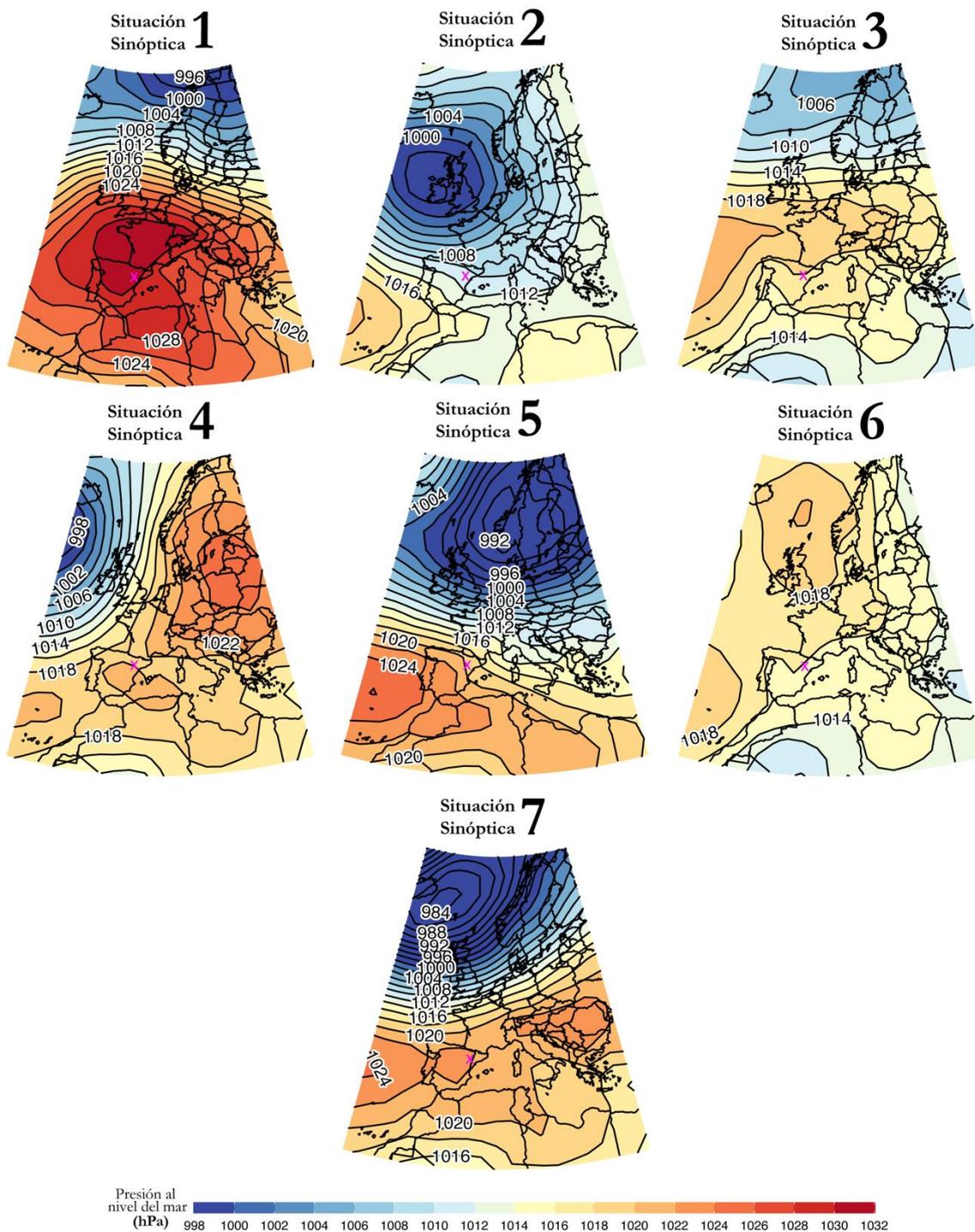


Figura 2.8. Situaciones sinópticas (1 a 7) categorizadas para las fechas con los datos marcados como sospechosos por saltos horarios anómalos. Los colores representan la presión sobre el nivel del mar en hectopascales (hPa) junto a las isobaras en negra.

La **situación sinóptica 2** presenta características distintivas de situaciones de advección del oeste, zonal o noroeste. En esta configuración sinóptica, se observa una baja presión centrada sobre las Islas Británicas afectando a la Europa occidental y se advierte también una ligera zona de altas presiones al suroeste de la península ibérica. Estas condiciones se traducen en la llegada de masas de aire polar marítimo o subtropical marítimo a la península junto a fuertes rachas de viento del oeste y un carrusel de frentes. En Zaragoza

estas condiciones propician un flujo de viento del noroeste y de fuertes rachas (cierzo) y la precipitación principalmente en invierno y primavera.

La **situación sinóptica 3** muestra dos centros de acción típicos de verano: 1) el anticiclón de las Azores, desplazado a latitudes septentrionales y localizándose en el centro y sur del Atlántico. De esta manera las altas presiones se quedan en altura a la derecha de la trayectoria de la corriente en chorro, la cual en esta época del año se desplaza al norte. 2) una borrasca centrada en el mar de Noruega y al norte de la península escandinava que se puede asociar con una cadena de frentes en el Atlántico norte y la trayectoria en altura de la corriente en chorro. De este modo, la península y en concreto Zaragoza se encuentran bajo la influencia del anticiclón y un tiempo caluroso y estable, incluso se pueden producir calimas. Sin embargo, en dirección sureste ligado al ambiente bochornoso y la elevada humedad en el litoral mediterráneo el calentamiento y ascenso del aire puede producir episodios tormentosos en condiciones de inestabilidad en altura.

La **situación sinóptica 4** muestra en Europa dos masas de aire opuestas con un sistema de altas presiones al este del continente frente a un sistema de bajas presiones al oeste de Gran Bretaña, lo que provoca un flujo de ascenso de masas de aire del sur hacia latitudes superiores. Mientras que en el caso de España se aprecia un anticiclón en el centro y este de la península y baleares. Esto puede suponer para Zaragoza la llegada masas de aire tropical marítimo, un viento húmedo, cálido y muy inestable. O la persistencia del anticiclón y la imposición de un tiempo estable, donde destacan las inversiones térmicas y las nieblas.

La **situación sinóptica 5** se corresponde con una advección del oeste anticiclónica sobre la península, similar a la segunda situación, lo que significa un flujo preferente de masas de aire que provienen del Atlántico. La advección de oeste puede traer consigo condiciones meteorológicas variables, provocando un aumento de la humedad atmosférica, lo que podría resultar en la formación de nubes y precipitación. En general, el tiempo se caracteriza por nubosidad y precipitación en el norte y noroeste, siendo más seco y soleado en la vertiente mediterránea y en el sur. Sin embargo, en el caso de Zaragoza, en el límite da como resultado un tiempo variable.

La **situación sinóptica 6** corresponde a una situación de pantano barométrico en superficie. Se caracteriza por mostrar una zona bastante amplia del mapa donde no dominan ni las altas ni las bajas presiones, y la presión atmosférica es muy similar en una gran parte de la península, el Mediterráneo y Europa. De normal en verano esta situación suele asociarse con cielos poco nubosos, vientos suaves y tiempo estable. Sin embargo, en condiciones adecuadas pueden producirse nubes de evolución, desarrollando tormentas con precipitaciones fuertes, aunque breves y aisladas. Esto se produce por una convección fuerte ayudada por inestabilidad en las capas altas de la atmósfera frente a situaciones estables en superficie.

La **situación sinóptica 7** está caracterizada por la presencia de un sistema de bajas presiones en superficie centrado en Islandia, con flujos de viento predominantes del oeste que afectan a todo el norte de Europa. Mientras tanto, en la Península Ibérica y los países del este de Europa, hay una franja o corredor de altas presiones. Además, al sur de Marruecos y Túnez, nuevamente hay áreas de bajas presiones. Debido al anticiclón, en el caso de Zaragoza, predominan condiciones estables con una elevada oscilación térmica y posibles nievas en todo el valle. Pero si se acentúan el flujo de viento del oeste pueden traer aire más fresco y húmedo del océano.

Una vez identificados todos los tipos, estas situaciones sinópticas se relacionaron con las observaciones catalogadas como sospechosas en el control de calidad (Figura 2.9). Este análisis nos proporcionó patrones distintivos que nos permiten diferenciar si estas observaciones se deben a condiciones meteorológicas específicas o a errores de medición.

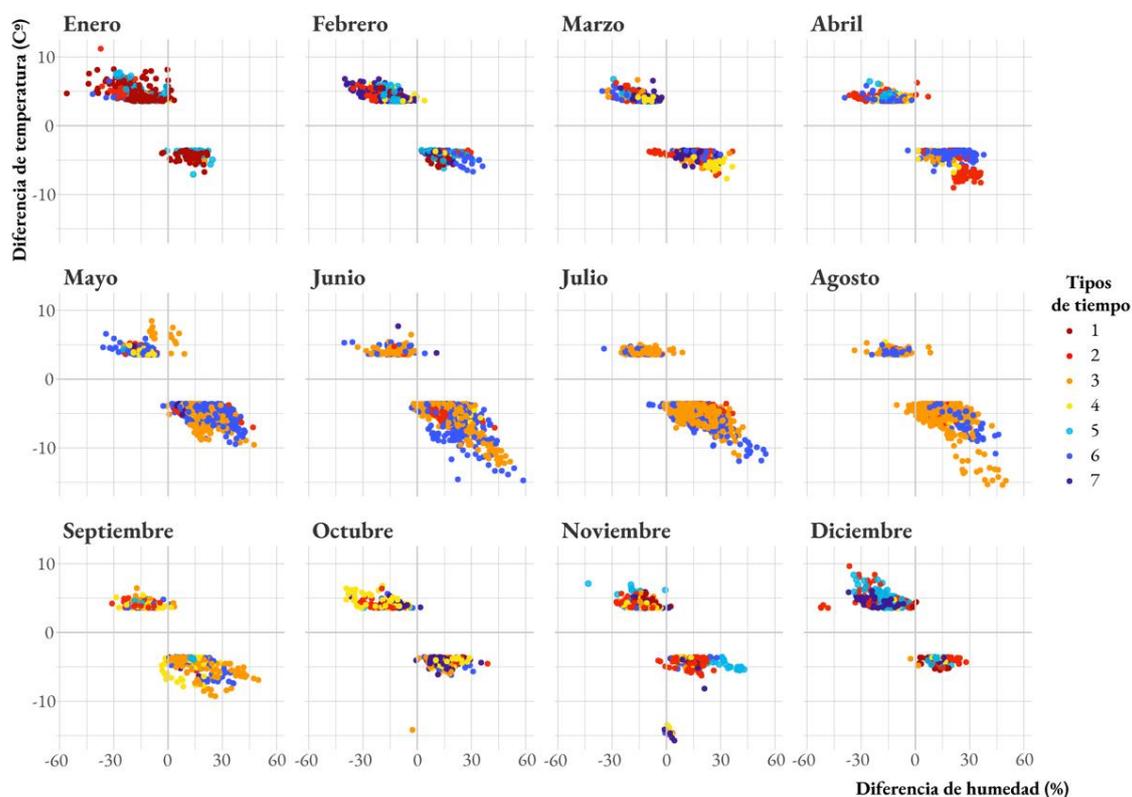


Figura 2.9. Distribución mensual de observaciones sospechosas detectadas y tipología de situación sinóptica asociada por color. El eje x representa la variación horaria de la humedad y el eje y representa la variación de la temperatura.

Durante los meses de junio a agosto, se registraron las mayores diferencias horarias de temperatura de toda la serie, superando en ocasiones descensos de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  con aumentos de humedad superiores al 30 %. Por otro lado, de diciembre a febrero, se observaron aumentos de temperatura inferiores a  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  asociados a descensos de humedad del  $-30\%$ . Estos patrones estacionales refuerzan la validez de los datos, indicando que las variaciones detectadas son consistentes con las condiciones meteorológicas esperadas en cada estación.

Ciertas situaciones atmosféricas están relacionadas con errores y meses específicos. Por ejemplo, en los meses más cálidos, las tipologías 3 y 6 son las más frecuentes. En ambos casos, encontramos situaciones sobre la península de tiempo estable, cielos despejados y temperaturas cálidas. Pero en ciertas condiciones se pueden desarrollar tormentas, aunque poco frecuentes no son inusuales. Se trata de eventos de gran intensidad en un corto periodo de tiempo, que provocan descensos de temperatura de alrededor de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  en una hora, por lo que no se deben a un fallo de registro del sensor. Ocurre durante las tardes de verano, a última hora, después de un aumento constante de la temperatura a lo largo del día, en el cual la ciudad se calienta. En este momento, se produce una tormenta que provoca un contraste de temperaturas, enfriando la ciudad de manera muy abrupta. Este fenómeno se refleja en el aumento de la humedad ligado a este descenso. Además, al producirse en los últimos momentos del día, la falta de radiación solar no permite compensar el enfriamiento y recuperar la temperatura previa.

En invierno, los cambios de la temperatura entre horas sucesivas pueden alcanzar valores de entre 5 °C y 10 °C. En este caso, los tipos de situaciones predominantes no son tan específicos como en el caso de verano, pero los tipos 1, 2 y 5 (anticiclón térmico invernal y advecciones del oeste, respectivamente) son los más frecuentes. Las mayores anomalías alcanzadas en este período se concentran en enero bajo la situación del anticiclón térmico. Como se explicó anteriormente, este tipo de clima se caracteriza por temperaturas diurnas suaves respecto a la estación y noches frías. En la ciudad de Zaragoza, esto suele provocar heladas matinales o bancos de niebla persistentes que, al disiparse al mediodía, hacen descender rápidamente la humedad y aumentan la temperatura. La sucesión de frentes intercalados con cielos nublados y despejados produce el mismo efecto, ya que la insolación provoca el calentamiento de la ciudad y el aumento de la temperatura registrada.

Sin embargo, algunas de las anomalías detectadas en las observaciones no pudieron explicarse ni por la situación atmosférica, ni por la época del año, ni por el comportamiento de la humedad. Así, fueron identificadas como errores y eliminadas de la base de datos. Estas anomalías se observaron principalmente en el mes de noviembre, registrándose un descenso notable de la temperatura con mínima variación de la humedad. Además, se corresponden con las situaciones 2, 3 y 7, que no explican satisfactoriamente el motivo de la disminución. Las observaciones corresponden a las estaciones S17 y S18 en un período de la serie en el que ambos sensores ya habían presentado fallos que habían sido eliminadas en pasos de control de calidad anteriores. Por tanto, estas observaciones erróneas corresponden a datos que los límites de control de calidad anteriores no pudieron detectar y que este nuevo paso del control más detallado ha permitido identificar y corregir.

Finalmente, tras el control manual de los datos, también identificamos algunos errores de salto que no pudieron explicarse por las situaciones atmosféricas de los sensores S02, S13 y S21. Estos errores fueron puntuales, y en total se detectaron 7 observaciones como errores en estos tres sensores. Sin embargo, tras la revisión de estos datos sospechosos, se advirtieron una serie de errores en la evolución temporal al inicio de ambas series. Se observó que, al comienzo de la base de datos, estos sensores mostraban una variabilidad horaria mínima y muy diferente respecto al resto de la red. Las temperaturas diarias tenían rangos muy estrechos y las temperaturas nocturnas apenas mostraban variabilidad o descenso en algunos tramos de la serie temporal. Este error también fue identificado en el apartado de datos repetidos como únicos sensores en los cuales se eliminaron datos de temperatura por repeticiones, pero en ese momento no permitió identificar el problema general del sensor en ese periodo. Finalmente, se decidió eliminar todo el periodo inicial de estos observatorios.

Este último paso del control de calidad fue el que eliminó el mayor número de observaciones sospechosas de la base de datos, un total de 37.764 observaciones, lo que representa el 1,5 % del total. Como se mencionó anteriormente, este error está muy concentrado en ciertos sensores (S02, S13, S17, S18 y S21), y como se puede observar en la gráfica 4, en los sensores afectados, en su mayoría, suponen el 5 % de los datos eliminados, destacando los valores de temperatura eliminados en el S17 con un 11 % siendo el mayor volumen de datos eliminados por un paso en un sensor.

Una vez completada esta fase y eliminados estos últimos errores identificados gracias a la clasificación de situaciones sinópticas el control de calidad está finalizado. Y como resultado se obtuvo una base de datos horaria de temperatura y humedad relativa filtrada para proceder a los análisis posteriores en este proyecto, como la interpolación de la temperatura, y para cualquier estudio posterior relacionado con la climatología del entorno urbano de la ciudad de Zaragoza.

## 2.4. Discusión

Es importante analizar la distribución temporal de las observaciones eliminadas después de realizar el control de calidad, ya que puede proporcionar información sobre posibles sesgos en los datos y su impacto en análisis futuros. La Figura 2.10 muestra la distribución temporal de las observaciones eliminadas.

La mayoría de las observaciones eliminadas (37 %) ocurrieron en el año 2018 cuando los sensores S17 y S18 fallaron, seguido por el inicio de la puesta en marcha de la red en 2015, que representó el 23 % de todas las eliminaciones y está muy ligado a las eliminaciones del último paso del control de calidad. También se observa un pico en el año 2016, con un total de 7.130 observaciones eliminadas solo en octubre y noviembre. El promedio mensual de eliminaciones es de alrededor de 400 observaciones, con variaciones a lo largo de los años. En 2018, por ejemplo, este valor alcanzó un promedio mensual de 1.161 observaciones eliminadas, mientras que en 2015 fue de 981 observaciones. Sin embargo, este promedio ha ido disminuyendo desde 2018, llegando a 69 observaciones eliminadas mensualmente en 2022.

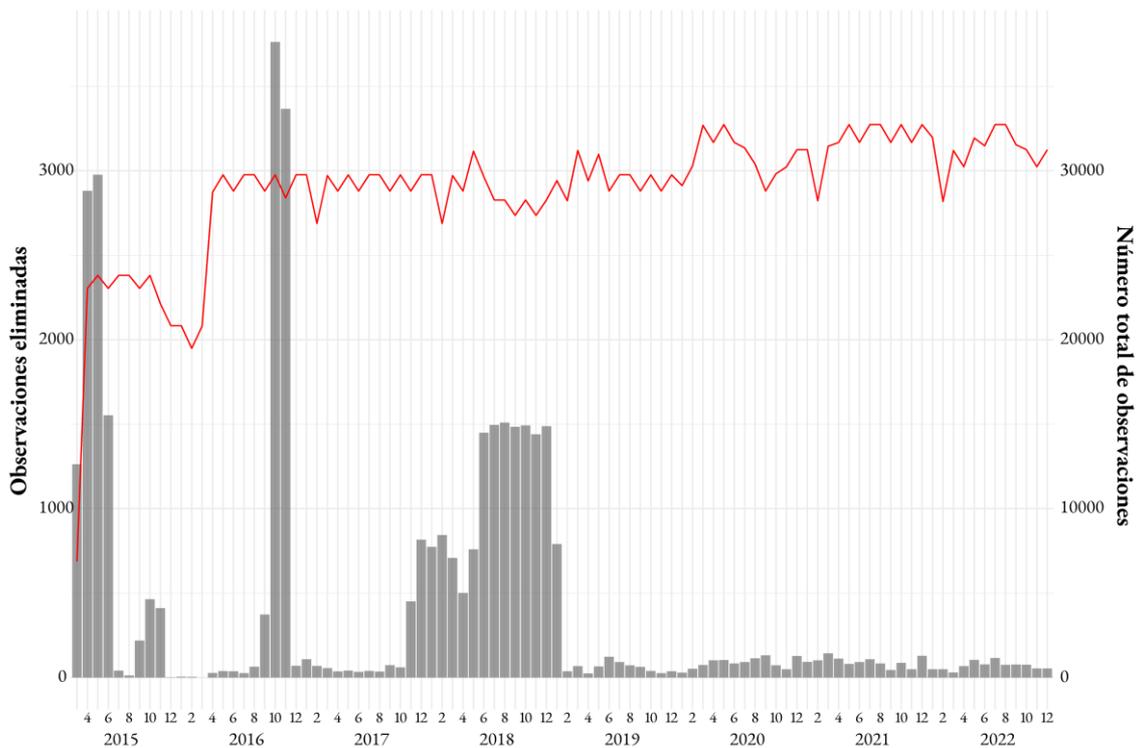


Figura 2.10. Evolución mensual de observaciones eliminadas en toda la red (barras) y número de datos totales disponibles para cada mes del año (línea roja), tanto de temperatura como humedad relativa.

Aunque no hay un mes específico con un aumento significativo en observaciones eliminadas, se observa una ligera agrupación en los meses de otoño y primavera. Además, al comparar los datos eliminados con el total de datos disponibles para cada mes, se observa que al inicio de la implementación de la red de sensores fue cuando se produjeron más eliminaciones. A medida que avanzaron los registros y se incorporaron más sensores a la red, estos errores disminuyeron. El promedio a partir de 2015 (excluyendo los picos de eliminación de 2016 y 2018) fue de menos del 2% de datos eliminados, alrededor de 95

observaciones por mes en toda la red y para ambas variables (temperatura y humedad relativa).

El control de calidad vemos pues que desempeña un papel fundamental en el análisis climático y es por ello que se le ha otorgado una atención especial en este estudio. Este proceso permite eliminar observaciones que no se ajustan a la variabilidad natural del clima. Además, en este caso específico, ha demostrado ser una herramienta valiosa para identificar situaciones atmosféricas como niebla, convección, precipitación convectiva, entre otras, que a menudo no están incluidas en el seguimiento meteorológico convencional.

Sin embargo, es importante destacar que nuestro enfoque de control de calidad no es completamente automático y requiere la intervención directa del investigador, especialmente en aspectos como la variabilidad horaria o saltos en los datos, así como el cálculo de situaciones sinópticas. En estos casos, la interpretación manual es esencial para revisar los resultados obtenidos y las observaciones marcadas como sospechosas. Esta limitación implica que el investigador debe poseer conocimientos básicos sobre la red de sensores y la zona de estudio a la que se aplica el control de calidad. Esto incluye información climática previa sobre la zona, como valores medios de temperatura máxima y mínima para establecer umbrales significativos, la distribución anual de la precipitación para relacionarla con situaciones sinópticas, y aspectos urbanos como morfología, densidad de urbanización y cobertura del suelo en las proximidades de los sensores. No obstante, a partir de los resultados obtenidos, se está avanzando en un protocolo que incluya el análisis sinóptico de forma automática en el proceso de control de calidad.

A pesar de esta necesidad de intervención manual, nuestro enfoque de control de calidad es altamente adaptable y puede extrapolarse con éxito a otras redes de sensores termohigrométricos, independientemente de su escala o ubicación geográfica. La clave para su aplicación exitosa radica en disponer de información climática complementaria y conocer las características específicas de la zona de estudio, lo que garantiza la robustez y la generalización de los resultados obtenidos.

Lo destacado aquí es que esta aplicación del control de calidad para identificar patrones atmosféricos específicos no ha sido observada en otros estudios de clima urbano de características similares, al menos en la literatura consultada. Esta perspectiva novedosa podría resultar de gran utilidad en simulaciones numéricas y modelos de predicción atmosférica, ya que muchos de ellos desechan este tipo de información como error. Y no incluyen estos datos climáticos en los modelos y, por lo tanto, este tipo de eventos no quedan representados. La capacidad para mejorar la calidad de los datos climáticos y, al mismo tiempo, revelar patrones atmosféricos detallados podría tener implicaciones significativas para la comprensión y predicción de fenómenos climáticos en entornos urbanos.

También señalar la importancia de utilizar bases de datos climáticas urbanas de alta calidad radica, sobre todo, en las diversas oportunidades que ofrece. Este uso no solo beneficia el avance del conocimiento científico, sino que también tiene aplicaciones cruciales en áreas como la planificación y la ordenación territorial urbana (Harlan & Ruddell, 2011). La mejora de los planes existentes de protección civil, como el Plan Específico para riesgos meteorológicos o el Plan de Emergencia Municipal de Zaragoza, se convierte en una posibilidad valiosa. La información detallada proporcionada por este tipo de datos no solo aumentaría la eficiencia de las intervenciones, sino que también ofrecería más datos para identificar las zonas con mayores riesgos o vulnerabilidades.

Además, este enfoque de calidad en las bases de datos climáticas urbanas podría tener implicaciones significativas en el ámbito de la arquitectura. Proporciona una información más precisa para el cálculo de valores de eficiencia energética de edificaciones, la selección de tipos de aislamiento y materiales para la construcción (Manzano-Agugliaro et al., 2015). También se destaca su utilidad en el cálculo y análisis de las afectaciones al medio ambiente urbano, no solo relacionadas con la contaminación, sino también en la gestión de la infraestructura verde urbana (Bowler et al., 2010). Además, ofrece información valiosa sobre los riesgos para la salud de la población, especialmente en relación con la exposición a diversas temperaturas (Royé et al., 2021). En conjunto, este enfoque no solo beneficia la investigación científica, sino que también tiene un impacto positivo en áreas clave que afectan directamente la calidad de vida urbana.

### 3. Interpolación de la temperatura urbana

Conocer cómo se distribuye la temperatura del aire en la ciudad a una elevada resolución espacial y temporal por medio de un modelo de interpolación permitiría analizar el comportamiento climático urbano a una escala poco conocida. Sin embargo, este avance no es sencillo debido a las fuentes de datos actuales y metodologías empleadas en estos entornos (Stewart, 2011).

La precisión de la interpolación está estrechamente ligada a la calidad de los datos utilizados. Se requieren bases de datos extensas con múltiples puntos de medición dentro y fuera de la ciudad, que representen fielmente las características climáticas de los espacios urbanos y periurbanos más relevantes. Además, es esencial disponer de una gran cantidad de datos de manera continua y sostenida en el tiempo para analizar diversos patrones temporales. Sin embargo, en la realidad actual, las ciudades cuentan con un número limitado de estaciones debido a problemas de gestión, mantenimiento y costos elevados (Sabatini, 2017). A pesar de estos desafíos, han surgido redes propias en varias ciudades, como Zaragoza, que emplean un gran número de sensores para recopilar información sobre las diversas morfologías urbanas, como en Birmingham (L. Chapman et al., 2015), Berna (Gubler et al., 2021) o Lisboa (Alcoforado et al., 2014). Con todo, la resolución espacial aún es puntual y no continua, lo que resulta en una falta de información en muchos espacios urbanos. La interpolación puede mitigar esta problemática al incorporar datos auxiliares que reduzcan la incertidumbre y mejoren las estimaciones de temperatura.

La teledetección destaca como una fuente de información auxiliar valiosa para proporcionar a la interpolación de datos continuos sobre las características del terreno urbano. Además, permite estudiar la temperatura de la superficie mediante sensores térmicos (Weng et al., 2014; Xia et al., 2022), aunque no del aire. Aunque, surgen desafíos en el uso de la teledetección relacionados con las necesidades específicas de los estudios urbanos, como la demanda de información de alta resolución y frecuencia de paso, lo que depende de las características de cada satélite y sensor.

Además de la interpolación, se han empleado diversos métodos para estimar la temperatura del aire a partir de datos satelitales y variables geográficas. Ruiz-Álvarez et al. (2019) resumen algunos de los estudios más relevantes: 1) Sun et al. (2006) utilizaron el método desarrollado por Jin y Dickinson (1999) para estimar el ciclo diurno de LST y modelar la oscilación diurna de la temperatura del aire, basándose en las mediciones del *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES). 2) Gholamnia et al. (2017) intentaron estimar la temperatura del aire utilizando exclusivamente datos de LST y observatorios meteorológicos terrestres. 3) Golkar et al. (2018), en cambio, incorporaron información geográfica auxiliar en sus estimaciones. 4) Mira et al. (2017) emplearon un modelo de regresión lineal múltiple (MLRM) para calcular la temperatura del aire a partir de datos de LST y elevación. 5) Pero Xu et al. (2014), en contraposición a los modelos MLRM, afirmaron que los modelos de *Random Forest* ofrecían una mayor precisión en la estimación de la temperatura del aire. A pesar de estos esfuerzos, la mayoría de los productos meteorológicos generados están orientados a la obtención de datos globales (Hooker et al., 2018), con poca atención al ámbito urbano y a la complejidad de trabajar con variables climáticas dinámicas en entornos tan diversos y de escala tan detallada.

Es por ello que, pese a las ventajas e inconvenientes que tienen los diferentes métodos de registro de la temperatura del aire, la integración de la teledetección y la temperatura registrada en redes densas de clima urbano tiene un gran potencial para poder espacializar la temperatura del aire. La combinación de modelos físicos y numéricos junto a la

disponibilidad de esta información climática y satelital han permitido una mejor comprensión del comportamiento térmico local en entornos urbanos (Tran et al., 2021). Estos modelos han demostrado ser útiles para la estimación de la temperatura del aire a pequeña escala y la predicción de cómo los factores ambientales influyen en la temperatura del aire local (Atkinson, 2003; Hofierka et al., 2020). Por otro lado, requieren parametrizaciones adecuadas, específicas y complejas de calcular, además de una enorme potencia de cálculo para producir resultados de alta precisión (Alizadeh, 2022; Taheri-Shahraiyni & Sodoudi, 2017). Por ello, los métodos de interpolación espacial son una solución muy eficiente al permitir construir una imagen completa de la temperatura del aire con una elevada precisión y sin necesitar una capacidad de cálculo tan elevada (Burger et al., 2021; Ding et al., 2023; Venter et al., 2020). Esto es especialmente cierto en aquellos que permiten: 1) tener en cuenta otras variables ambientales que caracterizan las superficies urbanas y 2) explicar las diferencias de la distribución de la temperatura. Modelos como el *cokriging* (Cho et al., 2020) y evitando la ponderación de distancia inversa (IDW) o el *Ordinary Kriging* (OK), modelos muy comunes en los procesos de interpolación pero poco precisos en espacios tan heterogéneos y demasiado generales a una escala tan detallada como una ciudad (Smoliak et al., 2015).

Este apartado integra: 1) los datos de temperatura del aire registrados por la red de sensores de alta densidad en Zaragoza (PARTE I), 2) los datos de cobertura del suelo de elevada resolución y de libre acceso, y 3) la información de la cobertura terrestre derivada del satélite *Landsat 8* por medio de diferentes índices. El objetivo principal es obtener una imagen completa de la distribución espacial de la temperatura del aire en el entorno urbano, en una resolución espacial representativa (100 m) de los diferentes espacios de una ciudad media, compacta y con una morfología compleja.

También se analizan los datos temperatura máxima, media y mínima estacional y se comparan seis enfoques de interpolación para cada una de las estaciones del año. Finalmente, se realiza una evaluación de los modelos y, según los resultados obtenidos junto con el cálculo del error o mediante el RMSE, se identifica el más adecuado. Un modelo que se utilizara posteriormente en la interpolación mensual y diaria calibrando a la escala temporal adecuada tanto la información climática de partida como las covariables.

### **3.1. Interpolación espacial en entorno urbano**

La espacialización de variables climáticas en entornos urbanos ha sido un área de estudio relativamente limitada, particularmente en ciudades de tamaño medio o pequeño, donde la necesidad de un detalle más fino es crucial para captar la elevada variabilidad espacial. Desarrollar un modelo de interpolación en un entorno urbano complejo y diverso implica considerar varios aspectos únicos de la ciudad, como: 1) la topografía urbana, 2) la altura de los edificios, 3) el entramado urbano, 4) la impermeabilidad del suelo y 5) los materiales utilizados.

Algunas interpolaciones de temperatura o precipitación, ya sea en un ámbito urbano o no, a parte de la propia distancia entre las observaciones tienen en cuenta elementos geográficos básicos que se correlacionan con estas variables (J. Li & Heap, 2014; Serrano-Notivoli et al., 2017, 2019). La topografía, que se refiere a las características físicas y naturales de la superficie terrestre, y la altitud, medida verticalmente desde un punto específico, son factores fundamentales. En entornos urbanos, estos elementos adquieren matices complementarios. Esto destaca la necesidad de adaptar y especificar reglas generales para abordar la complejidad y diversidad de estas áreas.

Los aspectos topográficos, como el relieve de la zona en la que se asienta la ciudad, influyen en su clima. Sin embargo, este impacto se ve complementado por las alteraciones y modificaciones que el ser humano ha introducido en la propia orografía al construir la ciudad. Esto implica cambios como el aterrazamiento de laderas o el aplanamiento de áreas elevadas para el desarrollo de infraestructuras y actividades humanas. Además, la construcción de edificios crea un relieve antropogénico con una estructura propia, con su rugosidad y formas características, aunque diversas, lo que afecta tanto al clima (Rafailidis, 1997) como al relieve natural.

En el caso de la altitud, no solo hay que tener en cuenta las consideraciones generales como el gradiente adiabático. La altura de los propios edificios también puede favorecer la creación de sombras que afectan a la distribución de la luz solar en las calles y áreas circundantes, alterando la temperatura y los patrones térmicos de calentamiento y enfriamiento. Al mismo tiempo, influyen en la circulación del aire (Hang et al., 2012), ya que los edificios pueden ejercer de barreras físicas limitando la circulación viento o reorientándolo, alterando su dirección o velocidad.

Otro aspecto fundamental relacionado con la modificación de los flujos de aire y la temperatura es el entramado urbano, específicamente las características del viario de la ciudad. La orientación y la extensión de las calles, junto con la topografía urbana y la altura de los edificios, intervienen en la creación de los cañones urbanos (T. Oke, 1981, 1988; Vardoulakis et al., 2003). Calles estrechas y sinuosas flanqueadas por edificios altos pueden influir significativamente en las temperaturas a nivel de suelo y los flujos de aire. En términos generales, los cañones urbanos, caracterizados por calles estrechas con edificios más altos, tienden a ser más cálidos que aquellos donde las calles son más anchas y las alturas de los edificios son más bajas debido a que el calor acumulado tiene mayores dificultades para disiparse por la falta de viento. Sin embargo, la influencia del cañón sobre la intensidad y la velocidad del viento puede variar. Aumenta cuando se canaliza al moverse en paralelo a la orientación de la calle, lo que beneficia en ciertas ocasiones al reducir el calor y los contaminantes, pero puede provocar problemas cuando el efecto Venturi intensifica la velocidad de forma excesiva, creando rachas severas que reducen el confort.

La impermeabilidad del suelo es otro aspecto a considerar, ya que está estrechamente vinculada a los procesos de drenaje y evapotranspiración de las superficies, lo que influye en la humedad relativa del aire circundante y la temperatura (Mohajerani et al., 2017). Los espacios urbanos más construidos, donde predominan los suelos asfaltados y las edificaciones, y faltan zonas verdes, se caracterizan por sellar el suelo, reduciendo la capacidad de absorber agua y los procesos de evaporación posterior, lo que puede resultar en una menor pérdida de calor y en un aumento de la temperatura ambiente. Al mismo tiempo, las características de los materiales utilizados en este tipo de coberturas intervienen en el comportamiento térmico y el balance energético de estas superficies (Erell et al., 2014; Jiachuan Yang et al., 2015). Los materiales más oscuros, como el asfalto, tienen un albedo muy bajo y, por lo tanto, no reflejan la radiación solar, sino que durante el día absorben la mayor parte, expulsándola de noche de forma graduada y aumentando la temperatura.

Una vez consideradas todas estas variables, también hay que tener en cuenta una serie de condicionantes para su implementación en un modelo de interpolación. Consideraciones como la elevada variabilidad espacial que se produce en un espacio relativamente pequeño, como es una ciudad en nuestro contexto urbano mediterráneo y europeo. En estudios urbanos, especialmente en ciudades de tamaño medio o pequeño, se requiere una escala de análisis muy detallada. En un área tan limitada como la ciudad y sus alrededores, se observan cambios significativos en los espacios que la componen en distancias muy cortas. Por

ejemplo, en Zaragoza, en menos de 1 km, se puede pasar de un espacio densamente urbanizado a zonas de cultivos donde las únicas construcciones son agrícolas. También se puede transitar, a escasos metros de zonas residenciales, a áreas de polígonos industriales, donde las características de las edificaciones son totalmente diferentes. Además, se encuentran dicotomías como las zonas verdes dentro del entramado urbano o las diferentes características urbanas en los límites entre barrios con niveles socioeconómicos y densidad de población tan variados. Todas estas variaciones hacen que las variables utilizadas para la modelización necesiten una resolución espacial detallada.

Otra consideración que debe tenerse en cuenta en la interpolación en espacios urbanos está relacionada con las bases de datos de partida que se integrarán en el modelo, tal y como se ha mencionado antes. Debe existir un número de observatorios adecuado a la diversidad de espacios urbanos, ya que por muy detalladas que sean las variables incluidas, si no existe un valor de observación climático asociado, es imposible identificar cómo esas variables interactúan con el clima de ese espacio urbano. Por lo tanto, contar con una red sólida en la que estén representados los principales espacios urbanos se convierte en una pieza clave para el desarrollo exitoso de cualquier tipo de interpolación posterior. De lo contrario, algunos espacios podrían quedar subestimados o no representados en sobreestimación de otros.

Para concluir, también se debe tener en cuenta que, debido a todos estos aspectos, el margen de incertidumbre asociado al resultado de la interpolación es más elevado en entornos urbanizados. Esto implica que los resultados pueden no exhibir la misma precisión que aquellos obtenidos en espacios menos antropizados, sujetos a parámetros más conocidos y fáciles de modelar. Sin embargo, esto no significa que los resultados sean poco fiables o deban descartarse.

### **3.2. Cokriging para la espacialización de la temperatura**

Uno de los métodos geoestadísticos más populares es el *kriging*, (Dirksen et al., 2020; Nikoloudakis et al., 2020; Oyler et al., 2015). A diferencia de otras técnicas de interpolación, el *kriging* tiene en cuenta tanto la tendencia espacial como la estructura de la correlación entre las observaciones. Esto permite realizar estimaciones más precisas y proporcionar medidas de incertidumbre asociadas (J. Li & Heap, 2014).

El *kriging* tiene varias ventajas: 1) es un método óptimo en el sentido de que proporciona las mejores estimaciones lineales no sesgadas posibles en función de la información espacial disponible (Hofstra et al., 2008) y 2) proporciona una medida de la incertidumbre asociada a cada estimación, lo que es útil en muchos análisis. Sin embargo, también tiene algunas limitaciones (Cho et al., 2020). Por ejemplo, homogeneiza espacialmente la modelización al usar todas las observaciones porque necesita construir una distribución teórica (el semivariograma) y tampoco tiene en cuenta la co-variación de esas observaciones en función de otra variable, lo cual es especialmente útil en la temperatura.

La técnica de interpolación utilizada en este caso es el *cokriging*, que sí permite utilizar la información de otras variables relacionadas, con la temperatura en nuestro caso, para mejorar la precisión de la interpolación (Smoliak et al., 2015). Estas otras variables pueden proporcionar más información adicional sobre la estructura espacial y la correlación de las observaciones. El *cokriging* puede reducir la incertidumbre en las estimaciones y proporcionar resultados más precisos, además de ayudar a mitigar el efecto de la falta de datos en áreas específicas (K. Zhang et al., 2011).

El análisis se realiza en R, mediante el paquete *automap* (Hiemstra et al., 2009). Concretamente utilizando un modelo de *kriging* universal para el *cokriging* al permitir la inclusión de una tendencia no constante en el modelo y puede manejar variaciones no estacionarias en la media. Por ejemplo, supongamos que estamos analizando datos de temperatura en la ciudad y observamos que esta tiende a aumentar a medida que nos movemos hacia el sur, pero la tasa de aumento no es la misma en todas partes. Algunas áreas pueden experimentar un aumento más pronunciado, mientras que otras pueden tener un aumento más gradual. En este caso, hay una tendencia global (el aumento de temperatura hacia el sur), pero no es constante en términos de la velocidad o la magnitud del cambio en todas las ubicaciones. En el contexto del *kriging* o de otros métodos de interpolación espacial, la incorporación de una tendencia global no constante en el modelo permite capturar y ajustar estas variaciones sistemáticas en los datos para mejorar la precisión de las predicciones en ubicaciones no muestreadas. Esto es especialmente relevante cuando la relación entre la variable de interés y la ubicación no sigue un patrón uniforme en todo el dominio espacial.

A continuación, se explicarán las diferentes etapas involucradas en el modelo de interpolación. Comenzaremos con la fase inicial de **seleccionar las variables** que participarán en el *cokriging*, y luego avanzaremos hacia la **formulación del modelo** utilizando los datos climáticos de la red urbana. Se hará especial énfasis en la adaptación del modelo de acuerdo con la escala temporal elegida para generar la representación climática final. Este proceso iniciará con el **desarrollo del modelo a nivel estacional** y, desde ese punto, se irá descendiendo progresivamente a **escalas mensuales**, permitiendo un acercamiento a la **escala diaria**.

### 3.3. Selección y creación de covariables

Para desarrollar un modelo de interpolación más preciso, se complementarán las mediciones de temperatura diaria de la red de sensores con una serie de covariables (Figura 3.1 y Figura 3.2). La elección de estas covariables se basó en trabajos previos realizados en Zaragoza (Cuadrat et al., 2005; Cuadrat, Vicente-Serrano, et al., 2015) y en investigaciones desarrolladas en otras ciudades (Cho et al., 2020; Dirksen et al., 2020; Montaner-Fernández et al., 2020; Nikoloudakis et al., 2020). El objetivo fue identificar las propiedades clave que influyen en la distribución de la temperatura del aire en entornos urbanos. Todas las covariables se agregaron espacialmente en una cuadrícula de 100 m de píxel. Y fueron calculadas a diferentes escalas temporales para el periodo de 2015 a 2022, comenzando con los promedios estacionales de todo el periodo hasta valores promedio mensuales. Las variables seleccionadas se han categorizado en dos conjuntos de covariables: las de origen satelital y las de origen territorial.

Es importante señalar al lector que esta sección de la tesis sobre la selección de covariables se basará en todo momento en los datos estacionales promedio. Se consideró que esta era la mejor manera de sintetizar tanta información con escalas temporales y espaciales tan diversas, permitiendo extraer los patrones principales que posteriormente se agregarán en la interpolación. Esta premisa se aplicará luego en la selección y creación de componentes principales a escala mensual. Además, se observó que los patrones de composición y correlación de las covariables a escala mensual no difieren significativamente de los patrones estacionales.

#### 3.3.1. Variables satelitales

Todas las covariables de este conjunto se obtuvieron de *Google Earth Engine* (GEE), utilizando el catálogo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés, *United States Geological Survey*). Se ha optado por *Landsat* debido a su resolución

temporal (16 días con *Landsat 8* y 8 días junto al *Landsat 9*) y espacial (de 30 m a 100 m dependiendo de la banda), que permite obtener promedios estacionales adecuados para el análisis de ciudades medianas o pequeñas (Jimenez-Munoz et al., 2014; Roy et al., 2014). Las imágenes utilizadas pertenecen a los satélites *Landsat 8*, disponible desde 2013, y *Landsat 9*, disponible desde 2022, ya que coinciden con el periodo de registro de la red de sensores meteorológicos, que comenzó en 2015. Específicamente, se empleará el producto nivel 2 de la colección 2 derivado de los sensores OLI/TIRS, que incluye correcciones atmosféricas y proporciona reflectancia de la superficie y temperatura de la superficie terrestre.

Es importante destacar que se observaron errores en la categorización de la banda QA (*Quality Assessment*), que contiene los valores de calidad del píxel. Numerosos píxeles no fueron señalados como neblina, sombras o nubes, mientras que espacios como polígonos industriales de techos claros se categorizaron erróneamente como nubes. Estos errores, especialmente en la banda térmica, generaron problemas significativos para construir una imagen global de la ciudad y que en el caso de las bandas de reflectancia de superficie no se aprecia (Cook et al., 2014), especialmente con nieblas tenues o sombras en el borde de nubes que en otras bandas apenas distorsionan la imagen generada pero en el caso de la térmica provoca alteraciones inaceptables. Para abordar esto, se llevó a cabo una revisión manual de las imágenes individuales durante el periodo invernal, que presenta una mayor concentración de nubes y nieblas. Se evitó la máscara de nubes, se utilizó una restricción de <10 % de nubes y se aplicó la mediana en el agregado estacional. Finalmente, se calcularon los índices correspondientes para cada estación.

Con el objetivo de obtener la mejor representación de las características urbanas para añadir al modelo de interpolación, este estudio calculó un total de 20 índices espectrales (Tabla 3.7). Se busca enriquecer el modelo, probar nuevos índices diferentes a los tradicionales (Javed et al., 2021) y determinar cuáles se ajustan mejor a Zaragoza. Estos índices se agruparon en tres categorías en relación con la temática que analizan: vegetación, humedad y suelo construido. Estas tres categorías representan aspectos fundamentales de las características del entorno urbano y tienen una relación estrecha con la temperatura.

Temática	Índice	ID	Formula	<i>Landsat 8</i>	Referencia
Vegetación	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	5 and 4	Kriegler et al., 1969; Rouse et al., 1974
Vegetación	Enhanced Vegetation Index	EVI	$2.5 * \frac{NIR - Red}{NIR + (C_1 * Red) - (C_2 * Blue) + L}$	5, 4 and 2	Liu and Huete, 1995
Vegetación	Leaf Area Index	LAI	$3.681 * EVI - 0.118$		Boegh et al., 2002
Vegetación	Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} * (1 + L)$	5 and 4	Huete, 1988
Vegetación	Green Leaf Index	GLI	$\frac{(Green - Red) + (Green - Blue)}{(2 * Green) + Red + Blue}$	3, 4 and 2	Louhaichi et al., 2001
Vegetación	Normalized Burn Ratio	NBR	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	5 and 7	Key et al., 2002

Masas de agua y humedad	Normalized Difference Water Index	NDWI	$\frac{Green - NIR}{Green + NIR}$	3 and 5	Gao, 1996
Masas de agua y humedad	Modified Normalized Difference Water Index	MNDWI	$\frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$	3 and 6	Xu, 2006
Masas de agua y humedad	Normalized Difference Moisture Index	NDMI	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	5 and 6	Wilson and Sader, 2002
Masas de agua y humedad	Normalized Difference Turbidity Index	NDTI	$\frac{Red - Green}{Red + Green}$	4 and 3	Lacaux et al., 2007
Masas de agua y humedad	New Water Index	NWI	$\frac{Blue - (NIR + SWIR_1 + SWIR_2)}{Blue + (NIR + SWIR_1 + SWIR_2)}$	2, 5, 6 and 7	Feng, 2009
Masas de agua y humedad	Water Ratio Index	WRI	$\frac{Green + Red}{NIR + SWIR}$	3, 4, 5 and 6	Shen and Li, 2010
Suelo construido	Normalized Difference Built-up Index	NDBI	$\frac{SWIR_1 - NIR}{SWIR_1 + NIR}$	6 and 5	Zha et al., 2003
Suelo construido	Urban Index	UI	$\frac{SWIR_2 - NIR}{SWIR_2 + NIR}$	7 and 5	Kawamura et al., 1996
Suelo construido	New Built-up Index	NBI	$\frac{Red * SWIR}{NIR}$	4, 6 and 5	Jieli et al., 2010
Suelo construido	Built-up Area Extraction Index	BAEI	$\frac{Red + 0.3}{Green + SWIR}$	4, 3 and 6	Bouzekri et al., 2015
Suelo construido	Index-based Built-up Index	IBI	$\frac{NDBI - (SAVI + MNDWI)/2}{NDBI + (SAVI + MNDWI)/2}$		Xu., 2008
Suelo construido	Normalized Built-up Area Index	NBAI	$\frac{(SWIR_2 - SWIR_1)/Green}{(SWIR_2 + SWIR_1)/Green}$	7, 6 and 3	Waqar et al., 2012
Suelo construido	Normalized Impervious Surface Index	NISI	$\frac{(Blue + Green + Red) - NIR}{(Blue + Green + Red) + NIR}$	2, 3, 4 and 5	Su et al., 2022
Suelo construido	Built-up Index	BUI	$\frac{2 * ((Red * SWIR_2) - (SWIR_1 * SWIR_1))}{(Red + SWIR_1) * (SWIR_1 + SWIR_2)}$	4, 7 and 6	Kaimaris and Patias, 2016)

Tabla 3.1. Tabla resumen de los indicadores satelitales que forman parte de las covariables en el modelo de interpolación. Indicando la clase de índice que es según su tema de análisis, su nombre, fórmula con la que se ha calculado, bandas a las cuales equivalen en *Landsat 8* y la bibliografía de cada índice.

### 3.3.1.1. Vegetación

La vegetación se relaciona con la temperatura de superficie y del aire (Marzban et al., 2018; Yuan & Bauer, 2007), indicando que, bajo las condiciones adecuadas, tiene un efecto de enfriamiento en el entorno (Guha et al., 2018), debido principalmente a su papel en la evapotranspiración.

El *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), es uno de los índices más utilizados para caracterizar la cobertura vegetal (Huang et al., 2021; Kriegler et al., 1969; Rouse et al., 1974). De forma matemática, el NDVI se expresa así:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Dónde NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizado. NIR o infrarrojo cercano es el área del espectro electromagnético definida por longitudes de onda entre 780 nm y 2.500 nm. En el caso del Red forma parte del espectro visible y se encuentra entre alrededor de los 700 nm. Al operar con satélite *Landsat* 8 y 9 las bandas utilizadas serán la banda 4 y 5 como Red y NIR. El rango de valores de NDVI está entre 0 y 1, siendo los valores más elevados los que representan mayor presencia de vegetación.

Sin embargo, existen una gran variedad de índices de vegetación con algoritmos personalizados que dependen del objeto del estudio y que tienen una enorme variedad de aplicaciones (Xue & Su, 2017). Por lo cual se han integrado algunos de ellos para cual relaciona mejor la distribución de la vegetación urbana con la temperatura de la ciudad.

Similar al NDVI pero corrigiendo algunas condiciones atmosféricas y el ruido de fondo del dosel (H. Q. Liu & Huete, 1995) se calcula el *Enhanced Vegetation Index* (EVI). Este índice se caracteriza por mejorar la sensibilidad en áreas con vegetación densa reduciendo el ruido de fondo, el ruido atmosférico y la saturación. Y se expresa así:

$$EVI = 2.5 * \frac{NIR - Red}{NIR + (C_1 * Red) - (C_2 * Blue) + L}$$

Donde a los valores de NIR o infrarrojo cercano se añaden los valores del Red y el Blue del espectro visible, respectivamente serían las bandas 5, 4 y 2; L representa los parámetros de ajuste del suelo, y su valor es igual a 1; y los parámetros  $C_{1y2}$  son constantes equivalentes a 6 y 7,5, respectivamente.

En relación al EVI está el *Leaf Area Index* (LAI) cuyo objetivo era el pronóstico del crecimiento y rendimientos de los cultivos estimando la cobertura vegetal. Proporciona una característica estructural crucial de la vegetación. Para su cálculo se utilizó la estimación a partir de EVI desarrollada por Boegh et al en 2002 (Boegh et al., 2002).

$$LAI = 3.681 * EVI - 0.118$$

El *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) también busca mejorar la sensibilidad a los fondos del suelo, aspectos como el color o el contenido de humedad. También son múltiples las modificaciones, ajustes y actualizaciones de este índice pero en este caso se utiliza el original de Huete (Huete, 1988):

$$SAVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} * (1 + L)$$

Donde se añade a las bandas del NIR y el Red el valor de L o índice de acondicionamiento del suelo. El valor de L es de alrededor de 0,5 en las condiciones ambientales más comunes.

También hay índices de vegetación que se diseñaron originalmente para usarse con una cámara digital RGB (Louhaichi et al., 2001), cuando no se cuenta con el infrarrojo cercano y por lo tanto no se puede calcular el NDVI. Destaca el *Green Leaf Index* (GLI) con una clara aplicación del estudio de cultivos por medio de drones. Los valores positivos representan las hojas y tallos verdes, siendo extremadamente sensible a frente a los colores verdes.

$$GLI = \frac{(Green - Red) + (Green - Blue)}{(2 * Green) + Red + Blue}$$

Solo necesita las bandas visibles del espectro por ellos solo ocupa los valores de las bandas Blue, Green y Red. En el caso de Landsat las bandas 2, 3 y 4. Hay que tener en cuenta que al trabajar con el espectro visible aspectos como la fase fenológica de la vegetación o la existencia de sombras en la imagen tendrán mucha relevancia.

Por último, también se calcula el *Normalized Burn Ratio* (NBR) diseñado para resaltar áreas quemadas en grandes zonas de incendio (Key et al., 2002), pero que puede aportar una gran información sobre la vegetación saludable. Destaca por beneficiarse de la magnitud de la diferencia espectral del infrarrojo, utiliza la relación entre las bandas NIR y SWIR. Según la siguiente fórmula:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

En esta ocasión se incorpora el infrarrojo de onda corta SWIR al infrarrojo cercano o NIR. Lo que se corresponde con las bandas 5 y 7.

### 3.3.1.2. Masas de agua y humedad

La humedad y la presencia de masas de agua actúan como un regulador térmico, distribuyendo y almacenando calor. Sus propiedades térmicas, como su alta capacidad calorífica y conductividad térmica, intervienen en la regulación del clima de las ciudades (W. Liu et al., 2009). Las áreas con una mayor presencia de agua pueden experimentar temperaturas del aire ligeramente más bajas que las áreas con menos agua (Guha et al., 2018). Además, una mayor humedad del suelo bajo condiciones adecuadas podría estar asociado con temperaturas del aire más bajas debido a un aumento en la humedad relativa.

Con el fin de cuantificar estas variables y observar su distribución espacial surgen diversos índices espectrales. Uno de los más utilizados es el *Normalized Water Difference Index* (NDWI), en origen muy relacionado con el NDVI y centrado en la detección remota del agua líquida de la vegetación desde el espacio (Gao, 1996). Se expresa así:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

Dónde NIR es el infrarrojo cercano y Green forma parte del espectro visible, alrededor de los 500 nm. Al operar con satélite *Landsat* 8 y 9 las bandas utilizadas serán la banda 3 y 5 como Green y NIR. El rango de valores de NDWI está entre 0 y 1, siendo los valores más elevados los que representan mayor presencia de agua o humedad.

El *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) como el nombre indica es una modificación del índice de agua original y surgió para mejorar los valores obtenidos en grandes masas de agua y en aguas abiertas (Xu, 2006). Además, también disminuye las características del área construida lo que puede ser interesante en espacios urbanos para diferencias masas de agua.

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$$

La modificación consiste en cambiar el NIR por la banda infrarroja de onda corta o SWIR. Lo que en *Landsat* 8 supondría un cambio por la banda 6.

El *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI) detecta los niveles de humedad en la vegetación utilizando una combinación de bandas espectrales del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR) (Wilson & Sader, 2002). Es un gran indicador del estrés hídrico en los cultivos y por lo tanto una excelente herramienta agrícola. El foco de estudio no son las masas de agua, como en el NDWI, pero puede ser un buen índice en entornos urbanos debido a la relación entre humedad, evapotranspiración y vegetación.

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Las bandas que intervienen serían la 5 y la 6, como NIR y SWIR. Como la mayoría de los índices, el NDMI sólo puede tener valores entre -1 y +1, lo que facilita su interpretación. El estrés hídrico vendría señalado por los valores negativos que se acercan a -1, mientras que el +1 puede indicar anegamiento. Por lo tanto, cada valor intermedio corresponderá a una situación agronómica ligeramente diferente.

Se incorpora al estudio el cálculo del Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) un algoritmo para estimar la turbidez del agua enfocado específicamente para estanques y aguas continentales (Lacaux et al., 2007), lo que puede ser de gran ayuda en la detección de masas de agua en nuestra zona de estudio. El índice combina las bandas roja y verde del espectro electromagnético, de la siguiente manera:

$$NDTI = \frac{Red - Green}{Red + Green}$$

En la que Red se corresponde con la banda 4 de *Landsat* 8, mientras que Green con la banda 3. Hay que destacar que frente al resto de índices relacionados con el agua aquí expuestos en el caso del NDTI los valores más cercanos a 1 se relacionan con mayor turbidez y por lo tanto menor presencia de agua, mientras que valores negativos se asocian a mayor presencia de agua.

El *New Water Index* (NWI) respecto los anteriores se diferencia por incluir en el cálculo la banda azul, y abarca hasta el rango del infrarrojo de onda corta (Feng, 2009). Se encontró que este índice era mejor que otros extracción de agua en entornos urbanos (Jason Yang & Du, 2017). El índice se calcula de la siguiente manera:

$$NWI = \frac{Blue - (NIR + SWIR_1 + SWIR_2)}{Blue + (NIR + SWIR_1 + SWIR_2)}$$

Donde Blue es la reflectancia en la banda 2. NIR una vez más es la banda 5. Y SWIR1 y SWIR2 se corresponden con las bandas 6 y 7 del infrarrojo de onda corta.

Como último índice de este apartado incluimos el *Water Ratio Index* (WRI) (L. Shen & Li, 2010). Shen y Li aseguran que logra un mejor rendimiento que los algoritmos tradicionales en la extracción de cuerpos de agua, gracias principalmente al algoritmo *adaboost*. El índice se calcula de la siguiente manera:

$$WRI = \frac{Green + Red}{NIR + SWIR}$$

Donde Green y Red forman parte del espectro visible y se corresponden con las bandas 3 y 4. Mientras que NIR y SWIR son las bandas 5 y 6 del infrarrojo.

### 3.3.1.3. Suelo construido

La detección de suelo construido se utiliza para cuantificar y cartografiar el grado de urbanización y la extensión del uso del suelo urbano (Herold et al., 2002). Principalmente en teledetección estas superficies denominadas impermeables se relacionan con espacios pavimentados y los techos de los edificios. Numerosos estudios han demostrado la relación entre una mayor presencia de suelo construido y una mayor temperatura de la superficie terrestre (Halder et al., 2022; T. Oke, 1973). Además de una fuerte relación lineal entre la temperatura y el porcentaje de superficie impermeable, superior en algunos casos a su relación con el NDVI (Yuan & Bauer, 2007).

En primer lugar, uno de los índices de suelo construido más utilizados es el *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI). Esta fórmula aprovecha las características espectrales distintivas de las áreas construidas en comparación con otras coberturas terrestres. Y mediante una modificación del NDVI, logra mapear de forma precisa las áreas construidas (Zha et al., 2003). Se expresa así:

$$NDBI = \frac{SWIR_1 - NIR}{SWIR_1 + NIR}$$

Donde SWIR<sub>1</sub> se corresponde con el infrarrojo de onda corta, una parte del espectro electromagnético que abarca aproximadamente entre los 1.55µm y 1.65µm. NIR se corresponde con el infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Ambos se corresponden con las bandas 6 y 5.

De cálculo semejante al NDBI encontramos el *Urban Index* (UI). Un índice utilizado para la evaluación de áreas urbanas y obtener información detallada sobre sus características (M. Kawamura et al., 1996). También se centra en la diferencia de reflectancia entre las áreas construidas y no construidas. Y aplica la diferencia normalizada, pero utilizando otro rango del infrarrojo de onda corta, el SWIR<sub>2</sub>. Se formula así:

$$UI = \frac{SWIR_2 - NIR}{SWIR_2 + NIR}$$

Donde el infrarrojo de onda corta o SWIR<sub>2</sub> pasa al rango entre 2.1µm y 2.2µm. Y por lo tanto la banda que le corresponde es la 7.

El *New Built-up Index* (NBI) surge con la premisa de que la respuesta espectral de las coberturas terrestres es más distintiva entre sí para cada cobertura en los rangos del Red, NIR SWIR<sub>1</sub> (Jieli et al., 2010). Lo que puede ser una alternativa valiosa a otros índices y mapear con gran precisión áreas construidas. El índice se expresa así:

$$NBI = \frac{Red * SWIR}{NIR}$$

Donde el Red parte del espectro visible, el NIR o infrarrojo cercano y el SWIR infrarrojo de onda corta corresponden a las bandas 4,5y7.

El *Built-up Area Extraction Index* (BAEI) se caracteriza por contar con una aplicación simple que necesita menor tiempo y procesamiento previo. Y obtiene resultados muy preciso si se compara con otros índices en espacios mediterráneos continentalizados donde se desarrolló (Bouzekri et al., 2015). El índice se calcula de la siguiente manera:

$$BAEI = \frac{Red + 0.3}{Green + SWIR}$$

Donde se le añade a la banda Red una constante aritmética igual a 0.3.

El *Index-based built-up index* (IBI) es un índice derivado de índices ya existentes y que hemos incorporado anteriormente: NDBI, SAVI y MNDWI. Incorporando en el cálculo los tres principales componentes urbanos de vegetación, agua y suelo construido (Xu, 2008). De este modo suprime el ruido de fondo. Se expresa así:

$$IBI = \frac{NDBI - (SAVI + MNDWI)/2}{NDBI + (SAVI + MNDWI)/2}$$

Donde NDBI es el Índice de construcción de diferencia normalizada, el SAVI es el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo y el MNDWI es el Índice de agua de diferencia normalizado modificado.

El *Normalized Built-up Area Index* (NBAI) se basa en combinaciones de bandas espectrales y técnicas de procesamiento de imágenes. El objetivo es mejorar la precisión en la identificación y cuantificación de áreas construidas y suelo desnudo (Waqar et al., 2012). Se formula así:

$$NBAI = \frac{(SWIR_2 - SWIR_1)/Green}{(SWIR_2 + SWIR_1)/Green}$$

Donde la diferencia normalizada relaciona la diferencia de los infrarrojos de onda corta SWIR<sub>1 y2</sub> con la banda Green. Siendo las bandas 3, 6 y 7.

El *Normalized Impervious Surface Index* (NISI), basándose en imágenes de Sentinel-2 MSI y bibliotecas espectrales, desarrolla un método enfocado en discernir entre suelo desnudo y superficies impermeables (Su et al., 2022). Un problema que desde la teledetección no ha sido resuelta de manera efectiva. El índice se calcula de la siguiente manera:

$$NISI = \frac{(Blue + Green + Red) - NIR}{(Blue + Green + Red) + NIR}$$

Donde a las diferentes bandas del espectro visible Blue, Green y Red se les incorpora el infrarrojo cercano o NIR. Lo que supondría el cálculo con las bandas 2, 3, 4 y 5.

Para terminar calculamos el *Built-Up Index* (BUI), un índice desarrollado en ciudades de Grecia y Palestina que distan de la mayoría de fórmulas anteriores con origen en ciudades asiáticas de gran tamaño (Kaimaris & Patias, 2016). Y el cual se aplicó a zonas urbanas, suburbanas y agrícolas. De forma matemática, el BUI se expresa así:

$$BUI = \frac{2 * ((Red * SWIR_2) - (SWIR_1 * SWIR_1))}{(Red + SWIR_1) * (SWIR_1 + SWIR_2)}$$

Donde la fórmula es la suma de dos diferencias normalizadas. La primera relacionada Red y SWIR<sub>1</sub>, es decir, las bandas 4 y 6. La segunda con SWIR<sub>2</sub> y SWIR<sub>1</sub>, las bandas 7 y 6.

#### 3.3.1.4. Temperatura de superficie (LST)

La temperatura de superficie puede utilizarse como un predictor altamente correlacionado para estimar la temperatura del aire, como lo han demostrado diversos estudios. Chung et al. (Chung et al., 2020), utilizando imágenes MODIS, lograron una sólida correlación entre ambas variables, destacándose especialmente en las temperaturas máximas y mínimas, así como en las diurnas y nocturnas. En la Antártida, Chapman y Walsh (2007) observaron que la temperatura del aire y la de la superficie están más correlacionadas en verano y en el continente antártico que en invierno sobre el hielo marino. Kubota y Shikauchi (1995) también evidenciaron un alto coeficiente de correlación en la superficie marina. En lo que respecta a superficies más similares al suelo urbano, Kawashima et al. (2000), mediante el análisis de imágenes *Landsat*, resaltaron que el 80 % de la variación observada en la temperatura del aire durante las noches claras de invierno se explicaba por la temperatura de la superficie. Además, Good et al. (2017), en un estudio a escala global, presentaron una correlación del 0,9, aún mayor fuera de las zonas tropicales.

En esta tesis, se utilizan datos del sensor *Thermal InfraRed Sensor* (TIRS) de *Landsat 8* para analizar patrones espaciales intraurbanos de LST. Particularmente, se emplea la banda 10 *Thermal Infrared* (TIR 1) que ofrece la colección 2 nivel 2 tier 1 del USGS en GEE. Este producto pese a la resolución original de 100 m se obtiene a una resolución espacial de 30 m, utilizando una convolución cúbica para asegurar una co-registración precisa con las bandas del sensor OLI (Roy et al., 2014). El cálculo de la temperatura de la superficie en los productos *Landsat* se realiza mediante un algoritmo de un solo canal (*Single Channel*) que utiliza la banda 1 del sensor TIRS (Cook, 2014; Jiménez-Muñoz & Sobrino, 2003). Este algoritmo se basa en una inversión directa de la ecuación de transferencia radiativa y utiliza datos de emisividad global (GED) de ASTER para extraer las emisividades de la superficie (Hulley et al., 2012, 2015).

Es importante tener en cuenta que los datos de *Landsat 8* no reflejan necesariamente la temperatura superficial más alta en el espacio urbano, ya que la superficie intraurbana, compuesta principalmente por pavimento, cemento y asfalto, retiene calor y lo libera a una tasa acelerada posteriormente. También Ruiz-Álvarez et al. (2019) señalan que la variable LST durante la noche, es un indicador muy preciso para la estimación de la temperatura del aire, ya que la radiación solar no tiene ningún efecto, lo que simplifica el balance energético de la superficie del suelo. Mientras que, por el día, es necesario tener en cuenta varias variables, como la nubosidad, la velocidad del viento, la humedad del suelo y la rugosidad de la superficie, que los sensores remotos no pueden recuperar. Sin embargo, estos datos diarios son relevantes ya que capturan el momento de máxima radiación solar recibida en la

superficie terrestre, lo que permite analizar el desarrollo de los patrones de isla de calor superficial (SUHI) y sus distribuciones espaciales en un momento significativo del día (Cotlier & Jimenez, 2022).

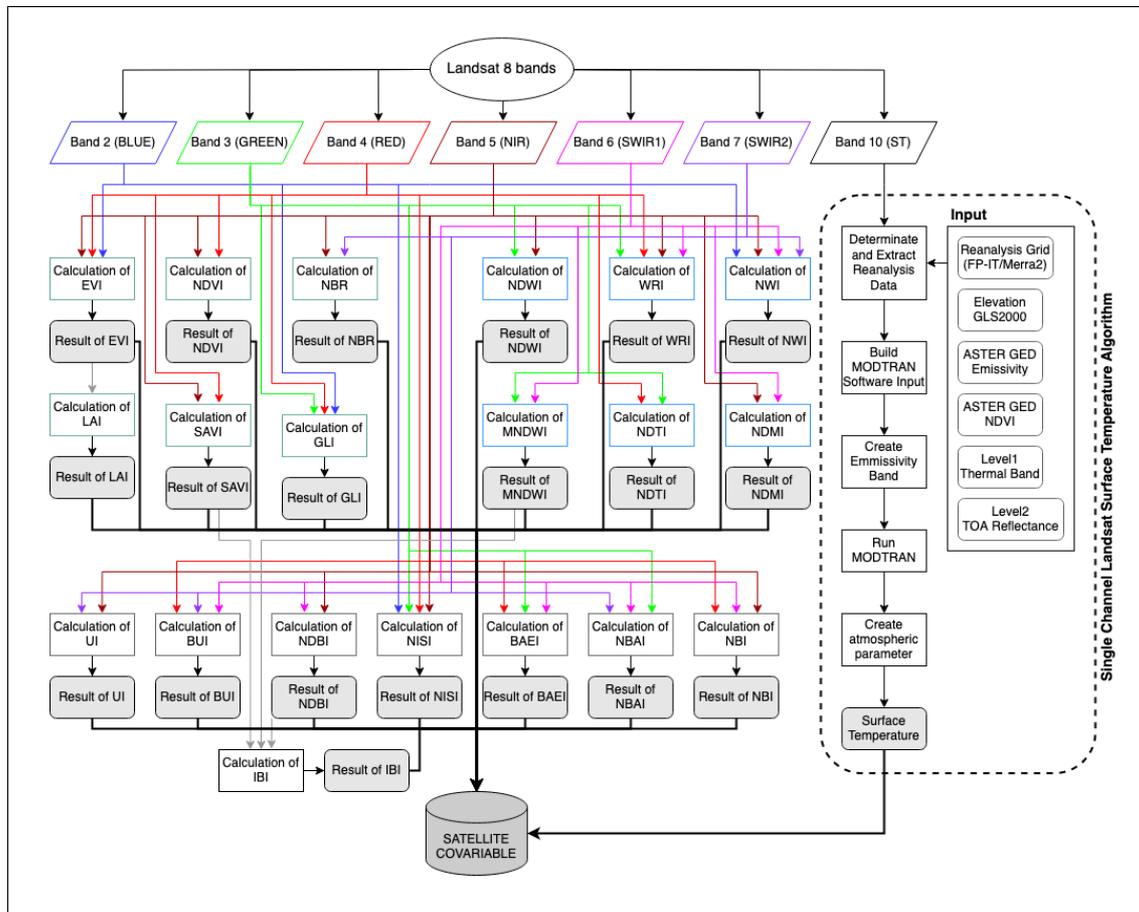


Figura 3.1. Diagrama de flujo de trabajo para el cálculo de los indicadores satelitales que formaran partes de las covariables en el modelo de interpolación.

### 3.3.2. Variables territoriales

En este caso las covariables que se integran en la interpolación se caracterizan por aportar información territorial y geográfica (Figura 3.2) y que, aunque algunas cuentan con información satelital en su origen, se tratan de productos finales que no es necesario trabajar desde satélite. La mayor parte de ellas son capas estáticas que no varían en el tiempo como si el caso de las satelitales, principalmente debido a la disponibilidad de información. Estas covariables están relacionadas con los modelos de elevaciones y productos derivados de los mismos que nos dan información sobre aspectos morfológicos urbanos (Y. Hu et al., 2020; Nikoloudakis et al., 2020).

#### 3.3.2.1. Modelo Digital del Terreno (MDT)

Modelo digital de elevación que sirve como representación digital de la superficie terrestre. El MDT fue obtenido del Instituto Geográfico Nacional (IGN) (<https://www.ign.es/>) y fue desarrollado por interpolación a partir de la clase terreno de los vuelos con sensor *Light Detection And Ranging* (LIDAR) de la segunda cobertura del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) (<https://pnoa.ign.es/>). Cuenta con una resolución de 2 metros y el vuelo en el cual se encuentra la zona de estudio es de octubre de

2016. Estos datos se usan en una variedad de aplicaciones, como planificación de infraestructuras, diseño de obras civiles, georreferenciación, análisis de inundaciones o proyección de vías. Una variable fundamental que sintetiza la información topográfica y altitudinal de Zaragoza y sus alrededores. Se incorpora al estudio como una pieza clave en las interpolaciones climáticas, especialmente de temperatura, debido a su relación con el gradiente térmico adiabático.

#### 3.3.2.2. Modelo Digital de Superficies (MDS)

Modelo digital de elevación que representa todos los elementos presentes en la superficie de la tierra, tanto antrópicos como naturales. Como el MDT, se obtuvo del IGN, pero para su creación se incluyeron las clases terreno, vegetación (baja, media y alta) y edificación del vuelo LIDAR del PNOA. Cuenta con una resolución de 2 m y fecha de 2016. Es tan útil como el MDT, pero con la ventaja adicional de permitir la integración en el análisis de las construcciones y edificaciones urbanas, acercándonos así más a la realidad de la ciudad. Por esta razón, es una variable de gran importancia que se utiliza en la construcción de otras variables relacionadas con las características de la estructura urbana.

#### 3.3.2.3. Altura de la edificación

Representación de la altura de las edificaciones de la ciudad de manera aislada en metros. Al igual que las variables anteriores proviene del IGN y del vuelo LIDAR del PNOA, pero en esta ocasión se desarrolló mediante una interpolación de la altura relativa al suelo a partir de la clase edificación. La resolución es de 2,5 metros y fecha de 2016.

#### 3.3.2.4. Pendiente

Representación de la pendiente en la zona de estudio que muestra los cambios en la elevación de la ciudad. Esta variable se calculó con el software ArcGIS en base al MDS y cuenta con una resolución de 2 metros y fecha de 2016.

#### 3.3.2.5. Orientación

Representación de la dirección y la inclinación de las líneas de terreno en la zona de estudio, es decir, la dirección de brújula a la que apunta la superficie en cada ubicación. Esta variable se calculó con el software ArcGIS en base al MDS y cuenta con una resolución de 2 metros y fecha de 2016.

#### 3.3.2.6. Radiación

Representación de la tendencia general en la cantidad de radiación solar en una zona concreta. Permite analizar y planificar el potencial energético solar de un territorio. Esta variable se calculó con el software ArcGIS, con la herramienta de análisis de radiación solar (Fu & Rich, 2002), en base al MDS y cuenta con una resolución de 2 metros y fecha de 2016. Se calcularon tres momentos de radiación diferentes para obtener un valor de radiación para cada estación del año. Concretamente, se calculó el momento de mayor radiación del año en el solsticio de verano, el de menor radiación con el solsticio de invierno y, por último, los momentos de radiación media con los equinoccios de primavera y otoño.

#### 3.3.2.7. Sky view factor

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, aplicándose en los estudios de modelación de clima urbano o en el análisis de la isla de calor urbano (L. Chen et al., 2012; Dirksen et al., 2019; Middel et al., 2018). El SVF se calculó con el algoritmo de código abierto y gratuito utilizado en SAGA-GIS (Conrad et al., 2015). El algoritmo se basa en datos de entrada *raster*, en nuestro caso el MDS de la ciudad a 2m, y los cálculos se realizan utilizando dos parámetros: el número de direcciones y la distancia de búsqueda (Bernard et al., 2018).

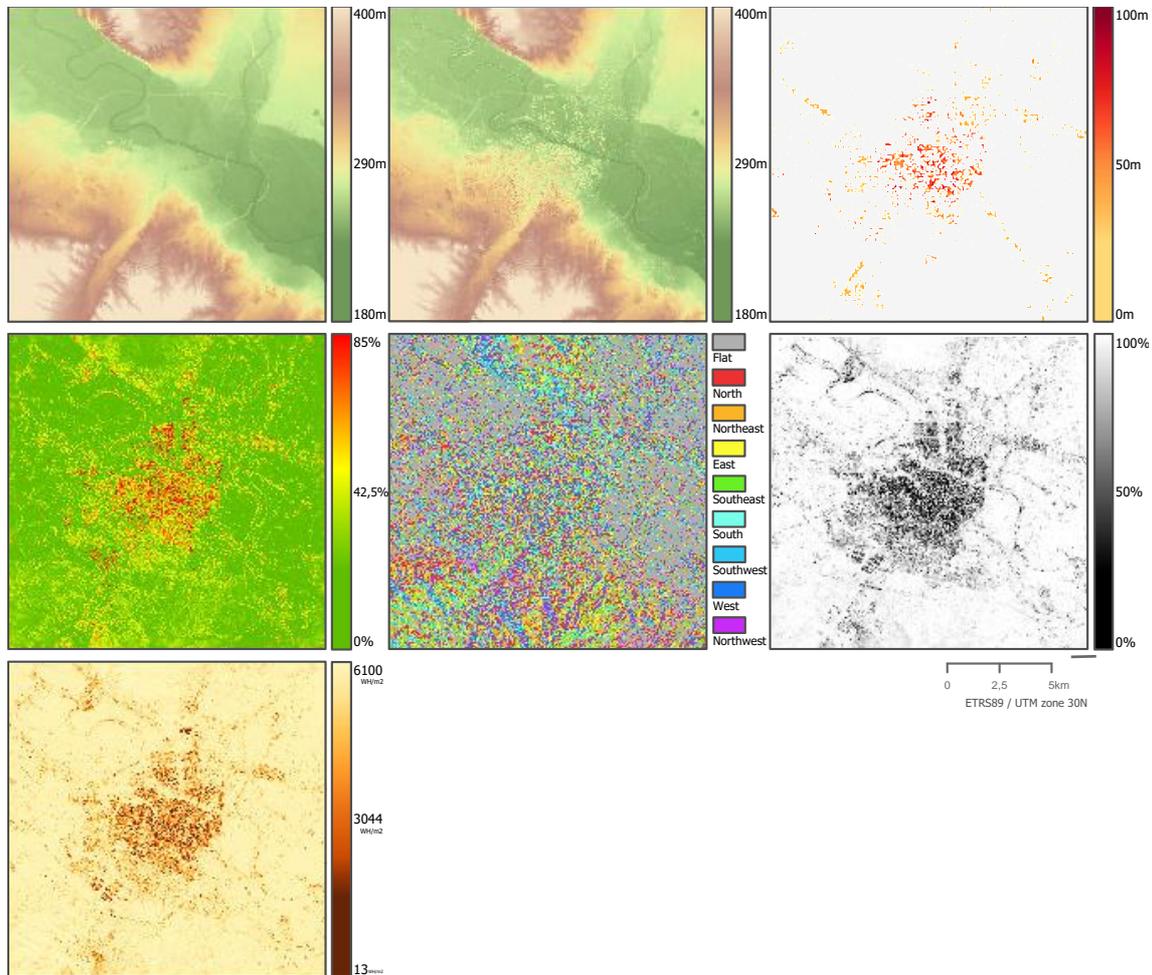


Figura 3.2. Variables territoriales utilizadas en la interpolación. A) MDT. B) MDS. C) Altura de edificaciones. D) Elevaciones. E) Orientaciones. F) SVF. G) Radiación solar del solsticio de verano. H) IMD de 2018.

### 3.3.3. Selección de variables

Se calcularon así un total de 28 covariables, 21 de ellas provenientes de datos satelitales y 7 relacionadas con características territoriales. Estas covariables se consideraron posibles vectores para explicar la distribución de la temperatura en la ciudad. Sin embargo, para seleccionar los predictores más adecuados que describan las propiedades del suelo urbano y que puedan afectar la temperatura del aire, se llevó a cabo un análisis de correlación. En este análisis, se asociaron la temperatura máxima, media y mínima de cada estación del año en cada uno de los sensores de la red, junto con un buffer de 100 metros alrededor de cada sensor, con el promedio de cada una de las covariables. El objetivo fue determinar la dirección, fuerza y significación de cada correlación.

Para lograr una síntesis de variables, se ha utilizado el PCA. Esta metodología, que proporciona una ventaja significativa al obtener factores no correlacionados que son combinaciones lineales de las variables originales. Estos factores pueden utilizarse posteriormente en el proceso de interpolación. El PCA permite reducir las dimensiones de las variables, destacando los aspectos clave de las características urbanas. Dado que el PCA se basa en la covarianza entre variables, es importante estandarizar las variables para asegurarse de que todas tengan la misma escala. Esto implica restar la media de cada variable y dividir por la desviación estándar. Se realizaron pruebas de normalidad y se verificó que no existían valores atípicos que pudiesen afectar a los resultados del análisis.

Previo al cálculo del PCA se realizó una selección de las variables más adecuadas. Esto permitió identificar cuáles mostraban una relación significativa con la temperatura del aire y, por lo tanto, podían ser consideradas como predictores relevantes. Se eliminaron todas aquellas que al menos no tuvieran correlación significativa en dos estaciones del año en cualquiera de las tres variables de temperatura. Como se puede ver en la Tabla 3.2 las variables de vegetación son las que mayor correlación tienen con la temperatura del aire, en todos los casos existe una correlación negativa significativa y tienen un promedio en torno al 0,6 anual que se acentúa en invierno y otoño. Por el contrario, de las variables de humedad y masas de agua tan solo el NDTI es significativa todo el año. Con un rango de valores de correlación que oscilan entre los 0,83 en la temperatura máxima de invierno y los 0,59 de verano. La relación es positiva ya que es el único de estos índices de humedad que analiza la turbidez del agua, al contrario que el resto que analizan el agua o la humedad y por lo tanto tienen correlaciones negativas. En el caso de las variables de construcción se eliminaron las variables UI, NISI, NBI y BAEI ya que no tenían ninguna correlación significadita o eran poco representativas. De las variables si seleccionadas destacan el NBAI y el BUI siendo las covariables con mayor correlación, un máximo de 0,80 y 0,73 respectivamente.

		Temperatura del aire											
		Invierno			Primavera			Verano			Otoño		
		MÁX	MED	MÍN	MÁX	MED	MÍN	MÁX	MED	MÍN	MÁX	MED	MÍN
Vegetación	NDVI	-0,70	-0,57	-0,43	-0,46	-0,47	-0,39	-0,44	-0,35	-0,21	-0,68	-0,49	-0,33
	EVI	-0,69	-0,71	-0,63	-0,47	-0,53	-0,50	-0,45	-0,41	-0,32	-0,61	-0,53	-0,44
	LAI	-0,69	-0,71	-0,63	-0,47	-0,53	-0,50	-0,45	-0,41	-0,32	-0,61	-0,53	-0,44
	SAVI	-0,68	-0,68	-0,59	-0,45	-0,50	-0,47	-0,43	-0,37	-0,27	-0,61	-0,51	-0,40
	GLI	-0,81	-0,73	-0,62	-0,64	-0,71	-0,67	-0,62	-0,62	-0,53	-0,80	-0,74	-0,60
	NBR	-0,65	-0,57	-0,41	-0,47	-0,45	-0,36	-0,49	-0,40	-0,23	-0,62	-0,47	-0,31
Masas de agua y humedad	NDWI	0,55	0,41	0,27	0,31	0,28	0,20	0,29	0,16	0,01	0,53	0,29	0,13
	MNDWI	0,08	0,002	-0,02	0,09	0,07	0,04	0,03	-0,03	-0,06	0,08	-0,03	-0,05
	NDMI	-0,59	-0,47	-0,31	-0,28	-0,26	-0,19	-0,31	-0,21	-0,06	-0,51	-0,34	-0,18
	NDTI	0,83	0,73	0,63	0,64	0,72	0,68	0,59	0,64	0,60	0,77	0,75	0,64
	NWI	0,47	0,34	0,22	0,25	0,24	0,18	0,21	0,07	-0,05	0,48	0,24	0,09
	WRI	0,57	0,44	0,32	0,37	0,37	0,30	0,34	0,24	0,13	0,58	0,38	0,24
Suelo construido	NDBI	0,65	0,57	0,47	0,47	0,45	0,52	0,49	0,40	0,41	0,62	0,47	0,48
	UI	0,59	0,47	0,31	0,28	0,26	0,19	0,31	0,21	0,06	0,51	0,34	0,18
	NBI	0,30	0,11	0,41	0,13	0,10	0,36	0,26	0,14	0,23	0,39	0,17	0,31
	BAEI	-0,21	0,13	-0,02	0,06	0,22	0,04	-0,01	0,17	-0,01	-0,24	0,07	0,01
	IBI	0,64	0,52	0,54	0,34	0,34	0,62	0,36	0,28	0,52	0,56	0,41	0,55
	NBAI	0,69	0,68	0,30	0,73	0,72	0,35	0,75	0,67	0,35	0,80	0,70	0,27
	NIS	0,64	0,50	0,37	0,41	0,39	0,27	0,38	0,26	0,13	0,62	0,41	0,25
	BUI	0,67	0,58	0,35	0,59	0,61	0,30	0,57	0,51	0,10	0,73	0,61	0,23
Variables territoriales	MDS	-0,50	-0,32	-0,21	-0,74	-0,55	-0,32	-0,62	-0,48	-0,31	-0,56	-0,40	-0,27
	MDT	-0,57	-0,42	-0,33	-0,78	-0,62	-0,41	-0,67	-0,53	-0,39	-0,61	-0,48	-0,37
	Orientación	0,24	0,47	0,51	0,43	0,45	0,48	0,48	0,37	0,43	0,17	0,37	0,46
	Pendiente	0,37	0,59	0,65	0,34	0,50	0,58	0,33	0,48	0,56	0,27	0,52	0,60
	Altura edificios	0,23	0,72	0,74	0,44	0,72	0,73	0,53	0,59	0,72	-0,16	0,60	0,70
	SVF	-0,32	-0,58	-0,65	-0,40	-0,53	-0,59	-0,37	-0,51	-0,58	-0,22	-0,52	-0,62
		RAD	-0,30	-0,33	-0,30	-0,53	-0,59	-0,57	-0,48	-0,64	-0,67	-0,44	-0,59

Tabla 3.2. Valores de correlación entre cada una de las covariables explicativas y las variables de temperatura del aire (máxima, media y mínima) estacionalmente. Aquellos valores en gris son los valores de correlación no significativos.

En el caso de las variables no satelitales al ser temáticas heterogéneas los valores de cada una son más diversos. En el caso del MDT y MDS al ser valores de altitud tienen la correlación típica negativa con la temperatura. Aspectos como la orientación o la pendiente tienen una correlación media anual positiva no muy elevada, en torno al 0,5. La altura de los edificios no cuenta con correlación significativa en ningún momento del año, principalmente creemos que esto es debido a la escala de análisis ya que pasa a una agregación tan grande que al ser un variable tan concreta y cuyo efecto está tan localizado que sus efectos sobre la temperatura se desdibujan. Y los valores de radiación y SVF son negativos con mayor peso en las temperaturas mínimas, esto quiere decir que la relación con la temperatura es más fuerte en las noches de invierno cuando las áreas con mayor SVF, aquellas más despejadas, se enfrían más rápidamente mientras que las más compactas con menos cielo descubierto permanecen más cálidas, un buen ejemplo del comportamiento térmico urbano.

Tras este análisis nos quedamos con 17 de las 28 variables iniciales al ser las que mejores valores de correlación guardaban de la variable temperatura la interpolación. Con el fin de evitar la multicolinealidad, se filtraron las variables predictoras ya que posteriormente podrían generar inestabilidad en la interpolación de la temperatura (Dormann et al., 2013). Se comenzó calculando el Factor de Inflación de la Varianza (VIF) que mide para cada variable del modelo el efecto combinado que tienen las dependencias entre los regresores sobre la varianza de esa variable (Estrada-Peña et al., 2013), con valores muy elevados de VIF hay colinealidad por ello se eliminaron aquellas variables predictoras que presentaban un VIF > 10. Gracias al análisis se desecharon 6 variables más: EVI, LAI, SAVI, NDBI, IBI y MDS.

El siguiente paso consiste en examinar la correlación entre las variables seleccionadas (Figura 3.3). Este análisis resulta útil para comprender cómo se relacionan entre sí y también

para identificar posibles correlaciones extremadamente altas entre dos o más variables. Si se detecta una alta correlación entre dos o más variables, ejercerán una influencia significativa en la orientación de los componentes principales y por lo tanto pueden sesgar la interpolación, por ello son eliminada. Eliminando aquellas cuya representación de la temática que analizaban era más deficiente en relación con los espacios urbanos. Finalmente, las variables seleccionadas para el PCA fueron: MDT, SVF, LST, GLI, NDTI y NBAI.

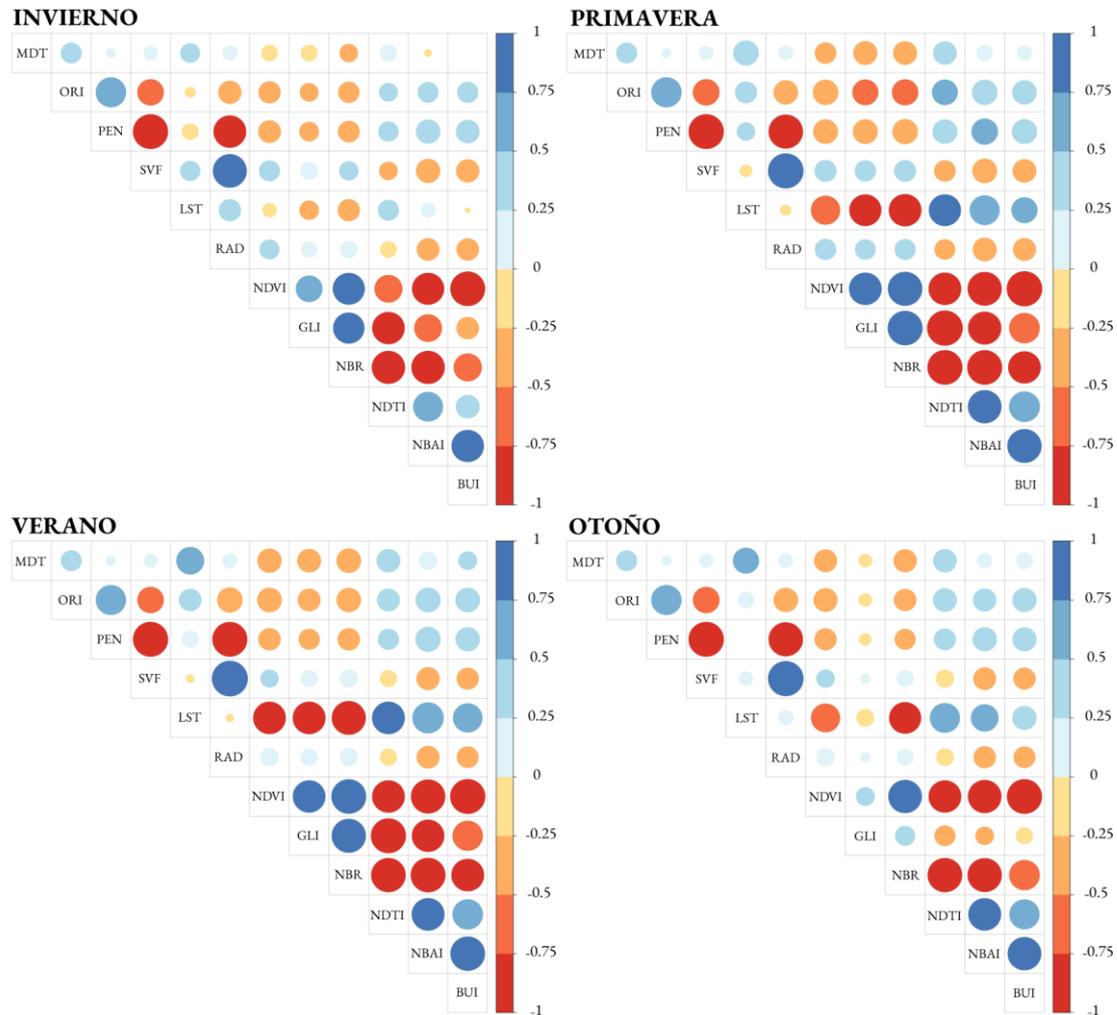


Figura 3.3. Autocorrelación de las covariables. MDT: Modelo Digital del Terreno. ORI: Orientación. PEN: Pendiente. SVF: *Sky View Factor*. LST: Temperatura de superficie. RAD: Radiación. NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*. GLI: *Green Leaf Index*. NBR: *Normalized Burn Ratio*. NDTI: *Normalized Difference Turbidity Index*. NBAI: *Normalized Built-up Area Index*. BUI: *Built-up Index*.

### 3.3.4. Análisis de Componentes Principales (PCA)

Después de seleccionar las variables, se realizó el cálculo del PCA mediante la función *prcomp* en R. Esta función utiliza la descomposición de valores singulares para examinar las covarianzas entre individuos. Se estableció un máximo de 3 componentes principales, ya que el objetivo era reducir la dimensionalidad. Además, con tres componentes, la proporción acumulativa de varianza explicada estaba alrededor del 90 % o superior.

En primer lugar, se han establecido tres componentes o dimensiones debido a los eigenvalores asociados (los eigenvalores son medidas numéricas que representan la cantidad

de varianza explicada por cada componente principal). Al elegir los componentes con eigenvalores superiores a 1, se priorizan aquellos que explican más varianza que una única variable original. Esto significa que estos componentes son más informativos y tienen un impacto significativo en la estructura de los datos. En la Tabla 3.3 se observa que los dos primeros componentes son superiores a 1, con un rango de 1,25 a 3,81. Mientras que el tercer componente es siempre inferior. Además, al considerar los dos primeros componentes con eigenvalores superiores a 1, se captura la mayor cantidad de información relevante en un espacio bidimensional. Al retener estos dos componentes, se tiene una idea clara de cómo se relacionan las observaciones entre sí y cómo se distribuyen en función de las variables originales.

Sin embargo, también se ha tenido en cuenta la varianza acumulada. Al seleccionar tres componentes principales en lugar de solo dos, se amplía la capacidad para explicar y representar la estructura subyacente de los datos. Al asegurar que estos tres componentes acumulen al menos el 90 % de la varianza total de los datos, se retiene una cantidad significativa de información. Menos en el caso de invierno que pese a contar con un valor elevado solo alcanza el 84 %. De este modo el PCA permite tener una representación más completa y precisa del conjunto de datos original.

Estación	Dimensión	Eigenvalue	Varianza %	Varianza acumulada	Desviación estandar
<b>Invierno</b>	1	2,69	44,84	44,84	1,64
	2	1,57	26,09	70,93	1,25
	3	0,78	13,07	83,99	0,89
<b>Primavera</b>	1	3,81	63,51	63,51	1,95
	2	1,26	20,96	84,47	1,12
	3	0,52	8,74	93,21	0,72
<b>Verano</b>	1	3,81	63,4	63,4	1,95
	2	1,25	20,87	84,27	1,12
	3	0,56	9,35	93,62	0,75
<b>Otoño</b>	1	3,49	58,15	58,15	1,87
	2	1,37	22,79	80,94	1,17
	3	0,62	10,31	91,24	0,79

Tabla 3.3. Dimensiones, eigenvalores y varianza de los PCA en las 4 estaciones.

En relación a la composición de los derivados del PCA, la Figura 3.4 representa la contribución de cada covariable a cada uno de los tres componentes principales calculados para cada estación del año. A nivel estacional, no se observan diferencias significativas, aunque en invierno se aprecian algunas disparidades, principalmente relacionadas con el peso de la temperatura de superficie. Destaca en particular la contribución del LST en el componente dos, representando alrededor del 33% en contraste con el promedio del 8 % en el resto del año.

En general, el primer componente está compuesto por variables satelitales que abarcan características de la vegetación, humedad, impermeabilidad del suelo, construcción y temperatura de superficie. Estas variables tienen una contribución promedio del 23,81 %. El NDTI se destaca como la variable con mayor influencia, con un rango que varía entre el 32 % y el 24 % dependiendo de la estación. Aunque está muy cerca de los valores de vegetación (GLI) y de suelo construido (NBAI). Este primer componente actuaría dentro del modelo como un esquema de los usos del suelo o tipos de cubiertas del entorno urbano. Dado que

el primer componente captura la mayor cantidad de información relevante y explica un mayor porcentaje de varianza, en la interpolación, todas estas características urbanas detalladas tendrán un peso significativo.

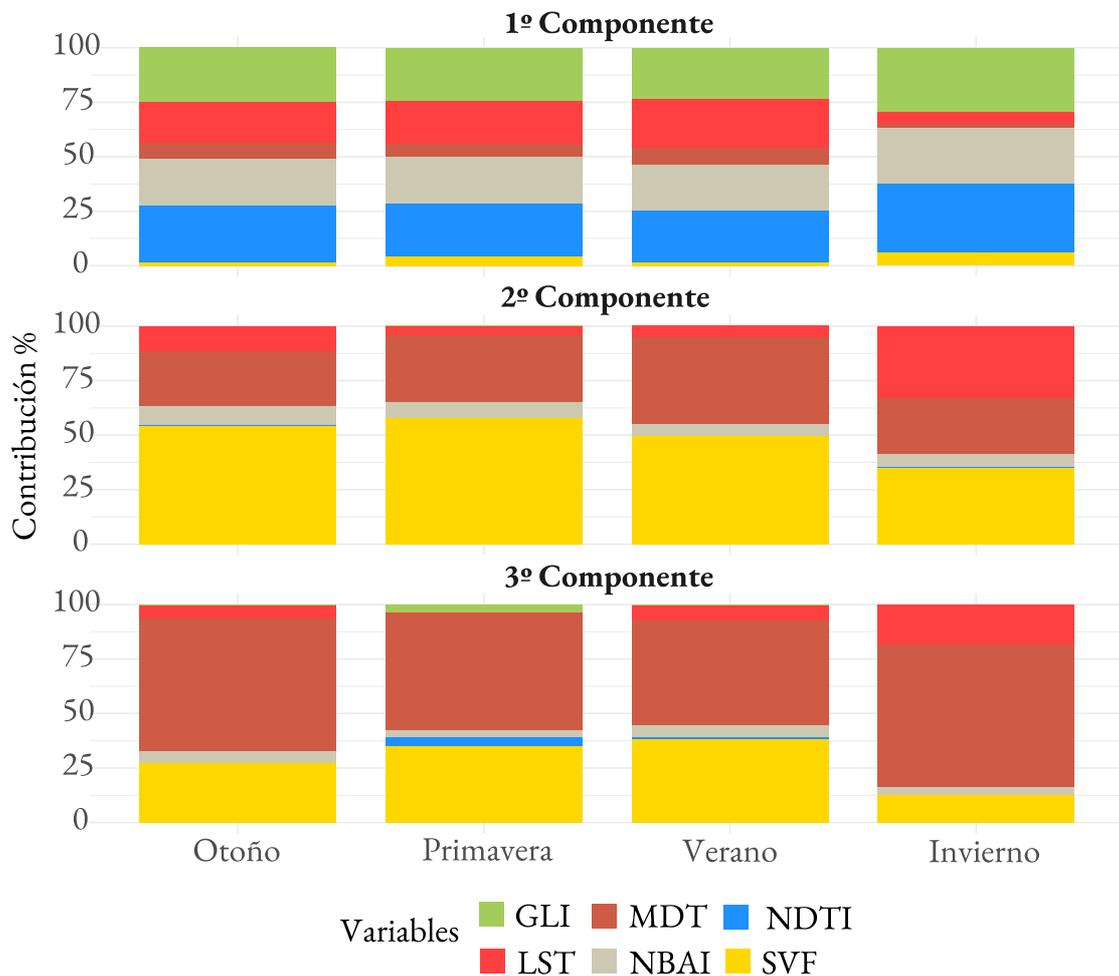


Figura 3.4. Formación de los tres primeros componentes principales para cada estación del año. Mediante colores se especifica la contribución de cada una de las covariables.

Los componentes dos y tres están compuestos principalmente por variables territoriales, especialmente derivadas de modelos de elevación. En el caso del componente dos, la variable predominante es el SVF, con un promedio del 47 %, seguida por el MDT con un 32 %. Esta segunda componente servirá para incluir la importancia de la trama urbana, la morfología de las calles de la ciudad y la presencia de sombras. Por otro lado, en el caso del componente tres, el MDT es la variable más destacada, con un promedio del 45,31 % en comparación con el 41,72 % del SVF. Aunque existe una correlación entre la elevación y la temperatura (perdida 1 °C por  $\approx$  150 m), en una escala detallada como una ciudad que no tenga grandes contrastes de altitud, puede generar errores en la interpolación. Por ejemplo, un punto de medición puede situarse en el centro de la ciudad más cálido y otro punto a la misma altura tiene valores más suaves al estar situado en un parque. Al incluirlo dentro del PCA, se pueden considerar los matices necesarios para mejorar la explicación de la distribución térmica y evitar dichos problemas.

### 3.4. Creación de modelo para la interpolación estacional

Las variables climáticas que serán objeto de interpolación son los promedios estacionales de la temperatura media, máxima y mínima desde 2015 hasta 2022. Para este propósito, se empleará la base de datos horaria resultante del control de calidad. Esta base de datos presenta datos faltantes tras el control de calidad y lagunas causadas por fallos en los sensores o periodos en los que las estaciones aún no estaban operativas. Con el objetivo de integrar en el análisis una base de datos más completa y robusta, se implementó un proceso de relleno de datos que desarrolló Serrano-Notivoli (2017, p. 42). Este método consiste en estimar los datos faltantes basándose en las observaciones cercanas. Para evitar la introducción de inhomogeneidades, se aplica un factor de corrección a la serie predicha. Este coeficiente de corrección se calcula mediante la ratio entre las medias diarias de la variable de cada mes de todos los valores observados y el mismo cálculo para los valores predichos. Estos coeficientes se calculan independientemente para cada mes, evitando sesgos en las variaciones estacionales. Esta metodología se adaptó de escala mensual y diaria a los datos horarios de esta tesis, permitiendo así completar las lagunas de observaciones en la base de datos tanto de temperatura como de humedad relativa y calcular promedios estacionales más completos.

Los datos de temperatura estacional se incorporaron al modelo de interpolación geostatístico *cokriging*, junto con las covariables seleccionadas, con el objetivo de generar una imagen térmica detallada de la ciudad. No obstante, para evaluar la precisión del modelo y verificar la capacidad de las covariables para explicar la distribución de la temperatura, se compararon los resultados de seis combinaciones de modelos de interpolación *cokriging*.

1. Todas las variables descritas en el apartado 3.3 previas a la selección.
2. El resultado de los tres primeros componentes del PCA de todas las variables descritas en el apartado 3.3.
3. Variables habituales en los modelos de interpolación de temperatura del aire urbana: NDVI, NDWI y NDBI.
4. El resultado de los tres primeros componentes del PCA de las variables tradicionales.
5. Variables seleccionadas más adecuadas para la interpolación en el apartado 3.3.: MDT, SVF, GLI, NDTI y NBAI.
6. El resultado de los tres primeros componentes del PCA de las variables seleccionadas en el apartado 3.3.

Los resultados correspondientes a cada estación del año para las variables de temperatura, según el modelo de interpolación, se presentan en Figura 3.5, Figura 3.6, Figura 3.7 y Figura 3.8. Todas estas figuras siguen una estructura similar, donde cada imagen representa una interpolación. La disposición consta de 3 filas y 6 columnas. Cada par de columnas se refiere a una de las variables térmicas (temperatura máxima, media y mínima), y cada fila se asigna a un par de modelos de interpolación. Es importante destacar que, en las interpolaciones, los números impares corresponden a modelos que incluyen covariables antes del análisis de componentes principales, mientras que los números pares representan modelos que incorporan los componentes principales de diversas combinaciones de covariables.

# INVIERNO

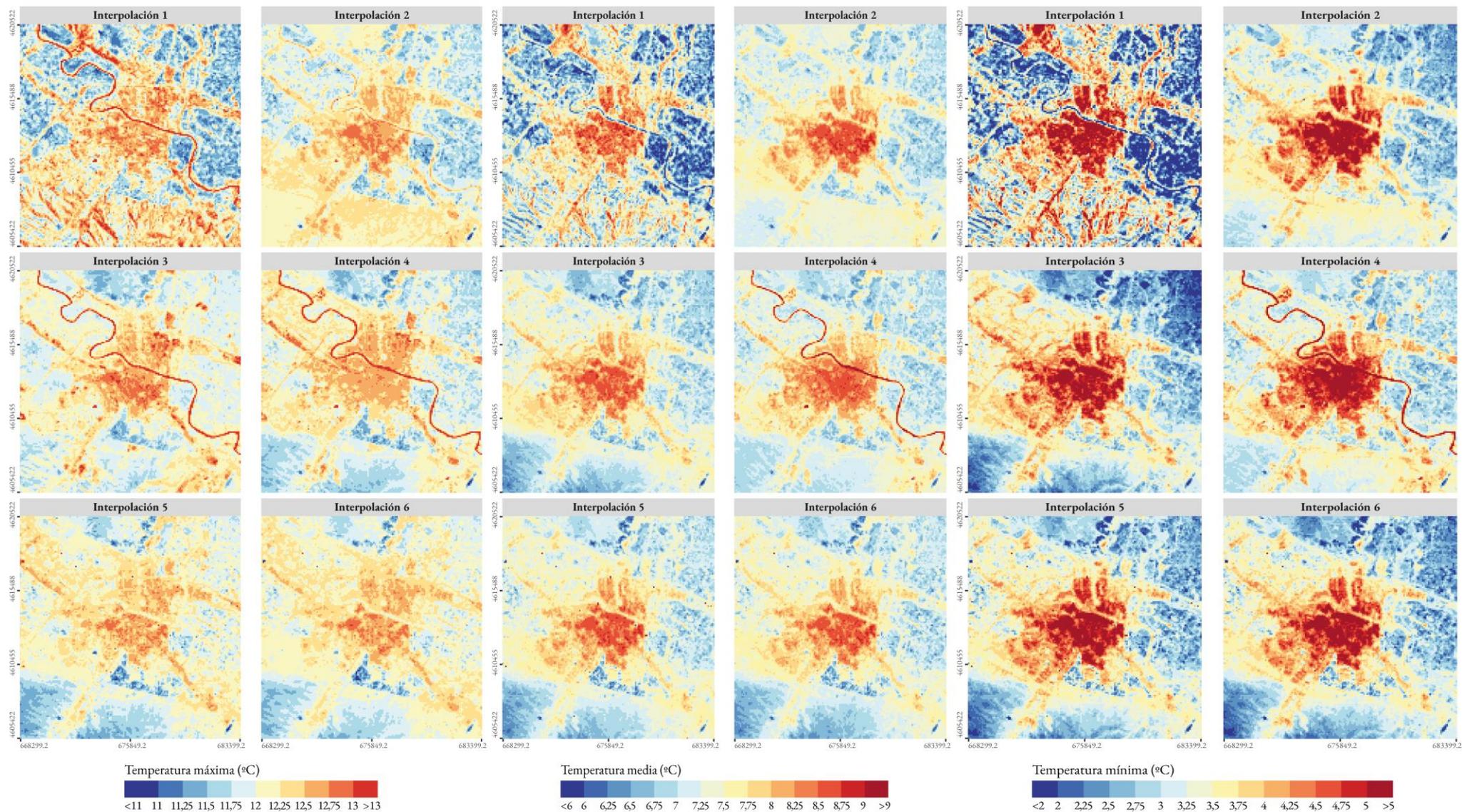


Figura 3.5. Resultados de la interpolación de la temperatura del aire máxima, media y mínima para el promedio de invierno de 2015 a 2022. Cada interpolación esta numerada según las variables que integra el modelo de interpolación: (1) Todas las variables. (2) PCA de todas las variables. (3) Variables tradicionales: NDVI, NDWI y NDBI. (4) PCA de las variables tradicionales. (5) Variables seleccionadas: MDT, SVF, GLI, NDTI y NBAI. (6) PCA de las variables seleccionas

# PRIMAVERA

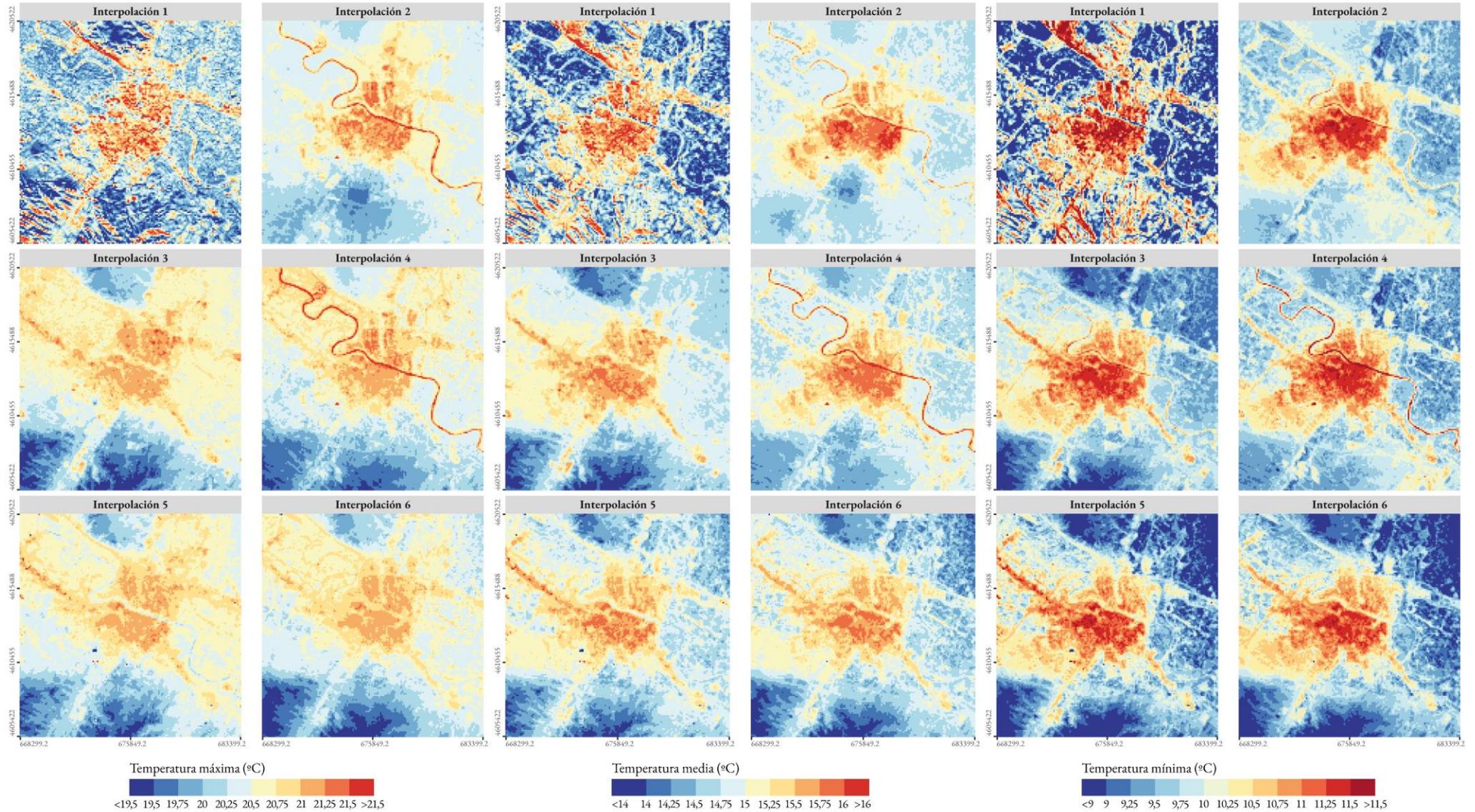


Figura 3.6. Resultados de la interpolación de la temperatura del aire máxima, media y mínima para el promedio de primavera de 2015 a 2022. Cada interpolación esta numerada según las variables que integra el modelo de interpolación: (1) Todas las variables. (2) PCA de todas las variables. (3) Variables tradicionales: NDVI, NDWI y NDBI. (4) PCA de las variables tradicionales. (5) Variables seleccionadas: MDT, SVF, GLI, NDTI y NBAI. (6) PCA de las variables seleccionas.

# VERANO

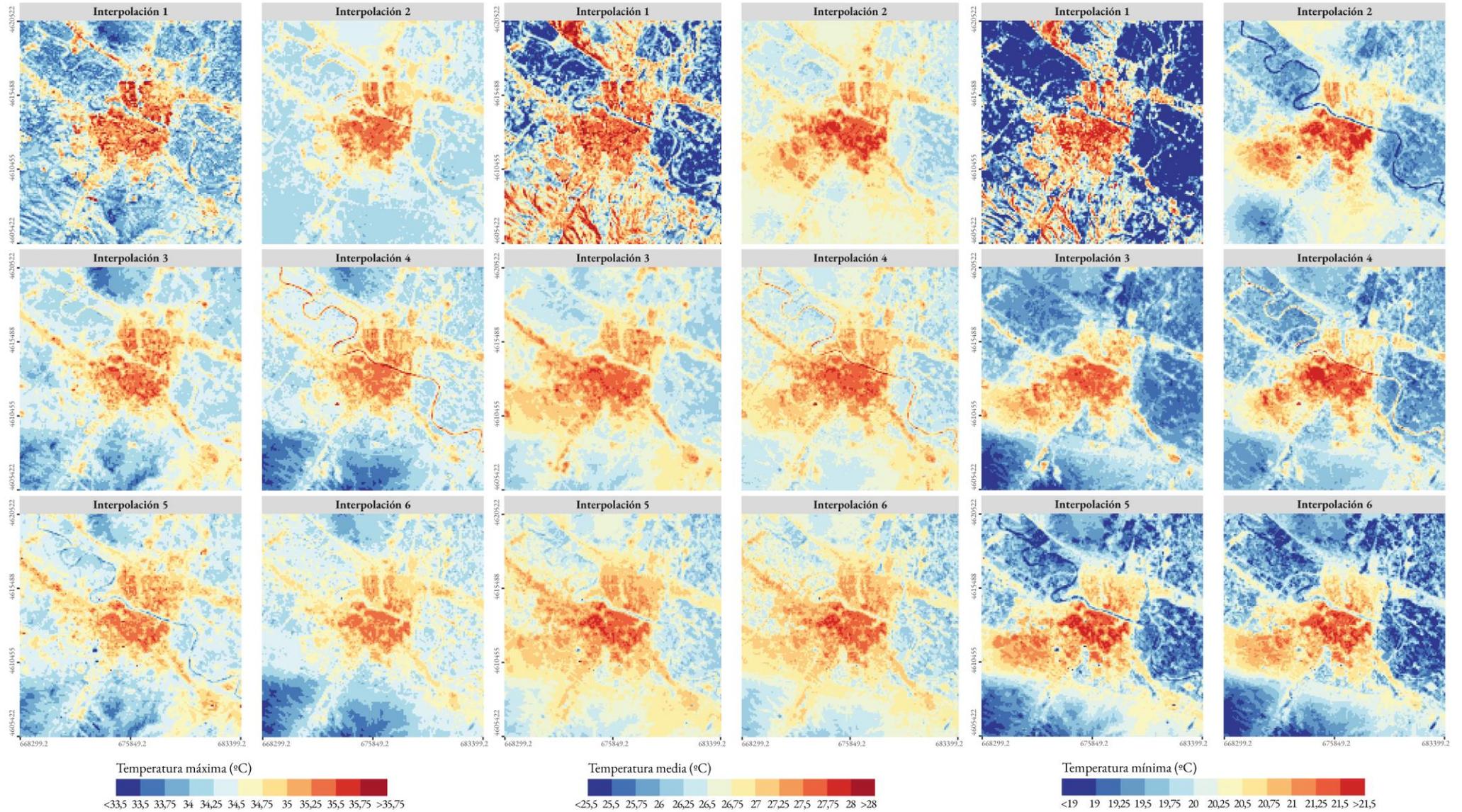


Figura 3.7. Resultados de la interpolación de la temperatura del aire máxima, media y mínima para el promedio de verano de 2015 a 2022. Cada interpolación esta numerada según las variables que integra el modelo de interpolación: (1) Todas las variables. (2) PCA de todas las variables. (3) Variables tradicionales: NDVI, NDWI y NDBI. (4) PCA de las variables tradicionales. (5) Variables seleccionadas: MDT, SVF, GLI, NDTI y NBAI. (6) PCA de las variables seleccionas.

# OTOÑO

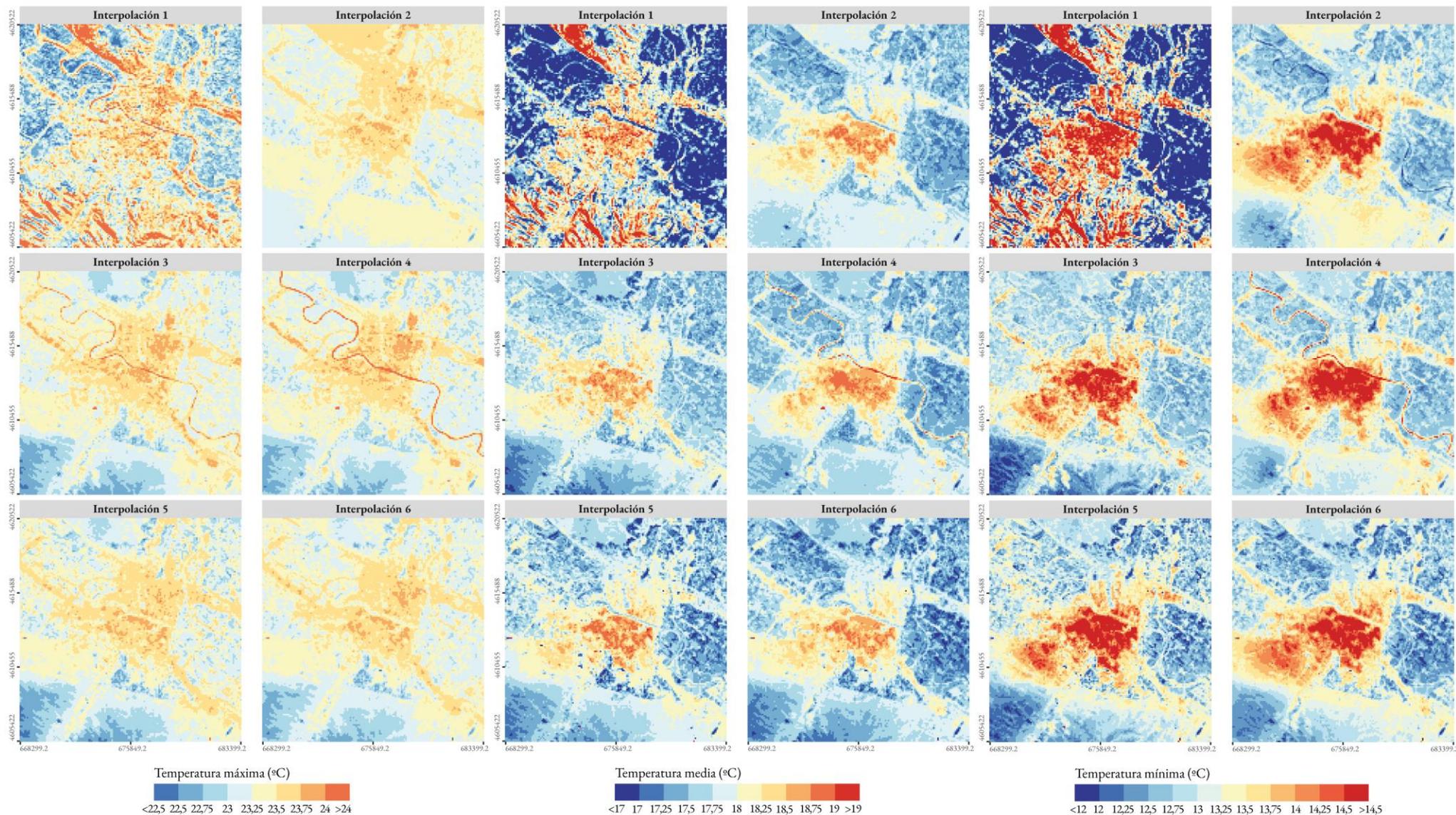


Figura 3.8. Resultados de la interpolación de la temperatura del aire máxima, media y mínima para el promedio de otoño de 2015 a 2022. Cada interpolación esta numerada según las variables que integra el modelo de interpolación: (1) Todas las variables. (2) PCA de todas las variables. (3) Variables tradicionales: NDVI, NDWI y NDBI. (4) PCA de las variables tradicionales. (5) Variables seleccionadas: MDT, SVF, GLI, NDTI y NBAI. (6) PCA de las variables seleccionas.

Al analizar los resultados obtenidos, observamos patrones generales y patrones específicos que varían según el modelo aplicado y las variables seleccionadas. En primer lugar, al examinar simultáneamente todas las interpolaciones de todas las estaciones, emerge un patrón climático urbano clásico: el efecto de isla de calor. Este fenómeno es evidente especialmente al enfocarnos en las interpolaciones de las temperaturas mínimas, la variable vinculada a la temperatura nocturna, cuando el impacto de la isla de calor urbano es más pronunciado. Es destacable que, independientemente de la estación o del modelo de interpolación utilizado, la temperatura mínima resalta el efecto urbano de manera más clara, revelando la ciudad como un área más cálida en comparación con su entorno rural o natural. Al considerar todas las estaciones del año y todas las interpolaciones, se registra un rango promedio global más elevado para la temperatura mínima, alcanzando los 4,38 °C. En contraste, el efecto de la isla de calor se atenúa en las temperaturas máximas, asociadas más con las condiciones de medio día o la tarde. Aquí, el rango de valores promedio se reduce a 2,98 °C, indicando una imagen más homogénea y cálida.

También el análisis de las interpolaciones realizadas, se destaca la coherencia de los resultados obtenidos. Tanto los valores mínimos como máximos de temperatura se sitúan dentro de los límites normales para la región, sin evidenciar extremos significativos que sobresalgan. Cabe resaltar que la variación en el valor promedio o la mediana de temperatura entre las interpolaciones más baja y más alta no supera los 0,3 °C, lo que indica una consistencia notoria. Por ejemplo, en la Tabla 3.4 se puede apreciar que la diferencia entre interpolaciones de temperatura máxima para la estación de invierno es de tan solo 0,03 °C en el caso de la mediana y 0,04 °C en el promedio. Estos resultados reflejan una conformidad general con la climatología normal de la zona de estudio, respaldando la fiabilidad de las combinaciones de covariables empleadas en el proceso de interpolación *cokriging*.

En relación con características generales, también se observa que la variable MDT (Modelo Digital del Terreno) y su conexión con la disminución de las temperaturas desempeñan un papel significativo en las zonas más alejadas de la ciudad en todas las opciones. Este impacto es más pronunciado en las áreas periféricas de la ciudad, donde los cambios en la cobertura del suelo son menos frecuentes y el número de estaciones es notablemente menor, ya que estos lugares no son el enfoque principal de la red. Como resultado, en las zonas ubicadas por encima del escarpe al norte de la ciudad o a medida que nos alejamos de la ciudad hacia el sur y ascendemos por suaves relieves alomados sobre yesos a ambos lados del valle del río Gállego, se registra una disminución de la temperatura en todos los casos.

Al analizar los diferentes modelos de interpolación, especialmente la primera fila que corresponde a interpolaciones construidas con todas las variables previamente identificadas como potencialmente explicativas de la distribución de la temperatura en la ciudad, se destaca que la Interpolación 1 muestra los valores más abruptos en comparación con otros resultados. Este patrón persiste en todas las estaciones del año y para cada variable interpolada. Además, la distribución de esta interpolación presenta características que son difíciles de explicar en el contexto de la climatología urbana. Notablemente, las zonas naturales sin presencia de vegetación, como el escarpe de yesos al norte de la ciudad o los valles típicos de los relieves del sur, muestran los valores máximos de temperatura en esta interpolación, a diferencia de las zonas de cultivo del valle cercanas a las masas de agua, que presentan temperaturas más bajas. Este fenómeno puede atribuirse a un peso significativo de las variables satelitales en el modelo de interpolación, otorgando una importancia desproporcionada a los aspectos relacionados con las cubiertas del suelo sin considerar otros factores urbanos. Los resultados en la Tabla 3.4 confirman que la Interpolación 1 alcanza los valores extremos en la mayoría de las ocasiones. De los 12 momentos interpolados

independientemente del número de modelos interpolados en cada ocasión (3 variables interpoladas por 4 estaciones), la Interpolación 1 alcanzó el mínimo o máximo absoluto en 10 ocasiones, estando en promedio 1,11 °C por encima de la siguiente opción de modelo. Es destacable que, en el caso de la temperatura mínima en invierno, la Interpolación 1 muestra una diferencia de más de 5 °C con respecto a la opción de modelo más cercana (Interpolación 5).

La primera fila proporciona un ejemplo destacado para ilustrar cómo el análisis de componentes principales contribuye significativamente a mejorar la distribución de la temperatura y, por ende, los resultados de la interpolación. En la mayoría de los casos, esta técnica mejora considerablemente la distribución de la temperatura en la ciudad y sus alrededores, evitando valores abruptos como los observados en la Interpolación 1 e incluso superando a otras opciones de interpolación, como la Interpolación 3, que utiliza variables seleccionadas. Sin embargo, surge un desafío en estas interpolaciones mejoradas, particularmente en la segunda interpolación, relacionado con la dificultad para crear componentes principales que sean fácilmente comparables entre sí. Esto se debe a la intervención de múltiples variables en la creación de los componentes principales, lo que resulta en diferencias significativas entre ellos dependiendo de la estación. A diferencia de la Interpolación 6, cuyos componentes, a pesar de algunas diferencias, muestran estructuras más comparables entre sí. Como consecuencia, algunas de las segundas interpolaciones exhiben patrones notoriamente distintos según la estación del año, reflejando la variabilidad en la creación de componentes principales en función de las diferentes variables empleadas. Por ejemplo, en la 2 interpolación en la mayor parte de las ocasiones el río sale como uno de los espacios menos cálidos de la ciudad, pero en el caso de primavera es uno de los espacios más cálidos.

Las interpolaciones de la segunda fila, compuestas por variables 'tradicionales' que incluyen índices espectrales ampliamente utilizados en estudios de teledetección para evaluar la vegetación (NDVI), el agua (NDWI) y las áreas construidas (NDBI), en general, muestran valores normales de temperatura interpolada. Sin embargo, en el caso de la temperatura media, se observan los valores más abruptos durante el verano y otoño. A pesar de esto, no se desvían significativamente del promedio de las demás interpolaciones y en ningún momento alcanzan valores aberrantes que resalten de manera notable. Lo que destaca en estos modelos de interpolación es que, a diferencia de la Interpolación 1, la distribución en la imagen generada no muestra valores tan abruptos ni poco fiables. Sin embargo, hay un aspecto que resalta en exceso: el río Ebro y otras masas de agua, que alcanzan los valores más cálidos de toda la imagen independientemente de las variables de temperatura o la estación. Este corredor excepcionalmente cálido no puede explicarse climáticamente.

Esto se debe a los índices satelitales utilizados en la interpolación, incluso después del análisis de componentes principales. Estos índices identifican y caracterizan eficientemente las superficies a las que están dirigidos, pero no consideran cómo se relacionan otros espacios con la temperatura. En otras palabras, asumimos que la presencia de vegetación se asocia con temperaturas más bajas. Por lo tanto, al utilizar el índice de vegetación, como el NDVI, ampliamente documentado en la bibliografía, esperaríamos obtener temperaturas más bajas donde haya una mayor presencia de vegetación y, por ende, un NDVI más alto. Esto se cumple en la práctica, pero al mismo tiempo, el NDVI alcanza valores negativos en las masas de agua, ya que se calcula utilizando el infrarrojo cercano (NIR), una parte del espectro electromagnético donde el agua y la vegetación presentan firmas completamente diferentes. De esta manera, tenemos dos variables, temperatura del aire y NDVI, fuertemente correlacionadas inversamente, asignando los valores más bajos a las zonas con mayor vegetación y los valores más altos al agua. Este resultado contradice la expectativa común,

según la cual las zonas más húmedas o con presencia de masas de agua deberían refrescar la temperatura del aire, según la literatura especializada. Incluso en algunos casos la interpolación 4 resalta aún más este fenómeno, ya que contará con una mayor representación de NDVI en la composición de los componentes.

Temperatura	Interpolación	Invierno					Primavera						
		Mínimo	Q1	Mediana	Media	Q3	Máximo	Mínimo	Q1	Mediana	Media	Q3	Máximo
MÁXIMA	1	9,28	11,92	12,25	12,24	12,54	16,45	18,54	20,21	20,46	20,51	20,78	23,38
	2	11,22	12,09	12,24	12,23	12,35	12,87	19,45	20,46	20,62	20,65	20,82	22,29
	3	11,08	12,06	12,22	12,22	12,38	15,29	19,12	20,49	20,78	20,67	20,99	21,78
	4	11,39	12,06	12,22	12,22	12,37	12,97	19,11	20,36	20,67	20,62	20,93	22,53
	5	11,19	12,06	12,24	12,21	12,39	13,01	18,94	20,44	20,72	20,64	20,94	21,83
	6	11,28	12,06	12,22	12,20	12,36	12,96	18,90	20,36	20,68	20,59	20,91	21,75
PROMEDIO		10,91	12,04	12,23	12,22	12,40	13,92	19,01	20,39	20,66	20,61	20,90	22,26
MEDIA	1	4,43	7,09	7,58	7,55	8,01	9,44	13,19	14,06	14,51	14,54	14,95	16,82
	2	6,55	7,46	7,64	7,68	7,84	8,94	13,94	14,51	14,65	14,72	14,83	16,24
	3	6,57	7,43	7,66	7,69	7,87	9,52	12,13	14,55	14,76	14,74	14,95	16,52
	4	6,48	7,34	7,59	7,65	7,89	9,11	13,75	14,43	14,66	14,69	14,90	16,11
	5	6,35	7,37	7,62	7,65	7,85	9,03	13,54	14,39	14,65	14,66	14,91	15,92
	6	6,30	7,34	7,60	7,63	7,85	9,02	13,42	14,35	14,60	14,62	14,89	15,84
PROMEDIO		6,11	7,34	7,62	7,64	7,89	9,18	13,33	14,38	14,64	14,66	14,91	16,24
MÍNIMA	1	-3,66	2,89	3,64	3,60	4,30	7,77	5,47	8,29	9,06	9,07	9,79	12,40
	2	2,26	3,50	3,80	3,85	4,09	6,07	8,20	9,01	9,28	9,36	9,59	11,12
	3	2,28	3,43	3,77	3,83	4,10	6,02	7,06	8,90	9,24	9,30	9,64	11,99
	4	2,36	3,49	3,80	3,90	4,17	6,31	8,19	8,94	9,22	9,34	9,65	11,14
	5	1,90	3,26	3,64	3,72	4,06	5,89	7,57	8,78	9,14	9,22	9,63	11,67
	6	1,94	3,31	3,70	3,75	4,06	5,96	7,66	8,70	9,09	9,18	9,62	11,10
PROMEDIO		1,18	3,31	3,72	3,78	4,13	6,34	7,36	8,77	9,17	9,24	9,65	11,57
Temperatura	Interpolación	Verano					Otoño						
		Mínimo	Q1	Mediana	Media	Q3	Máximo	Mínimo	Q1	Mediana	Media	Q3	Máximo
MÁXIMA	1	30,78	31,71	31,97	32,04	32,33	33,72	19,11	21,36	21,61	21,63	21,89	26,01
	2	31,24	31,90	32,03	32,12	32,24	33,62	20,93	21,44	21,57	21,58	21,71	22,21
	3	30,55	31,95	32,18	32,17	32,44	33,40	20,45	21,42	21,64	21,59	21,83	23,01
	4	30,61	31,88	32,17	32,12	32,43	33,40	20,51	21,39	21,60	21,56	21,78	22,36
	5	30,00	31,99	32,26	32,22	32,48	33,65	20,34	21,38	21,61	21,57	21,80	22,55
	6	30,58	31,89	32,15	32,12	32,42	33,33	20,44	21,37	21,56	21,54	21,76	22,28
PROMEDIO		30,63	31,89	32,13	32,13	32,39	33,52	20,30	21,39	21,60	21,58	21,79	23,07
MEDIA	1	23,06	24,31	24,78	24,79	25,23	27,02	14,25	15,47	15,96	15,96	16,41	18,28
	2	23,99	24,60	24,74	24,82	24,95	26,37	15,17	15,85	16,06	16,09	16,25	17,30
	3	22,92	24,65	24,90	24,90	25,15	27,58	13,74	15,83	16,08	16,11	16,35	18,32
	4	23,87	24,58	24,80	24,83	25,07	25,90	14,97	15,79	16,02	16,07	16,32	17,19
	5	23,42	24,65	24,89	24,90	25,15	26,04	14,68	15,84	16,08	16,09	16,32	17,54
	6	23,70	24,52	24,79	24,80	25,07	25,96	14,68	15,67	15,97	15,99	16,29	17,25
PROMEDIO		23,49	24,55	24,82	24,84	25,10	26,48	14,58	15,74	16,03	16,05	16,32	17,65
MÍNIMA	1	15,70	17,44	18,21	18,23	18,96	21,88	8,04	10,42	11,18	11,20	11,92	14,48
	2	17,46	18,14	18,38	18,46	18,65	20,23	10,15	11,14	11,44	11,50	11,72	13,51
	3	16,40	18,04	18,41	18,46	18,84	22,21	9,23	11,17	11,47	11,54	11,81	13,78
	4	17,29	18,07	18,36	18,45	18,74	20,02	10,27	11,18	11,43	11,54	11,79	13,33
	5	16,86	18,02	18,43	18,46	18,84	20,19	9,68	11,12	11,43	11,49	11,75	13,55
	6	16,85	17,84	18,26	18,31	18,72	20,11	9,76	10,93	11,30	11,38	11,75	13,34
PROMEDIO		16,76	17,93	18,34	18,39	18,79	20,77	9,52	10,99	11,38	11,44	11,79	13,66

Tabla 3.4. Resumen estadístico de las variables térmicas estacionales interpoladas en los diferentes modelos de interpolación.

En cuanto a la última fila, que incluye las interpolaciones desarrolladas a partir de las variables seleccionadas y sus componentes, estas muestran imágenes más fieles a lo esperado para la temperatura de una ciudad. Se distinguen claramente los espacios urbanos más construidos en contraste con el entorno periurbano o rural en los márgenes. Se evidencia cómo el efecto de la Isla de Calor Urbano (ICU) se intensifica durante la noche,

especialmente en las temperaturas mínimas. También se observa la importancia de las zonas verdes urbanas, actuando como áreas menos cálidas o 'piscinas de frío', como es el caso del Parque Grande José Antonio Labordeta. Además, se resuelven los problemas que surgían con las masas de agua y su sobrecalentamiento en otros modelos de interpolación. En la Tabla 3.4, los valores de la interpolación 6 no son aberrantes ni tan abruptos como en otras interpolaciones y, en general, exhiben la variabilidad esperada en un entorno urbano tan heterogéneo. Presentan un rango promedio global de 2,78 °C de diferencia entre la temperatura máxima y mínima interpolada.

### 3.5. Validación del modelo para la interpolación estacional

La validación de modelos de interpolación geoestadística es un paso esencial en la investigación, donde la precisión y la confiabilidad de las predicciones son fundamentales. En este contexto, la elección de una estrategia de validación adecuada adquiere una importancia crucial para garantizar la capacidad del modelo para predecir a nuevas ubicaciones no observadas, en este caso temperatura del aire. Dada la naturaleza intrínseca de nuestras bases de datos y el número de sensores a nuestra disposición, hemos optado por implementar el método de *Leave-One-Station-Out-Cross-Validation* (LOOCV). Este enfoque, utilizado en cantidad de estudios (Aryaputera et al., 2015; Meyer et al., 2016; Nikoloudakis et al., 2020), se presenta como la elección más apropiada debido a su exhaustividad y rigurosidad en la evaluación del rendimiento del modelo (Risk & James, 2022), permitiéndonos así obtener resultados más confiables y robustos.

En LOOCV, cada iteración del proceso implica excluir una única estación de muestreo, representando una ubicación geoespacial específica, del conjunto de entrenamiento. Esta estación excluida se utiliza como conjunto de prueba, mientras que las demás estaciones conforman el conjunto de entrenamiento. Este procedimiento se repite para cada estación en el conjunto de datos, lo que garantiza que cada ubicación sea excluida una vez. La ventaja radica en su capacidad para utilizar todos los datos disponibles en cada iteración de entrenamiento, lo que puede proporcionar una evaluación más precisa del rendimiento del modelo. Este enfoque garantiza que la estimación del rendimiento no dependa de particiones específicas de los datos, reduciendo así la variabilidad en los resultados. La implementación de LOOCV en modelos geoespaciales implica ajustar el modelo utilizando las estaciones de entrenamiento, realizar predicciones en la estación excluida y registrar los resultados. Esto se repite para todas las estaciones en el conjunto de datos. Al finalizar las iteraciones, los resultados se promedian para obtener una evaluación global del rendimiento del modelo. Este enfoque riguroso es particularmente útil en el contexto de modelos geoespaciales, donde la variabilidad espacial y la dependencia espacial son consideraciones clave. La exclusión sistemática de cada ubicación garantiza que el modelo se evalúe en diversas configuraciones espaciales, proporcionando una evaluación exhaustiva de su capacidad de generalización.

Aunque este método proporciona una evaluación detallada del rendimiento en modelos, presenta desafíos importantes. En primer lugar, su alto costo computacional especialmente en conjuntos de datos grandes, ya que implica ajustar el modelo repetidamente para cada estación excluida. Esto puede requerir una potencia de cómputo significativa y tiempo, lo que puede no ser práctico en situaciones con recursos limitados. También la sensibilidad a valores atípicos y dependencia de la distribución espacial pueden limitar su aplicabilidad. Además, existe el riesgo de sobreajuste debido a la repetida adaptación a conjuntos de datos más pequeños. Por otro lado, la evaluación se basa en datos existentes y puede no reflejar necesariamente el rendimiento en ubicaciones no muestreadas. Por todo ello, considerar cuidadosamente estos aspectos negativos es crucial al seleccionar la estrategia

de validación cruzada más adecuada, equilibrando la exhaustividad de la evaluación con los recursos computacionales disponibles y los objetivos específicos de la investigación.

El paquete *automap* proporciona una función, *autokrige.cv*, que permite calcular este método de validación y obtener una serie de estadísticos de error fundamentales para evaluar la precisión y el rendimiento de los modelos de interpolación. Entre estos, se encuentra el *mean\_error*, que representa el promedio del error residual derivado de la validación cruzada. Un valor más bajo indica un mejor rendimiento del modelo, reflejando una menor discrepancia entre las predicciones y los valores reales. Otra métrica relevante es el *me\_mean*, que evalúa el error promedio del modelo en relación con la escala de los valores observados. Esta métrica proporciona información sobre la magnitud del error promedio en comparación con la variabilidad intrínseca de los datos, siendo crucial para entender la significación práctica del error. El *MSE (Mean Squared Error)* cuantifica el promedio de los errores cuadráticos entre las predicciones y los valores reales, buscando minimizar las diferencias cuadráticas. Por otro lado, el *MSNE (Mean Squared Normalized Error)* normaliza el *MSE* en relación con la desviación estándar de los valores reales, ofreciendo una medida de cuán cerca están las predicciones del modelo de los valores observados, considerando la variabilidad de los datos. La métrica *cor\_obspred* evalúa la correlación entre los valores observados y los predichos por el modelo. Idealmente, se busca una correlación cercana a 1, indicando un rendimiento óptimo en la capacidad del modelo para predecir con precisión los valores reales. En cuanto a *cor\_predres*, mide la correlación entre las predicciones del modelo y los errores residuales. La búsqueda de una correlación cercana a 0 sugiere que las predicciones no están sesgadas por los errores pasados, mostrando la imparcialidad del modelo en sus predicciones.

El *RMSE (Root Mean Squared Error)*, que representa la raíz cuadrada del promedio de los errores cuadráticos, es una métrica valiosa cuyo uso es muy extendido al proporcionar una interpretación en la misma escala que los datos originales y penalizar los errores grandes. Para evaluar la variación de los errores residuales en relación con la variación de los valores observados, se emplea la métrica *RMSE\_sd*. Esta métrica ofrece información sobre cómo la variabilidad de los errores se compara con la variabilidad natural de los datos observados. Además, se utiliza el *URMSE (Unbiased Root Mean Squared Error)*, que se centra en evaluar la calidad de los residuos del modelo, esperando que no presenten sesgo sistemático y tengan una dispersión baja. Finalmente, la métrica *iqr (Interquartile Range of the Residuals)* proporciona información sobre la dispersión de los residuos en el rango intermedio del 50% de los datos, siendo menos sensible a valores atípicos.

Estas métricas, en conjunto, ofrecen una evaluación integral de la capacidad predictiva y la calidad del modelo de interpolación en diferentes aspectos, permitiendo una comparación profunda de su desempeño y precisión. Los resultados obtenidos de la validación cruzada se sintetizan en la Tabla 3.5 donde se pueden observar el resultado de cada uno de los estadísticos de error para cada una de las interpolaciones de cada variable térmica para cada periodo estacional.

Si iniciamos el análisis de la validación a partir de los resultados obtenidos en la métrica del *RMSE*, podemos observar que la interpolación 6, que incorpora seis componentes principales de variables seleccionadas, se destaca como el modelo con los valores más bajos, presentando un promedio de 0,3 °C. Aunque presenta oscilaciones en un rango máximo de 0,41 °C en las temperaturas mínimas de verano y un valor mínimo de 0,17 °C en las temperaturas medias de invierno. Al contrastar estos datos de error con otros modelos, es importante señalar que, en 9 de las 12 combinaciones de interpolación, el modelo 6 exhibe el valor más bajo. Considerando las peculiaridades del *RMSE*, se evidencia que la interpolación 6 no presenta valores atípicos destacables ni errores significativos, lo que

permite afirmar que se trata de la interpolación con las predicciones de menor error. Este hecho resalta la robustez y la precisión del modelo en sus estimaciones, respaldando su eficacia en comparación con otras alternativas.

Estadísticos de error	Temperatura máxima						Temperatura media						Temperatura mínima							
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		
INVIERNO	MEAN ERROR	-0,03	0,0005	0,001	-0,004	0,01	-0,002	0,02	-0,01	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	-0,019	0,031	-0,024	-0,040	-0,038	-0,046	-0,027
	ME	-0,003	0,00004	0,0001	-0,0003	0,001	-0,0001	0,003	-0,002	-0,003	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
	MAE	0,23	0,22	0,19	0,18	0,22	0,19	0,22	0,15	0,15	0,14	0,17	0,13	0,23	0,21	0,29	0,31	0,27	0,22	0,22
	MSE	0,08	0,08	0,05	0,05	0,07	0,05	0,07	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,08	0,08	0,15	0,14	0,11	0,08	0,08
	MSNE	1,37	1,23	1,23	1,01	1,01	0,91	1,87	1,22	1,21	0,68	1,28	1,08	2,34	1,59	1,66	1,29	1,46	1,20	1,20
	COR OBSPRED	0,60	0,51	0,68	0,68	0,59	0,68	0,81	0,90	0,88	0,91	0,87	0,91	0,90	0,89	0,79	0,79	0,84	0,89	0,89
	COR PREDRES	-0,43	-0,30	-0,27	-0,15	-0,35	-0,16	-0,43	-0,02	0,00	0,06	-0,05	0,03	-0,35	-0,02	-0,19	-0,11	-0,10	0,01	0,01
	RMSE	0,274	0,277	0,233	0,228	0,267	0,229	0,27	0,18	0,20	0,175	0,21	0,17	0,2864	0,2856	0,383	0,377	0,34	0,27	0,27
	RMSE_sd	0,87	0,88	0,74	0,72	0,84	0,73	0,64	0,43	0,46	0,41	0,48	0,40	0,46	0,46	0,61	0,60	0,54	0,44	0,44
	URMSE	0,27	0,28	0,23	0,23	0,27	0,23	0,27	0,18	0,19	0,17	0,20	0,17	0,28	0,28	0,38	0,38	0,33	0,27	0,27
IQR	0,47	0,32	0,31	0,39	0,29	0,29	0,31	0,19	0,29	0,19	0,29	0,16	0,44	0,31	0,44	0,55	0,45	0,36	0,36	
PRIMAVERA	MEAN ERROR	-0,03	-0,004	-0,03	-0,01	-0,06	-0,01	0,01	-0,02	-0,03	-0,03	-0,05	-0,03	0,04	-0,03	-0,02	-0,05	-0,07	-0,04	-0,04
	ME	-0,001	-0,0002	-0,001	-0,0005	-0,003	-0,0005	0,0004	-0,001	-0,002	-0,002	-0,003	-0,002	0,004	-0,003	-0,002	-0,005	-0,007	-0,004	-0,004
	MAE	0,34	0,24	0,27	0,25	0,29	0,22	0,29	0,20	0,21	0,21	0,21	0,18	0,37	0,35	0,34	0,34	0,32	0,28	0,28
	MSE	0,18	0,10	0,10	0,10	0,14	0,08	0,15	0,07	0,06	0,06	0,07	0,05	0,27	0,17	0,19	0,16	0,17	0,13	0,13
	MSNE	1,74	1,02	1,31	1,27	1,58	1,27	1,97	1,27	1,43	1,11	1,41	1,37	2,62	2,43	2,13	1,43	1,65	1,49	1,49
	COR OBSPRED	0,53	0,69	0,71	0,70	0,61	0,77	0,69	0,78	0,80	0,79	0,78	0,83	0,77	0,73	0,68	0,72	0,71	0,78	0,78
	COR PREDRES	-0,46	-0,02	-0,19	-0,20	-0,28	-0,16	-0,63	-0,07	-0,09	-0,02	-0,04	-0,04	-0,71	-0,23	-0,21	-0,11	-0,11	-0,04	-0,04
	RMSE	0,42	0,318	0,320	0,323	0,37	0,29	0,38	0,259	0,247	0,255	0,261	0,23	0,52	0,407	0,43	0,405	0,412	0,36	0,36
	RMSE_sd	0,93	0,70	0,71	0,71	0,82	0,64	0,91	0,62	0,59	0,61	0,62	0,55	0,88	0,69	0,74	0,69	0,70	0,61	0,61
	URMSE	0,42	0,32	0,32	0,32	0,36	0,29	0,38	0,26	0,24	0,25	0,26	0,23	0,52	0,41	0,43	0,40	0,41	0,36	0,36
IQR	0,58	0,32	0,31	0,37	0,49	0,32	0,40	0,31	0,35	0,29	0,30	0,30	0,53	0,63	0,37	0,55	0,41	0,38	0,38	
VERANO	MEAN ERROR	-0,07	0,01	-0,02	-0,02	-0,05	-0,01	-0,07	-0,01	-0,03	-0,03	-0,07	-0,02	-0,03	-0,02	-0,07	-0,05	-0,09	-0,04	-0,04
	ME	-0,002	0,0002	-0,001	-0,001	-0,002	-0,0003	-0,003	-0,0004	-0,001	-0,001	-0,003	-0,001	-0,002	-0,001	-0,003	-0,003	-0,005	-0,002	-0,002
	MAE	0,60	0,34	0,39	0,33	0,41	0,32	0,33	0,24	0,27	0,26	0,31	0,24	0,39	0,39	0,38	0,39	0,45	0,33	0,33
	MSE	0,50	0,18	0,22	0,17	0,27	0,16	0,19	0,10	0,10	0,11	0,16	0,09	0,21	0,20	0,24	0,21	0,31	0,17	0,17
	MSNE	1,64	1,07	1,15	0,96	1,39	0,97	1,50	1,40	1,44	1,24	1,81	1,28	1,68	2,33	2,28	1,59	2,82	1,66	1,66
	COR OBSPRED	0,08	0,56	0,52	0,62	0,40	0,63	0,43	0,66	0,67	0,64	0,45	0,68	0,73	0,66	0,59	0,63	0,48	0,71	0,71
	COR PREDRES	-0,68	-0,15	-0,34	-0,21	-0,41	-0,19	-0,48	-0,17	-0,14	-0,15	-0,36	-0,10	-0,50	-0,26	-0,28	-0,16	-0,38	-0,08	-0,08
	RMSE	0,71	0,43	0,47	0,413	0,52	0,406	0,43	0,318	0,313	0,325	0,40	0,307	0,460	0,451	0,49	0,459	0,56	0,41	0,41
	RMSE_sd	1,34	0,82	0,89	0,79	0,99	0,77	1,02	0,75	0,73	0,76	0,95	0,72	0,78	0,76	0,83	0,77	0,94	0,69	0,69
	URMSE	0,70	0,43	0,47	0,41	0,52	0,41	0,43	0,32	0,31	0,32	0,40	0,31	0,46	0,45	0,49	0,46	0,55	0,41	0,41
IQR	1,05	0,50	0,62	0,57	0,62	0,58	0,45	0,39	0,44	0,39	0,51	0,36	0,69	0,68	0,53	0,67	0,59	0,52	0,52	
OTOÑO	MEAN ERROR	-0,07	-0,01	-0,02	-0,01	-0,01	-0,004	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03	-0,03	-0,02	0,01	-0,03	-0,05	-0,06	-0,06	-0,05	-0,05
	ME	-0,003	-0,0003	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0002	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002	-0,002	-0,001	0,001	-0,003	-0,004	-0,005	-0,005	-0,002	-0,002
	MAE	0,41	0,30	0,30	0,25	0,33	0,26	0,26	0,20	0,19	0,20	0,29	0,22	0,30	0,29	0,36	0,33	0,37	0,26	0,26
	MSE	0,26	0,15	0,12	0,09	0,16	0,10	0,12	0,08	0,06	0,06	0,13	0,08	0,13	0,12	0,19	0,18	0,21	0,12	0,12
	MSNE	1,51	1,32	1,12	0,93	1,09	0,89	1,39	1,50	1,16	0,98	1,91	1,70	1,84	2,14	2,10	1,82	2,54	1,75	1,75
	COR OBSPRED	0,06	0,22	0,47	0,59	0,37	0,59	0,69	0,76	0,82	0,80	0,61	0,75	0,86	0,83	0,72	0,74	0,69	0,83	0,83
	COR PREDRES	-0,68	-0,35	-0,35	-0,18	-0,49	-0,21	-0,43	-0,12	0,00	0,01	-0,30	-0,08	-0,47	-0,11	-0,18	-0,16	-0,24	-0,03	-0,03
	RMSE	0,51	0,39	0,35	0,307	0,40	0,310	0,34	0,276	0,242	0,254	0,35	0,283	0,356	0,351	0,43	0,42	0,46	0,348	0,348
	RMSE_sd	1,33	1,02	0,92	0,80	1,04	0,81	0,79	0,64	0,56	0,58	0,82	0,65	0,56	0,56	0,69	0,67	0,73	0,55	0,55
	URMSE	0,51	0,39	0,35	0,31	0,40	0,31	0,34	0,28	0,24	0,25	0,35	0,28	0,36	0,35	0,43	0,42	0,46	0,34	0,34
IQR	0,55	0,52	0,60	0,43	0,56	0,45	0,40	0,25	0,20	0,28	0,52	0,31	0,66	0,53	0,67	0,57	0,67	0,36	0,36	

Tabla 3.5. Estadísticos de error derivados del método de validación cruzada. Cada una de las columnas representa un modelo de interpolación de los 6 calculados para cada una de las variables de temperatura. Y en cada una de las filas recoge el valor de un estadístico de error para cada estación del año. Aparecen coloreados los valores de RMSE en color rojo el valor máximo y en verde el valor mínimo para cada variable interpolada en cada estación del año.

Adicionalmente, cabe destacar cómo la aplicación de la técnica de PCA contribuye a la disminución del error RMSE, mientras que la selección de variables también conlleva a una notable reducción de dicho error. En la mayoría de los casos, los modelos, tras la implementación del PCA, experimentan una mejora que se traduce en una disminución promedio del error de 0,06 °C. Este efecto se intensifica a 0,08 °C en las instancias de los modelos pareados 1-2 y 5-6. En contraste, en el caso del modelo 3-4, la reducción es más moderada, situándose en 0,01 °C. Es relevante subrayar que la selección de variables también desempeña un papel crucial en la reducción del error de predicción, observándose una disminución promedio de 0,07 °C al comparar los resultados de los modelos 3 y 5 con el modelo inicial (1), que incorpora todas las variables sin ningún proceso de selección. Este fenómeno subraya la importancia de estrategias como el PCA y la selección de variables en

la mejora general de la precisión de los modelos, proporcionando una perspectiva más detallada sobre su eficacia y robustez.

Al analizar los resultados del RMSE estacionalmente (Figura 3.9), se evidencia una tendencia donde el error es significativamente menor para todos los modelos y variables durante la temporada invernal, mientras que se acentúa en el verano donde alcanza su valor más elevado en la interpolación de la temperatura máxima. De este modo, todos los modelos de interpolación trabajan mejor con temperaturas bajas que con las elevadas, Donde temperaturas menos abruptas como las que se alcanzan en primavera u otoño cuentan con valores de error medios. Sin embargo, este patrón se manifiesta de manera más notable al predecir los valores de la temperatura media en contraste con la temperatura mínima con valores de error más elevados. La discrepancia podría atribuirse a la naturaleza de la temperatura mínima, la cual está más estrechamente vinculada a las condiciones nocturnas y a la ICU. En este contexto, durante la noche, se observa una mayor disparidad entre las observaciones del centro de la ciudad y su entorno, presentando magnitudes más divergentes. Esta variabilidad podría complicar la predicción de la temperatura mínima, resultando en un mayor error en los modelos. En cambio, la temperatura media, al abarcar un rango más amplio de condiciones climáticas, puede ser predicha con mayor precisión que otras variables más extremas como la temperatura máxima o mínima. Este fenómeno destaca la importancia de considerar las particularidades estacionales y las características específicas de las variables al evaluar la eficacia de los modelos de predicción.

En relación al RMSE, si dividimos este valor por la desviación típica de los valores observados proporciona un indicador adicional,  $RMSE_{sd}$ , que puede ser valioso para evaluar la significancia de los residuos del modelo en comparación con la variabilidad intrínseca de los datos. Una baja relación sugiere que los residuos son relativamente pequeños en comparación con la variación natural de los datos, indicando un buen ajuste del modelo. Por el contrario, una relación alta podría señalar que los residuos son considerablemente grandes en comparación con la variación natural de los datos, indicando posibles problemas en la calidad del ajuste del modelo. Los resultados obtenidos refuerzan las tendencias ya observadas en el indicador anterior, destacando que los valores de verano, en promedio, muestran un ajuste menos preciso de los modelos en comparación con los de invierno, con una diferencia promedio de 0,26 entre ambas estaciones. Además, el modelo 6 exhibe los valores más bajos en la mayoría de las combinaciones de interpolación, variable y estación, con un promedio de 0,63. Es relevante señalar que los modelos que emplean análisis de componentes principales también mejoran el ajuste a la variabilidad intrínseca de los datos, reduciendo en todas las ocasiones el valor de este estadístico. Por ejemplo, el modelo 1, que utiliza todas las variables directas, tiene un valor promedio de 0,88 en este indicador. En comparación, el modelo 2, que aglutina estas variables en tres componentes principales, reduce significativamente este valor promedio a 0,69. Esto sugiere que la técnica de análisis de componentes principales contribuye a mejorar la capacidad del modelo para ajustarse a la variabilidad inherente de los datos, lo que puede resultar en predicciones más precisas y consistentes.

El análisis del URMSE proporciona un estadístico calculado a través del RMSE, pero ajustado restando el promedio de los residuales elevados al cuadrado. Esta medida ofrece una evaluación más justa y precisa de la calidad del ajuste de los modelos. Como se ha mencionado, los valores obtenidos son muy similares a las tendencias expuestas en los estadísticos anteriores, siendo en promedio los modelos más ajustados durante las estaciones invernales (0,25) frente a las estivales (0,43), y particularmente destacando el modelo 6 como el que ofrece los mejores resultados (0,3). Además, las variables de temperatura media son las que mejor se ajustan en promedio (0,27). Al analizar datos específicos, aunque el modelo

6 es consistentemente el que mejor se ajusta en la mayoría de las ocasiones, en el caso de las combinaciones otoñales, no siempre es el valor más bajo. El ajuste más óptimo se obtiene con un valor de 0,16 en la temperatura media de invierno utilizando el modelo 6. Estos resultados confirman la capacidad del modelo 6 para proporcionar predicciones más precisas y ajustadas en comparación con otras combinaciones de interpolación, variables y estaciones.

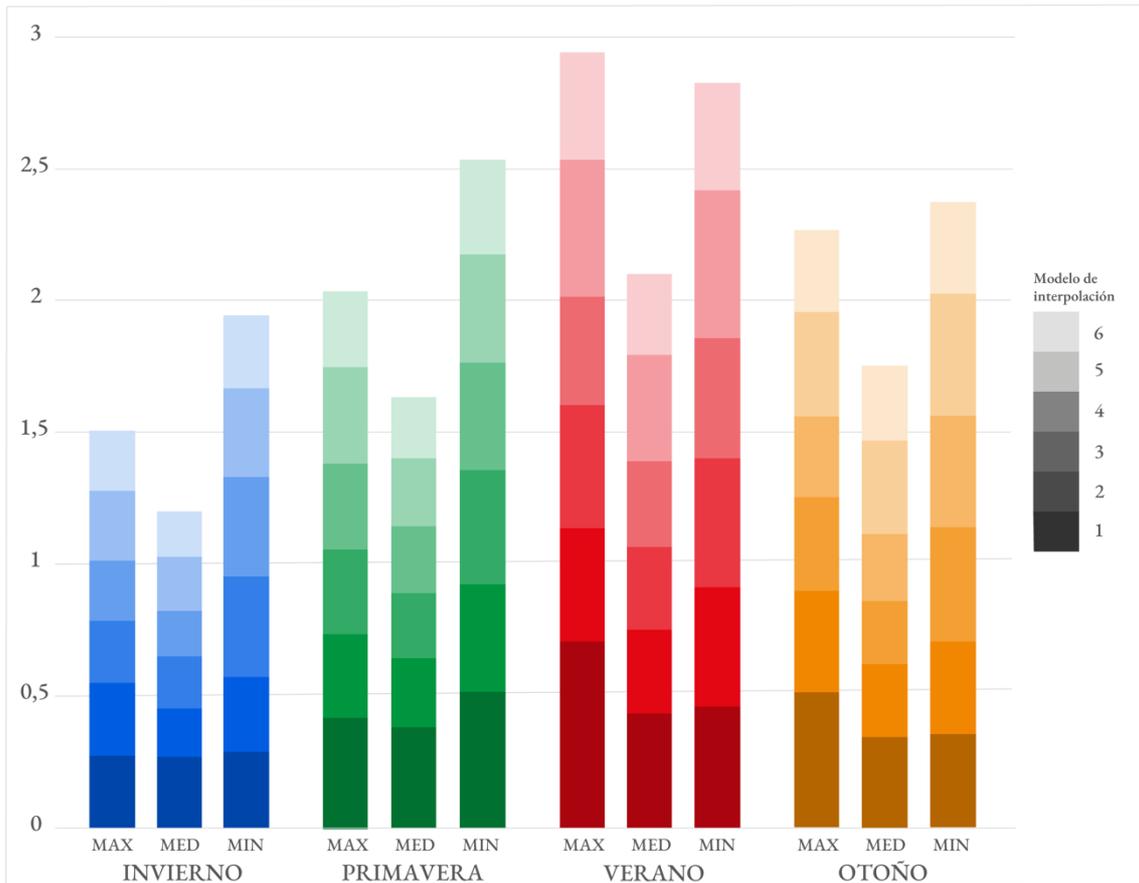


Figura 3.9. Gráfico de columnas apiladas con los valores de RMSE para cada modelo de interpolación según variable interpolada (temperatura máxima, media y mínima) y estación del año (color).

En relación a otras métricas, como el error medio (mean\_error), los valores obtenidos revelan un sesgo bajo en todos los modelos, con cifras cercanas a 0 °C y oscilando en valores absolutos entre 0,0004 °C y 0,08 °C. Esto resulta en un promedio de todas las combinaciones de interpolación de -0,02 °C, indicando que, en promedio, las predicciones tienden a subestimar los valores reales. Este sesgo negativo se manifiesta de manera consistente en todas las estaciones del año, siendo menor en invierno (-0,01 °C) y mayor en otoño (-0,04 °C). Al examinar el sesgo promedio de cada variable térmica, se observa que este sesgo negativo es menos pronunciado en el caso de las temperaturas máximas, con un valor de -0,02 °C. Es destacable señalar que al ordenar en valores absolutos el error promedio de las 10 interpolaciones con los valores más bajos, 8 de ellas corresponden a temperaturas máximas. Al analizar los valores promedio por modelo de interpolación, se verifica que el sesgo negativo es constante en todos ellos, alcanzando el valor más bajo en el modelo 2 con un -0,01 °C. Sin embargo, al comparar los resultados entre modelos según la combinación de variables y estaciones sin realizar promedios, nuevamente se destaca que los modelos 2 y 6 suelen obtener los mejores resultados de error promedio. Es crucial tener en cuenta que, al analizar el error medio, este no proporciona información sobre la dispersión de los errores

individuales. Un modelo con un error medio bajo aún podría presentar errores significativos para puntos específicos.

Cuando dividimos el error promedio por el promedio de los datos observados, en este caso, las observaciones de temperatura, obtenemos un estadístico de error (ME) que nos brinda una indicación sobre la magnitud del error medio en relación con la escala de los valores observados. En este caso un valor cercano a 0 es más deseable, ya que indica mayor confianza en el modelo. Los resultados obtenidos en este indicador siguen siendo bajos en su conjunto, con un promedio absoluto de 0,002. El rango absoluto abarca desde un valor máximo de 0,01 en el modelo de interpolación 5 de la temperatura mínima de invierno hasta  $3,88 \cdot 10^5$  registrado por el modelo de interpolación 2 de la temperatura máxima de invierno. Este conjunto de valores bajos, en su mayoría, indica que los modelos de interpolación no tienen dificultades para capturar la variabilidad de los datos interpolados. Sin embargo, al comparar los seis modelos utilizados para cada combinación de variable y estación, nuevamente destacan con valores más bajos el modelo 2, principalmente, y el modelo 6. Si observamos los valores por variable, la temperatura máxima es la variable que los modelos recogen mejor en términos de promedio absoluto. Esta tendencia se mantiene en el caso estacional, destacándose en verano. Cabe destacar que, en todos los casos, los valores promedios son reducidos y se sitúan en torno a la milésima, indicando una habilidad generalizada de los modelos para capturar la variabilidad de los datos interpolados.

Continuando con el análisis de validación de los modelos, tras examinar el error medio, nos adentramos en el error absoluto medio o *Mean Absolute Error* (MAE), que proporciona los errores absolutos de todas las observaciones. Comparado con el error medio, el MAE nos permite ponderar en la misma escala todos los errores, resultando especialmente útil en casos donde los datos de entrenamiento presentan valores atípicos, ya que no los penaliza. En contraste con otros índices o estadísticos de error, el MAE presenta un rango de valores ligeramente mayor, oscilando entre 0,13 °C en el modelo de interpolación 6 para la temperatura media en invierno y 0,59 °C en el modelo de interpolación 1 para la temperatura máxima en verano. El promedio total es de 0,28 °C, variando según la estación del año, siendo más elevado en verano con 0,35 °C y menor en invierno con 0,21 °C. Estas diferencias también se observan al considerar variables, siendo la temperatura media la que se acerca más a 0 y, por lo tanto, muestra una mejor validación, con un promedio de 0,22 °C frente al 0,30 °C de las temperaturas máximas o el 0,32 °C de las mínimas. Esta tendencia general, donde las variables más extremas son más difíciles de predecir que las medias, se refleja en varios otros índices. En cuanto a los diferentes modelos, el modelo de interpolación 6 muestra consistentemente el menor error en la mayoría de las combinaciones, siendo el más cercano a 0 en 8 de las 12 combinaciones de interpolación. Este modelo obtiene los valores más bajos en todas las variables para las estaciones de primavera y verano. Además, el modelo 4 muestra valores bajos en las temperaturas máximas, mientras que el modelo 2 destaca en primavera y las temperaturas mínimas.

En el caso del error cuadrático medio, en inglés *Mean Squared Error* (MSE), que representa la diferencia al cuadrado entre los valores reales y predichos, se destaca como uno de los índices de error más comunes, ampliamente utilizado en análisis de regresión. A diferencia del MAE, el MSE otorga un mayor peso a los valores atípicos, generando un gradiente más suave para errores pequeños. Dado que los resultados siempre son positivos y varían de 0 a infinito, un valor más cercano a 0 indica un mejor desempeño del modelo. En general, los errores de las interpolaciones oscilan entre un mínimo de 0,03 °C en el modelo de interpolación 6 para la temperatura media de invierno y un valor de 0,49 °C en el modelo de interpolación 1 para la temperatura máxima de verano. Estos extremos son consistentes con el rango observado en el estadístico MAE. Al igual que en el RMSE o el

MAE, el error se acentúa en verano y es menor en invierno, con un promedio de 0,07 °C frente al 0,2 °C estival. También se observa el patrón de que los modelos se ajustan mejor a la temperatura media (0,08 °C) que a las temperaturas extremas (0,14 °C y 0,17 °C). Las diferencias entre modelos resaltan la preponderancia del modelo 6 como exponente de los valores de error mínimos para cada combinación de variable y estación, siendo el valor mínimo en 10 de las 12 ocasiones. Aunque los valores de otoño muestren un rendimiento inferior, no se considera necesariamente malo, ya que, en las ocasiones en las que no ha sido el mínimo, ha sido uno de los tres valores más bajos. Dentro del modelo 6 y comparando entre variables, las temperaturas mínimas presentan un mayor error, aunque sigan siendo los valores más bajos entre todos los modelos. En todas las ocasiones, el valor de verano es el más alto entre todas las estaciones. Otros modelos como el 2, el 4 o el 3 también exhiben valores bajos, y en la mayoría de las ocasiones, los modelos que cuentan con componentes principales muestran mejores valores de error que los modelos con variables directas. Este patrón indica la eficacia de la técnica de componentes principales en la mejora de la precisión de las predicciones.

Como complemento a los últimos estadísticos, consideramos el MSNE (*Mean Squared Normalized Error*) o error cuadrático medio normalizado. Este indicador proporciona el promedio del  $\chi$ -score al cuadrado y registra cómo los modelos de interpolación capturan la variabilidad de los datos interpolados. Un valor más pequeño indica un mejor desempeño, y en este sentido, destaca que la estación de invierno presenta un promedio de 1,31 °C absolutos para todos los modelos, valores más bajos que las estaciones cálidas como primavera o verano, que obtienen una peor valoración con 1,58 °C y 1,57 °C respectivamente. Al considerar las variables de temperatura, se observa que las temperaturas máximas son las que mejor reflejan la variabilidad de los modelos, con un valor de 1,21 °C, en comparación con el 1,91°C de las temperaturas mínimas. Es crucial tener en cuenta una vez más el efecto de la ICU, ya que esta adquiere una mayor representación con las temperaturas mínimas, es decir, las nocturnas. Por lo tanto, estas temperaturas exhiben un mayor contraste entre el centro y la periferia de la ciudad, lo que se traduce en una mayor variabilidad y complejidad de los datos, dificultando su representación por parte de los modelos. Al analizar los modelos, se observa que el modelo 4 es el que obtiene el menor valor en el mayor número de combinaciones, alcanzando esta distinción en 7 ocasiones, lo que sugiere que es el modelo que mejor registra la variabilidad de los datos en sus predicciones. Le sigue el modelo 6, que presenta el valor mínimo en 4 ocasiones y el segundo valor más bajo en la mayoría de las demás combinaciones.

El análisis de la correlación entre los valores observados y predichos (COR OBSPRED) y la correlación entre los valores predichos y los residuales (COR PREDRES) proporciona información valiosa sobre la calidad de los modelos de interpolación. Estas métricas deben interpretarse de manera diferente, ya que en el caso de la relación entre observados y predichos, se espera una correlación cercana a 1 con una fuerte correlación positiva. En cambio, en la correlación entre los valores predichos y los residuales, lo deseable es que sea cercana a 0, ya sea con valores positivos o negativos, para indicar la ausencia de patrones sistemáticos en los errores del modelo.

En el caso de la correlación entre observados y predichos (COR OBSPRED), los valores muestran una correlación más cercana a 1 en los meses de invierno (0,79), siendo significativamente más bajos en verano (0,56). Al desglosar por variables, las temperaturas máximas exhiben la menor correlación (0,53), mientras que las medias (0,74) y las mínimas (0,748) presentan correlaciones más elevadas. Es interesante notar que las interpolaciones de la temperatura máxima en otoño, en promedio de todas las interpolaciones, muestran la correlación más baja con un valor de 0,38, seguidas de las máximas en verano con 0,47. En

contraste, las correlaciones en invierno son más fuertes, especialmente para las medias que alcanzan una correlación de 0,88. En cuanto a los modelos, el modelo 6 destaca al mostrar resultados más cercanos a 1 en un mayor número de combinaciones. Su valor máximo es de 0,91 en la interpolación de la temperatura media de invierno, y su valor mínimo es de 0,58 en las máximas de otoño, que, incluso en este caso, es la segunda mejor cifra de todos los modelos. También se destacan el modelo 4 con valores más elevados en las máximas y el modelo 3 en las medias. Sorprendentemente, el modelo 1 sobresale en las mínimas y es el que muestra valores más cercanos a 1, independientemente de la estación del año.

En cuanto a la correlación entre los valores predichos y los residuales (COR PREDRES), se observan correlaciones muy diferentes dependiendo del modelo. Al analizar el promedio de los resultados obtenidos en cada clase de modelo, se destaca que el modelo 6 presenta una correlación muy baja con los residuales (-0,08), mientras que el modelo 1 tiene una correlación significativamente más baja, llegando a -0,52. Algunos de los promedios utilizados para enmarcar los valores estacionales y por variable son más elevados porque se incluyen modelos con una correlación muy alta, por ejemplo, el modelo 1. Es importante señalar que, en la mayoría de los resultados obtenidos, los coeficientes son negativos, lo que indicaría una sobreestimación de los valores en ciertos rangos. Sin embargo, la correlación positiva de la temperatura media con los modelos 4 y 6, y la correlación positiva en el valor medio de otoño, sugieren que en estas ocasiones los modelos subestiman los valores en ciertos rangos. Al analizar los valores por modelo, la correlación muestra que el modelo 6, seguido del 2 y el 4, exhibe las mejores correlaciones. El modelo 6 se acerca más a 0 en 6 de las 12 combinaciones, mientras que el modelo 2 y 4 lo logran en solo 2 combinaciones. Estas métricas proporcionan una visión detallada de cómo los modelos de interpolación se desempeñan en la relación entre observados y predichos, así como en la relación entre predichos y residuales, lo que puede ayudar a identificar áreas de mejora en la precisión de las predicciones.

Finalmente, analizamos otro indicador para evaluar la variabilidad del error, mediante el cálculo del rango intercuartílico (RIC o IQR por sus siglas en inglés). Esta medida estadística proporciona información sobre la dispersión o variabilidad de un conjunto de datos. En el contexto de la validación de modelos de interpolación, examinar el rango intercuartílico de los residuales puede revelar aspectos importantes sobre la distribución y variación de los errores del modelo. El rango intercuartílico mide la amplitud de la dispersión de los residuales, siendo un IQR grande indicativo de una variabilidad significativa en los residuales, sugiriendo que el modelo puede no estar capturando completamente la variación en los datos observados. En el caso de los modelos de interpolación, el modelo 1 refleja valores más elevados, con un máximo de 1,05 °C en la interpolación estival de la temperatura máxima. Como se observa en la mayoría de las ocasiones, los valores más altos también se encuentran en los modelos 3 y 5, aquellos que no cuentan con componentes principales, lo que indica una variabilidad y dispersión de residuales más pronunciada. Esto se alinea con otros estadísticos que muestran la intensidad del error en modelos sin componentes principales. De manera consistente con otros indicadores, la variabilidad o dispersión del error también es menor en la época invernal y cuando se interpolan temperaturas medias. Los modelos que presentan una dispersión de los residuales menor y, por tanto, son más consistentes, son principalmente el modelo 6. Su rango de IQR oscila entre 0,16 °C en la interpolación de la temperatura media de invierno y un máximo de 0,58 °C en el caso de la temperatura máxima de verano. Los modelos 2 y 4 también obtienen resultados bajos, aunque el modelo 6 presenta valores más bajos, especialmente en las temperaturas mínimas. Estos hallazgos sugieren que el modelo 6 es más robusto y consistente en la captura de la variabilidad de los datos, destacando su desempeño en la reducción de la variabilidad de los errores residuales.

A modo de conclusión, al examinar exhaustivamente los resultados de la validación cruzada para los seis modelos de interpolación, destaca en términos de precisión y consistencia el modelo 6. Este modelo, que incorpora tres componentes principales de variables seleccionadas y exhibe un rendimiento destacado en una variedad de métricas clave. En primer lugar, al considerar el RMSE, una métrica fundamental que cuantifica el promedio de los errores cuadráticos, el modelo 6 se destaca al presentar los valores más bajos en la mayoría de las combinaciones de interpolación, variables y estaciones. Este indicador es crucial para evaluar la discrepancia entre las predicciones y los valores reales, y la consistencia del Modelo 6 en mantener bajos los errores sugiere una robustez notable en sus estimaciones. Además, al desglosar los resultados estacionalmente, se observa que el modelo 6 presenta un rendimiento especialmente fuerte durante la temporada invernal, donde el error es significativamente menor en comparación con otras estaciones. Este patrón indica la capacidad del modelo 6 para manejar temperaturas más bajas de manera más precisa que sus contrapartes.

El análisis del RMSE\_sd, que evalúa la variación de los errores residuales en relación con la variación de los valores observados, refuerza la calidad del modelo 6 al mostrar consistentemente los valores más bajos. Esto indica que los residuos de este modelo son relativamente pequeños en comparación con la variación natural de los datos, lo que se traduce en un ajuste más preciso a la variabilidad intrínseca de los datos.

El URMSE, que se centra en evaluar la calidad de los residuos del modelo, también respalda la elección del modelo 6 al exhibir un ajuste más preciso durante las estaciones invernales y temperaturas medias. La baja dispersión de los residuos sugiere una consistencia notable en las predicciones del modelo 6.

Además, al analizar la correlación entre los valores observados y predichos (COR OBSPRED) y la correlación entre los valores predichos y los residuales (COR PREDRES), el modelo 6 demuestra una fuerte relación positiva con los observados y una baja correlación con los residuales, indicando una capacidad sobresaliente para predecir valores reales sin patrones sistemáticos en los errores.

En resumen, basándome en los resultados proporcionados, el modelo 6 se presenta como la opción más sólida y precisa para la interpolación de las variables térmicas en diferentes estaciones del año. Su capacidad para mantener bajos los errores, su consistencia estacional y su manejo eficiente de la variabilidad de los datos respaldan la elección de este modelo como el más confiable y preciso entre las opciones evaluadas.

### **3.6. Creación de un modelo para la interpolación diaria**

Tras la selección de las variables que mejor describen la distribución de las condiciones térmicas en entornos urbanos, se identificaron los tres primeros componentes principales derivados de los índices: MDT, SVF, GLI, NDTI, NBAI y LST. Estos componentes fueron integrados de manera óptima en el modelo 6 para llevar a cabo una interpolación mediante *cokriging*, siendo el mejor modelo de interpolación como se ha concluido en el apartado anterior. Posteriormente, se procedió a ajustar la escala temporal, optando por una resolución mensual de las variables con el objetivo final de lograr una interpolación diaria.

La elección de calcular estas variables mensuales para un modelo diario se fundamenta en la dificultad práctica de obtener información diaria, semanal o quincenal de cualquiera de las variables involucradas, dada la naturaleza de los datos satelitales. Este desafío aumenta al buscar un equilibrio entre la resolución temporal y espacial del sensor satelital en un entorno

tan específico como es el urbano. Además, consideramos que índices como el GLI, NDTI o NBAI no experimentan variaciones temporales tan notables a escala diaria, especialmente en condiciones atmosféricas estables. De manera análoga, variables como el MDT o el SVF presentan una mayor estabilidad temporal que supera incluso el carácter mensual. En virtud de estos análisis, se concluyó que la información mensual de las variables satelitales sería suficiente para llevar a cabo una interpolación junto con la información térmica, permitiendo así el desarrollo de una interpolación diaria de la temperatura máxima, mínima y media del aire. Este enfoque no solo simplifica la complejidad logística asociada con la obtención de datos diarios, sino que también se alinea con la variabilidad temporal realista de las variables consideradas en el contexto urbano estudiado.

En relación con el ajuste temporal de las variables territoriales, MDT y SVF, se destacó que estas son inherentemente estáticas, ya que la elevación del suelo, por ejemplo, no experimenta variaciones significativas diarias o estacionales, salvo cambios específicos causados por la intervención humana o eventos naturales. Por lo tanto, estas variables se mantuvieron sin alteraciones con respecto al modelo estacional, conservando una resolución espacial de 2 metros y con la fecha de referencia establecida en 2016. No obstante, se mencionó la posibilidad de enriquecer futuros modelos con nuevas coberturas obtenidas mediante vuelos LIDAR actualizados, lo que permitiría incorporar información más actualizada y mejorar la representación del entorno analizado.

En contraste, la adaptación o ajuste para el modelo mensual se centró en las variables satelitales. El proceso de obtención se describió detalladamente en la sección 3.3.1. La única diferencia en este ajuste radicó en la resolución temporal al agregar las imágenes y calcular los índices. Se subrayó que las imágenes obtenidas a través de GEE, mediante el programa *Landsat*, fueron seleccionadas manualmente, evitando máscaras de nubes para prevenir errores, como la presencia de nubes o fallos en el control de calidad de la codificación realizada por los algoritmos de corrección. Este fallo en la codificación de la banda *QA\_PIXEL* provoca que algunos píxeles que no cuentan con presencia de nubes sean categorizados como tal, principalmente el error del bit 1 que identifica la presencia de *dilated cloud*. Como se aprecia en la Figura 3.11b, una imagen donde la presencia de nubes es nula, el uso de una máscara de nubes enmascara píxeles. Estos fallos se han apreciado principalmente en los entornos urbanos y periurbanos y están muy ligados a la presencia de superficies brillantes y claras. El ajuste específico se realizó en el porcentaje de nubes de la imagen, con una selección manual que permitió variar este indicador entre el 0% y el 30%, especialmente en los periodos invernales y otoñales, donde la presencia significativa de nubes y nieblas descartaría muchas imágenes. En la Figura 3.10 se pueden observar algunos ejemplos de imágenes y algunas de las casuísticas que se mencionan sobre la presencia de nubes y nieblas en la zona de estudio. Este enfoque de ajuste del porcentaje de nubes facilitó la incorporación de imágenes que, a pesar de tener nubes, resultaban relevantes para el estudio al no afectar la zona de interés (Figura 3.11a). Una vez completada la selección de todas las imágenes pertinentes, se procedió al cálculo de la mediana mensual para todos los años desde 2015 hasta 2022, generando un total de 96 imágenes por cada variable satelital. Este proceso aseguró una representación mensual robusta y consistente de las variables satelitales en el análisis temporal.

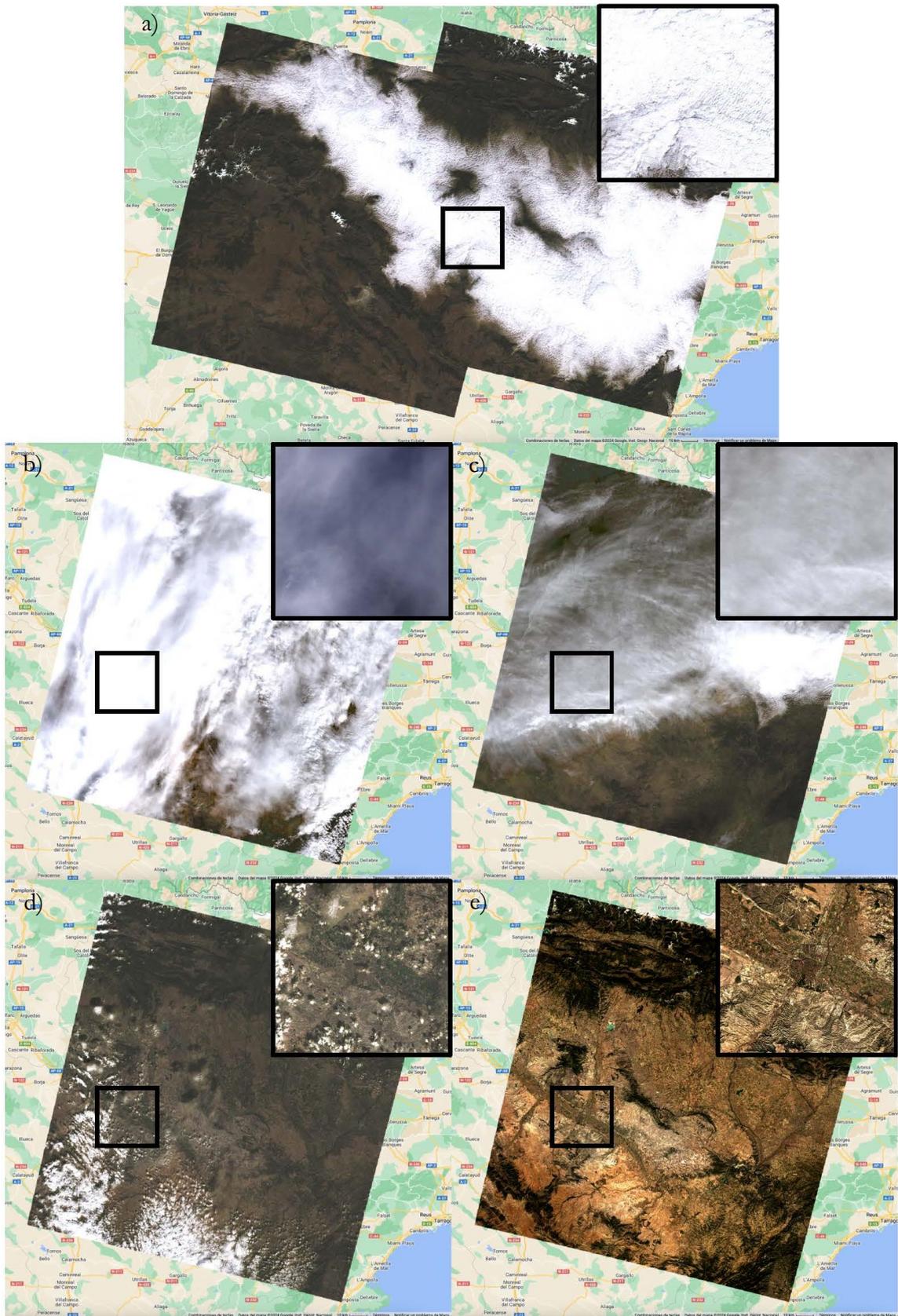


Figura 3.10. Captura de imágenes *Landsat* en *Google Earth Engine*, imagen completa y recorte de Zaragoza. a) Imágenes LC09\_200031\_20211215 y LC08\_199031\_20211216, acumulación de niebla o nubes en el valle del Ebro. b) Imagen LC08\_199031\_20180106, cubierta totalmente por nubes. c) Imagen LC08\_199031\_20160202, nubes poco densas y nieblas. d) Imagen LC08\_199031\_20171002, pequeñas nubes aisladas y su sombra. e) Imagen LC08\_199031\_20171205, sin presencia de nubes.

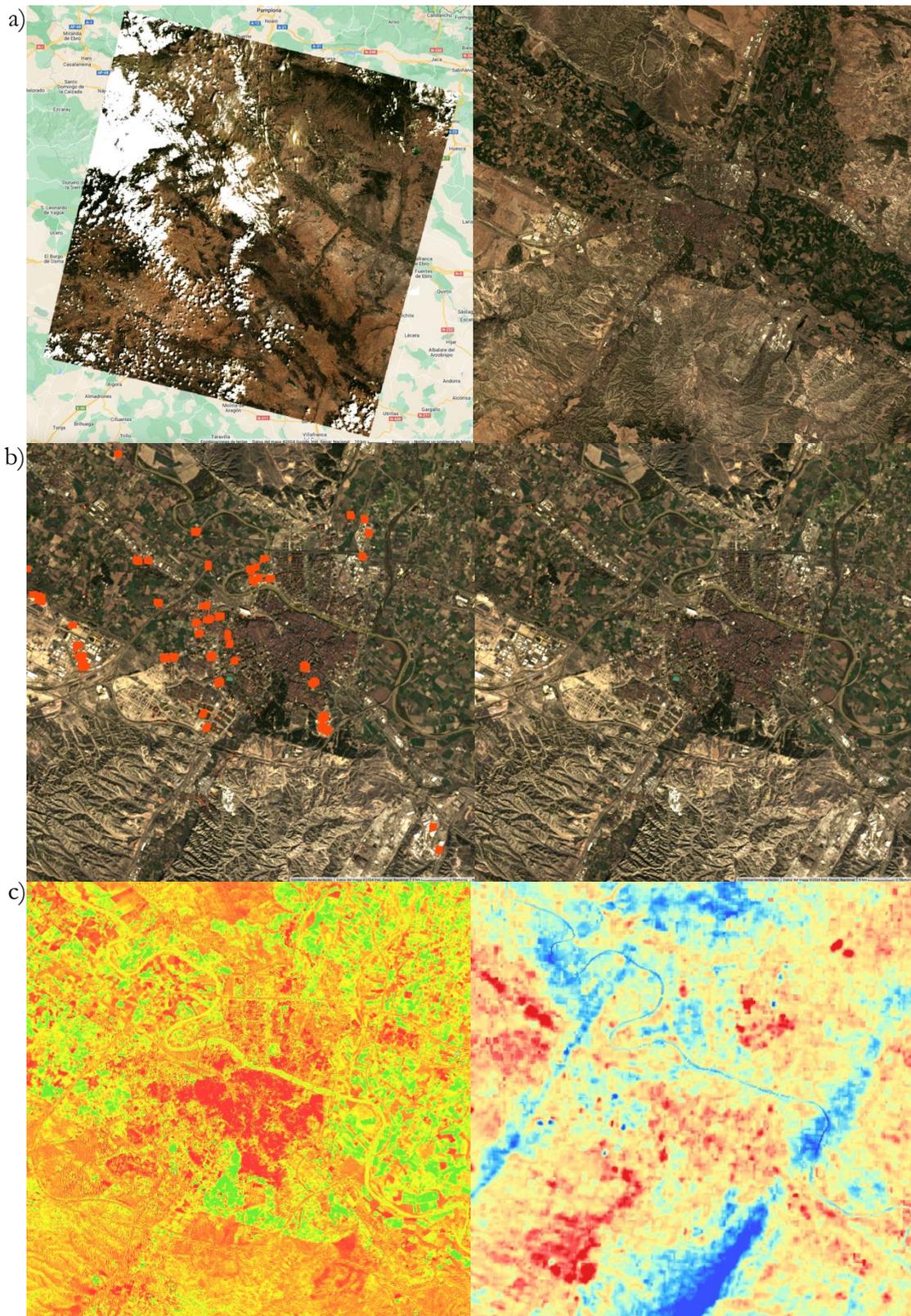


Figura 3.11. Ejemplos de complicaciones y condicionantes en la selección de imágenes para el cálculo de productos mensuales. a) Imagen LC08\_200031\_20180809 completa con presencia de nubes y recorte de la zona de estudio sin nubes. b) Imagen LC08\_199031\_20180802 con pixeles eliminados (rojos) por la mascara de nubes y la misma imagen sin la mascara de nubes. c) Imagen LC08\_199031\_20160117 a partir de la cual se calcula la imagen de GLI y LST.

Es importante señalar que, durante el cálculo de estas variables mensuales, se encontraron meses en los cuales, debido a condiciones meteorológicas como la presencia de nubes o nieblas, no fue posible obtener ninguna imagen durante todo el mes. En la Tabla 3.6 se refleja el número de imágenes por mes y año, observándose una mayor frecuencia de meses sin datos en los meses invernales, como diciembre o febrero, seguidos de finales de otoño en noviembre y principios de primavera en marzo y abril.

a)	Año	E	F	Mr	Ab	My	Jn	J	Ag	S	O	N	D	Σ Anual
	2015	1	0	1	3	3	2	3	2	1	0	2	0	18
	2016	1	0	1	2	2	2	2	4	1	1	1	0	17
	2017	2	2	2	2	1	2	3	2	3	2	3	3	27
	2018	2	3	1	1	1	2	4	4	1	2	0	1	22
	2019	1	2	2	0	1	4	3	3	2	2	2	3	25
	2020	1	2	0	0	3	2	3	3	1	3	0	3	21
	2021	1	0	1	1	2	3	2	1	2	1	4	0	18
	2022	5	5	0	2	6	6	7	6	2	3	1	3	46
	<b>Σ Mensual</b>	14	14	8	11	19	23	27	25	13	14	13	13	194

b)	Año	E	F	Mr	Ab	My	Jn	J	Ag	S	O	N	D	Σ Anual
	2015	0	0	1	3	3	2	3	2	1	0	2	0	17
	2016	0	0	1	2	1	1	2	4	1	1	1	0	14
	2017	2	2	1	1	1	2	3	2	3	2	2	3	24
	2018	2	1	1	1	1	2	4	4	1	1	0	0	18
	2019	0	2	2	0	1	4	3	3	2	1	1	1	20
	2020	1	2	0	0	3	2	3	1	1	2	0	0	15
	2021	1	0	1	1	2	3	2	1	1	1	4	0	17
	2022	5	5	0	2	6	6	7	2	2	3	1	0	39
	<b>Σ Mensual</b>	11	12	7	10	18	22	27	19	12	11	11	4	164

Tabla 3.6. Número de imágenes disponibles para cada mes y año para el cálculo de variables satelitales. a) Imágenes para GLI, NDTI y NBAI. b) Imágenes para LST. Se añaden en los extremos los sumatorios mensuales y anuales.

Mes	T	TM	Tm	R	H	DR	DN	DT	DF	DH	DD	I
Enero	6,6	10,5	2,7	21	75	4	0,7	0	6,5	7,6	4,6	131
Febrero	8,2	13,1	3,3	22	67	3,9	0,4	0,1	2,9	5,2	5,1	165
Marzo	11,6	17,3	5,8	19	59	3,7	0,2	0,3	0,4	1,4	6,7	217
Abril	13,8	19,6	7,9	39	57	5,7	0	1,4	0,2	0,1	4,6	226
Mayo	18	24,1	11,8	44	54	6,4	0	4,1	0,3	0	4,5	274
Junio	22,6	29,3	15,8	26	49	4	0	3,9	0,1	0	8,2	307
Julio	25,3	32,4	18,3	17	47	2,6	0	3,8	0	0	14,6	348
Agosto	25	31,7	18,3	17	51	2,3	0	3,7	0	0	10,9	315
Septiembre	21,2	27,1	15,2	30	57	3,2	0	2,8	0,2	0	8	243
Octubre	16,2	21,4	11	36	67	5,4	0	1	1	0	5,4	195
Noviembre	10,6	14,8	6,3	30	73	5,1	0,1	0,1	3,9	1,9	4	148
Diciembre	7	10,8	3,2	21	76	4,8	0,5	0,1	7,1	6,5	4,3	124
<b>Año</b>	15,5	21	10	322	61	51,1	2,4	21,3	22,5	23,1	81,6	-

Tabla 3.7. Valores climatológicos normales (mensual/anual). Zaragoza, Aeropuerto. T: Temperatura media (°C). TM: Media de las temperaturas máximas diarias (°C). Tm: Media de las temperaturas mínimas diarias (°C). R: Precipitación media (mm). H: Humedad relativa media (%). DR: Número medio de días de precipitación superior o igual a 1 mm. DN: Número medio de días de nieve. DT: Número medio de días de tormenta. DF: Número medio de días de niebla. DH: Número medio de días de helada. DD: Número medio de días despejados. I: Número medio de horas de sol. Fuente: [AEMET](#).

Esta falta de imágenes mensuales también varía según el año, siendo 2015 y 2020 los años con mayor ausencia de datos, con un total de 3 meses sin imágenes en esos años específicos. Estos patrones coinciden con el comportamiento climático de la zona de estudio (Cuadrat et al., 2007, 2014; López Martín, 2002), ubicada en el centro de la depresión del

valle del Ebro. En esta región, la mayor presencia de lluvias se registra al inicio de la primavera y el otoño, según los valores climatológicos normales (periodo 1981-2010) calculados por AEMET en la estación de Zaragoza Aeropuerto (Tabla 3.7). Después de mayo, los meses con la mayor precipitación media mensual son abril y octubre. No obstante, el fenómeno meteorológico predominante en el valle que más afecta la disponibilidad de imágenes es la presencia de nieblas (Figura 3.10a) y sus derivados, como la bruma o neblina. La niebla, formada por pequeñas gotas de agua o cristales de hielo suspendidos en el aire, reduce la visibilidad horizontal en las capas de aire en contacto con la superficie del suelo. Este fenómeno se ve favorecido por situaciones de estabilidad atmosférica vinculadas a la presencia de un anticiclón dinámico que se refuerza, especialmente durante los meses invernales, debido al efecto térmico (Cuxart & Jiménez, 2012; Hernández Navarro & Del Valle Melendo, 1989). Este proceso implica la acumulación de aire frío, más denso y pesado, en el fondo del valle, retroalimentado por la presencia del río Ebro como fuente de humedad. Al retomar los valores normales de AEMET, diciembre presenta en promedio el mayor número de días con niebla (7,1 días), seguido de enero (6,5 días) y noviembre (6,5 días). Además, al analizar el número de días despejados, se observa que los valores promedio más bajos coinciden con los meses que presentan una mayor ausencia de imágenes, a excepción de enero, que al menos cuenta con una imagen en todos los años.

Es crucial resaltar que el número promedio de meses sin imágenes aumenta al considerar las disponibles para la temperatura de superficie. En el caso de las imágenes LST, captadas mediante un sensor de infrarrojo térmico más sensible a las interferencias generadas por neblinas leves o sombras de nubes, en comparación con el sensor radiométrico, como se mencionó anteriormente, se registra un menor número de imágenes disponibles (Figura 3.11c). A lo largo de todo el periodo de estudio, se cuenta con un total de 30 imágenes, que, si bien pueden ser útiles en otras bandas, no permiten su incorporación en los promedios mensuales, especialmente en la banda 10. Esta limitación causa una disminución significativa en el número de imágenes disponibles, especialmente en los meses de enero y diciembre. En enero, el número de imágenes disponibles pasa de 0 a 3, mientras que en diciembre aumenta de 3 a 6. Esta situación destaca la influencia significativa de las condiciones climáticas adversas en la captura de imágenes de temperatura de superficie, particularmente en los meses invernales, afectando la consistencia y la disponibilidad de datos para el análisis mensual.

Para abordar la falta de información en los meses correspondientes a los índices radiométricos (GLI, NDTI o NBAI) o de la temperatura de superficie (LST), se implementó un enfoque de cálculo de promedios utilizando los meses disponibles más cercanos. Es decir, si un mes carecía de una imagen promedio, se reemplazaba con un promedio que incorporaba tanto el mes anterior como el posterior, junto con un promedio de todos los meses disponibles para el mes faltante. Por ejemplo, consideremos el caso de octubre de 2015, donde no hay imágenes disponibles. Para completar la serie temporal, se comenzó calculando el promedio de todas las imágenes de octubre a lo largo de la serie temporal de 2015 a 2022, generando así una imagen promedio representativa de un mes de octubre general. Este valor se promedió con las imágenes de septiembre y noviembre de 2015, ajustándolo al periodo. En situaciones en las que no estaban disponibles ni el mes anterior ni el posterior, el promedio mensual general se calculó solo con el mes disponible. Este escenario ocurrió, por ejemplo, en marzo y abril de 2020. En marzo, el valor final del mes se obtuvo como el promedio entre el promedio general de marzo y el valor del mes de febrero. Mientras que, en abril, se obvió marzo e incluyó mayo. En el caso específico de la temperatura de superficie (LST), se enfrentó la condición de tres meses consecutivos sin disponibilidad de imágenes. En esta situación, se optó por mantener el valor promedio general del mes. Esto ocurrió en diciembre de 2019 y enero de 2016. Este enfoque permitió suavizar la falta de datos en

algunos meses y mantener la coherencia en la serie temporal, a pesar de las limitaciones en la disponibilidad de imágenes.

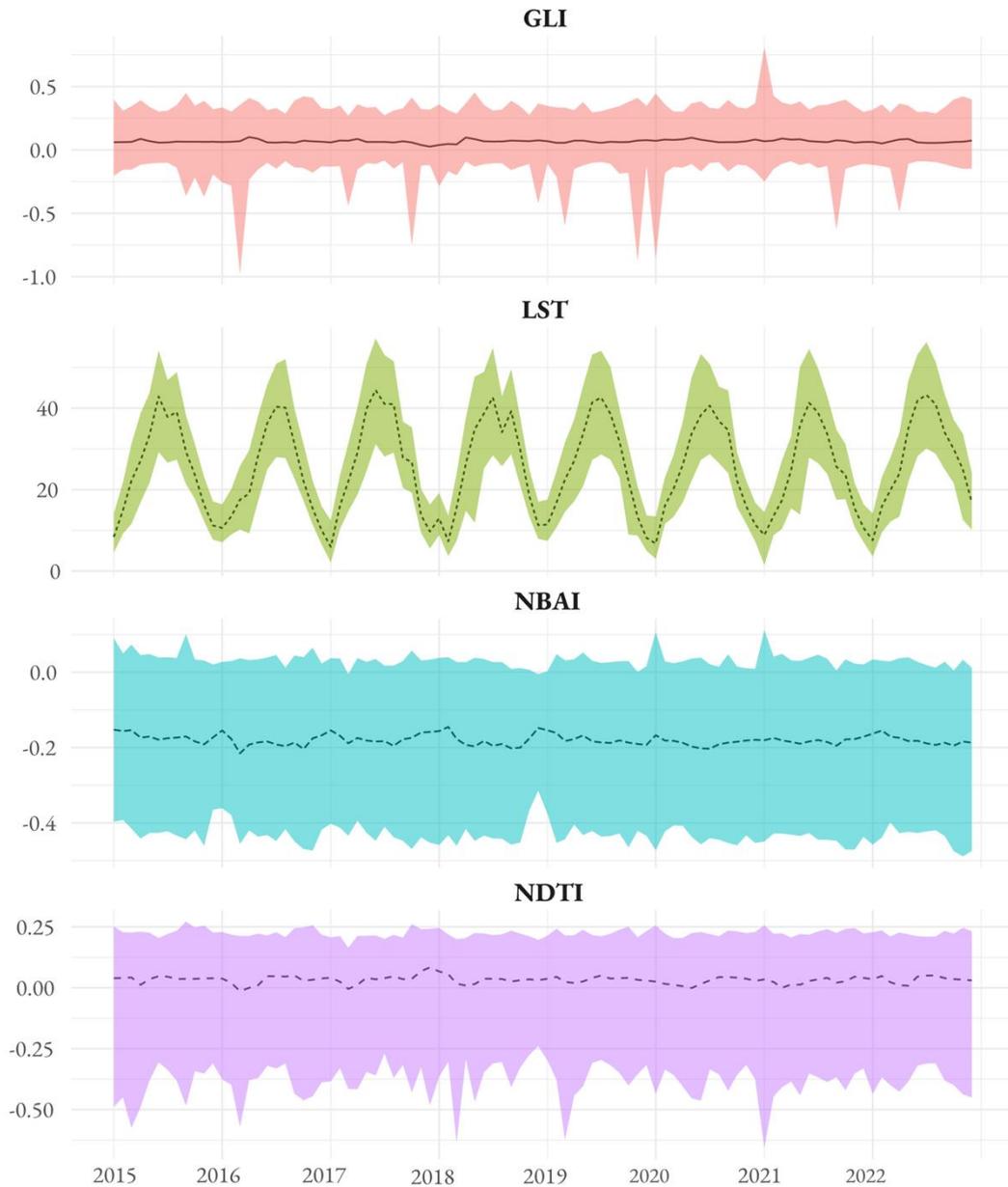


Figura 3.12. Evolución temporal de las variables satelitales a escala mensual, para cada mes del año la variable representa el valor promedio mediante una línea y se añade valor máximo y mínimo como extremos del sombreado. Green Leaf Index (GLI) en rojo. Land Surface Temperature (LST) en verde. Normalized Built-up Area Index (NBAI) en azul. Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) en morado.

Para verificar la coherencia en la base de datos, se extrajeron, para cada *raster* mensual de cada variable, los valores promedio, mínimo y máximo, y se creó el Figura 3.12 para mostrar los resultados. Aunque esta metodología está estrechamente relacionada con los valores extremos, los gráficos obtenidos para cada variable no revelan datos especialmente aberrantes o sesgos temporales que no puedan explicarse por la dinámica natural de la variable.

Un ejemplo ilustrativo es el caso de la LST, cuya variación en los patrones temporales sigue el comportamiento típico de la temperatura en el hemisferio norte, con inviernos fríos y veranos cálidos. El rango total de la variable se ajusta a los valores esperados en la zona de estudio, con temperaturas de superficie que oscilan entre los 10 °C y los 50 °C, a diferencia de las temperaturas del aire. En cuanto al resto de los índices, debido a las magnitudes en las que se presentan, puede que no faciliten tanto su interpretación apreciando tan solo ligeras diferencias. No obstante, en el caso del GLI, se pueden notar ligeros ascensos durante los periodos primaverales, reflejados en pequeños picos en torno a 0,09 en los meses de abril y mayo, momentos de mayor actividad vegetal. En el caso del NDTI, se observan disminuciones de la variable a finales del invierno y principios de la primavera, coincidiendo con los momentos de mayor caudal del río Ebro a su paso por Zaragoza. Según la estación hidrométrica (n° 9011) de la Confederación Hidrográfica del Ebro, el caudal medio mensual más elevado se alcanza en los meses de febrero y marzo, superando ligeramente los 400 m<sup>3</sup>/s, momentos de mayor presencia de agua, lo que provoca la disminución del valor de NDTI, ya que la presencia de agua, especialmente agua limpia o menos turbia, se asocia con valores más bajos de esta variable. En el caso de la variable NBAI, al estar relacionada con elementos no naturales como el suelo construido, no sigue un patrón temporal natural, y la tendencia está más vinculada con la actividad humana y las diferentes fases de construcción de la ciudad o el cambio de usos del suelo.

Es importante señalar que se está calculando el valor mínimo y máximo de un espacio muy heterogéneo compuesto por *rasters* de 695 y 521 píxeles por lado, y a pesar de la cantidad de información, no se observan datos especialmente aberrantes que puedan suponer un grave error en la interpretación de la variable. Además, se demuestra que el uso de promedios para el cálculo de meses faltantes no introduce sesgos ni errores en la evolución temporal de estas variables.

Finalmente, tras calcular todas las variables satelitales (GLI, NDTI, NBAI, y LST) a escala mensual, así como las variables territoriales (MDT y SVF), y determinar el valor máximo, medio y mínimo diario de la temperatura del aire para cada punto de la red de sensores, se llevó a cabo el modelo de interpolación *cokriging*. En este modelo, no se incorporaron las variables brutas mensuales, sino los tres primeros componentes principales para cada mes del año, siguiendo la misma estrategia aplicada en el modelo 6 del apartado anterior (3.4). Este proceso de interpolación se realizó utilizando el paquete *automap* en R. En esta ocasión, se ajustó el modelo para calcular primero los PCA para cada mes, y luego utilizar los tres primeros componentes como covariables en la interpolación diaria. Como resultado de este proceso, se generaron 2.842 *rasters* con la temperatura urbana de la ciudad de Zaragoza. Si multiplicamos este resultado por las tres variables térmicas calculadas, obtenemos un total de 8.562 *rasters*, proporcionando una representación espacial detallada y ajustada de la temperatura urbana.

### **3.7. Validación del modelo para la interpolación diaria**

En este caso, se volverá a utilizar un modelo de validación cruzada (LOOCV) para analizar los datos diarios resultantes de la interpolación. En esta ocasión se validarán 8.562 *rasters*, y no se emplearon todas las métricas automáticas proporcionadas por la herramienta *autokrige.cv* debido a la dificultad de interpretación. Sin embargo, el proceso de validación cruzada seguirá siendo el mismo: se excluye una única estación de muestreo, representando una ubicación geoespacial específica, del conjunto de entrenamiento. Esta estación excluida se utiliza como conjunto de prueba, mientras que las demás estaciones conforman el conjunto de entrenamiento. Este procedimiento se repetirá para cada estación en el conjunto

de datos, asegurando que cada ubicación sea excluida exactamente una vez. Y obteniendo un valor por cada estación de la red para cada día, es decir, 21 puntos por cada interpolación.

La novedad en este proceso de validación cruzada reside en que, durante esta fase, se extraerán tres conjuntos de datos clave: los valores observados, los valores predichos y los residuales. Estos residuales representan la diferencia entre los valores observados y los valores predichos. Este enfoque más detallado permitirá una evaluación exhaustiva de la capacidad del modelo para capturar las variaciones reales en los datos, ya que los residuales proporcionan información sobre la magnitud y la dirección de los errores en cada predicción. De esta manera, se obtendrá una visión más completa y precisa del rendimiento del modelo diario en comparación con las observaciones reales.

En este contexto, se emplearán cinco estadísticos de validación clave, cada uno diseñado para desglosar aspectos específicos de la relación entre las predicciones y las observaciones reales. Estos estadísticos incluirán: Error Medio (ME - *Mean Error*), Error Absoluto Medio (MAE - *Mean Absolute Error*), Error Cuadrático Medio (RMSE - *Root Mean Squared Error*), Ratio de Medias (RM - *Ratio of Means*) y Ratio de Desviación Estándar (RSD - *Ratio of Standard Deviation*). En relación a los resultados obtenidos de los estadísticos, a continuación, se presenta un análisis detallado de los datos más relevantes para comprender las dimensiones y el comportamiento del error en el modelo de interpolación. La Figura 3.13 proporciona una visión resumida de la distribución de todos los datos obtenidos en las diferentes interpolaciones diarias de las variables térmicas, utilizando un diagrama de cajas.

En el caso del ME, se observa que los valores se sitúan principalmente cerca de cero, indicando un error muy bajo, ya que a medida que se acerca a cero, menor es la diferencia entre lo predicho y lo observado. Sin embargo, se percibe una ligera sobreestimación de los valores predichos, ya que hay valores principalmente por debajo de cero, sugiriendo que el valor predicho tiende a ser superior al observado. Al centrarse en las magnitudes de cada variable térmica, se aprecia que los datos de temperatura máxima y mínima son mayores que la temperatura media, superando 0,5 °C en el caso de la temperatura máxima. Este patrón, similar al observado en la validación de la interpolación estacional, muestra que los valores más abruptos son más complejos de interpolar que los valores medios. Es esencial complementar la interpretación del ME con otras métricas de validación, ya que este puede enmascarar errores al no revelar su dispersión y compensar en una misma interpolación residuales con valores positivos y negativos muy abruptos. Por este motivo, el MAE proporciona una visión más clara de la magnitud del error en el modelo de interpolación. Observamos que las cifras obtenidas en esta métrica adquieren un rango de valores considerablemente superior a los del ME. En la mayoría de los casos, el MAE también presenta valores de error bajos, con un rango de datos que oscila entre 0,29 °C y 0,53 °C en el percentil 25 y 75 (extremos de la caja) para la temperatura media. Para las temperaturas máximas, el rango varía entre 0,42 °C y 0,73 °C, y para las temperaturas mínimas, entre 0,4 °C y 0,82 °C. En comparación, se evidencia un valor máximo en el rango de datos de 4,5 °C en las temperaturas máximas, 2,92 °C en las medias y 3,73 °C en las mínimas. Nuevamente, se destaca que el error tiende a ser más elevado en el caso de las temperaturas más abruptas, frente a las medias que apenas sobrepasan en su mediana el 0,5 °C.

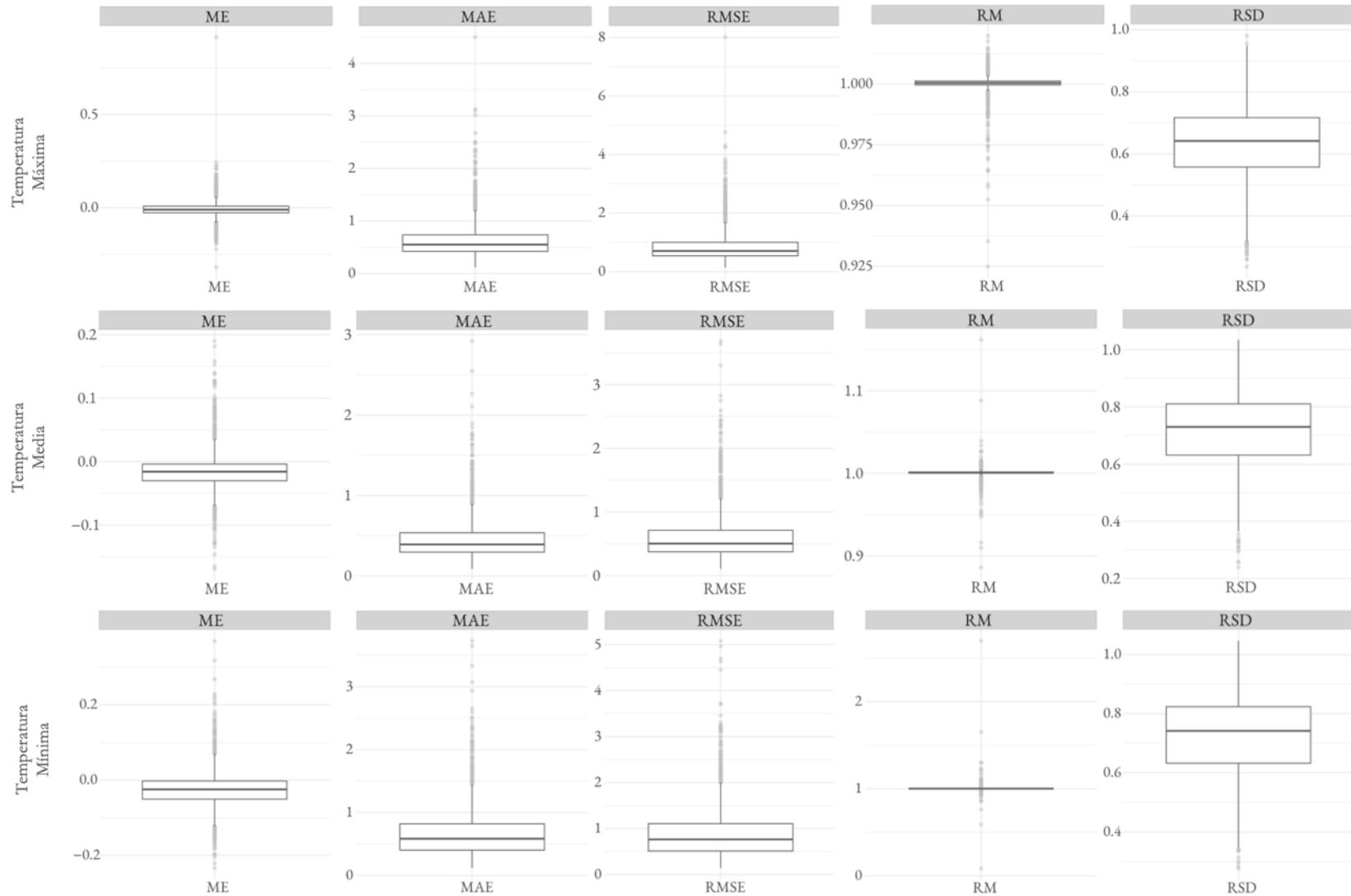


Figura 3.13. Gráfico de cajas con los estadísticos de error seleccionados para la interpolación diaria de las variables térmicas urbanas.

La asimetría se hace más evidente al considerar los valores de RMSE, una métrica que destaca especialmente los valores más aberrantes de error. El RMSE alcanza los valores más pronunciados de todas las métricas de error, destacando con un valor máximo de 8,01 °C en el caso de las temperaturas máximas. A pesar de esto, la tendencia es similar a los estadísticos anteriores: se encuentran algunas interpolaciones diarias con errores elevados, pero la mayoría de los datos tienen un valor de error inferior a 1 °C. En el caso de la temperatura media, incluso el valor de la mediana se sitúa en torno a los 0,5 °C, mostrando una mayor variabilidad o dispersión significativa en ciertas predicciones, pero que en la mayoría de los casos resulta en un modelo consistente para interpolar la temperatura.

Respecto a otros estadísticos como el RM, en todas las interpolaciones, independientemente de la variable térmica, alcanza valores muy cercanos a 1. Esto indica que tanto las medias de los valores predichos como de los observados son muy parecidas y muestran una centralidad muy semejante. Sin embargo, en el caso de la temperatura mínima, este rango se amplía, encontrando valores más alejados de 1, con un máximo de 2,7 y un mínimo de 0,08, mostrando cómo en algunas interpolaciones de esta variable, los datos presentan medias muy diversas. Hay que destacar que en las temperaturas mínimas es cuando se produce mayor variabilidad térmica en el entorno urbano debido a la presencia de la ICU, una dicotomía entre el núcleo de la ciudad y su periferia que para el modelo es más complicado de recoger.

En relación al RSD y su representación de la distribución de la desviación estándar en ambas variables (predichos y observados), se observa cómo difiere la variabilidad o dispersión. Se aprecia que, en todas las variables, la variabilidad de las predicciones no refleja la variabilidad natural de las observaciones, ya que en pocas ocasiones los valores superan 1 y oscilan alrededor de un valor de mediana en torno al 0,7. Esto muestra una dificultad del modelo para capturar la variabilidad natural del entorno urbano, una característica térmica tremendamente distintiva en este contexto de estudio y uno de los objetivos fundamentales en los estudios sobre la climatología urbana. La capacidad del modelo para recoger y analizar la enorme variabilidad térmica en un espacio de escala tan reducida como una ciudad resulta un desafío debido a la complejidad inherente a esta tarea.

Para el análisis temporal del error, la Figura 3.14, Figura 3.15 y Figura 3.16 examinan los valores de los errores diarios seleccionados por meses, una gráfica por cada variable térmica interpolada.

Se observan tendencias comunes en el comportamiento de los estadísticos, destacando que los valores de ME son sistemáticamente bajos y cercanos a 0. A medida que analizamos el MAE y el RMSE, la distribución de los resultados en estos estadísticos de error es más amplia. El RM muestra un error muy cercano a 1 en todos los meses, lo que indica que, independientemente del mes del año, ambas medias son muy similares y el modelo cumple adecuadamente. Sin embargo, al comparar la desviación estándar (RSD) y la variabilidad de los datos, se observa un rango de valores más amplio que no siempre está cercano a 0.

Se destaca una asimetría constante en la distribución de los datos hacia la derecha, indicando la presencia de valores, no demasiados, con resultados de error más elevados que difieren de la mayoría de los datos más cercanos a 0 °C o 1 °C en los estadísticos de MAE y RMSE. Esto se refleja en una mayor longitud de los bigotes superiores de las cajas, la posición de la línea de la mediana en la parte inferior de la caja y la presencia de valores extremos (*outliers*). Estos *outliers*, principalmente por encima de la caja y representados por puntos, superan el umbral de 1,5 °C en el caso de la temperatura media, alrededor de 2 °C en las máximas y ligeramente por encima de 2 °C en las mínimas.

El tamaño de la caja en los gráficos revela la distribución de los valores para cada estadístico, permitiendo observar si hay mucha discrepancia diaria o si la mayor parte de los días presenta un comportamiento similar. Tanto en el caso de ME, MAE como de RMSE, se aprecia cómo el error aumenta en los meses de invierno, ya que las cajas se encuentran en posiciones más elevadas y su tamaño es más amplio, mostrando una mayor variabilidad de este error. Incluso los bigotes o extremos se amplían en la parte superior del gráfico en los meses de noviembre a enero, indicando una mayor presencia de errores más elevados. En cambio, en los meses de verano y finales de primavera, este error se reduce y se concentra.

Es importante señalar que, independientemente del mes, la mayoría de los errores de estadísticos como MAE o RMSE tienen valores de mediana bajos, en torno a  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esta tendencia se observa en todas las variables térmicas, aunque se intensifica, como ya se ha comentado, en las temperaturas mínimas y su relación con la ICU. Es plausible que la mayor distribución en los valores diarios de los estadísticos en los meses de invierno esté motivada por la calidad de las covariables utilizadas. Durante este periodo de estudio, había menor disponibilidad de imágenes para crear covariables, lo que limitaba la capacidad de generar productos mensuales adecuados para captar la distribución espacial de estas covariables en la ciudad. Además, la dinámica climática asociada a estos meses, con mayor inestabilidad y ocurrencia de eventos atmosféricos adversos como nieblas, inversiones térmicas, intensidad de viento o precipitación, provoca situaciones más complejas para el modelado, y la interpolación no logra capturarlas de manera completa.

También se ha realizado un cálculo mensual de los resultados para cada estadístico de validación en las Tabla 3.8, Tabla 3.9 y Tabla 3.10, considerando cada una de las variables térmicas. En estas tablas no se ha estimado un promedio con los resultados de cada día, ya que un promedio del error en interpolaciones diferentes carecería de sentido estadístico. El procedimiento estándar consiste para cada día calcular el valor del error utilizando los estadísticos basados en los 21 puntos de observación, con el valor predicho y observado mediante la técnica de LOOCV y obtener un resultado diario. En esta ocasión, se seleccionaron estos 21 valores de cada día junto con todos los valores de ese mes para todos los años, y se calcularon los estadísticos para cada mes. Por ejemplo, para el mes de marzo, se seleccionaron las 21 observaciones (observado y predicho) de los 31 días del mes para todos los años desde 2015 hasta 2022, y en base a esa selección se calcularon los estadísticos.

Las tablas revelan ligeras diferencias según la variable y el mes. En ME, las temperaturas máximas presentan los resultados más favorables al ser las más cercanas a 0. Es notable que los meses de enero de las tres variables son los únicos que indican valores negativos, y al mismo tiempo, son los meses con menor error. Contrariamente, las mínimas ocupan los puestos con el error más elevado, siendo septiembre el mes con el valor máximo de  $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pesar de ello, es importante destacar que el error es muy bajo, lo cual también puede atribuirse al mayor número de valores que intervienen en el cálculo. En cuanto al MAE, se observan tendencias previamente señaladas, siendo la variable de la temperatura media la que registra la menor magnitud de error, especialmente en los meses de primavera y verano, en comparación con los meses de invierno o las temperaturas máximas en los meses más cálidos. Este patrón se repite en las otras variables, siendo los meses más fríos de las temperaturas mínimas los que presentan un mayor error (febrero  $0,79\text{ }^{\circ}\text{C}$  y enero  $0,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y los meses más cálidos de las temperaturas máximas (julio  $0,69\text{ }^{\circ}\text{C}$  y agosto  $0,68\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), siempre por debajo de 1. En el caso del RMSE, los valores aumentan y muestran un rango que oscila entre un valor mínimo de  $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}$  para la temperatura media de marzo y un valor máximo de  $1,26\text{ }^{\circ}\text{C}$  para la temperatura mínima de febrero. Sin embargo, la dinámica es similar a la del MAE, donde la temperatura media es la variable que presenta el menor error, mientras que

los meses que principalmente presentan mayores errores son las temperaturas mínimas interpoladas de los meses de invierno, específicamente de octubre a febrero.

En relación con el RM, como se observó en las gráficas anteriores, expresa relaciones de medias muy fuertes con valores muy cercanos a 1, independientemente del mes o la variable interpolada, mostrando un rango de diferencia de solo 0,015 entre el mínimo y el máximo. Finalmente, para el RSD y su medida de la dispersión, los resultados calculados mensualmente mejoran los diarios. A diferencia de las gráficas anteriores, en esta ocasión los resultados son generalmente mucho más cercanos a 1, con una diferencia máxima de 0,038. Las variables de temperatura cuya distribución es más similar son las medias, y las que muestran menos similitud son las mínimas, aunque incluso en este caso el valor más bajo sigue siendo elevado, con 0,96.

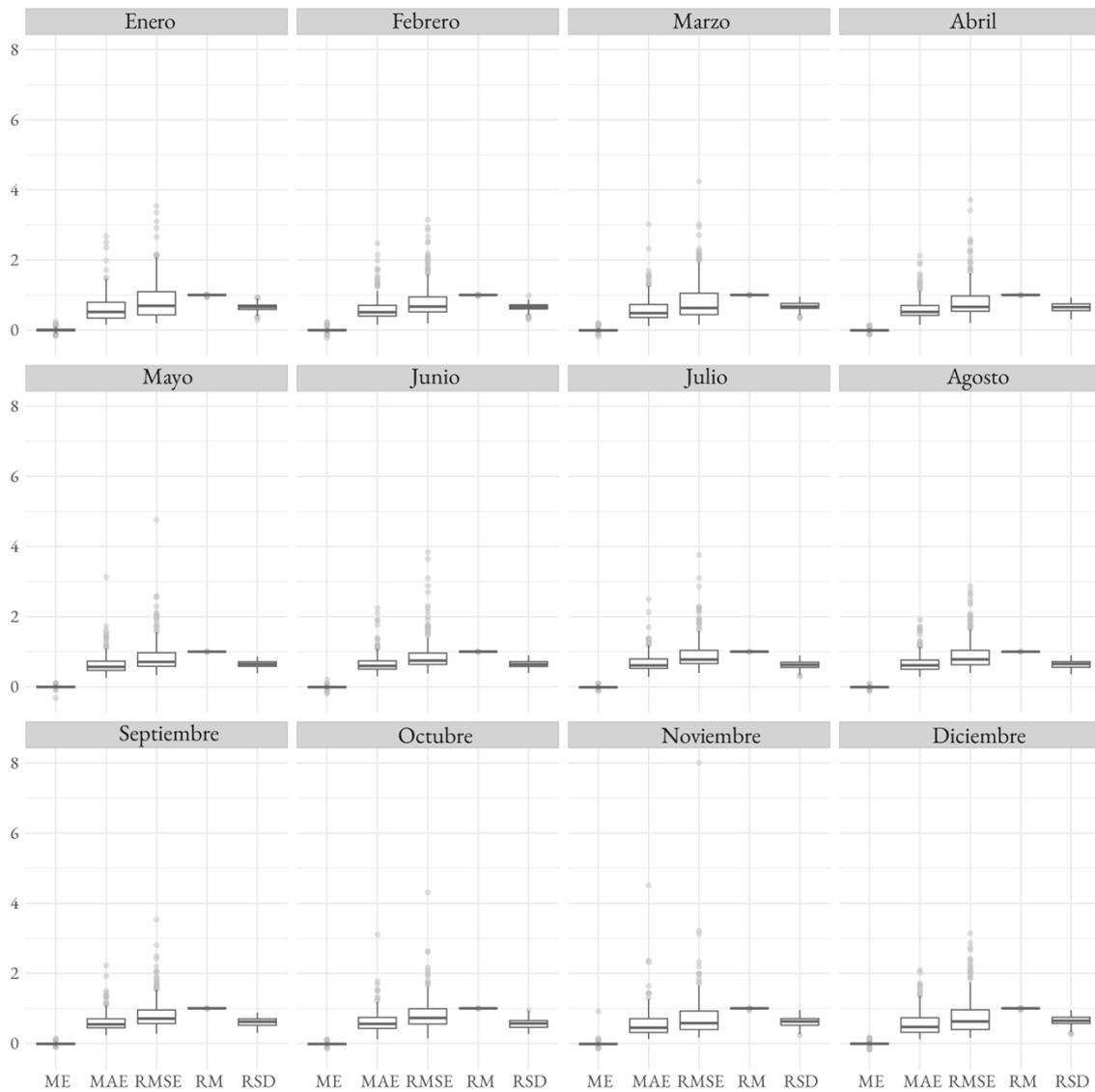


Figura 3.14. Valores mensuales de los estadísticos de error calculados para la interpolación diaria de temperatura máxima.

MES	ME	MAE	RMSE	RM	RSD
Enero	0,00	0,63	1,05	1,00	0,99
Febrero	0,00	0,62	1,00	1,00	0,99
Marzo	0,01	0,60	1,05	1,00	0,99
Abril	0,01	0,60	0,97	1,00	0,99
Mayo	0,00	0,63	0,97	1,00	0,99
Junio	0,01	0,67	1,02	1,00	0,99
Julio	0,01	0,69	1,05	1,00	0,99
Agosto	0,01	0,68	1,04	1,00	0,99
Septiembre	0,01	0,62	0,96	1,00	0,99
Octubre	0,02	0,62	0,95	1,00	0,99
Noviembre	0,01	0,57	1,01	1,00	0,98
Diciembre	0,01	0,58	0,96	1,01	0,99

Tabla 3.8. Valores mensuales absolutos de los estadísticos de error calculados para la interpolación diaria de temperatura máxima.

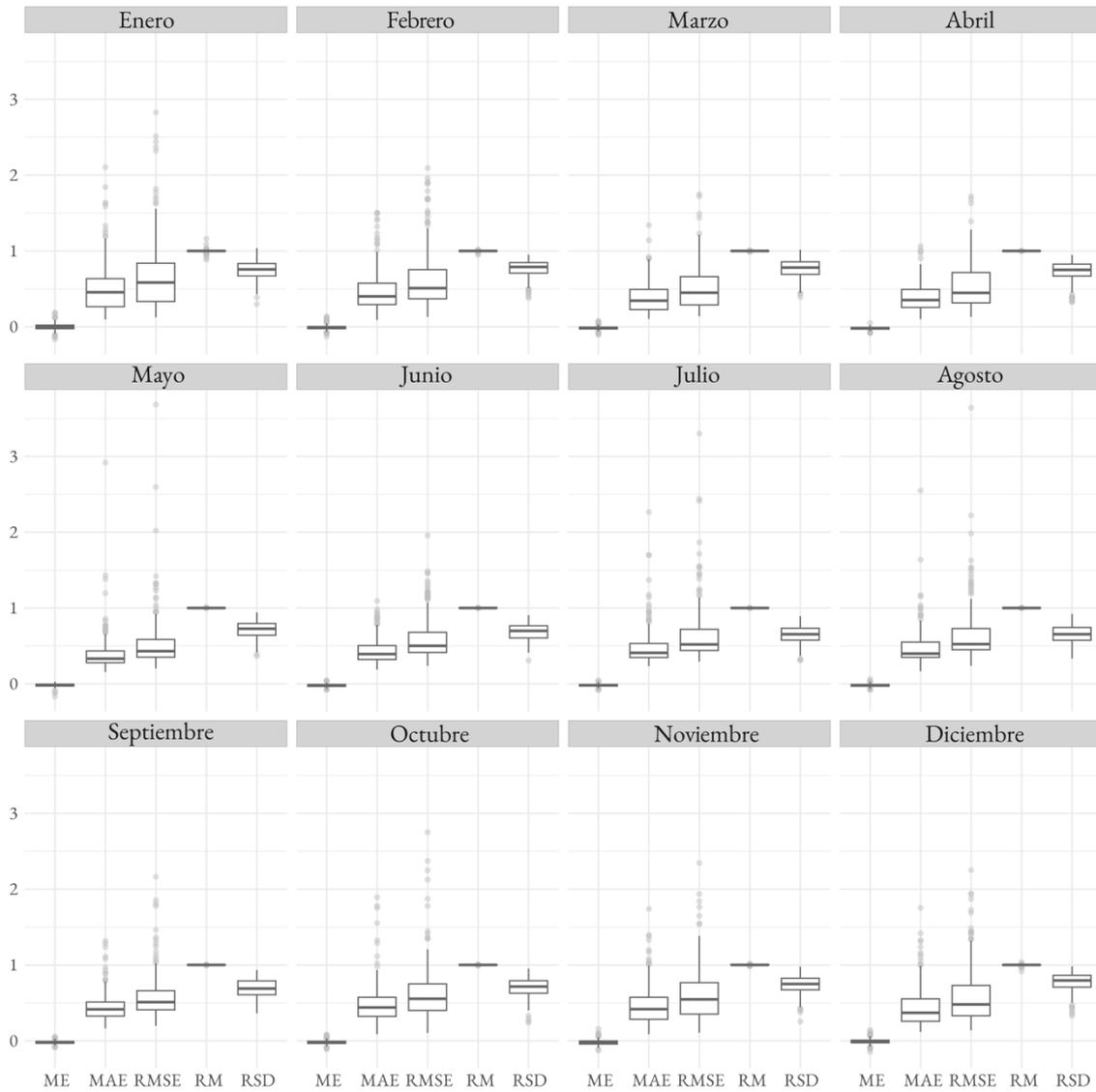


Figura 3.15. Valores mensuales de los estadísticos de error calculados para la interpolación diaria de temperatura media.

MES	ME	MAE	RMSE	RM	RSD
Enero	0,00	0,50	0,82	1,00	0,99
Febrero	0,01	0,48	0,77	1,00	0,98
Marzo	0,01	0,39	0,61	1,00	0,99
Abril	0,02	0,39	0,61	1,00	0,99
Mayo	0,02	0,39	0,62	1,00	0,99
Junio	0,02	0,44	0,65	1,00	0,99
Julio	0,02	0,48	0,74	1,00	0,99
Agosto	0,02	0,48	0,74	1,00	0,99
Septiembre	0,02	0,44	0,65	1,00	0,99
Octubre	0,02	0,48	0,71	1,00	0,99
Noviembre	0,02	0,46	0,70	1,00	0,99
Diciembre	0,01	0,45	0,70	1,00	0,99

Tabla 3.9. Valores mensuales absolutos de los estadísticos de error calculados para la interpolación diaria de temperatura media.

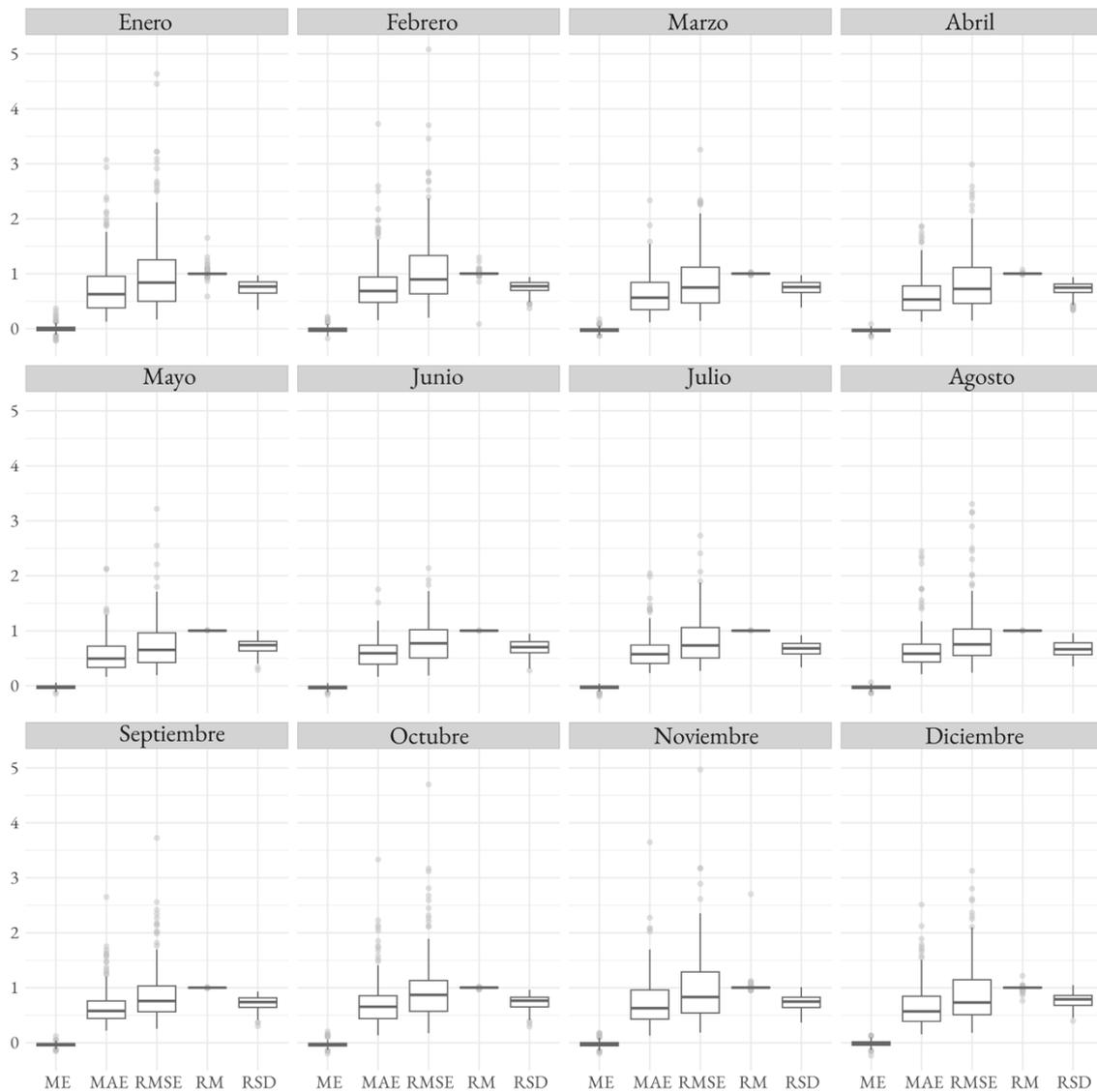


Figura 3.16. Valores mensuales de los estadísticos de error calculados para la interpolación diaria de temperatura mínima.

<b>MES</b>	<b>ME</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE</b>	<b>RM</b>	<b>RSD</b>
Enero	0,00	0,75	1,23	1,01	0,98
Febrero	0,02	0,79	1,26	0,99	0,96
Marzo	0,02	0,64	1,01	1,00	0,96
Abril	0,03	0,61	0,98	1,00	0,97
Mayo	0,03	0,56	0,86	1,00	0,98
Junio	0,03	0,59	0,86	1,00	0,98
Julio	0,03	0,62	0,91	1,00	0,97
Agosto	0,03	0,65	0,98	1,00	0,97
Septiembre	0,04	0,66	0,99	1,00	0,97
Octubre	0,04	0,71	1,10	0,99	0,97
Noviembre	0,02	0,73	1,13	1,00	0,97
Diciembre	0,01	0,67	1,03	1,00	0,97

Tabla 3.10. Valores mensuales absolutos de los estadísticos de error calculados para la interpolación diaria de temperatura mínima.

Se eligió el estadístico RMSE para visualizar la evolución temporal diaria del error mediante gráficos en forma de calendario para cada variable térmica (Figura 3.17, Figura 3.18 y Figura 3.19), abarcando desde el inicio de los registros en 2015 hasta 2022. La comparación entre estas gráficas resalta las diferencias en las magnitudes entre las variables, mostrando un mayor error en las variables más extremas en comparación con las medias.

El sesgo temporal evidenciado por estos gráficos permite captar cómo el RMSE registra valores más elevados de error al principio de la serie que al final, especialmente durante los tres primeros años hasta principios de 2018. Una posible causa de este mayor error podría atribuirse a la falta de datos originales, como se detalló en el apartado 1 sobre el control de calidad. La mayoría de los errores se identificaron al inicio de la implementación de la red. Si observamos los datos eliminados Figura 2.10, los tres principales momentos de detección y eliminación de errores ocurrieron entre 2015 y 2018. Al considerar que los dos últimos sensores de la red se instalaron en 2019, podríamos relacionar esta mayor magnitud del error al principio de la serie temporal con la falta de estos datos originales. Aunque los datos faltantes se reconstruyeron, es posible que la variabilidad natural de los sensores no quedara completamente reflejada en la reconstrucción, contribuyendo así al mayor error observado en los primeros años de la serie temporal. En la Figura 3.20 se representan todos los valores residuales (observados – predichos) absolutos calculados en todos los sensores a lo largo de toda la serie temporal, mostrando como los sensores 15 (Facultad de Veterinaria) y 20 (Parque de atracciones) son los sensores de mayor magnitud. Ambos sensores fueron los últimos en ser colocados y por lo tanto los sensores que más datos reconstruidos cuentan por lo que corroboran la hipótesis anterior. Además, el sensor 16 (Parque del Agua) también adquiere mayor valor en los residuales y también cuenta con lagunas importantes con falta de datos. Del mismo modo que la mayoría de los sensores que mayor valor alcanzan en los residuales absolutos son aquellos que el control de calidad más datos a eliminado y posteriormente se han reconstruido, como los sensores 17 (Jardín Botánico) y 21 (C.D. Real Zaragoza). También se puede observar como el modelo predice mejor los resultados en los sensores más urbanos mientras que los que están más en el ámbito periurbano o pertenece a espacios con una importante componente vegetal como parques cuentan con mayor diferencia.

La consistencia observada en los resultados de los estadísticos de validación, donde la mayoría de los días exhiben errores inferiores a 1°C en temperatura, refuerza la solidez del modelo de interpolación utilizado. Esta baja variabilidad diaria en el error sugiere que, en general, el modelo es capaz de realizar predicciones cercanas a las observaciones reales.

Es particularmente notable que no se identifica un patrón claro de días específicos con errores constantemente elevados. Esta variabilidad en la distribución del error a lo largo de diferentes días del año indica que el modelo no está influenciado por fenómenos climáticos específicos o condiciones temporales que generen sistemáticamente errores más altos. Es esencial destacar que, aunque se encuentren ciertos días con errores más elevados en la temperatura máxima, no necesariamente se reflejan en la temperatura media o mínima, y viceversa. Esta falta de correlación en los patrones de error entre las distintas variables térmicas subraya la capacidad del modelo para adaptarse a la complejidad y variabilidad inherente a las condiciones climáticas urbanas.

Este comportamiento sugiere que la interpolación logra una representación sólida de la variabilidad diaria, capturando las particularidades térmicas de diferentes momentos sin incurrir en sesgos sistemáticos. La robustez del modelo se traduce en un rendimiento consistente, incluso en condiciones climáticas variables, consolidando su utilidad en el contexto de estudios climáticos urbanos.

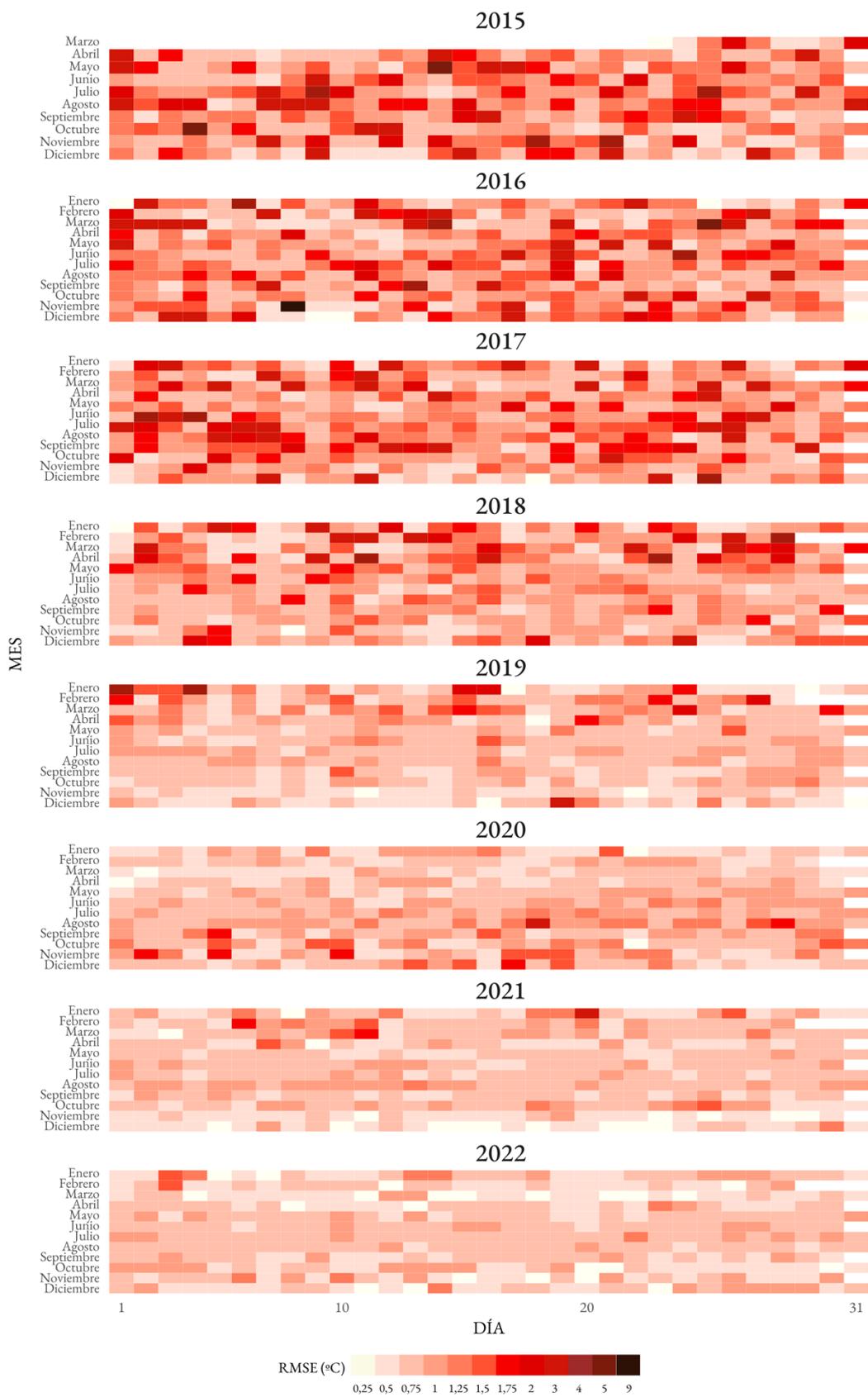


Figura 3.17. Error RMSE diario desde 2015 a 2022 de la interpolación de la temperatura del aire máxima diaria.

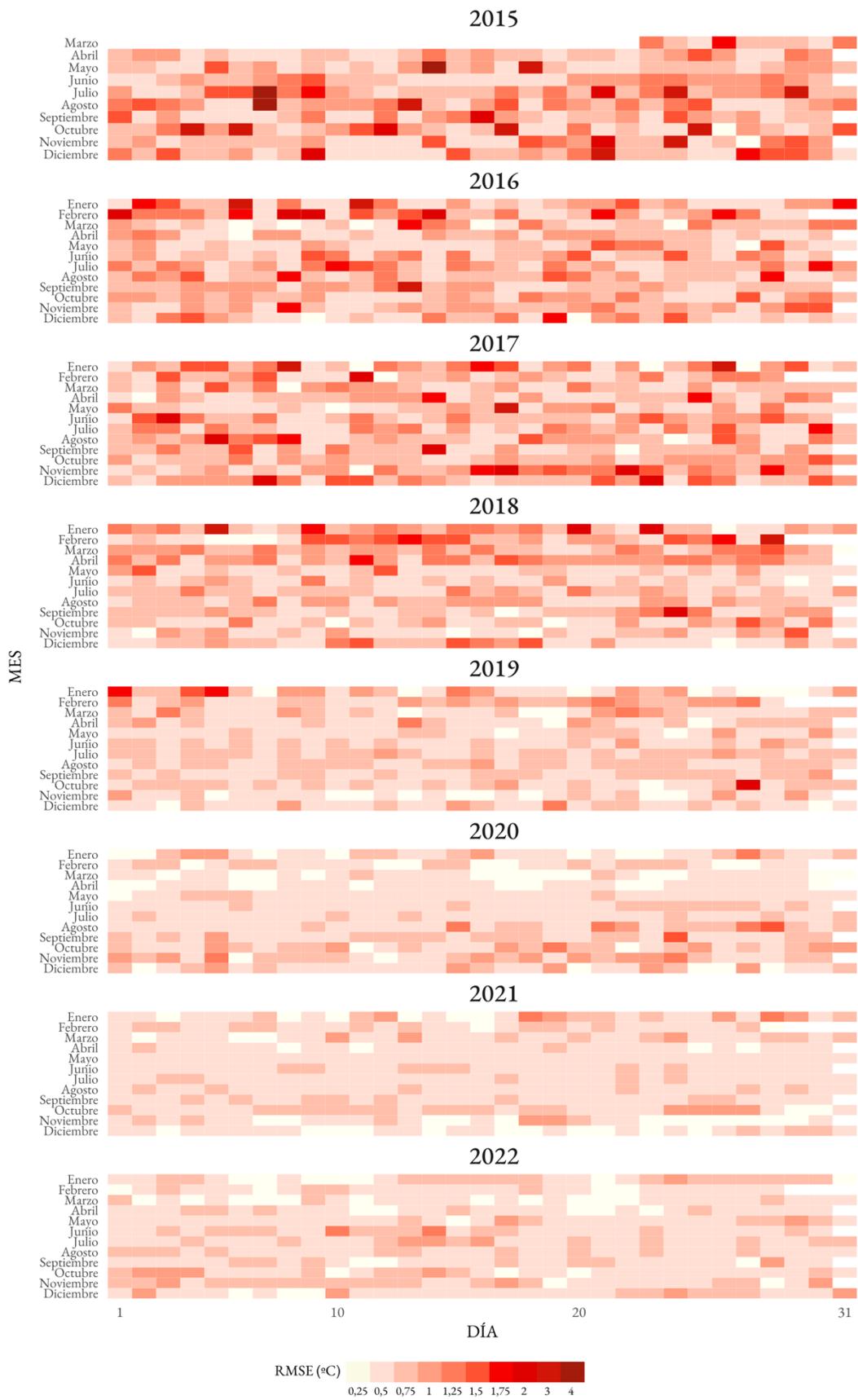


Figura 3.18. Error RMSE diario desde 2015 a 2022 de la interpolación de la temperatura del aire media diaria.

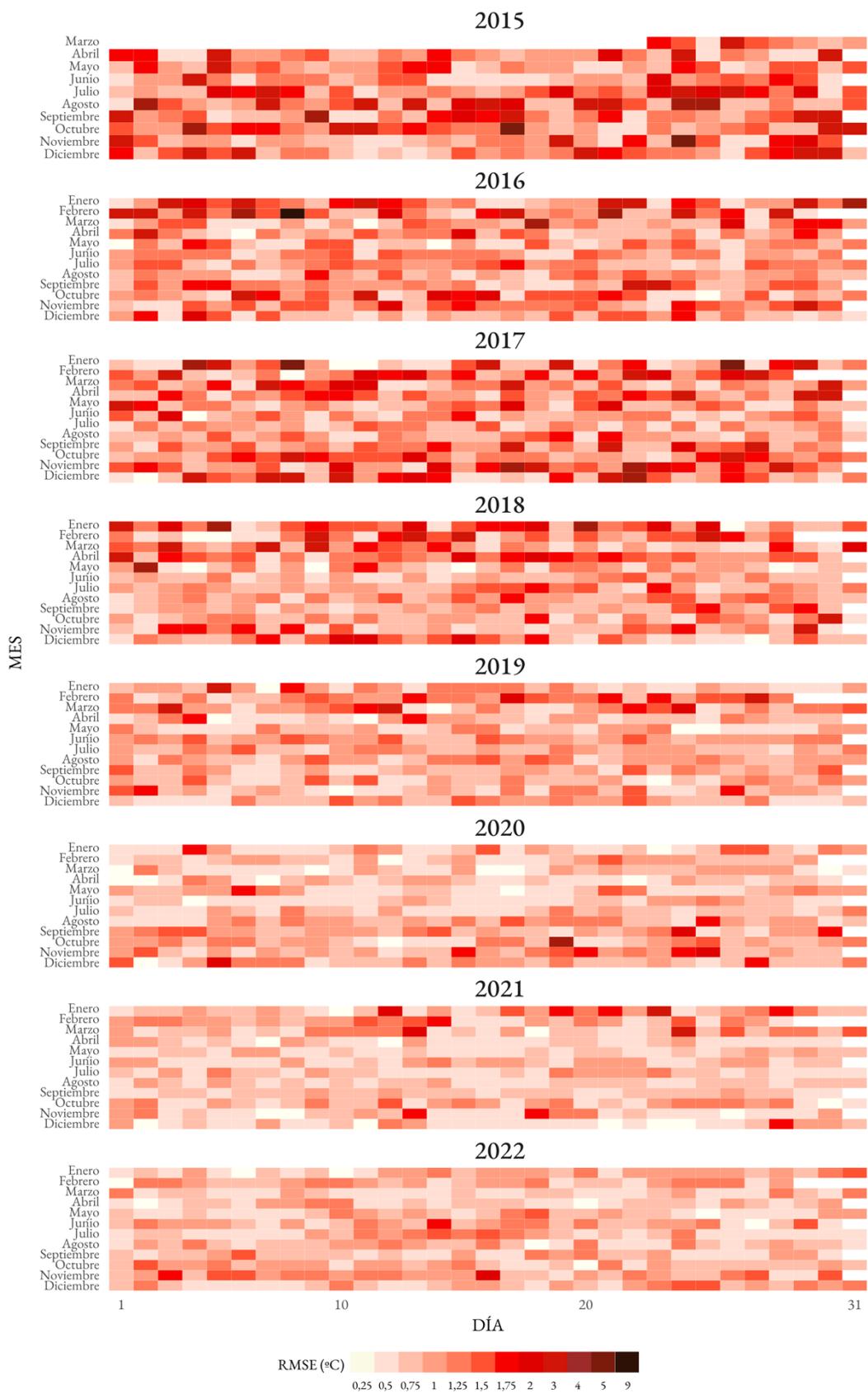


Figura 3.19. Error RMSE diario desde 2015 a 2022 de la interpolación de la temperatura del aire mínima diaria.

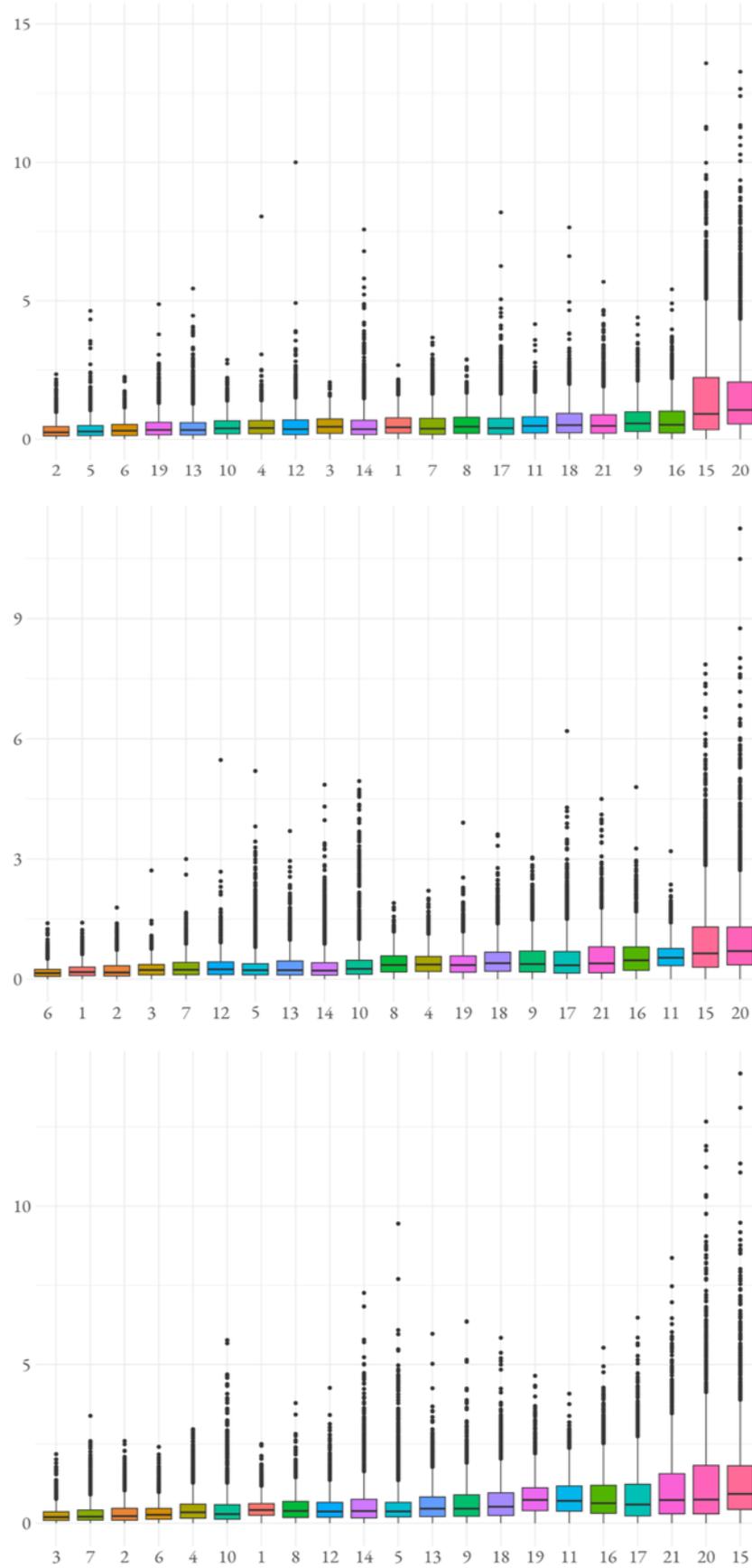


Figura 3.20. Valores residuales resultado de la diferencia entre observaciones observadas y predichas agrupados por sensor. De arriba abajo temperatura máxima, media y mínima.

### 3.8. Discusión

Los resultados de la interpolación *cokriging* para la temperatura en Zaragoza proporcionan una visión integral del rendimiento del modelo. Se destaca la robustez general en la realización de predicciones cercanas a las observaciones reales, con la mayoría de los errores medios (ME) situados cerca de cero. Este hallazgo indica que, en términos generales, el modelo presenta una buena capacidad para predecir las temperaturas diarias en la ciudad.

Es relevante observar una tendencia de ligera sobreestimación en las predicciones, particularmente evidente en la temperatura máxima. Este patrón sugiere que el modelo tiende a prever valores ligeramente superiores a los observados. Además, al examinar el MAE, se confirma una mayor variabilidad, especialmente en las temperaturas extremas (máximas y mínimas), en comparación con la temperatura media. Este resultado resalta la complejidad de interpolar valores más abruptos y extremos, lo cual puede ser un desafío inherente en la modelación de variables térmicas. El RMSE revela valores más pronunciados, siendo las temperaturas máximas las más afectadas. A pesar de estos valores elevados en algunos casos, se subraya que la mayoría de los datos tienen un error inferior a 1 °C, indicando una precisión razonable en las predicciones. Este análisis cuantitativo del error se complementa con el RM, que muestra una consistencia notable entre las medias de los valores predichos y observados, con valores cercanos a 1. No obstante, el RSD señala dificultades para el modelo en capturar la variabilidad natural del entorno urbano. Este aspecto específico podría indicar que ciertas características térmicas distintivas del contexto urbano no se reflejan completamente en las predicciones del modelo.

Al examinar la evolución temporal del error, se observa un aumento durante los meses de invierno. Este fenómeno puede deberse a la menor disponibilidad de imágenes para crear covariables y a la complejidad climática asociada a estos meses, incluyendo fenómenos como nieblas, inversiones térmicas y eventos atmosféricos adversos. Aunque se registra mayor variabilidad en invierno, la mayoría de los errores de MAE y RMSE mantienen valores bajos en todos los meses, señalando una consistencia en el rendimiento del modelo a lo largo del tiempo. El análisis mensual de los resultados refuerza estas observaciones, destacando que las temperaturas máximas presentan los resultados más favorables en términos de ME, mientras que la temperatura media tiende a tener la menor magnitud de error, especialmente en primavera y verano. No obstante, se señala que los meses más fríos de las temperaturas mínimas y los meses más cálidos de las temperaturas máximas presentan mayores errores. La visualización temporal del error a través de gráficos en forma de calendario subraya un sesgo temporal, con mayores errores al principio de la serie temporal. Este fenómeno puede atribuirse a la falta de datos originales durante esos primeros años, especialmente antes de la instalación de los últimos sensores en 2019. La magnitud del error disminuye hacia el final de la serie temporal, evidenciando la influencia de la disponibilidad de datos originales en el rendimiento del modelo.

Además, los resultados residuales indican que los sensores más recientes, que cuentan con más datos reconstruidos, tienden a tener mayores valores residuales. Esto sugiere que la falta de datos originales al principio de la serie puede influir en la precisión de las predicciones. Se observa una mejor capacidad predictiva en sensores más urbanos en comparación con aquellos ubicados en ámbitos periurbanos o con importantes componentes vegetales, como parques.

En resumen, el modelo de interpolación *cokriging* demuestra una consistencia general en la realización de predicciones precisas de temperatura en Zaragoza. Aunque se identifican desafíos específicos, como la sobreestimación en la temperatura máxima y la dificultad para

capturar la variabilidad térmica urbana, la capacidad del modelo para adaptarse a la complejidad y variabilidad de las condiciones climáticas urbanas es evidente. La falta de correlación en los patrones de error entre las diferentes variables térmicas respalda la adaptabilidad del modelo a diversas condiciones climáticas y la capacidad para ofrecer predicciones sólidas en diferentes contextos térmicos.

## 4. Análisis de la distribución espacial de la temperatura urbana

El presente capítulo se enfoca en la caracterización climática de la ciudad de Zaragoza, utilizando como base los resultados obtenidos de la interpolación diaria de la temperatura, tanto máxima, media como mínima. Este análisis detallado de las condiciones térmicas tiene como objetivo principal entender la distribución espacial de la temperatura urbana en diferentes intervalos temporales, desde una perspectiva anual hasta una más detallada que abarca días específicos.

En primer lugar, se realizará un análisis general de la variabilidad climática a lo largo del año, identificando patrones en la temperatura urbana en términos anuales, estacionales y mensuales. Este enfoque amplio proporcionará una visión panorámica de cómo se comporta la temperatura en la ciudad en diferentes períodos temporales. Y gracias a las imágenes diarias se podrá analizar episodios y fenómenos específicos.

Posteriormente, se explorará en detalle el fenómeno de la ICU, centrándose en su comportamiento espacial y sus variaciones estacionales. Se examinarán los cambios espaciales en la intensidad de este fenómeno a lo largo de las estaciones y se incluirá el análisis de las diferencias horarias entre los distintos puntos de la ciudad que componen la red de sensores.

### 4.1. Variabilidad espacial y temporal climática en la ciudad

A pesar de que este trabajo se centra en los resultados diarios obtenidos de la interpolación diaria de las variables térmicas, se proporcionan en primer lugar los agregados anuales, estacionales y mensuales, ya que se consideran imprescindibles para la comprensión del comportamiento térmico de la ciudad. Estos agregados son el resultado del promedio de los *rasters* de temperatura (máxima, media y mínima) calculados en el Parte I. Todos los apartados de este capítulo se acompañan de diferentes cartografías climáticas, ya que se considera un recurso geográfico básico que aporta un marco de referencia apropiado para poder caracterizar el clima medio de la ciudad y su entorno. Como se ha podido observar en el apartado introductorio sobre las investigaciones en Zaragoza (1.3) existen trabajos previos y recursos cartográficos que han estudiado la distribución de la temperatura en la ciudad, pero ninguno con la elevada resolución espacial y temporal que aportan las mallas derivadas de la interpolación. Esto hace que la aportación de este trabajo sea novedosa y relevante.

#### 4.1.1. Temperatura anual

La representación de la temperatura anual, tanto la máxima, media como mínima, se ha llevado a cabo mediante la creación de tres mapas individuales (Figura 4.1, Figura 4.2 y Figura 4.3). Cada uno de estos mapas está acompañado de una leyenda por intervalos que se basa en una paleta de colores específica, proporcionando así un medio distintivo para la interpretación de todos los mapas térmicos de aquí en adelante. Adicionalmente, se ha añadido un mapa de referencia en la margen inferior derecha que muestra el trazado de varios transectos. Estos transectos han sido calculados utilizando los *rasters* anuales y están disponibles en tres variantes, una para cada variable térmica, como se observa en la Figura 4.4. Estos transectos están diseñados para abarcar algunos de los principales sectores de la ciudad, recorriendo vías importantes y revelando el comportamiento térmico de diversos espacios característicos tanto dentro del entorno urbano como periurbano. Asimismo, se ha considerado importante seguir la influencia de los transectos establecidos a finales de los

años 90 y principios de los 2000 (Cuadrat et al., 2005; Cuadrat, De la Riva, López, et al., 1993).

La temperatura anual media en las tres variables revela una serie de características comunes en Zaragoza. En primer lugar, el sector urbano construido resalta como el área más cálida en todos los mapas, contrastando con las zonas elevadas más agrestes situadas al noroeste, alrededor del escarpe, y al sur, cerca de los eriales de Valdespartera y las proximidades de los montes de Cuarte. Además, se observan temperaturas más bajas, aunque de manera más heterogénea, en las zonas de cultivo a lo largo de la ribera del Ebro y del río Gallego al noreste. Estas áreas presentan un mosaico de campos cultivados, en barbecho y de huertas con regadío, lo que contribuye a una distribución más variada de las temperaturas.

En cuanto a la magnitud de las temperaturas representadas en los mapas, todas se sitúan en valores cercanos a los valores normales calculados por AEMET para el observatorio de referencia en el Aeropuerto de Zaragoza (Tabla 3.7). En el caso de las temperaturas máximas, los valores oscilan entre 20,25 °C y 22,30 °C, frente a los 21 °C de las temperaturas medias mensuales/anuales de las máximas diarias. Las temperaturas medias fluctúan entre 14,55 °C y 16,71 °C, comparadas con los 15,5 °C calculados por AEMET. Por último, las temperaturas mínimas van desde 9,2 °C a 12,32 °C, mientras que AEMET estima un valor normal de 10 °C para las mínimas. Sin embargo, la ventaja de obtener una malla *grid* de temperaturas en este caso radica en su capacidad para ofrecer una representación térmica continua, en contraposición a un único valor de referencia. Además, permite analizar el rango absoluto de las temperaturas, lo cual revela la variabilidad dentro de la ciudad y con su entorno. Por ejemplo, se observa que las temperaturas máximas presentan la menor variación, con 2,05 °C, mientras que las mínimas registran la mayor variación, con 3,12 °C. Estos rangos de temperatura coinciden con observaciones realizadas en estudios previos (Cuadrat, 2004; López Martín, 2011), que indicaban que las mayores variaciones térmicas diarias entre el campo y la ciudad se producían durante la noche, asociadas en este trabajo con las temperaturas mínimas, en lugar de durante el día, que estaría relacionado con las temperaturas máximas.

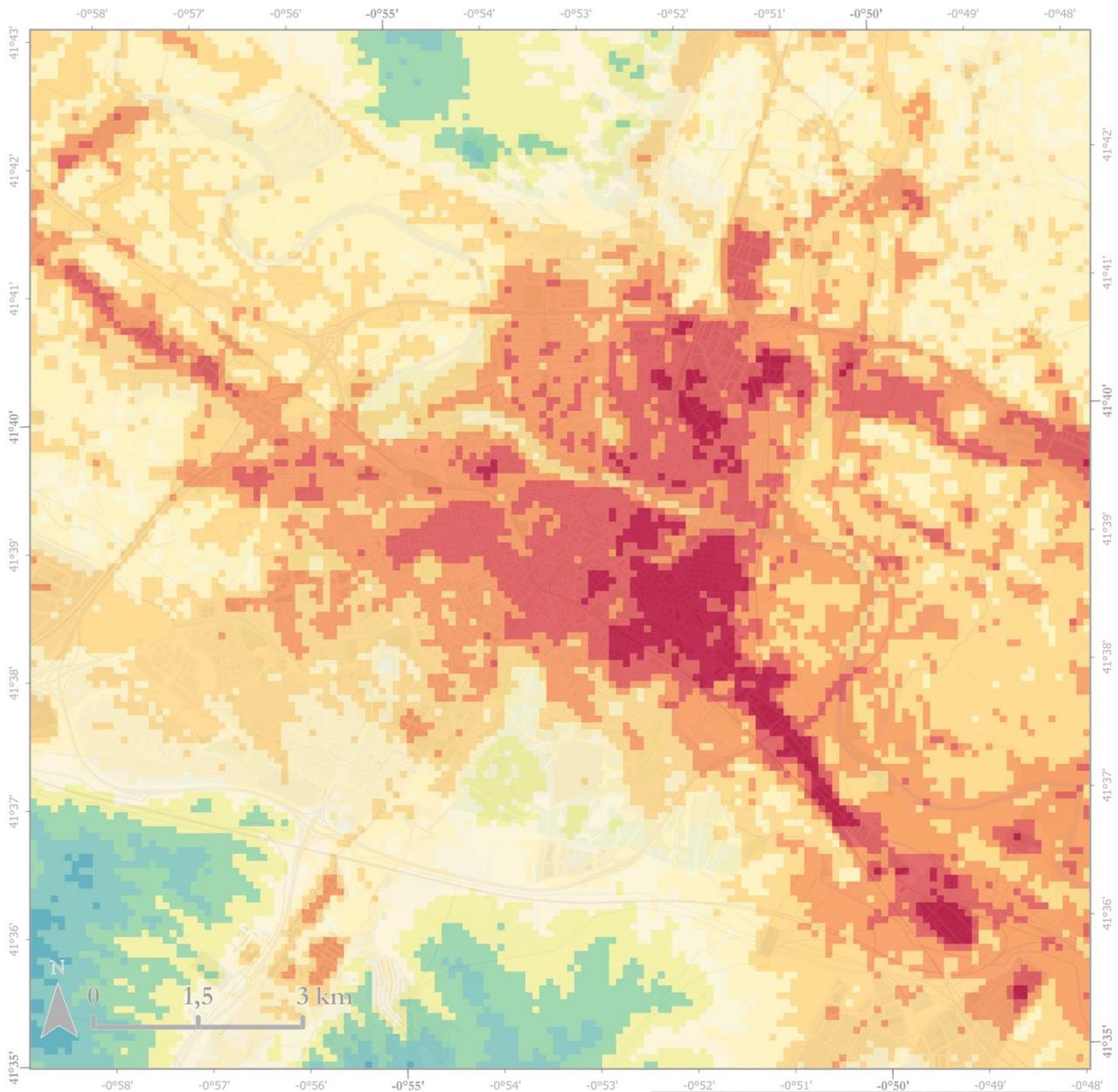
Además de las diferencias en rango y magnitud entre las variables térmicas, también se observan particularidades en su distribución espacial. En el caso de las temperaturas mínimas, se aprecia la característica forma de la ICU, con un centro urbano más cálido donde los valores superan los 12 °C. A medida que nos alejamos de las áreas densamente construidas, la temperatura tiende a disminuir en forma de áreas concéntricas. En el contexto de Zaragoza, es característico que la mayoría de las temperaturas más elevadas se concentran en la margen derecha del río, debido al desarrollo histórico de la ciudad hacia el sur. Estas áreas urbanas muestran una mayor amplitud térmica, con variaciones de hasta 2 °C en los *rasters* anuales, en comparación con las zonas rurales exteriores, donde las variaciones rondan 1 °C. Este comportamiento se puede atribuir a la inercia térmica de los materiales de construcción y a la mayor diversidad de espacios en el entorno urbano. Por supuesto, además de los aspectos mencionados, ya se ha señalado (De la Riva et al., 1997) cómo la radiación solar influye en estas diferencias. En las áreas urbanas, las características texturales y la rugosidad del medio junto con el juego de sombras que provocan afectan a las temperaturas. Por otro lado, en zonas llanas y abiertas, como los campos cultivados, la exposición al sol es más directa y completa, lo que también influye en temperaturas más homogéneas. Aunque en este último caso no hay que despreciar la importancia de la vegetación y la presencia de agua por medio del regadío. Además, en las zonas urbanas cálidas del centro también se observan pequeños espacios donde la temperatura desciende ligeramente, creando pequeñas islas urbanas de frescor. Estas áreas suelen coincidir con los principales espacios verdes de la ciudad, como el Parque Bruil o Miraflores, donde la temperatura puede descender hasta 1

°C en promedio, o plazas arboladas como la Plaza de los Sitios, donde los descensos alcanzan alrededor de 0,5 °C.

Por otro lado, la distribución de la temperatura media también presenta una forma concéntrica característica, aunque con un rango de temperatura menor, alrededor de 2,16 °C, que se acerca más a los valores de las temperaturas máximas. En este caso, a diferencia de las temperaturas mínimas, no se observa una diferencia tan marcada con los valores de la margen izquierda del río Ebro. Mientras que en las zonas de nueva construcción en el suroeste de la ciudad se homogeneizan.

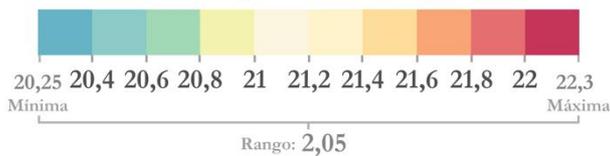
En el caso de las temperaturas máximas la distribución que presenta es distinta a las anteriores y se observa un desplazamiento de la hacia el sureste de las temperaturas urbanas más cálidas. Con un eje que comienza en la zona este de los barrios céntricos, se intensifica en Las Fuentes y San José los barrios más al este de la ciudad, y se expande siguiendo el eje de la carretera A-68 siguiendo el polígono industrial de Montemolín hacia la Cartuja Baja. Del mismo modo que se observa una disimetría periférica, en la cual la vertiente oriental es más cálida. Incluso se acentúan los valores máximos en los barrios rurales de Santa Isabel y Montañana al noreste.

Este desplazamiento de la isla térmica ha sido observado en estudios anteriores y se atribuye a la dinámica atmosférica local (Cuadrat, 1993, 2004; Cuadrat, De la Riva, López, et al., 1993), determinada por la dirección regional caracterizada por flujos de aire predominantes del noroeste. Este efecto de la intensidad y la dirección del viento sobre la temperatura urbana también se ha observado en otras ciudades como Sidney (Al-Obaidi et al., 2021) o Lisboa (A. Lopes et al., 2013). Además, la topografía desigual del valle de la Huerva, con un perfil más escarpado en su margen derecha, condiciona la acumulación de aire proveniente del noroeste, generando una especie de lengua fría que penetra en el sector suroccidental de la ciudad. La presencia de los cursos fluviales no solo aporta humedad, sino que también favorece la canalización del aire con su disposición paralela a los flujos predominantes, como en el caso del río Ebro, y un perfil transversal asimétrico, como en el caso de la Huerva. Este desplazamiento, determinado por la dinámica atmosférica regional, se hace más evidente en las temperaturas máximas, ya que, durante la noche, la intensificación del fenómeno de ICU en promedio, hace que adopte su forma característica. La importancia de la dinámica atmosférica general, y especialmente el viento, en la distribución de las temperaturas urbanas ha generado un gran interés y ha sido objeto de varios estudios (Cuadrat et al., 2005; Cuadrat, Saz, et al., 2015; Cuadrat & Vicente-Serrano, 2003). Estos estudios han demostrado que la dirección del flujo de viento influye directamente en el desplazamiento de las temperaturas más altas hacia el sector oriental cuando sopla el viento del noroeste (cierzo). Sin embargo, también se ha observado que los flujos de viento que vienen del sureste (bochorno) desplazan las temperaturas más cálidas hacia el noroeste.



## Temperatura anual media de las máximas

Temperatura (°C)



Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N  
 Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

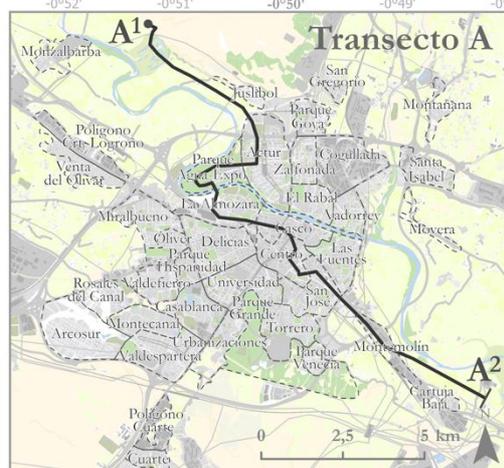
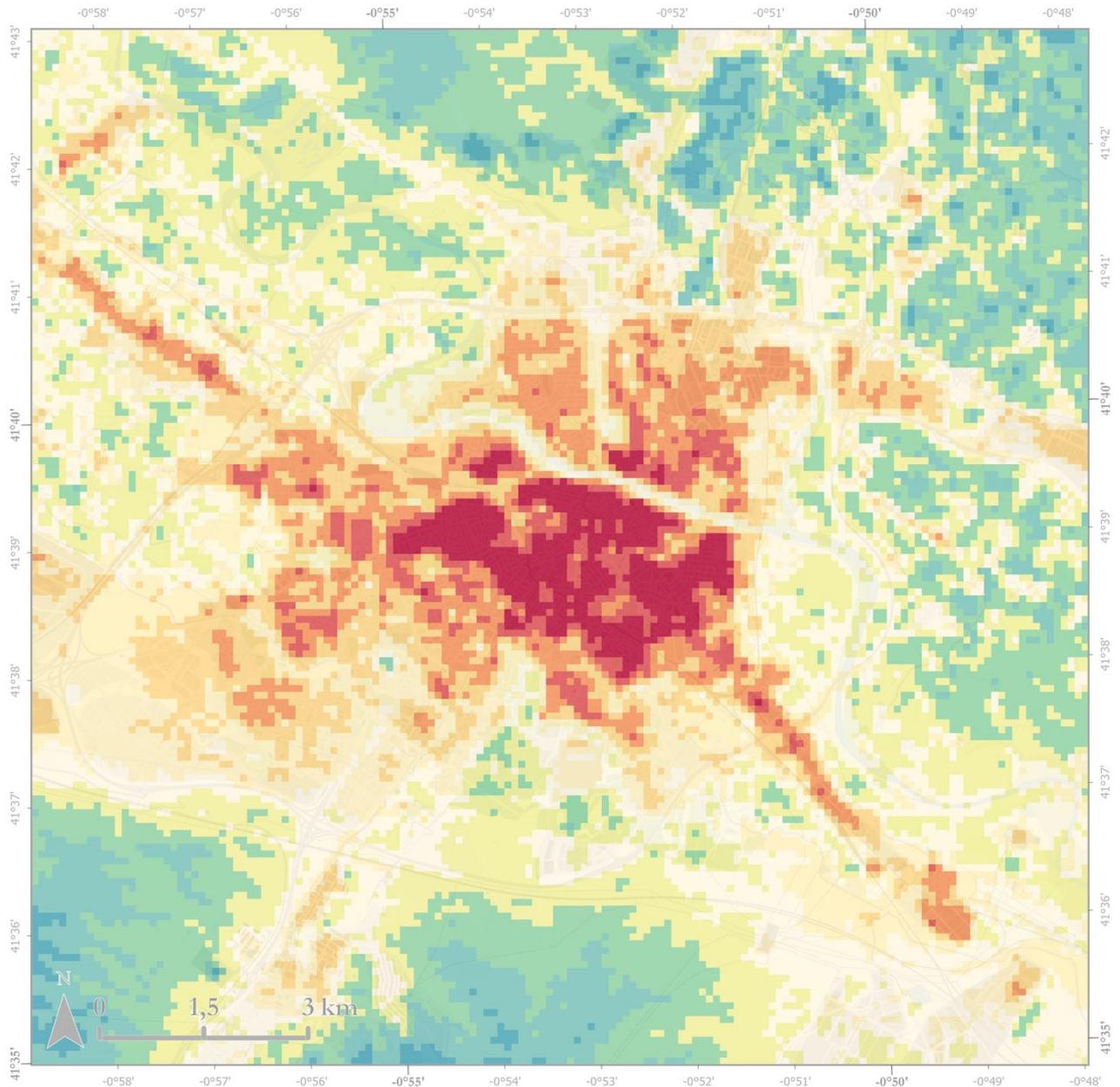
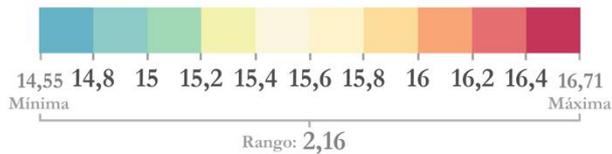


Figura 4.1. Mapa de temperatura anual media de las máximas de la ciudad de Zaragoza.



## Temperatura anual media de las medias

Temperatura (°C)



Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N  
Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional  
Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

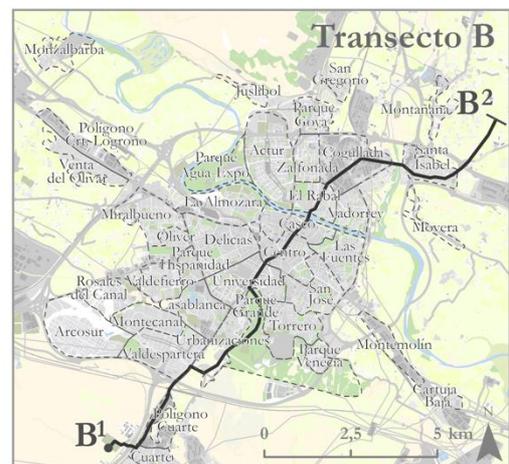
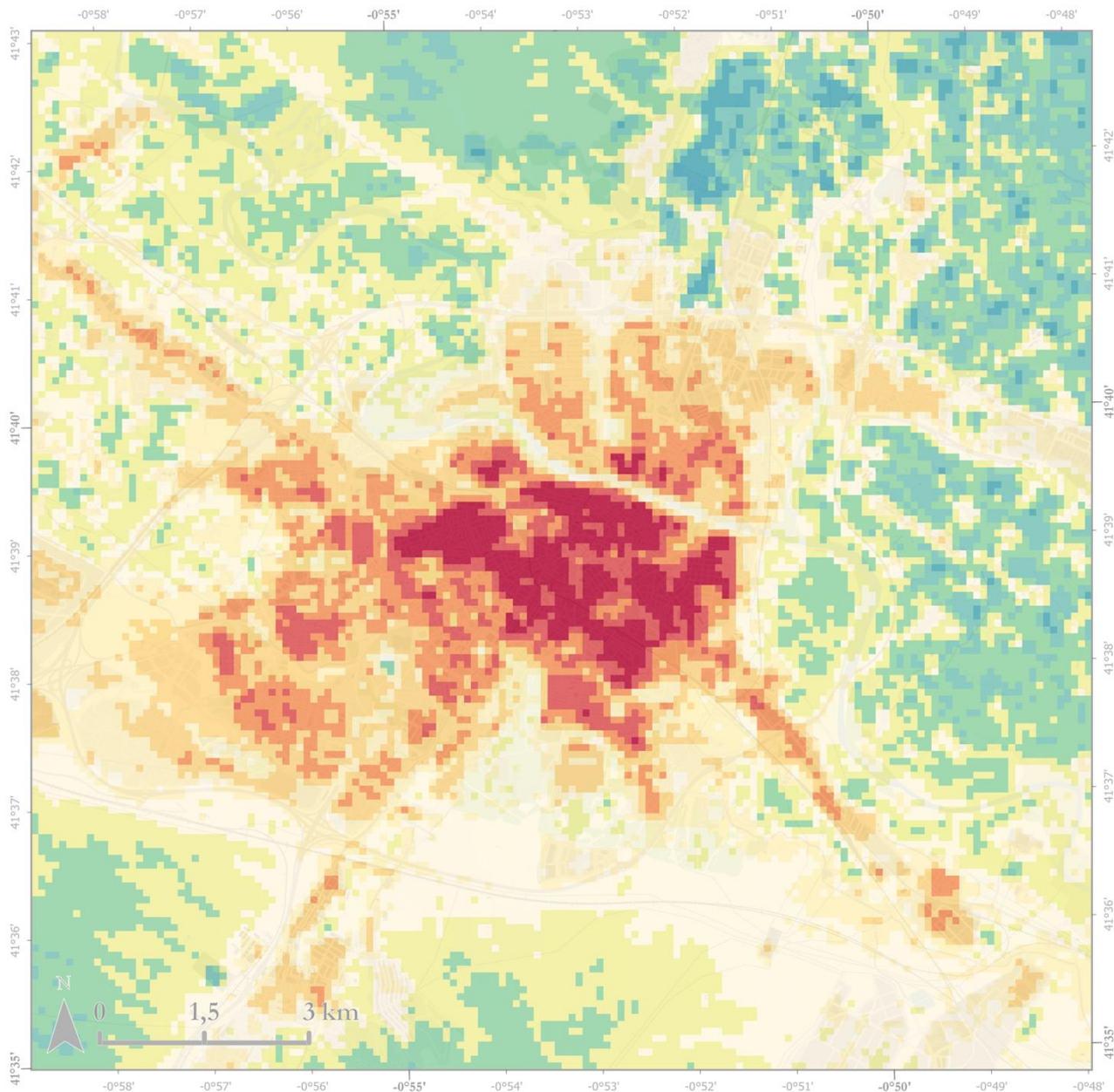
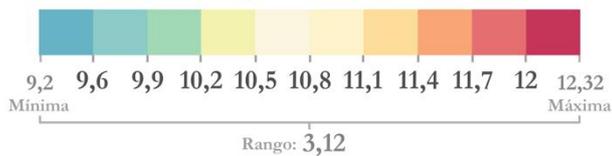


Figura 4.2 Mapa de temperatura anual media de las medias de la ciudad de Zaragoza.



## Temperatura anual media de las mínimas

Temperatura (°C)



Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N  
 Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

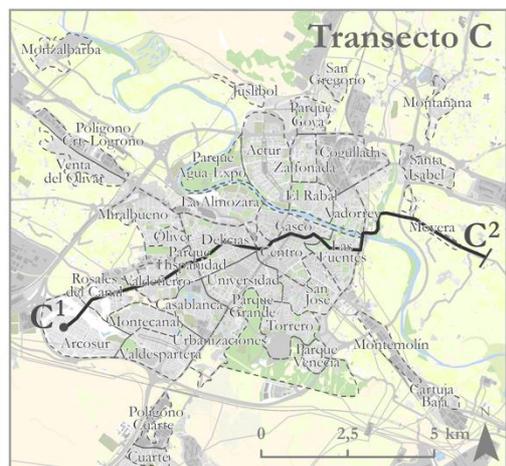


Figura 4.3. Mapa de temperatura anual media de las mínimas de la ciudad de Zaragoza.

Los transectos calculados en la Figura 4.4 proporcionan información detallada y ejemplos concretos que ayudan a comprender mejor la distribución de las temperaturas observadas en los mapas. Con este propósito, el transecto A (temperatura máxima) sigue una orientación NE-SO, reflejando la tendencia térmica mencionada anteriormente. Inicia cerca del castillo de Juslibol, en el escarpe de yesos, y concluye en la zona de cultivos junto al río Ebro y la Cartuja Baja. A medida que avanza el gráfico, se aprecia un aumento gradual de la temperatura en el margen este, disipando la típica forma de campana asociada a las áreas urbanas, donde alcanza valores superiores, aproximadamente 0,2 °C más altos. Las primeras secciones del gráfico corresponden a entornos naturales como el escarpe o los Galachos de Juslibol, seguidos de áreas de cultivo periurbanas con una intensa actividad vegetal, que registran las temperaturas más bajas, excepto en el caso del Parque del Agua, que muestra valores máximos anuales promedio de alrededor de 21,3 °C en algunos lugares. El transecto también revela claramente los puntos donde se producen las mayores alteraciones climáticas, como el cambio abrupto de temperatura al pasar de zonas de cultivo a áreas construidas, como el Parking Norte. Aquí, la temperatura aumenta casi 0,4 °C debido al suelo compacto e impermeable, predominantemente asfáltico. Luego, pasa a áreas residenciales, como el Actur, con edificaciones más abiertas y presencia vegetal. Otro punto destacado es el inicio del Centro, con una alta densidad de edificios y una textura urbana compacta. Asimismo, otro salto en el límite de los barrios de Las Fuentes y San José se produce en un espacio que mantienen una densidad urbana elevada, aunque con calles más estrechas en comparación con el centro de Paseo Independencia. Finalmente, el último salto ascendente culmina en el polígono industrial de Montemolín, la zona más cálida del recorrido, con temperaturas máximas alrededor de los 22,2 °C, debido a la rápida absorción y liberación de calor de los materiales utilizados en estas áreas, especialmente al mediodía. Momento en el cual la temperatura superficial alcanza valores muy elevados en estos espacios. Además, se observan pequeños espacios interurbanos que actúan como amortiguadores en el aumento de las temperaturas, como los pequeños parques urbanos de Miraflores, las inmediaciones de la Aljafería o la Plaza de los Sitios, donde la vegetación contribuye a aliviar el calor circundante ya sea con la presencia de árboles, zonas ajardinadas o láminas de agua.

El transecto B con orientación SO-NE, relacionado con las temperaturas medias, si exhibe la típica forma de campana asociada al fenómeno de la ICU, aunque con particularidades que el *raster* nos permite discernir y que los transectos de estudios anteriores no podían ofrecer al tratarse de mediciones a bordo de coches por la red vial. En este sentido, se destaca que la zona más cálida del transecto abarca el Centro y el Casco Histórico de la ciudad, donde se registran máximos de temperatura promedio anual alrededor de los 16,5 °C. A medida que nos alejamos de esta área, las temperaturas disminuyen gradualmente, alcanzando valores más bajos en zonas no construidas de suelos naturales, ya sean cultivados o no, como las inmediaciones de la Ciudad Deportiva del Real Zaragoza, donde inicia el transecto. Señalar el pequeño repunte en el caso de los cultivos se asocia con la ubicación de una granja o establo, que se intercala con las zonas de cultivo. De normal, este tipo de construcciones son comunes y forman parte del paisaje rural, pero suelen ser de pequeñas dimensiones. En esta ocasión el tamaño de la construcción y los materiales utilizados en los revestimientos de metal y chapa hace que sobresalga respecto al resto del espacio cultivado. No obstante, el incremento progresivo de la temperatura hacia el núcleo urbano no es constante ni lineal, manifestándose en una serie de dientes o escalones irregulares debido a los diversos cambios en el entramado urbano. Los polígonos industriales, por ejemplo, continúan siendo más cálidos que sus entornos naturales, siendo a menudo el primer cambio significativo de cobertura respecto al entorno circundante junto con las redes viales como carreteras o autopistas, pero no alcanzan el valor máximo como en el caso del promedio de las máximas. Un espacio no analizado previamente son las construcciones unifamiliares, ya

sea dispersas o en urbanizaciones privadas, que, junto con los barrios rurales, donde predominan las casas de pocas plantas y una menor densidad de construcción que en la ciudad, representan un cambio gradual en la temperatura. Por ejemplo, las urbanizaciones como La Junquera o Las Abdulas, que atraviesa este transecto, se observa una temperatura cercana a los 15,5 °C. Estas áreas están caracterizadas por casas o chalets con zonas ajardinadas o piscinas privadas. Por otro lado, el barrio rural de Santa Isabel registra temperaturas más cercanas a los 16 °C, con un tipo de edificación principalmente de adosados o incluso residencial, pero de baja altura. Además, la presencia de ríos como el Ebro o el gallego genera un descenso en la temperatura debido al efecto de enfriamiento adiabático, la cobertura vegetal circundante y la circulación del aire. Lo mismo ocurre en el Parque Grande, otro importante parque metropolitano de la ciudad, donde la extensión y la vegetación contribuyen a una marcada disminución de la temperatura.

El transecto C, que se enfoca en las temperaturas mínimas y sigue una orientación O-E, destaca claramente el efecto de la ICU al atravesar algunos de los barrios más cálidos de la ciudad, concentrando temperaturas más elevadas en torno a los 12°C de promedio anual. Al pasar por los barrios de Delicias, Centro, Casco Histórico y Las Fuentes, el transecto muestra una especie de meseta constante en temperaturas muy altas, reflejando las características urbanas de estas zonas centrales que favorecen este fenómeno. Los pequeños descensos en las temperaturas se observan en espacios abiertos como plazas, que interrumpen la compacidad de los espacios edificados y a menudo cuentan con algo de vegetación, como árboles. Espacios como la glorieta de los Zagriés en el límite entre Delicias y el Centro, o plaza España y plaza Aragón como se aprecia en el transecto B. Además del efecto de enfriamiento proporcionado por los parques urbanos, como Bruil y Delicias, se destacan las zonas verdes ajardinadas con césped y arbustos decorativos, la desembocadura del río Gallego, con vegetación de ribera y campos de cultivo, y el entorno del Canal Imperial y el Camping de Zaragoza, donde la presencia de vegetación y el curso de agua contribuyen al enfriamiento. En la margen este del transecto se encuentra el barrio rural de Movera, caracterizado por un desarrollo lineal en torno a la carretera CV-314, con construcciones antiguas y modernas entre campos de cultivo y algunas edificaciones agro-industriales. Este espacio presenta cierta heterogeneidad que se refleja en la gráfica, con sus altibajos y su disposición en forma de sierra. En el lado opuesto del transecto, la zona oeste y suroeste de la ciudad, barrios como Arcosur o Valdespartera, ha sido poco detallada hasta ahora. Estos son espacios de crecimiento urbanístico en la última década, donde antiguos terrenos sin construir ahora se están desarrollando como futuros parques de viviendas en construcción. Sin embargo, la crisis inmobiliaria española de 2008 detuvo temporalmente este desarrollo, dejando suelos desnudos de yesos y arenisca removidos durante mucho tiempo, mezclados con viales asfaltados, pero sin edificaciones. Estas características propician un aumento de la temperatura si lo comparamos con el entorno natural, especialmente en las mínimas, que se mantienen en torno a los 11°C. Si bien esta cifra está por debajo de los espacios ya construidos, como el barrio de Rosales del Canal con 11,5 °C, sigue siendo superior a la de los barrios rurales o las urbanizaciones periféricas, que registran alrededor de 10,5 °C.

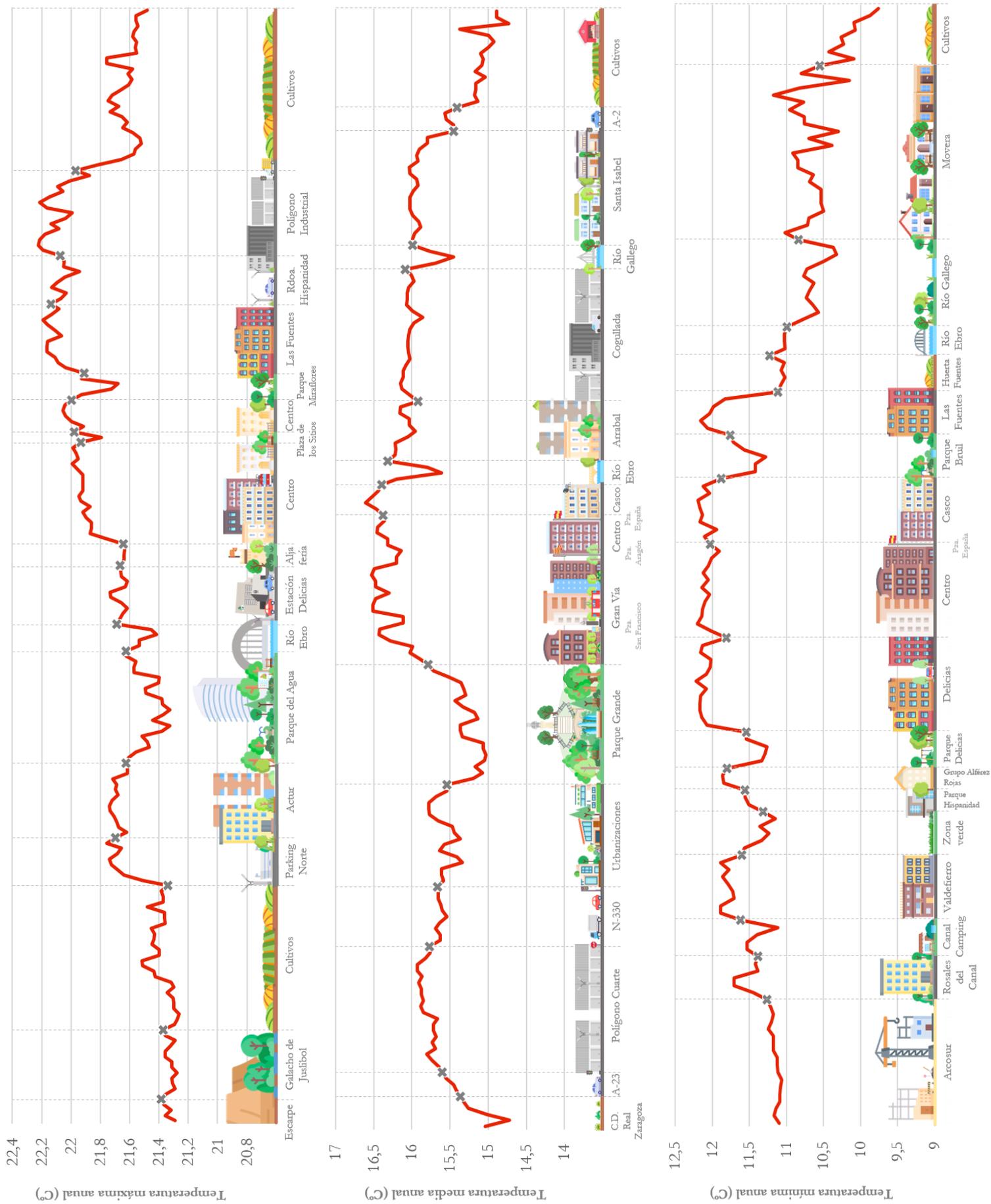


Figura 4.4. Transectos de temperatura anual media. a) Transecto A de las temperaturas máximas. b) Transecto B de las temperaturas medias. c) Transecto C de las temperaturas mínimas.

La Figura 4.5 presenta un diagrama de cajas que muestra los valores de temperatura anual promedio mínimos (a) y máximos (b) extraídos de los *rasters* en distintos espacios de la ciudad. Estos espacios abarcan diferentes barrios urbanos, distritos, barrios rurales o poblaciones cercanas a la ciudad que están dentro del área de interpolación de temperatura. Además, se incluyen espacios específicos con características singulares como polígonos industriales o grandes parques metropolitanos. Todos estos espacios se ajustan a las zonas urbanizadas y excluyen entornos naturales como ríos, cultivos o áreas naturales protegidas. Cada uno de estos espacios tiene una distribución diversa en cuanto a tamaño y forma, pero su ubicación se puede consultar en el mapa auxiliar de localización que se encuentra en los mapas anuales (Figura 4.1, Figura 4.2 y Figura 4.3).

En las figuras anteriores, se han discutido patrones generales de distribución de temperatura en la ciudad y su magnitud a través de los mapas. Mientras que, en el caso de los transectos, se ofrecen ejemplos de cómo estos patrones se distribuyen en diferentes puntos de la ciudad. Con esta última gráfica, se analiza el comportamiento de los distintos espacios a escala intraurbana que conforman la ciudad y cómo se comportan en términos de temperatura máxima y mínima. Los colores que distinguen cada una de las cajas están relacionados con una clasificación simple de los espacios intraurbanos. El verde oscuro se asocia con los parques metropolitanos, el verde claro con urbanizaciones de adosados o unifamiliares donde predominan las construcciones de menos de tres plantas y vegetación. En marrón, se representan pequeños barrios rurales de casas bajas, rodeados en su mayoría por zonas de cultivos o áreas naturales. El color amarillo engloba espacios heterogéneos como Santa Isabel y Cuarte, que comparten características tanto de barrios rurales como urbanos. Los polígonos industriales más destacados se muestran en gris, mientras que los barrios residenciales de la ciudad, con origen desde mediados de los años 80 hasta la actualidad, se representan en color naranja. Estos barrios se caracterizan por contar con viales más amplios, mayor presencia de vegetación y una altura de edificación mayor, además de un sistema urbano más planificado. Finalmente, en color rojo se destacan el núcleo central de la ciudad y los barrios más populosos, con origen en las décadas de los 50 y los 60. Aquí, la alta densidad de edificación y la escasez de vegetación son características comunes.

Los espacios del núcleo central urbano, como se mencionó anteriormente, son los que presentan las temperaturas más elevadas. Las principales diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas están determinadas por la influencia de la dinámica atmosférica regional o el fenómeno de la ICU. En particular, el Centro, el Casco Histórico, San José, Las Fuentes y Delicias son los espacios más cálidos de Zaragoza. Es importante destacar la dispersión de los valores en los barrios del Casco, San José y Las Fuentes, que muestran un sesgo y una simetría hacia los valores más cálidos. Esto se debe a que, aunque se han ajustado las zonas analizadas, los propios espacios no son totalmente homogéneos, y áreas verdes como parques o plazas ajardinadas incorporan valores más bajos de temperatura. Por ejemplo, el parque Bruil en Las Fuentes, el Miraflores en San José o el Centro, y áreas cercanas al río en el Casco Histórico, donde se nota especialmente el contraste en las temperaturas mínimas. Algunos de estos casos quedan bien reflejados en los transectos urbanos. También es relevante mencionar el caso de Oliver y Valdefierro, que, a pesar de tener características comunes, ocupan las posiciones más bajas en términos de temperaturas, principalmente en las máximas. Esto se debe principalmente a su ubicación en la zona oeste y suroeste de la ciudad, que no se ve tan afectada por el desplazamiento de la ICU motivado por el viento.

Las zonas de barrios residenciales muestran una notable heterogeneidad en su comportamiento térmico, la cual está determinada por sus propias características y su evolución histórica, lo que ha dado lugar a una diversidad de espacios considerable. Barrios

con una larga tradición y un crecimiento a lo largo de distintas épocas presentan una mezcla de etapas constructivas con particularidades propias, creando espacios similares a la tipología anterior pero intercalados con nuevas áreas que muestran una mayor planificación urbana. Por ejemplo, el barrio El Rabal o Arrabal, situado en la margen izquierda del Ebro, funciona como una especie de segundo casco histórico de la ciudad. Con la instalación de numerosas fábricas e industrias durante el siglo XX, y la construcción de nuevos bloques de viviendas en el siglo XXI en áreas como la avenida de Cataluña y la calle Marqués de la Cadena. Esto ha producido una dispersión de valores muy marcada, aunque con una tendencia hacia temperaturas más altas. Este patrón también se observa en barrios como Torrero – La Paz, Casablanca o La Almozara. En el caso de La Almozara, la alta dispersión de valores se atribuye también a la diversidad de espacios y coberturas que conforman el barrio, que incluyen áreas ribereñas y parques urbanos, así como grandes espacios asfaltados como el Parking Sur o la estación Delicias, junto con una variedad de edificaciones correspondientes a diferentes etapas constructivas. Por otro lado, los barrios más recientes muestran una mayor homogeneidad en su morfología y trazado urbano, así como una mayor presencia de zonas ajardinadas, incluso en áreas comunitarias de los edificios. Esto, junto a su lejanía del centro urbano, contribuye a que zonas como el Actur, Parque Goya, Arcosur, Valdespartera o Parque Venecia presenten temperaturas más bajas en comparación con otros barrios más antiguos y heterogéneos.

Las zonas de la ciudad ocupadas por urbanizaciones o recintos de casas unifamiliares y adosados muestran un comportamiento térmico distinto dependiendo de la variable analizada. En el caso de las temperaturas mínimas, aunque suelen tener promedios inferiores a las zonas céntricas y otros barrios compactos, no son necesariamente las más frías de la ciudad. Su temperatura mínima está influenciada principalmente por su proximidad al centro de la ciudad, ya que algunas de estas áreas están rodeadas de zonas cálidas, como el caso de Parque Hispanidad y sus alrededores. Estas urbanizaciones, caracterizadas por edificaciones de baja altura y abundancia de zonas verdes, están encajadas entre sectores más cálidos como Valdefierro, Oliver o Delicias. Esto significa que, durante la noche, el efecto de la ICU no permite que las temperaturas descendan tanto como en otras partes de la ciudad con una densidad de urbanización mayor pero más alejadas del centro. Así, solo las urbanizaciones ubicadas al sur de la ciudad, encajadas en los meandros del río Huerva hasta llegar al Parque Grande y la parte más oriental de los Pinares de Venecia, que están más alejadas del efecto de la ICU, mantienen valores más bajos de temperatura. En estas áreas, las temperaturas medias y medianas suelen rondar los 11 °C, lo que las convierte en una de las zonas más frescas de la ciudad. Por otro lado, en el caso de las temperaturas máximas, el efecto de enfriamiento relacionado con la presencia de vegetación y una mayor ventilación en las zonas más abiertas hace que estas áreas se destaquen como espacios más frescos en comparación con otras zonas de la ciudad. Esto se debe a que la vegetación y la ventilación pueden ayudar a disipar el diurno, lo que resulta en temperaturas máximas más bajas en estas zonas residenciales.

La zona de Santa Isabel en el noreste y la villa de Cuarte al sur representan un tipo de espacio intermedio entre las áreas rurales de baja densidad y las zonas urbanizadas más densas. En cuanto a las temperaturas mínimas, estas áreas registran valores bajos, principalmente debido a su distancia de la ciudad y a la influencia térmica urbana. Es importante destacar que, a una distancia similar de la ciudad, se encuentra el sensor de referencia S21 (C.D. Real Zaragoza), seleccionado por su ubicación alejada del efecto de la ICU generado por la ciudad. Por otro lado, en el caso de las temperaturas máximas, la ubicación de Santa Isabel en la zona este contribuye a que los valores registrados sean más altos debido a sus características urbanas. En cambio, Cuarte, protegida de este

desplazamiento de la isla de calor, se convierte en una de las zonas más frescas en comparación con otros espacios.

El comportamiento de los barrios rurales periféricos se caracteriza por registrar las temperaturas mínimas más bajas de todos los espacios analizados y una distribución muy asimétrica en cuanto a las temperaturas máximas. Durante el día (temperaturas máximas), estos espacios alejados de la ciudad, mayormente compuestos por casas de menos de tres alturas y un desarrollo urbano improvisado, tienden a calentarse fácilmente debido a una mayor exposición a la radiación solar y a la menor presencia de sombras del entramado urbano. Estos espacios son fácilmente distinguibles en el mapa al contrastar con el fondo de campos de cultivo ribereños que prevalece en la periferia. Las diferencias predominantes entre los barrios rurales en cuanto a la distribución de las temperaturas se deben principalmente a la dinámica atmosférica regional y, por lo tanto, a su ubicación en relación con la dirección general del viento en la zona, así como al tamaño del barrio, la densidad de urbanización, el tipo de construcción y el grado de compacidad e impermeabilidad del suelo. Destaca la Cartuja Baja como uno de los sectores más cálidos en las temperaturas máximas. Este antiguo monasterio convertido en pueblo ocupa una pequeña área al sureste de la ciudad, entre los campos de cultivo y un polígono industrial que sigue el curso de la autovía del Ebro (A-68). La cercanía a estos usos del suelo, junto con su pequeño tamaño y su ubicación en el mapa, puede haber contribuido a una sobreestimación de los valores de temperatura en este espacio por parte del modelo de interpolación, especialmente dado su alejamiento de la red de sensores de referencia. Sin embargo, si consideramos el comportamiento general de estos espacios, durante las noches y las temperaturas mínimas, tienden a ser más frescos. Esto se debe a su capacidad limitada para retener el calor acumulado durante el día. Zonas como Movera al este de la ciudad y San Gregorio al norte registran las temperaturas más bajas. Es especialmente notable el caso de San Gregorio, con una distribución de valores sesgada hacia las temperaturas más bajas, rondando los 10 °C y llegando en algunos casos a los 9,5 °C.

En este análisis, también se han considerado dos grandes zonas verdes de la ciudad: el Parque del Agua y el Parque Grande. Ambos parques suelen ser estar entre las zonas más frescas ya sea en el caso de las temperaturas máximas como de las mínimas. Muchos estudios (Aram et al., 2019; Bowler et al., 2010; Brown et al., 2015; Norton et al., 2015) sugieren que los parques urbanos, particularmente aquellos con una alta cobertura arbórea y un diseño bien planificado, pueden reducir la temperatura del aire en las ciudades hasta 2 °C, extendiendo sus efectos de enfriamiento a las áreas circundantes y mejorando el confort térmico tanto fisiológica como psicológicamente. Una relación entre la vegetación de las zonas verdes urbanas y el clima de la ciudad que también ha sido estudiado en otras ciudades españolas como Madrid (Almendros, 1990, 1992, 1999; Aram, Solgi, Baghaee, et al., 2020), Valencia (Ballester-Olmos, 1991, 1993; Gomez et al., 1998), Barcelona (Moreno-García & Baena, 2019) y también en Zaragoza (Ferrández Pastor, 2023).

Para finalizar, los polígonos industriales están ubicados principalmente en el área periurbana y conectados a las principales vías de comunicación, como Montemolín, Cartuja Logroño o Cuarte, presentan una disposición lineal. Sin embargo, existe el caso de Cogullada, un polígono industrial surgido en los años 60, que está cada vez más integrado en la ciudad debido a la pérdida de uso industrial y al aumento de la demanda residencial en la zona. Estos espacios se caracterizan por estar compuestos principalmente por grandes naves y parques logísticos, en lugar de grandes complejos industriales o fábricas. Esto afecta a las temperaturas, ya que no emiten calor producido por la actividad fabril o energética. En cambio, se calientan rápidamente durante el día debido a la radiación solar directa, pero también se enfrían rápidamente por la noche. Esto se debe a la capacidad de los polígonos

industriales para expulsar rápidamente el calor almacenado durante el día. Este proceso se observa en el gráfico, donde las temperaturas máximas diurnas, pueden alcanzar valores de temperatura muy elevados, especialmente en la zona este. Sin embargo, durante las temperaturas mínimas nocturnas, los valores suelen ser más bajos que en las zonas urbanas más compactas, pero más altos que en áreas más abiertas con mayor presencia de vegetación.

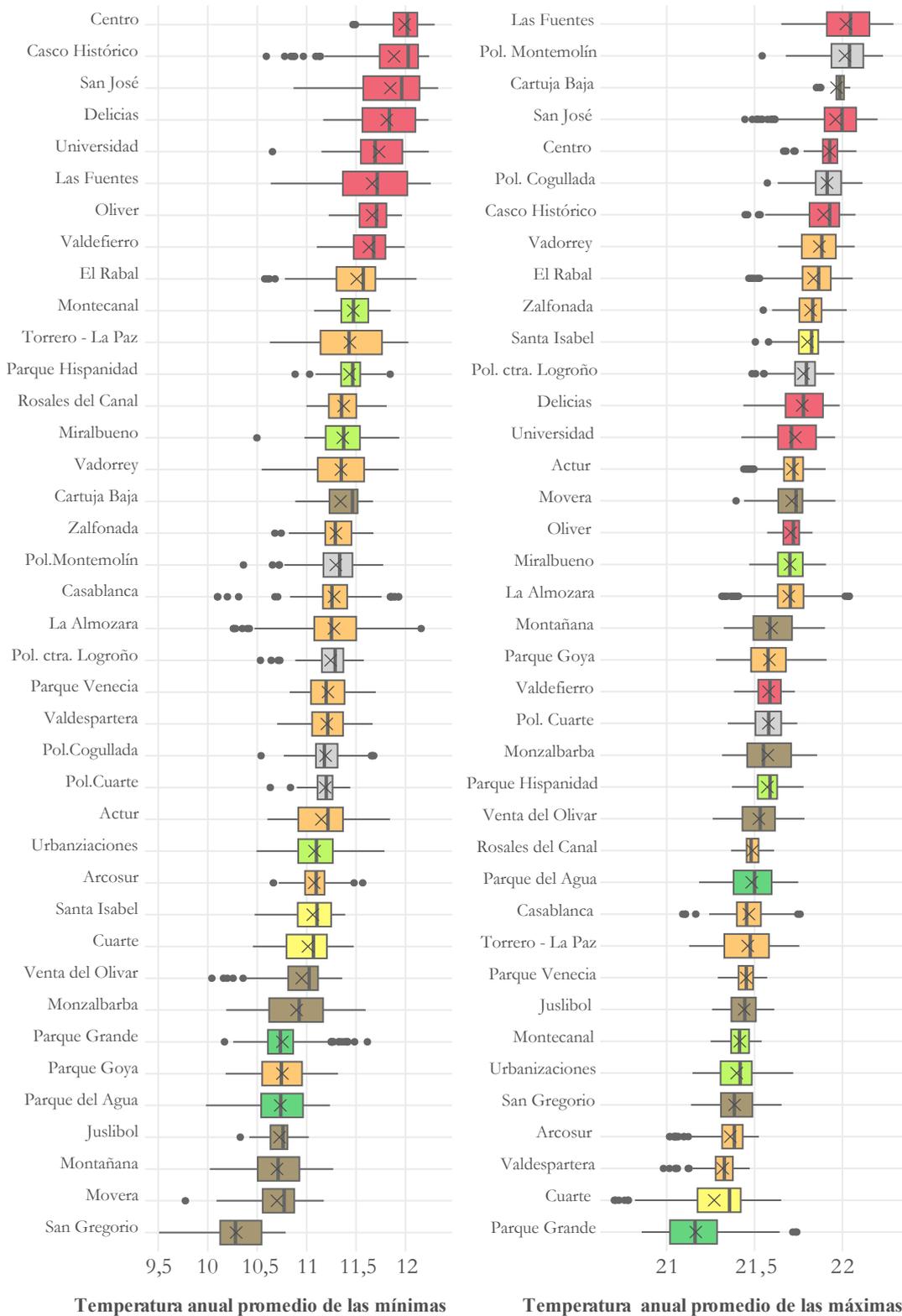


Figura 4.5. Gráfica de cajas con la temperatura anual promedio mínima (a) y máxima (b) para las distintas zonas de Zaragoza y su entorno periurbano.

#### 4.1.2. Temperatura estacional

La representación de la temperatura estacional, tanto la máxima, media como mínima, también se ha llevado a cabo mediante la creación de tres mapas (Figura 4.6, Figura 4.7 y Figura 4.8), pero en esta ocasión cada uno de ellos compuesto por cuatro mapas estacionales. El enfoque de representar la temperatura estacional a través de mapas compuestos es una estrategia interesante para abordar la variabilidad de las temperaturas a lo largo del año en Zaragoza, pero con ciertas dificultades cartográficas y de representación. Dada la amplia disparidad de magnitudes y la complejidad de combinar tres variables térmicas distintas, así como las diferencias en temperaturas debido al clima mediterráneo continental semidesértico de la región, es crucial utilizar un enfoque que permita una comparación efectiva entre estaciones y variables. La elección de desarrollar mapas de intervalos determinados por deciles (cada uno de los nueve valores que dividen, en diez partes iguales, un grupo de datos ordenados) es una forma efectiva de representar esta variabilidad. Esta metodología permite identificar fácilmente cómo se distribuyen las temperaturas más altas y más bajas a lo largo del año, así como el gradiente entre ambas. Aunque puede que la leyenda no sea tan sencilla de interpretar para consultar valores específicos, proporciona una visión general de cómo varían las temperaturas en la región y cómo se distribuyen en diferentes rangos.

La dicotomía entre los espacios urbanos construidos y los suelos naturales es nuevamente evidente en los mapas estacionales. Los valores intermedios suelen encontrarse en la interfaz entre el campo y la ciudad, identificados como suelos desnudos donde la vegetación es escasa y el suelo pavimentado es limitado. En contraste, la ciudad se distingue claramente como un espacio más cálido, con temperaturas que tienden a distribuirse hacia los deciles más elevados. Esta distinción entre áreas urbanas y naturales resalta la influencia significativa que la infraestructura construida y la falta de vegetación y suelo permeable tienen en las temperaturas locales. Esta tendencia se observa tanto en las temperaturas máximas como en las mínimas y otros estudios han documentado un aumento de 1,6°C en las temperaturas máximas (diurnas) y de 3,3°C en las mínimas (nocturnas) en zonas urbanas en comparación con áreas rurales (Ziska et al., 2004). Al mismo tiempo que han señalado como las zonas urbanizadas muestran una mayor variabilidad en las temperaturas mínimas que en las temperaturas máximas (Tam et al., 2015). En Zaragoza, también se observa esta situación y los mapas muestran que los rangos de temperatura son más altos en el caso de las mínimas, con valores superiores a 3 °C, en comparación con las medias, que registran valores superiores a 2 °C, y las máximas, con valores cercanos a los 2 °C, independientemente de la estación del año. Es importante señalar que la noción de que las zonas urbanas son siempre más cálidas que sus alrededores no es del todo precisa. De hecho, el fenómeno de la isla de frío urbano (IFU o UCI por sus siglas en inglés *Urban Cold Island*) es un claro ejemplo de cómo, en condiciones adecuadas y en momentos específicos, la ciudad puede registrar temperaturas más bajas que su entorno rural circundante. Sin embargo, este fenómeno es menos común y menos intenso que la ICU, y tiende a ocurrir principalmente después del amanecer y en las primeras horas de la mañana, momentos en los cuales los mapas presentados podrían no reflejarlo de manera precisa al utilizar temperaturas medias de mínimas, medias y máximas.

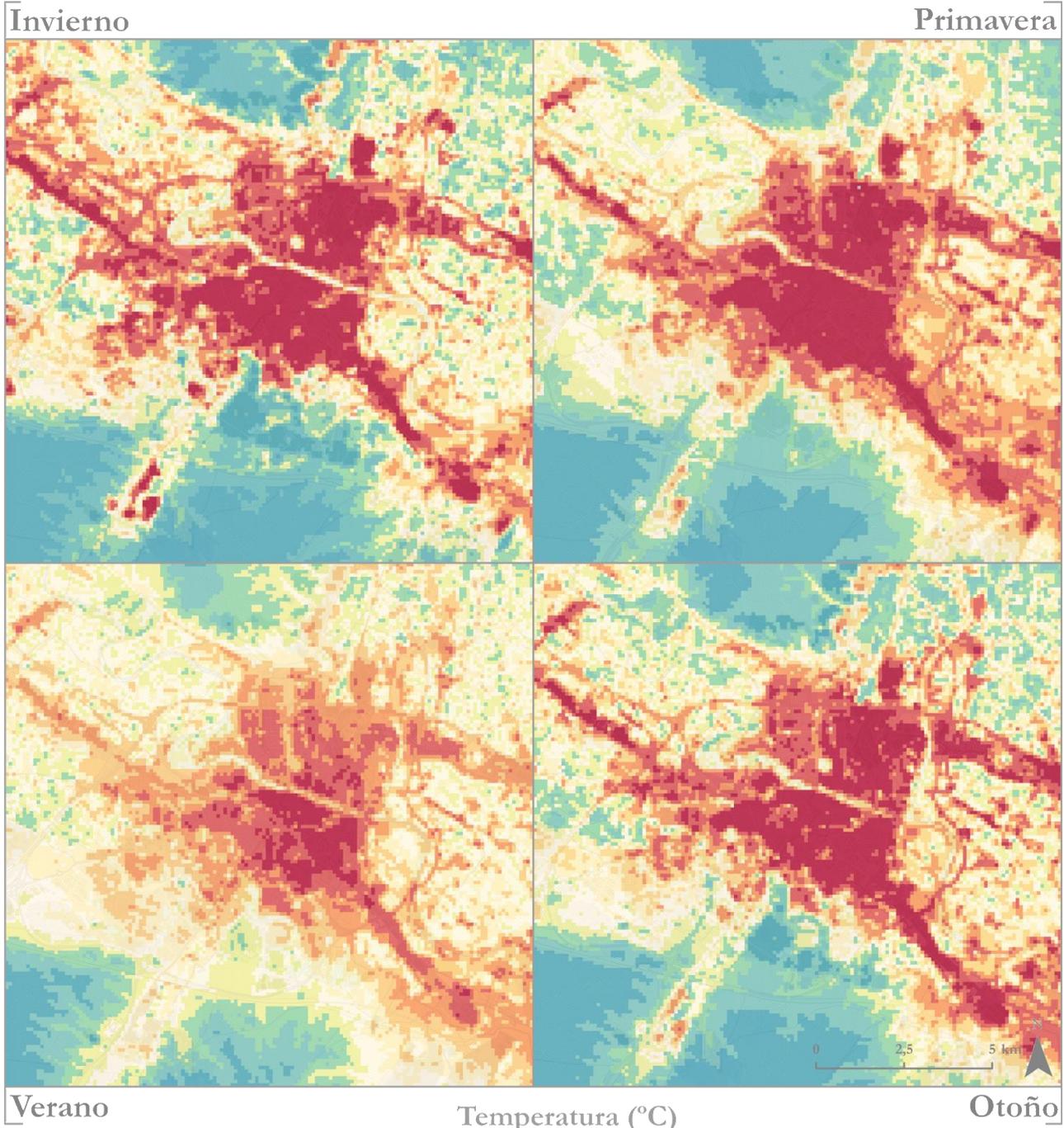
Estacionalmente, la distribución de la temperatura se caracteriza por una intensificación de las diferencias entre zonas urbanas y rurales durante el invierno, donde los deciles más altos se encuentran principalmente en áreas urbanizadas y construidas. Esta disparidad se acentúa especialmente en el caso de las temperaturas mínimas, como ya se ha comentado. Esta diferencia en los mapas estacionales es más evidente al observar los umbrales que marcan los deciles: en el caso de las temperaturas máximas invernales, hay

incrementos en los umbrales centrales, en torno a 0,05 °C y 0,04 °C, mientras que para las temperaturas mínimas, este incremento es de 0,12 °C. Por el contrario, durante el verano, esta dicotomía se suaviza, ya que la mayor parte del valle del Ebro experimenta temperaturas elevadas, mientras que los valores más frescos se concentran en zonas más elevadas al sur y al norte. Sin embargo, en estas áreas, los valores más altos de elevación (MDT), junto con la falta de urbanización y la presencia de vegetación de tipo estepario, podrían resultar en una subestimación de la temperatura por parte del modelo. El mapa de temperaturas máximas durante el verano muestra claramente este patrón, destacando los espacios densamente urbanizados en el centro de la ciudad y en el corredor que se extiende hacia el sureste, tal como se observaba en el mapa anual promedio de las máximas (Figura 4.1). La diferencia entre el verano y el invierno ha sido una de las observaciones más destacadas en los estudios estacionales realizados en la ciudad anteriormente. Aunque estos estudios se centran en la ICU, también muestran considerables variaciones estacionales (Barrao, Serrano-Notivoli, Saz, et al., 2022; Cuadrat et al., 2022).

En el caso del otoño y la primavera, estas diferencias también se producen, pero son menos pronunciadas y las variaciones respecto al promedio anual son menores. En otoño, su comportamiento es más similar al del invierno, mientras que en primavera muestran una transición hacia los valores de verano. Durante la primavera, las mayores diferencias con respecto a los valores anuales se observan en zonas donde la vegetación tiene una gran importancia espacial, debido al ciclo fenológico de las especies locales. En estos meses primaverales, la mayoría de las especies, ya sean ribereñas o cultivadas, aumentan su actividad biológica hasta alcanzar su máximo apogeo. El mejor ejemplo se observa en las temperaturas mínimas de primavera cuando se comparan con el promedio anual. Durante esta época, los cultivos de regadío, que están en pleno esplendor, registran temperaturas más bajas que el promedio anual. La actividad vegetal desempeña un papel crucial como se evidencia en los sotos ribereños del Galacho de Juslibol y ciertas áreas del Parque del Agua. Durante el invierno, la caída de hojas y la disminución de la actividad vegetal resultan en un efecto de enfriamiento menos pronunciado en estos espacios. El modelo muestra colores más rojizos en estas zonas, indicando temperaturas más elevadas en comparación con áreas con mayor actividad vegetal. Este fenómeno resalta la capacidad de la vegetación para proporcionar un efecto de fresco característico durante las estaciones más cálidas y un efecto de aislamiento durante los meses más fríos. En contraste, durante la primavera, el resurgimiento de la actividad vegetal en estos espacios ribereños resulta en temperaturas más frescas y un aspecto más verde en los mapas. Este cambio refleja la capacidad de la vegetación para absorber el calor y proporcionar sombra, lo que contribuye a temperaturas más agradables en estas áreas durante los meses más cálidos.

En contraposición, las zonas urbanas muestran una menor variabilidad estacional en relación con la actividad vegetal. Durante otoño y primavera, estas áreas mantienen una consistencia con los valores anuales, lo que indica una influencia vegetal más limitada en la modulación de las temperaturas. Esta influencia se restringe principalmente a las zonas verdes y espacios ajardinados urbanos, muchos de los cuales están cuidadosamente controlados con sistemas de riego y mantenimiento. Además, la elección de especies perennes en estos espacios minimiza la variación estacional, enfocándose más en proporcionar un entorno fresco en comparación con las áreas urbanizadas circundantes. Este enfoque más controlado y constante en la vegetación urbana contribuye a mantener una estabilidad térmica relativa en estas zonas durante las estaciones de transición como otoño y primavera.

# Temperatura estacional media de las máximas

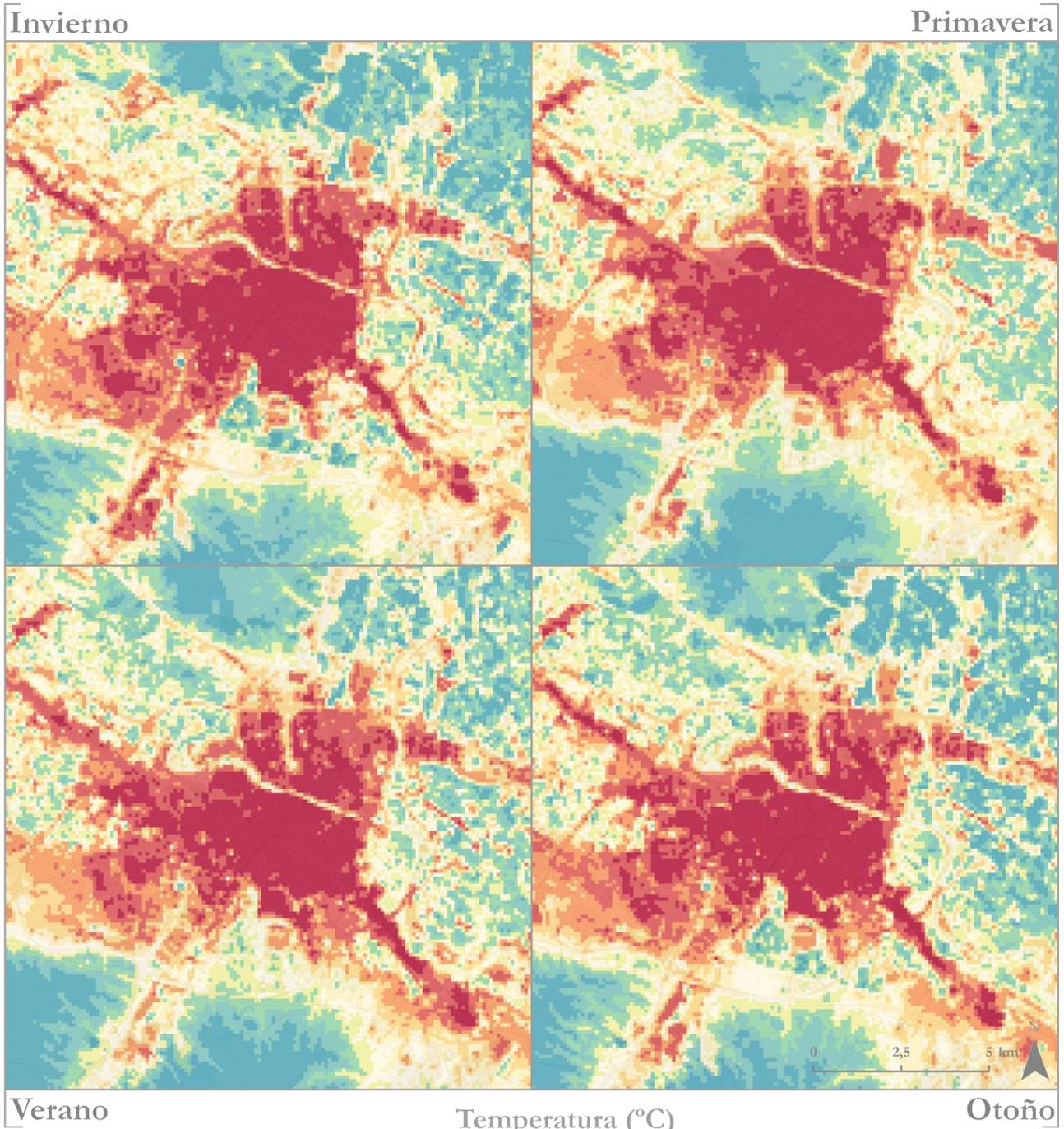


Deciles	Min	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>7</sub>	D <sub>8</sub>	D <sub>9</sub>	Max
Invierno	11,54	11,95	12,13	12,22	12,27	12,32	12,36	12,40	12,46	12,55	12,97
Primavera	19,30	20,06	20,38	20,54	20,62	20,70	20,79	20,90	21,00	21,16	21,68
Verano	30,71	31,20	31,48	31,71	31,91	32,08	32,26	32,46	32,68	32,95	33,51
Otoño	20,64	21,17	21,37	21,48	21,55	21,61	21,66	21,74	21,82	21,92	22,34

Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.6. Mapa de temperatura estacional media de las máximas de la ciudad de Zaragoza.

# Temperatura estacional media de las medias



Deciles	Min	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>7</sub>	D <sub>8</sub>	D <sub>9</sub>	Max
Invierno	6,68	7,28	7,39	7,49	7,59	7,67	7,75	7,84	7,96	8,17	8,87
Primavera	13,54	14,12	14,30	14,42	14,52	14,62	14,73	14,84	14,99	15,21	15,87
Verano	23,80	24,34	24,48	24,60	24,69	24,80	24,89	24,99	25,10	25,27	26,00
Otoño	15,02	15,57	15,70	15,80	15,91	16,00	16,10	16,22	16,34	16,51	17,23

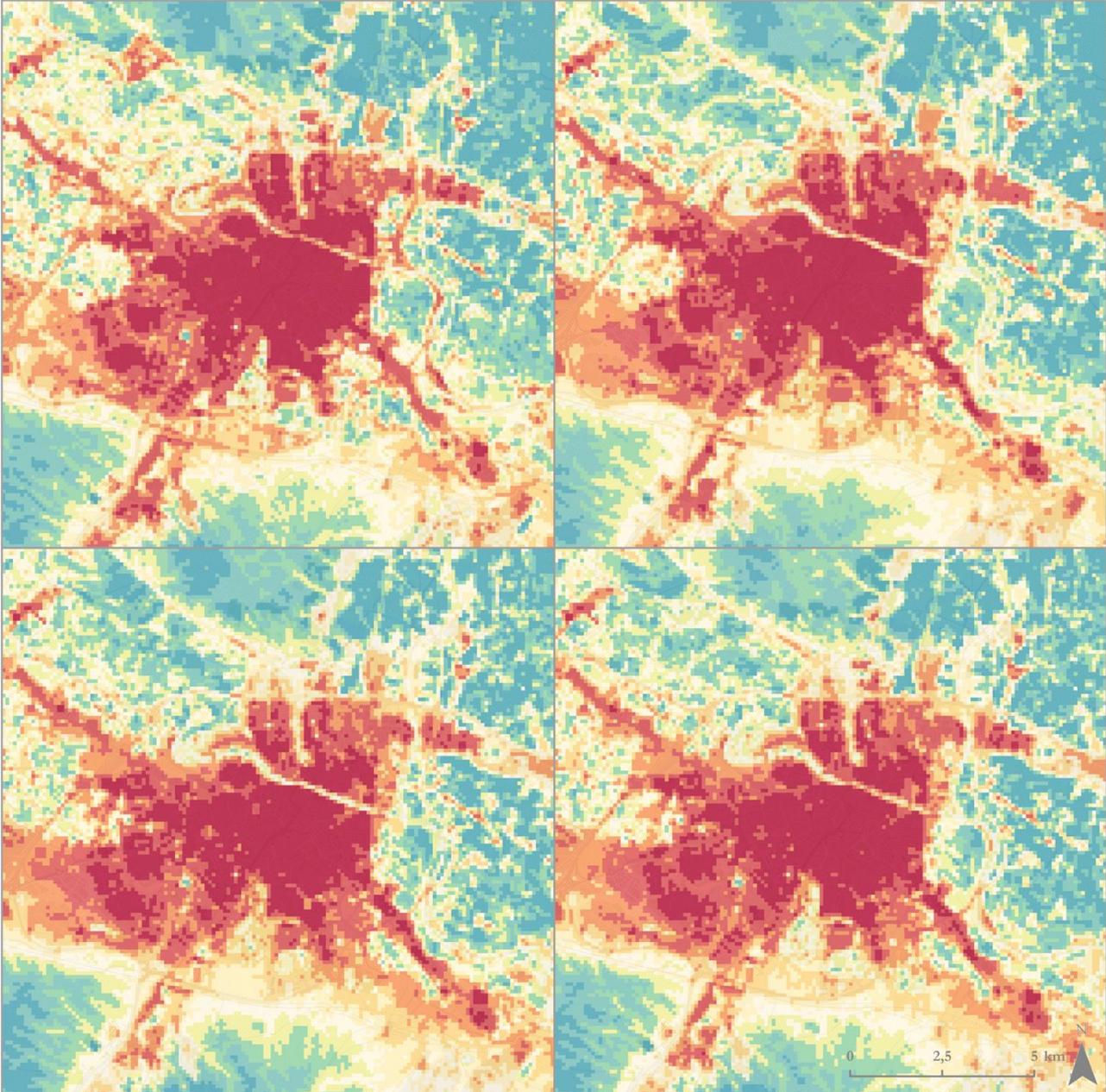
Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.7. Mapa de temperatura estacional media de las medias de la ciudad de Zaragoza.

# Temperatura estacional media de las mínimas

Invierno

Primavera



Verano

Temperatura (°C)

Otoño

Deciles	Min	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>7</sub>	D <sub>8</sub>	D <sub>9</sub>	Max
Invierno	2,53	3,28	3,45	3,58	3,71	3,83	3,95	4,08	4,27	4,61	5,56
Primavera	7,24	8,53	8,71	8,86	9,02	9,19	9,35	9,53	9,75	10,09	11,03
Verano	16,86	17,67	17,84	17,99	18,15	18,31	18,46	18,64	18,82	19,08	20,03
Otoño	9,98	10,75	10,94	11,08	11,22	11,36	11,51	11,69	11,88	12,19	13,25

Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein  
 under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.8. Mapa de temperatura estacional media de las mínimas de la ciudad de Zaragoza.

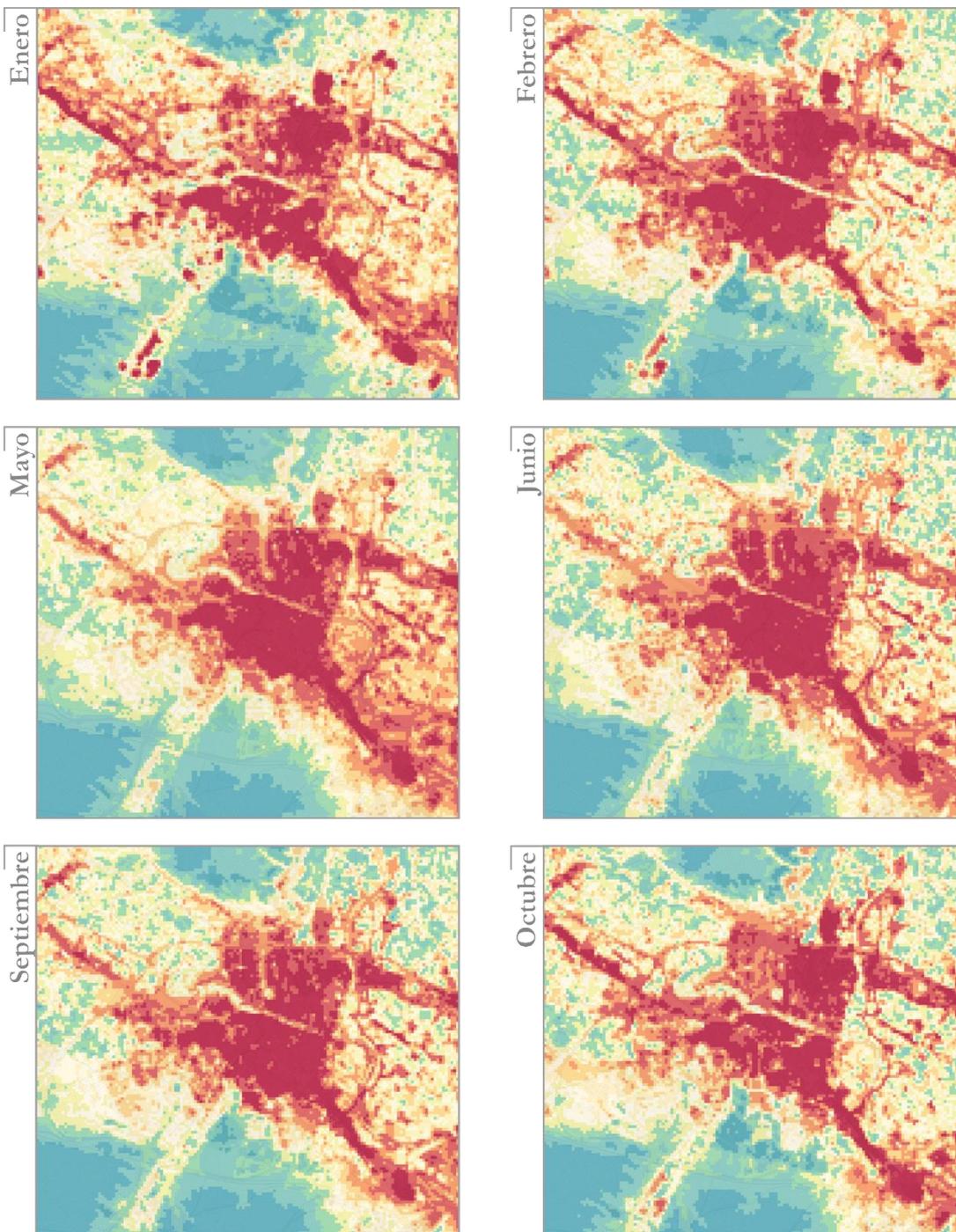
### 4.1.3. Temperatura mensual

La distribución de la temperatura a escala mensual revela patrones distintos para la temperatura máxima, mínima y media, como se muestra en tres mapas dobles separados (Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11). Al igual que en la representación estacional, se enfrentan desafíos al cartografiar las variaciones mensuales de temperatura debido a la diversidad climática de la región. Sin embargo, la adopción de un enfoque basado en deciles facilita la visualización de la distribución de temperaturas a lo largo del año. Este método permite distinguir claramente cómo se distribuyen las temperaturas más altas y más bajas en cada mes. De nuevo la dicotomía entre áreas urbanas y naturales se refleja nuevamente en los mapas mensuales. Las áreas urbanas tienden a experimentar temperaturas más altas mientras que los espacios naturales muestran temperaturas más moderadas. Unas diferencias que se multiplican dependiendo de si la variable analizada es el promedio de las máximas o las mínimas, con ese eje de sobrecalentamiento en dirección sureste. Apreciándose dos tendencias en la distribución de la temperatura una más estival de abril hasta septiembre y otras más invernal de octubre a febrero.

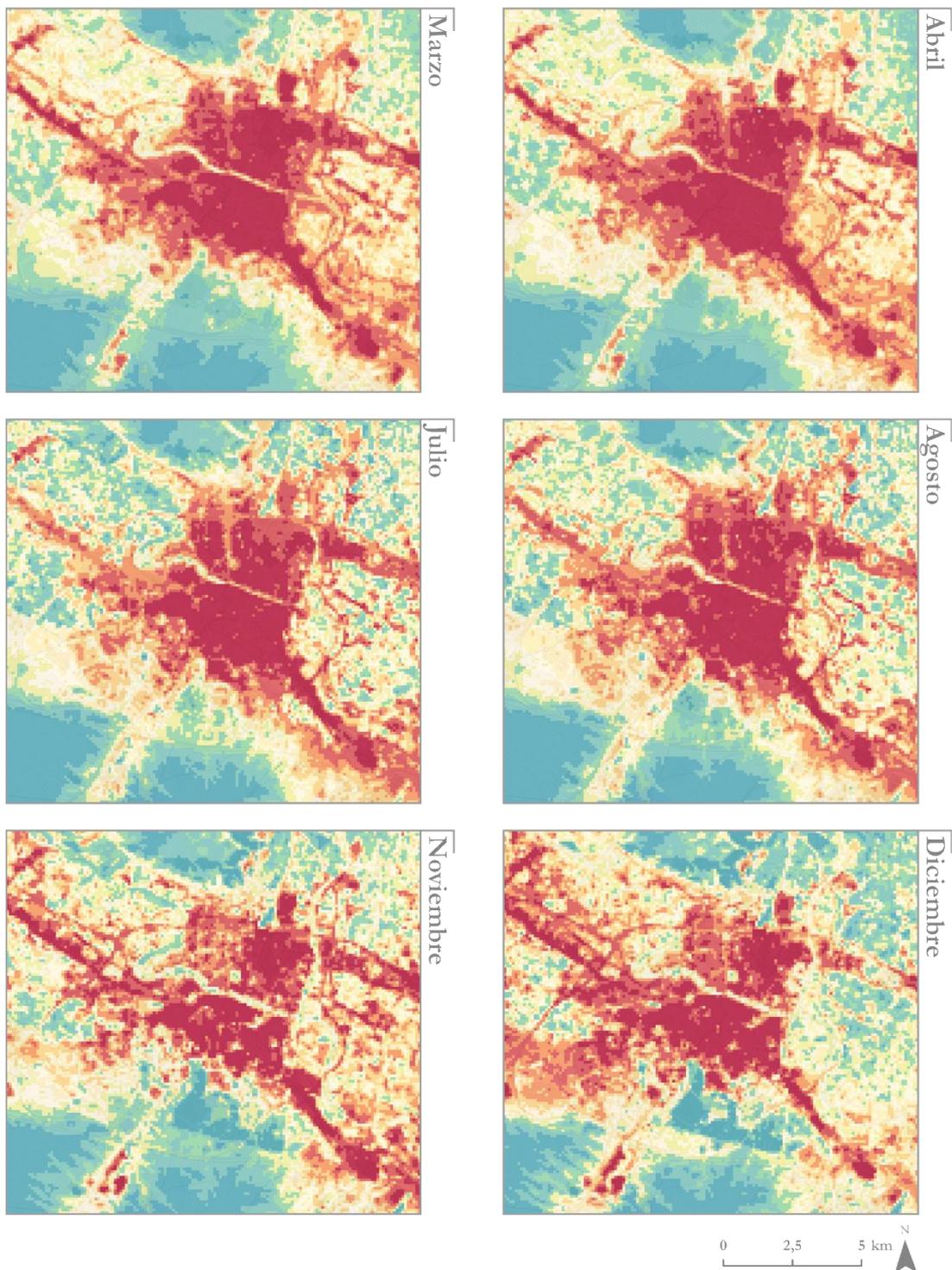
Aunque la representación mensual de la temperatura en Zaragoza revela patrones similares a los observados en los mapas estacionales o anuales, es importante destacar que proporciona una visión más detallada y específica de cómo varía el clima a lo largo del año. A pesar de que no se observan muchos más detalles que los ya mencionados en los mapas estacionales y anuales, la inclusión de datos mensuales permite confirmar que no existen valores aberrantes o extremos que puedan distorsionar la comprensión del clima local. Estos resultados mensuales son valiosos para la caracterización climática de la ciudad a diferentes escalas. Además de complementar la información proporcionada por los mapas estacionales o anuales, los datos mensuales permiten una mayor precisión al analizar tendencias a corto plazo y fenómenos climáticos específicos. En consecuencia, esta información es útil para trabajos futuros relacionados con la gestión del entorno urbano ya que la temperatura permite una comprensión detallada de cómo varía el clima a lo largo del año en la ciudad.

Aprovechando la escala mensual, se hace referencia a los mapas obtenidos del proceso de interpolación que reflejan la desviación estándar, incluidos en el apartado de **Anexos**, tanto para la temperatura máxima, media como mínima (II.a, II.b y II.c). Estos mapas proporcionan información sobre la incertidumbre asociada a las predicciones interpoladas. Valores más elevados indican una mayor incertidumbre en la predicción, lo que sugiere que los datos de esa ubicación pueden ser menos confiables. En estos mapas, al igual que en los mapas de temperatura, se ha calculado el promedio para cada píxel. Los resultados obtenidos coinciden con los mostrados en el apartado de control de calidad 2, siendo los mapas de temperaturas máximas y mínimas los que presentan un mayor error en comparación con los mapas de temperaturas medias. Este error se agrava principalmente en el caso de las temperaturas máximas durante los meses estivales y en los mapas de temperaturas mínimas durante los meses invernales, superando una desviación estándar de 1 °C hasta los 1,4 °C en algunos píxeles. Sin embargo, estos mapas no permiten observar qué zonas del mapa tienen una mayor incertidumbre. Se observa que las zonas más cercanas a la red de sensores son las que registran menos incertidumbre, siendo el entorno urbano el que presenta valores más bajos. Por otro lado, las zonas más alejadas, en los límites periféricos de la ciudad, son las que tienen un mayor error promedio. Además, las áreas principalmente naturales con características muy diferentes a las urbanas, como las masas de agua, como los ríos, y los espacios de cultivo de la huerta, muestran niveles de incertidumbre más altos, ya que la red de sensores está diseñada principalmente para el entorno urbano y su comportamiento térmico no queda completamente reflejado en estas áreas al no contar con sensores específicos en estos lugares.

## Temperatura mensual media de las máximas



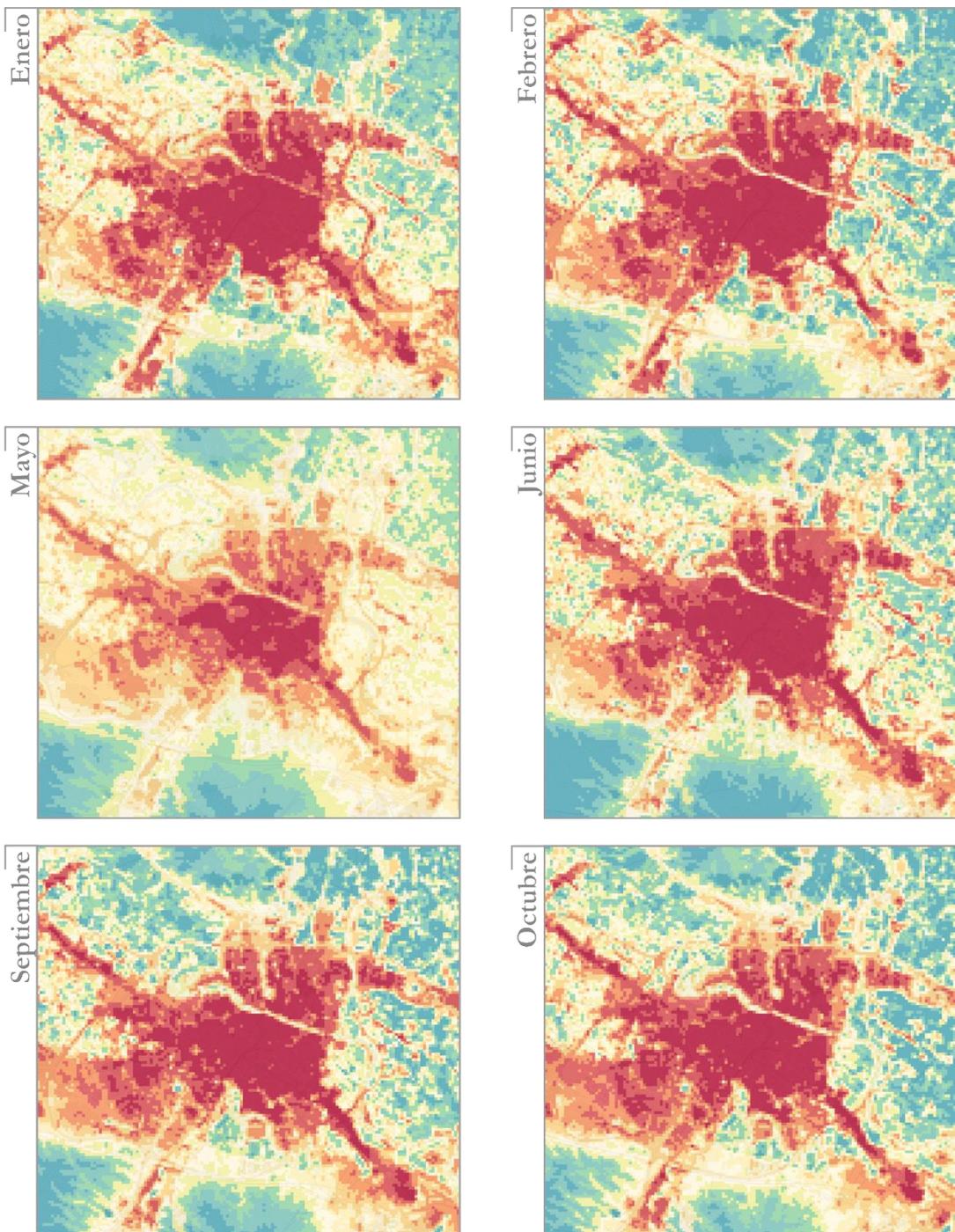
Temperatura (°C)	Deciles	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Max		12,03	15,69	17,46	20,84	26,36	31,68	34,89	33,91	28,58	22,84	15,65	11,68
	D <sub>9</sub>	11,51	15,19	17,01	20,31	25,77	30,85	34,03	33,07	27,89	22,49	15,36	11,39
	D <sub>8</sub>	11,45	15,05	16,85	20,12	25,63	30,66	33,84	32,90	27,76	22,40	15,29	11,32
	D <sub>7</sub>	11,40	14,97	16,76	20,01	25,51	30,52	33,70	32,77	27,65	22,32	15,24	11,26
	D <sub>6</sub>	11,35	14,90	16,68	19,92	25,41	30,40	33,59	32,66	27,56	22,25	15,20	11,22
	D <sub>5</sub>	11,31	14,84	16,60	19,82	25,30	30,31	33,49	32,57	27,47	22,20	15,15	11,17
	D <sub>4</sub>	11,27	14,78	16,53	19,75	25,21	30,22	33,39	32,47	27,39	22,14	15,10	11,14
	D <sub>3</sub>	11,20	14,71	16,45	19,66	25,12	30,10	33,29	32,37	27,30	22,07	15,04	11,09
	D <sub>2</sub>	11,09	14,59	16,29	19,51	24,96	29,94	33,16	32,24	27,14	21,97	14,96	11,03
	D <sub>1</sub>	10,90	14,37	15,99	19,22	24,59	29,64	32,95	32,02	26,90	21,77	14,82	10,94
	Min	10,45	13,79	15,29	18,46	23,76	28,72	32,15	31,20	26,13	21,26	14,33	10,48



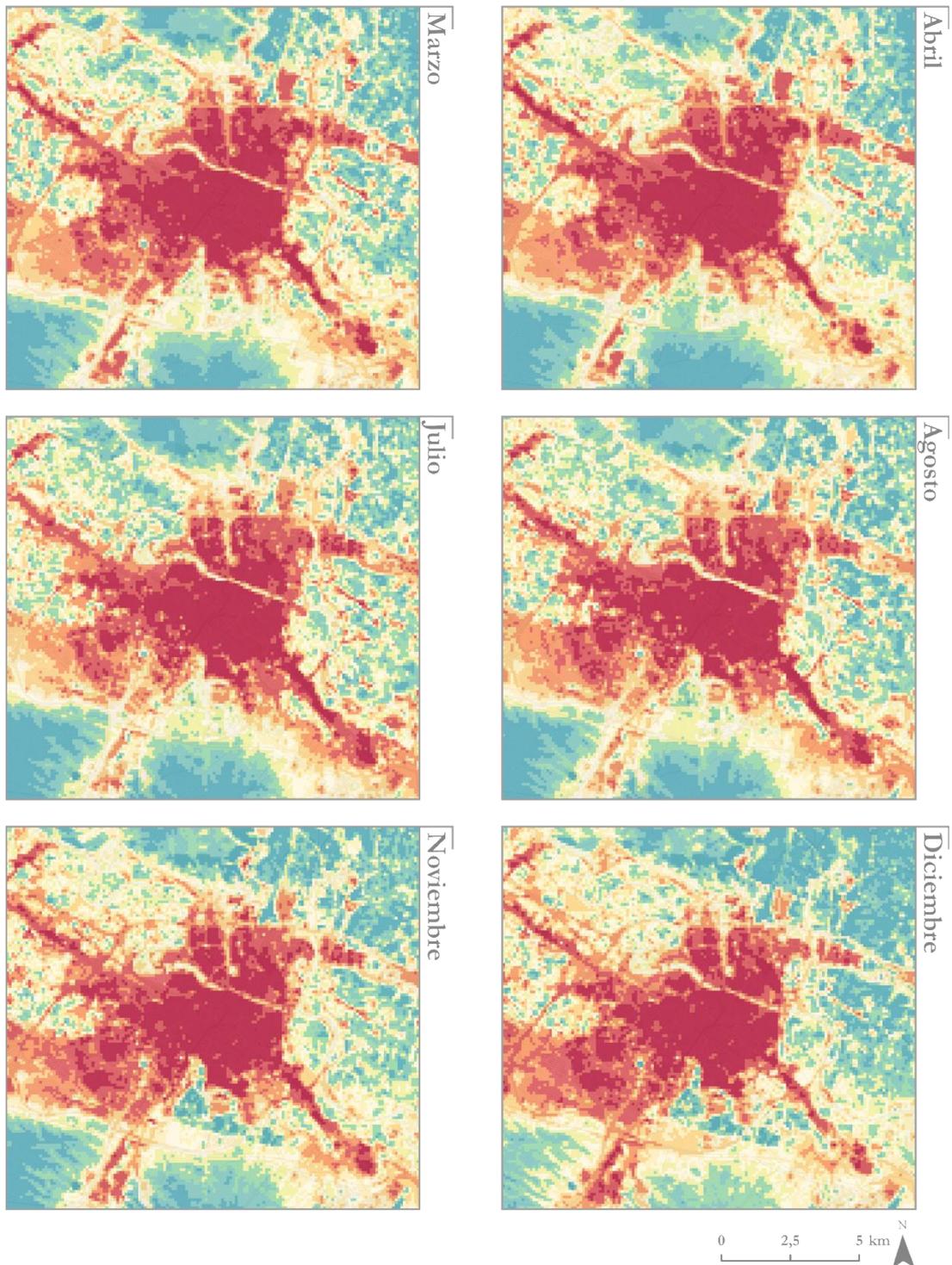
Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.9. Mapa de temperatura mensual media de las máximas de la ciudad de Zaragoza.

## Temperatura mensual media de las medias



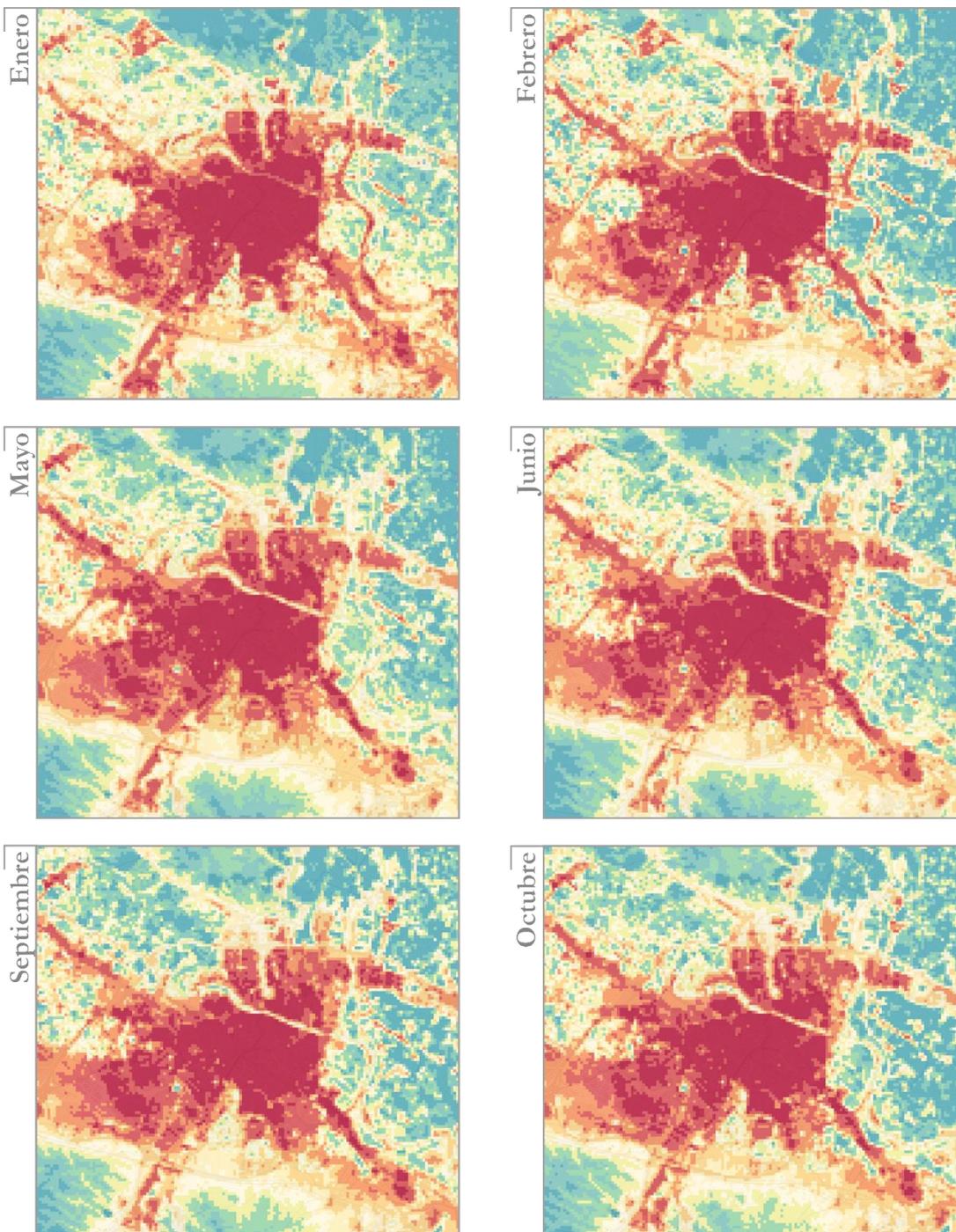
Temperatura (°C)	Deciles	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Max		7,85	10,61	12,31	15,16	19,82	24,48	27,02	26,44	22,43	17,51	11,75	8,37
	D <sub>9</sub>	7,20	9,77	11,61	14,52	19,39	23,70	26,33	25,76	21,65	16,82	11,06	7,79
	D <sub>8</sub>	7,01	9,51	11,37	14,27	19,15	23,51	26,17	25,60	21,47	16,64	10,88	7,61
	D <sub>7</sub>	6,91	9,36	11,22	14,11	18,96	23,40	26,06	25,49	21,35	16,51	10,77	7,49
	D <sub>6</sub>	6,82	9,24	11,11	13,99	18,78	23,29	25,97	25,37	21,23	16,38	10,67	7,40
	D <sub>5</sub>	6,75	9,14	11,00	13,88	18,62	23,20	25,88	25,27	21,12	16,28	10,58	7,32
	D <sub>4</sub>	6,67	9,03	10,89	13,78	18,46	23,09	25,78	25,17	21,02	16,17	10,51	7,26
	D <sub>3</sub>	6,58	8,92	10,79	13,68	18,29	22,99	25,69	25,08	20,92	16,05	10,42	7,18
	D <sub>2</sub>	6,46	8,80	10,66	13,56	18,08	22,87	25,58	24,96	20,81	15,94	10,31	7,10
	D <sub>1</sub>	6,31	8,65	10,51	13,39	17,85	22,68	25,44	24,82	20,67	15,81	10,19	6,99
	Min	5,67	8,02	10,09	12,88	17,45	22,08	24,97	24,34	20,08	15,12	9,61	6,43



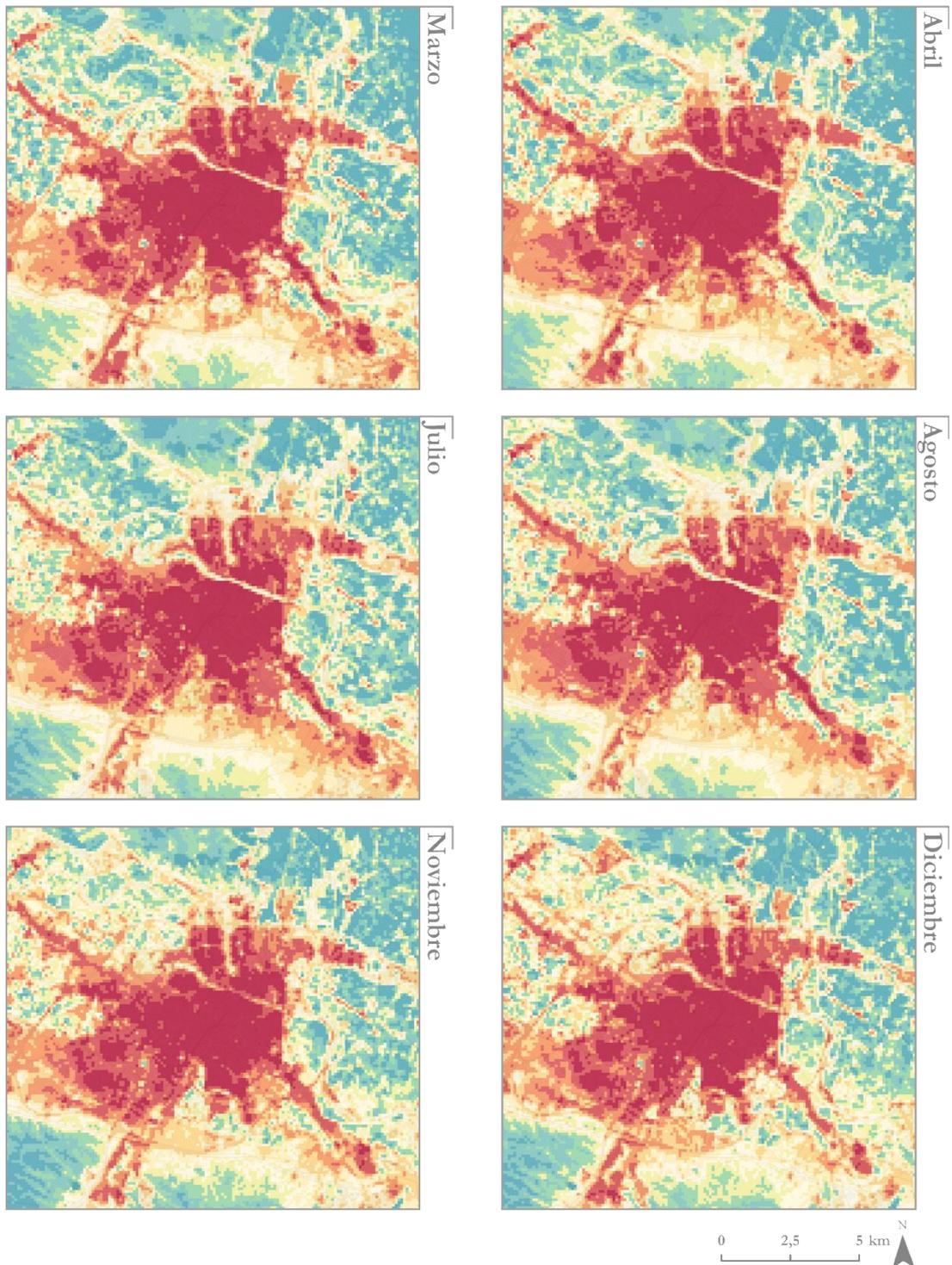
Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.10. Mapa de temperatura mensual media de las medias de la ciudad de Zaragoza.

## Temperatura mensual media de las mínimas



Temperatura (°C)	Deciles	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Max		4,60	6,51	8,10	10,43	14,32	18,56	20,81	20,67	17,59	13,57	8,59	5,71
	D <sub>9</sub>	3,68	5,34	7,06	9,50	13,41	17,57	19,91	19,73	16,50	12,46	7,61	4,81
	D <sub>8</sub>	3,39	4,93	6,70	9,16	13,12	17,28	19,66	19,49	16,23	12,15	7,28	4,50
	D <sub>7</sub>	3,23	4,71	6,48	8,92	12,89	17,07	19,50	19,31	16,03	11,93	7,09	4,32
	D <sub>6</sub>	3,12	4,54	6,33	8,74	12,69	16,88	19,33	19,15	15,85	11,74	6,95	4,18
	D <sub>5</sub>	3,01	4,39	6,17	8,58	12,52	16,72	19,17	18,99	15,70	11,59	6,82	4,08
	D <sub>4</sub>	2,89	4,24	5,99	8,41	12,36	16,56	19,01	18,83	15,55	11,43	6,70	3,97
	D <sub>3</sub>	2,77	4,10	5,82	8,26	12,21	16,39	18,86	18,66	15,39	11,27	6,57	3,86
	D <sub>2</sub>	2,63	3,93	5,65	8,13	12,06	16,22	18,71	18,52	15,24	11,11	6,44	3,75
	D <sub>1</sub>	2,44	3,71	5,43	7,92	11,88	16,03	18,55	18,35	15,07	10,91	6,27	3,60
Min		1,72	2,64	4,49	6,95	10,95	15,19	17,64	17,43	14,15	9,84	5,24	2,87



Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.11. Mapa de temperatura mensual media de las mínimas de la ciudad de Zaragoza.

#### 4.1.4. Temperatura diaria

Uno de los objetivos principales de este proyecto era desarrollar un modelo de interpolación que nos permitiera obtener imágenes térmicas completas de la ciudad a escala diaria, con una resolución espacial y temporal muy elevada. Esto permitiría analizar patrones climáticos urbanos de manera estandarizada en diferentes periodos de tiempo, algo que no era posible con las metodologías anteriores como los transectos o la teledetección. Para demostrar la utilidad de este producto diario desarrollado y complementar el análisis cartográfico, se decidió seleccionar una serie de días específicos para representar, ya que era imposible cartografiar la totalidad de los productos obtenidos. Estos días seleccionados servirán como ejemplos representativos de las variaciones térmicas diarias en la ciudad, proporcionando una visión más completa y detallada de los patrones climáticos locales. Este enfoque nos permitirá centrarnos en situaciones atmosféricas y fenómenos meteorológicos concretos que los anteriores valores promedio no permitían analizar. Además, nos brindará la oportunidad de estudiar la relación de la temperatura urbana con diferentes condiciones climáticas, un análisis que rara vez se ha llevado a cabo hasta ahora. Esto nos ayudará a comprender mejor cómo interactúan los elementos urbanos con el clima circundante y cómo estas interacciones afectan el microclima de la ciudad en diferentes momentos del día y en diversas condiciones atmosféricas.

La selección de los días no se realizó de forma arbitraria; para ello, se utilizaron los datos diarios del aeropuerto de Zaragoza proporcionados por AEMET, que incluyen diferentes variables meteorológicas. Estos datos se emplearon para identificar umbrales y situaciones atmosféricas concretas que se deseaban representar. Además, se llevaron a cabo análisis de situaciones atmosféricas y tipos de tiempo utilizando gráficos de tiempo históricos diarios generados a partir de datos de reanálisis del NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) del *National Weather Service* de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Este enfoque basado en datos meteorológicos confiables y análisis detallados garantiza que los días seleccionados sean representativos de situaciones específicas.

Desde el punto de vista cartográfico, se ha elegido crear mapas integrales compuestos por cuatro paneles, en los cuales se representan las tres variables térmicas por separado, cada una con una leyenda continua única. Esto se debe a que se trata de eventos específicos y variables diferentes, lo que permite una interpretación más precisa de los datos. Además, se agrega una imagen del satélite MODIS en modo *true color*, también conocido como color verdadero, para permitir la visualización del estado de la península en ese día específico.

##### 4.1.4.1. Niebla

La niebla es un meteoro que se produce por la acumulación de gotas de agua en suspensión en el aire cerca del suelo, caracterizado por reducir la visibilidad a menos de 1 km (T. Oke et al., 2017). Basando en esta definición AEMET define la niebla en función de la visibilidad y distingue entre niebla y niebla espesa cuando la visibilidad es inferior a 200 m. En la Depresión del Ebro, es uno de los meteoros más comunes, como se refleja en los valores normales para la estación en el Aeropuerto de Zaragoza (Tabla 3.7), con un promedio de 22,5 días de niebla al año para el período 1981-2010. Sin embargo, en estudios anteriores con datos de esa misma estación, pero para el período 1955-1984, se registraban 35,1 días de media anual (Hernández Navarro & Del Valle Melendo, 1989). Esto muestra un descenso en las últimas décadas en la presencia de nieblas en el valle del Ebro, lo cual no es un fenómeno aislado, ya que se ha observado una tendencia global en la disminución de nieblas, brumas y neblinas (Vautard et al., 2009). Este descenso se relaciona con dos factores principales: el aumento de la ICU y la mejora de la calidad del aire en la ciudad (LaDochy,

2005; Tardif & Rasmussen, 2007). El calentamiento urbano reduce las condiciones necesarias para la formación de niebla, ya que a medida que la ciudad se calienta, las condiciones de estabilidad y enfriamiento nocturno necesarias para la formación de niebla son menos frecuentes. Mientras tanto, los controles de contaminación del aire han reducido los niveles de contaminantes, que contribuyen a la formación de niebla densa. Por lo tanto, resulta interesante conocer cómo este fenómeno meteorológico afecta a la distribución térmica de la ciudad.

Las nieblas más comunes en Zaragoza suelen estar asociadas a la presencia de anticiclones dinámicos durante los meses de invierno, los cuales se refuerzan en la superficie debido a efectos térmicos. Esto crea condiciones atmosféricas estables y propicia la formación de inversiones térmicas, provocando que las nieblas puedan persistir durante varios días si no se dan las condiciones adecuadas para su disipación, como la mayor radiación solar durante el mediodía o la presencia de vientos. Por esta razón, el día 22 de diciembre de 2020 se ha seleccionado como un ejemplo representativo de este fenómeno. Durante ese día de invierno, se observó una alta presión sobre la península ibérica debido a la presencia del anticiclón (Figura 4.12). La estación meteorológica de Zaragoza (Aeropuerto) registró una visibilidad inferior a 200 metros a lo largo de todo el día, lo que indica la presencia de niebla densa de manera constante. Además, se observaron valores bajos de radiación solar total diaria, alcanzando apenas unos escasos 2,93 MJ/m<sup>2</sup>, en contraste con los aproximadamente 10 MJ/m<sup>2</sup> que se podrían registrar en un día despejado de diciembre.

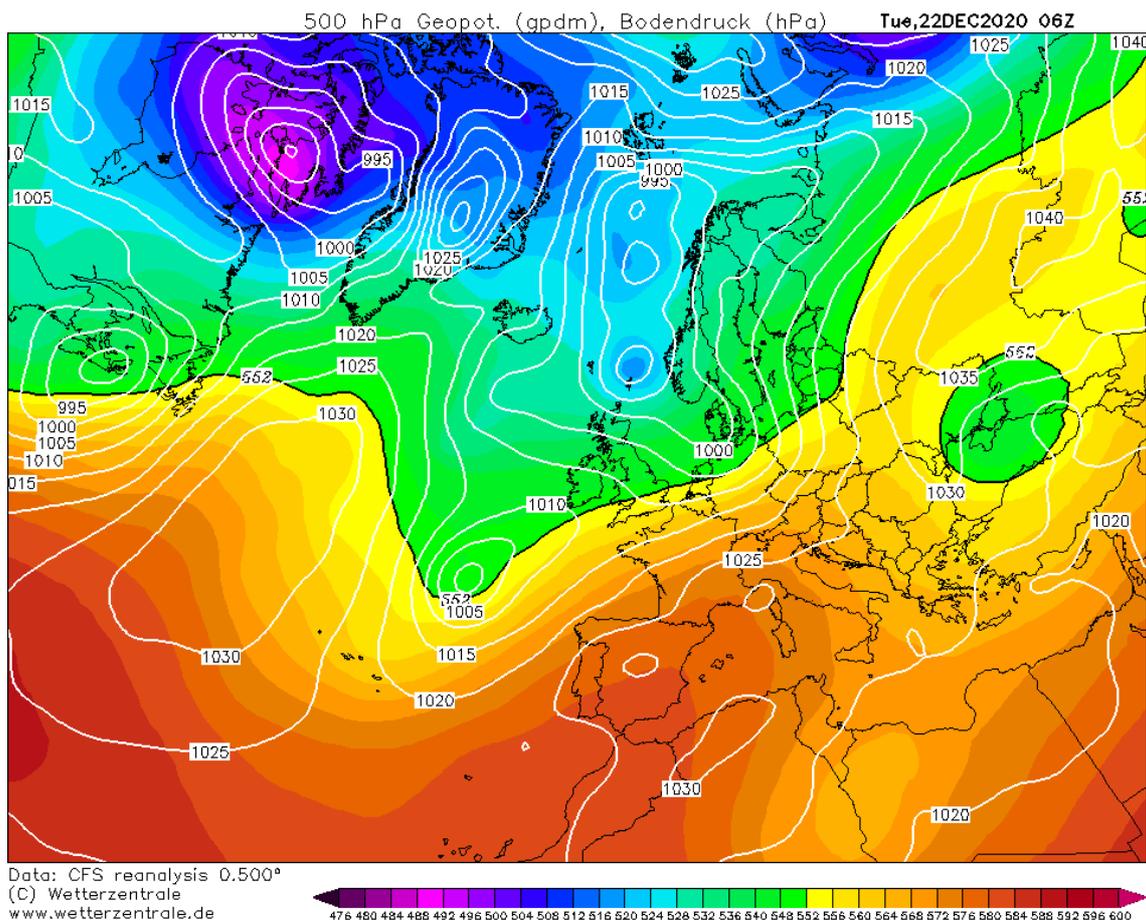


Figura 4.12. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 22 de diciembre de 2020 a las 06:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR. Fuente: www.wetterzentrale.de

El mapa (Figura 4.13) revela una amplitud térmica reducida en todas las variables, con un rango que varía entre los 2,45 °C de diferencia en las máximas y los 4,31 °C en las mínimas. Este fenómeno se atribuye principalmente a la presencia recurrente de nieblas sobre la ciudad. Las nieblas tienen un impacto significativo en la distribución de la temperatura, especialmente durante las horas de mayor insolación. Al disminuir la radiación solar, las diferencias térmicas entre áreas urbanas y rurales tienden a mitigarse.

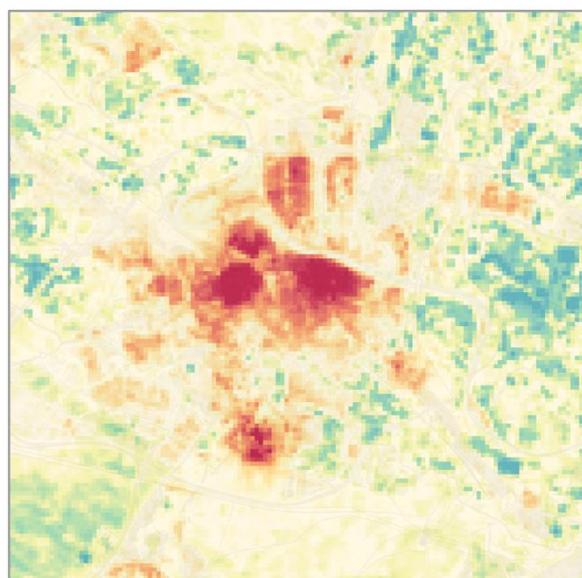
En el entorno rural circundante, las variaciones son mínimas, especialmente a lo largo de los corredores de los principales ríos, donde la alta humedad favorece la formación de niebla. Este fenómeno puede dificultar la distinción entre áreas de cultivo, zonas ribereñas, espacios sin cobertura vegetal y áreas con vegetación esteparia o boscosa. Es interesante notar que los bosques ejercen un efecto de protección contra las nieblas, lo que contribuye a que estas zonas sean relativamente más cálidas, especialmente en términos de temperaturas máximas. Este proceso de disipación de la niebla (Ôkita, 1953) por el bosque se produce principalmente por la intercepción y captura de gotas de agua por hojas y ramas a modo de obstáculos físicos, pero también por los procesos de coalescencia y coagulación creando gotas de agua más grandes que caen al suelo. En las zonas boscosas de pinares cerca del Parque de Atracciones al sur de la ciudad en los montes de Torrero se aprecia este aumento de la temperatura. Además, el efecto protector se ve potenciado por la elevada altitud de estas áreas.

Por otro lado, dentro de la propia ciudad, los barrios del Casco Histórico y Delicias destacan como espacios ligeramente más cálidos, principalmente en las temperaturas máximas. Esto se debe a la alta densidad urbana y a la compleja red de calles y vías que caracteriza a estos barrios. Esta configuración urbana crea una especie de efecto de microclima que actúa como barrera física contra la niebla, similar al efecto que tienen los bosques en las zonas rurales. Como resultado, se reduce la presencia de humedad y, por ende, se experimentan temperaturas ligeramente más altas en comparación con otras áreas de la ciudad. Por otro lado, en los barrios periféricos la situación es distinta. La disposición de calles más amplias y la mayor presencia de áreas verdes, lo que conlleva mayor humedad, favorecen la persistencia de la niebla. En estos lugares, la presencia de niebla es más frecuente y prolongada, mientras que su efecto en las temperaturas máximas es apenas perceptible. Un efecto que se intensifica en los barrios rurales y que puede apreciarse fácilmente si se comparan con el mapa temperatura máxima anual (Figura 4.1) o estacional (Figura 4.6). Asimismo, los polígonos industriales, con su característico diseño de edificios de pocas plantas y calles rectas, suelen ser uno de los espacios urbanos menos cálidos.

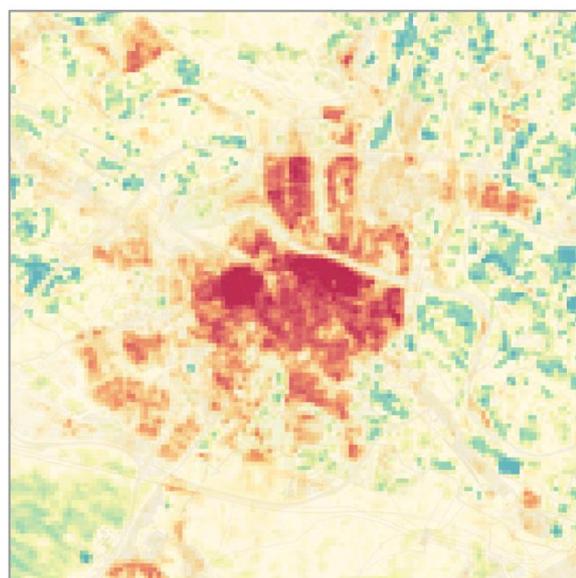
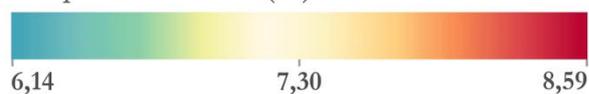
Sin embargo, es importante señalar que las diferencias de temperatura son bastante bajas, y solo en el caso de las temperaturas mínimas se observa una variación ligeramente más marcada, lo que indica la persistencia de la influencia de la isla urbana. Aunque en estas ocasiones su intensidad se debilita (Cuadrat et al., 2022).

## Temperatura del día 22 de diciembre de 2020

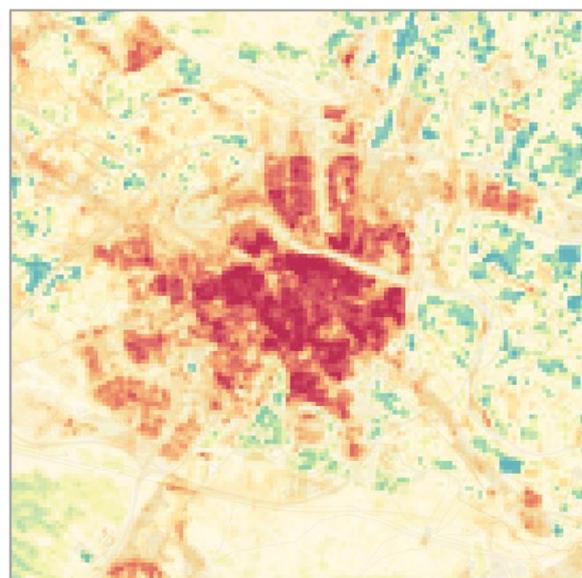
### Episodio de niebla sobre el valle del Ebro



Temperatura máxima (°C)



Temperatura mínima (°C)



Temperatura media (°C)

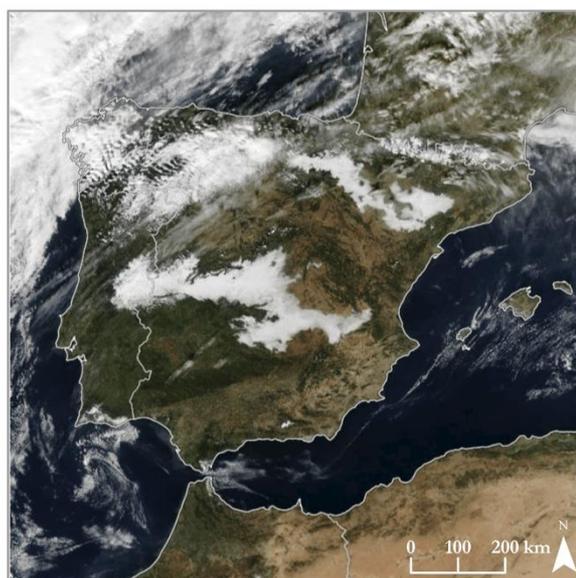


Imagen satélite (MODIS, composición RGB)



Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional.  
 Imagen satélite Aqua y Terra MODIS. NASA GSFC EOSDIS ([https:// zoom.earth](https://zoom.earth)). Composición RGB: R 0,66  $\mu\text{m}$ ; G 0,55  $\mu\text{m}$ ; B 0,47  $\mu\text{m}$ .  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.13. Mapa de temperatura del día 22 de diciembre de 2020, episodio de niebla sobre el valle del Ebro.

#### 4.1.4.2. Nieve

Contrario a la niebla, la nieve tiene una presencia escasa en la ciudad debido a la altitud y clima de la región. Aunque no es común, no se considera un fenómeno extraordinario. Según los valores normales de AEMET, en la estación del aeropuerto se registra un promedio de 2,4 días al año con presencia de nieve (Tabla 3.7). Desde marzo de 2015, la red de sensores urbanos ha coincidido en seis ocasiones con episodios de precipitación de nieve registrados por AEMET. Sin embargo, en la mayoría de los casos, se trata de nevadas breves y no muy intensas, donde la acumulación es mínima y desaparece rápidamente por la lluvia posterior, como ocurrió en marzo de 2016 o 2020. En otras ocasiones, las condiciones propician la formación de aguanieve, un hidrometeoro que consiste en agua y nieve parcialmente fundida, que generalmente no cuaja al llegar al suelo, como sucedió a principios de febrero de 2018 y enero de 2020 con la borrasca Gloria. Destaca la nevada histórica de la borrasca Filomena el 8 y 9 de enero de 2021, que produjo la acumulación de 20 cm de nieve en la capital aragonesa, permitiendo la acumulación de nieve durante varios días en zonas urbanas y especialmente en parques y jardines.

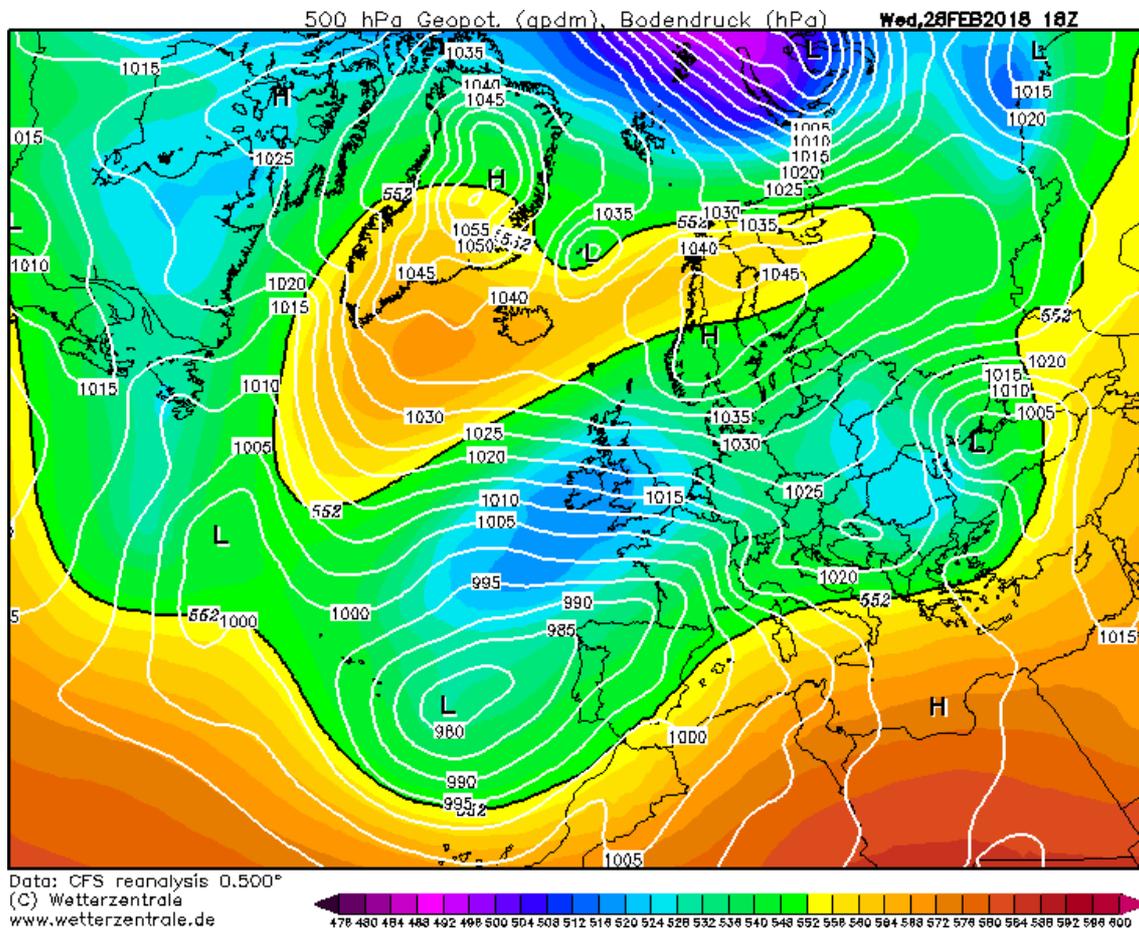


Figura 4.14. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 28 de febrero de 2018 a las 18:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR. Fuente: [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

Para la selección del mapa, se ha optado por la nevada que presenta características más comunes con las nevadas habituales. Se trata de la ocurrida la madrugada del 28 de febrero de 2018, una nevada ligera que dejó acumulaciones de apenas 5 cm en la ciudad. Este día se caracterizó por temperaturas mínimas negativas en torno a -1 °C y máximas que no superaron los 5 °C. En ese momento, se observaba la llegada a la península de masas de aire

polar continental arrastradas desde el interior del continente eurosiberiano por la presencia de un anticiclón en el Atlántico Norte y bajas presiones en el continente y el Mediterráneo (Figura 4.14). Estas masas de aire frío, por lo general extremadamente frías y secas, pueden captar humedad en su recorrido marítimo cercano a la península, lo que favorece la formación de nevadas.

El análisis cartográfico de la Figura 4.15 revela inicialmente la prevalencia de bajas temperaturas en general, con registros por debajo de los 0 °C en diversos puntos de la ciudad tanto en mínimas (con mínimas de hasta -2,27 °C) como en medias (con mínimas de -0,18 °C). En cuanto a las temperaturas máximas, la mayoría de la ciudad apenas supera los 5 °C, lo cual se atribuye principalmente a la influencia de masas de aire extremadamente frío.

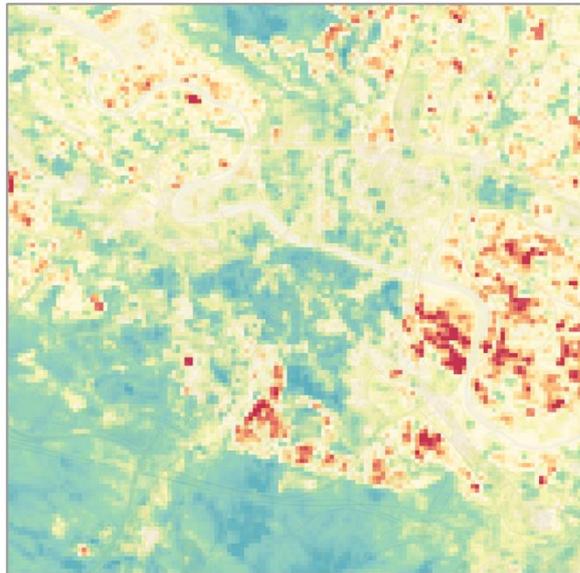
Un aspecto notable durante estos episodios es la ausencia de la ICU, ya que en ningún momento del día las temperaturas de la ciudad sobresalen respecto a las áreas no urbanizadas. La limitada radiación solar, ocasionada por la presencia de densas nubes, impide la acumulación de energía de onda corta en las superficies pavimentadas urbanas. Esta acumulación es crucial para el posterior almacenamiento de calor, el cual es liberado en forma de onda larga, contribuyendo así al calentamiento del aire circundante. Por consiguiente, la ciudad no logra alcanzar la temperatura necesaria para exhibir la característica forma de isla. En consecuencia, se percibe una isla de frío a lo largo del día, aunque esta tampoco está particularmente pronunciada ya que el entorno circundante tampoco crea efecto de contraste. Además, hay que tener en cuenta el propio efecto de la nieve en el balance energético ya que la nieve actúa como un reflector de la radiación solar y la nieve acumulada puede enfriar las superficies circundantes debido a su menor temperatura radiante.

En ciudades donde la presencia y la intensidad de la nieve son más comunes, se han realizado diversos estudios que han destacado cómo, en momentos de nevada, la ciudad puede experimentar una reducción de las temperaturas, pero la ICU puede intensificarse, especialmente durante el día (Malevich & Klink, 2011). Sin embargo, es importante señalar que las condiciones no son directamente comparables con las de Zaragoza, ya que estos estudios se llevaron a cabo en ciudades con nevadas intensas y prolongadas durante los períodos invernales, lo que permite una acumulación continua de nieve con espesores de alrededor de 10 cm o más. En este contexto, la intensificación de la ICU está vinculada a la retirada de la nieve de las zonas urbanas. Se ha demostrado que estas superficies desprovistas de nieve, con un albedo menor que el de la nieve acumulada, absorben más calor. Esto genera un contraste térmico con el entorno exterior aún nevado o con áreas verdes donde se acumula la nieve, intensificando el fenómeno de la isla (Millar, 2017).

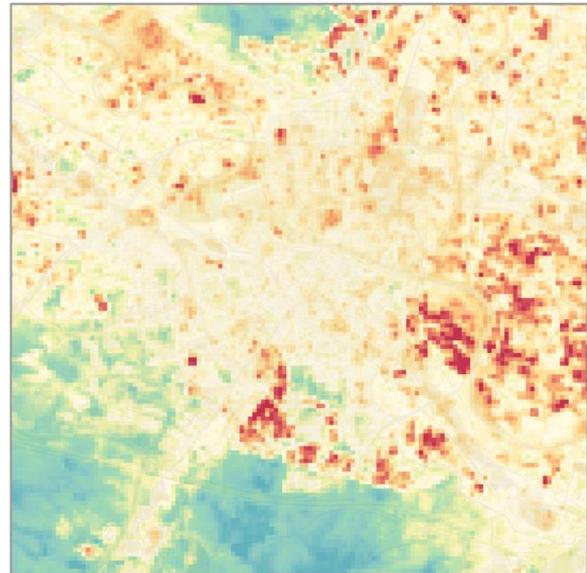
Paradójicamente, los espacios vegetales presentan las temperaturas más altas y como en el caso de las nieblas, los bosques actúan como puntos de mayor calidez. Esto puede explicarse por el efecto protector de las copas de los árboles contra la nieve, actuando como un aislante. Durante nevadas ligeras, la nieve no llega a penetrar en el suelo del bosque, lo que permite que el aire, ligeramente más cálido, quede atrapado en su interior. Además, factores como el bloqueo del viento, el flujo de calor sensible y el aumento de la radiación de onda larga (Lundquist et al., 2013) en estas zonas contribuyen a que la temperatura del aire registrada en el sensor del Parque de Atracciones supere a muchas de las estaciones urbanas. Este fenómeno de atenuación de temperaturas bajo el dosel arbóreo se ha observado a nivel mundial, mostrando cómo los bosques enfrían el sotobosque cuando la temperatura ambiente es elevada y lo calientan cuando la temperatura ambiente es fría (De Frenne et al., 2019).

## Temperatura del día 28 de febrero de 2018

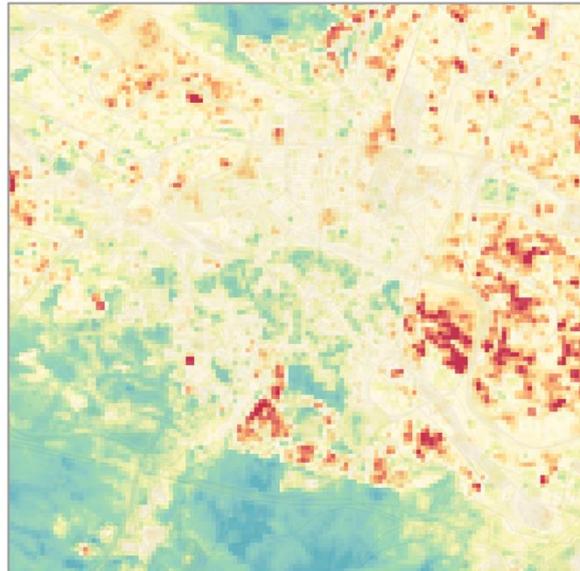
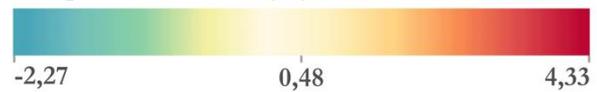
### Nevada ligera de 5 cm sobre la ciudad



Temperatura máxima (°C)



Temperatura mínima (°C)



Temperatura media (°C)

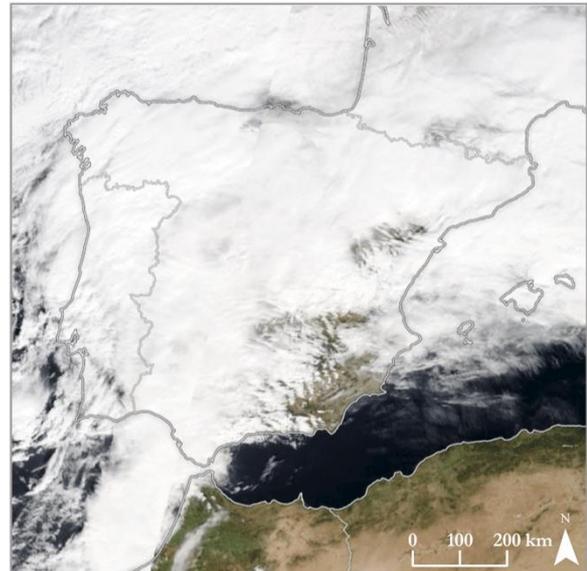
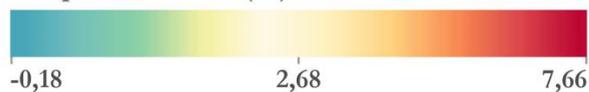


Imagen satélite (MODIS, composición RGB)



Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional.  
 Imagen satélite Aqua y Terra MODIS. NASA GSFC EOSDIS ([https:// zoom.earth](https://zoom.earth)). Composición RGB: R 0,66 µm; G 0,55 µm; B 0,47 µm.  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.15. Mapa de temperatura del día 28 de febrero de 2018, nevada ligera de 5 cm sobre la ciudad.

#### 4.1.4.3. Viento dirección noroeste (Cierzo)

Numerosos estudios (Chemel & Sokhi, 2012; Lee, 1979; A. Lopes et al., 2013; Morris et al., 2001; Ngarambe et al., 2020) respaldan la idea de que el viento puede mitigar el efecto de la ICU al redistribuir el calor y facilitar la ventilación. Esto ocurre debido a que el viento transporta y disipa el calor al mismo tiempo que dispersa los contaminantes presentes en el aire urbano. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el efecto del viento varía dependiendo de su velocidad y dirección, así como de las características particulares de la geometría urbana y las condiciones atmosféricas locales. Por lo tanto, el viento se convierte en uno de los principales factores que influyen en la distribución de la temperatura en la ciudad. En el caso de Zaragoza, debido a su frecuencia notable, el viento se convierte en uno de los fenómenos más estudiados (López Martín, 1997, 1998), especialmente en relación con su interacción con la ICU (Cuadrat et al., 2022).

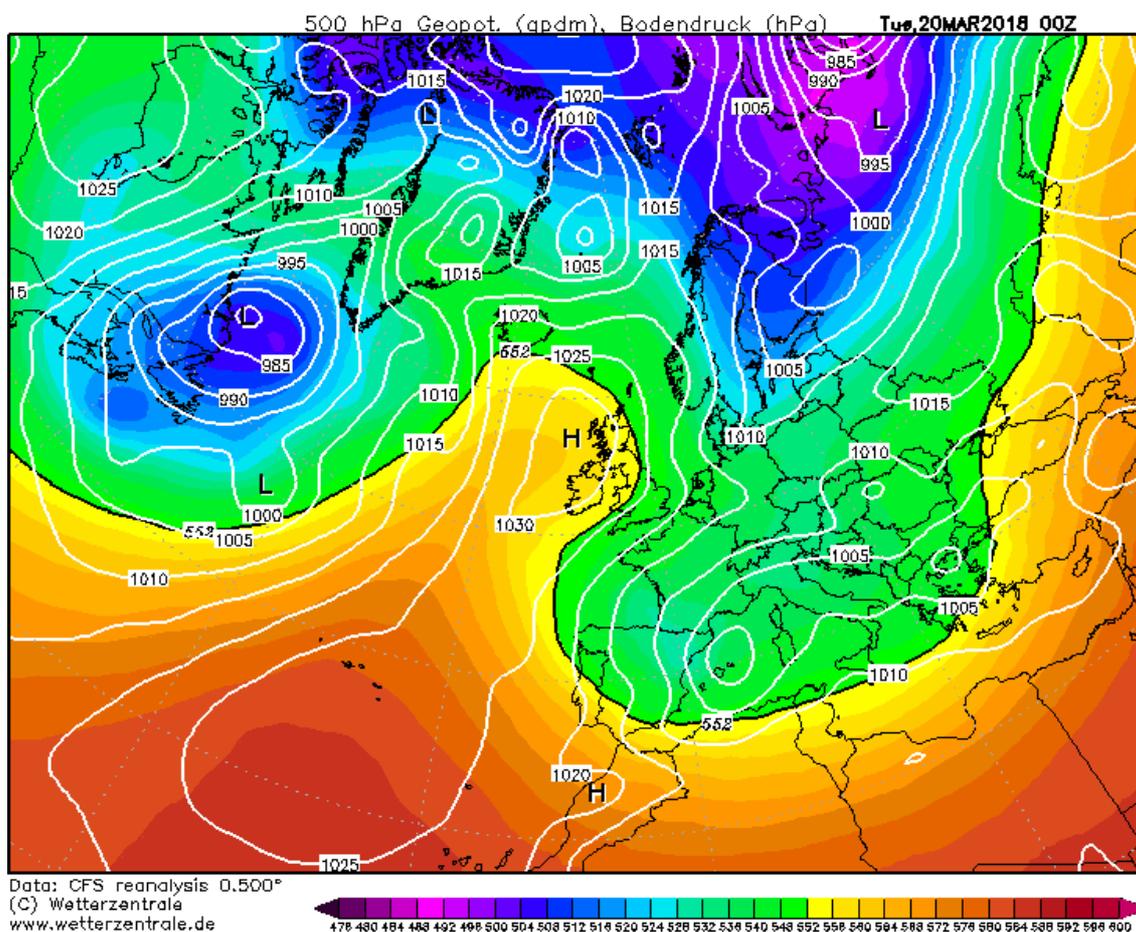


Figura 4.16. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 20 de marzo de 2018 a las 00:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR. Fuente: [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

En el caso de Zaragoza, el viento regional más característico es conocido como "*Cierzo*" (Hernández Navarro, 1990). Este viento, de componente noroeste, se origina debido a diferencias de presión locales y factores orográficos que crean un flujo canalizado a través del valle del Ebro (Lorente - Plazas et al., 2015; Masson & Bougeault, 1996; Ortega et al., 2023). La disparidad de presión entre el Mediterráneo y el Cantábrico genera fuertes corrientes de viento, con ráfagas que pueden superar los 60 km/h fácilmente. Aunque estas

ráfagas son más frecuentes en invierno y primavera, el cierzo puede afectar a Zaragoza a lo largo de todo el año, principalmente desde el noreste y oeste.

Por lo tanto, para ilustrar un día específico bajo estas condiciones, se cartografió el 20 de marzo de 2018 en la Figura 4.18. Durante este día, se cumplían las condiciones adecuadas y se registraron en el aeropuerto rachas máximas de velocidad superiores a 60 km/h, con una dirección del viento entre los 300° y los 330°. Se registró una racha máxima de velocidad de 88 km/h con una dirección del viento de 320°. La situación sinóptica de ese día estuvo marcada por una alta presión o anticiclón en el este de la península ibérica y una profunda depresión tanto sobre el Atlántico Norte como sobre Europa, extendiéndose por el Mediterráneo (Figura 4.16). Este evento estuvo asociado a borrascas con un importante frente frío que barrió la península de noroeste a sureste. Al mismo tiempo, en niveles de altura de 500 hPa, las isohipsas estuvieron muy próximas y la corriente de chorro, o *Jet Stream*, circuló a gran velocidad. Estas invasiones de aire frío continental el viento dominante es del noreste, pero en el valle medio del Ebro las ráfagas llegan rebotadas en el Moncayo con direcciones noroeste. Una situación que se puede reforzar si se refuerzan las bajas presiones en el Mediterráneo, bloqueadas si persiste el anticiclón sobre las islas británicas y sobre el centro de Rusia y los Balcanes (García de Pedraza, 1985).

En el mapa podemos apreciar las hipótesis de los estudios que comentábamos al inicio de como la ICU se desvanece cuando la velocidad del viento es muy elevada. Debido a que la dirección de este viento es predominantemente noroeste se ve un desplazamiento de las temperaturas hacia el sureste. Como se explicaba y apreciaba en el mapa anual promedio de las temperaturas máximas (Figura 4.1), pero en esta ocasión no solo se desplaza, sino que se disipa. El efecto de la isla no se aprecia ni en máximas ni en medias y tan solo es las mínimas se intuye ese entorno urbano, aunque de muy débil.

En una investigación previa realizada en Zaragoza (Cuadrat et al., 2022), se examinó cómo el viento afectaba a la intensidad de la ICU. Y se construyó un gráfico que relacionaba datos horarios de 2015 a 2020 de la intensidad de la ICU (en °C), la diferencia de temperatura registrada en un sensor dentro (S01) y fuera de la ciudad (S21), con la velocidad del viento registrada en el aeropuerto. Para una mejor comprensión del comportamiento observado en el mapa, se realizó este mismo gráfico añadiendo otras variables como la dirección del viento o la humedad relativa registrada, Figura 4.17. Los resultados confirmaron que los valores más altos de la ICU se alcanzan con viento en calma o muy débil. Durante momentos de ligera brisa o ausencia de viento (calma), las diferencias térmicas alcanzan sus valores máximos, superando en ocasiones los 5 °C. Las velocidades bajas, inferiores a 10 km/h, implican una alta variabilidad, aunque siempre predominan las intensidades positivas, y se observa que las direcciones principales del viento no solo son las del cierzo, sino de componente sureste. A partir de velocidades de viento superiores a 10 km/h se produce una reducción de la intensidad, aunque aún se mantienen promedios alrededor de los 2 °C. Con velocidades superiores a 40 y 50 km/h, la ICU prácticamente desaparece, aunque no llega a ser nula, lo que indica la importancia del efecto refugio de la ciudad, con su morfología y sus edificios, como también se observa en el mapa de temperaturas mínimas. En general, el estudio estimó una tasa media de descenso de la ICU de -0,02 °C por cada km/h de incremento en la velocidad del viento, aunque con una gran variabilidad por debajo de 10 km/h y una estabilidad considerable por encima de 30 km/h, mostrando una distribución más similar a una exponencial negativa que a una relación completamente lineal. Además, se destacó cómo el cierzo es un viento constante en la ciudad, con diferentes velocidades, pero que principalmente es el viento que alcanza rachas de mayor velocidad. El gráfico también muestra cómo hay momentos en los cuales se produce el efecto contrario y la ICU alcanza valores negativos, es decir, que el exterior está más fresco que el centro urbano. Gracias a los

valores de humedad, se pudo observar cómo esta situación solo se produce en momentos de aumento de la humedad, lo que normalmente está relacionado con fenómenos tormentosos, principalmente durante el verano.

### Efecto del viento y la humedad relativa en la intensidad de la Isla de Calor Urbana (ICU)

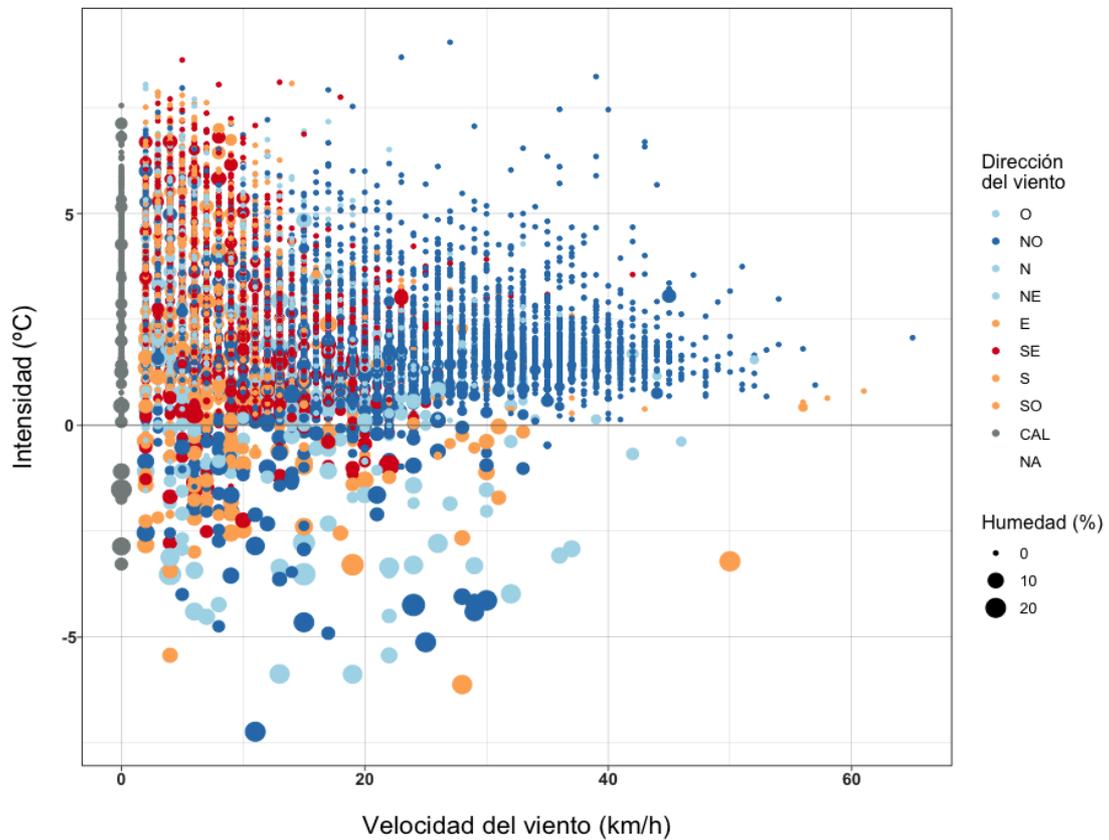
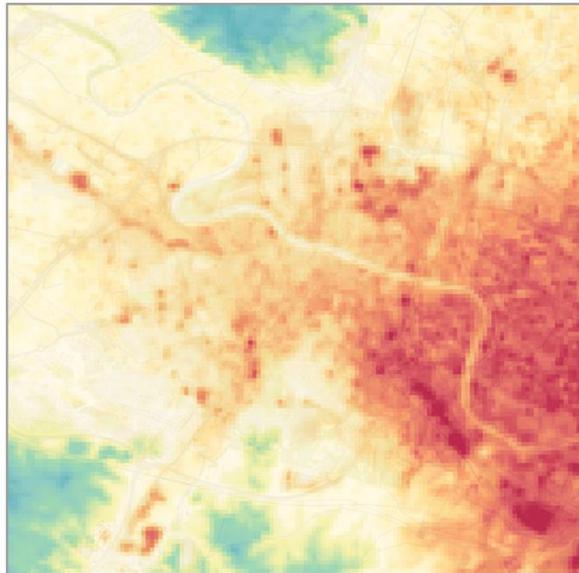


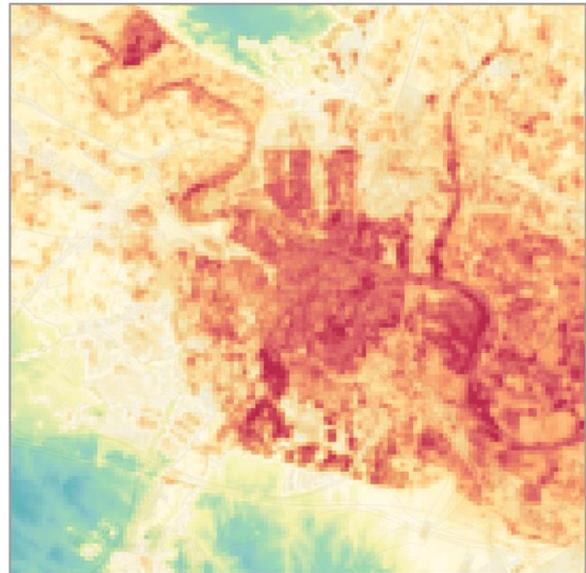
Figura 4.17. Gráfica de intensidad de la isla de calor urbano en relación con la velocidad del viento, dirección y humedad relativa para los datos horarios de 2015 a 2020. Fuente: Red de sensores urbanos y AEMET.

## Temperatura del día 20 de marzo de 2018

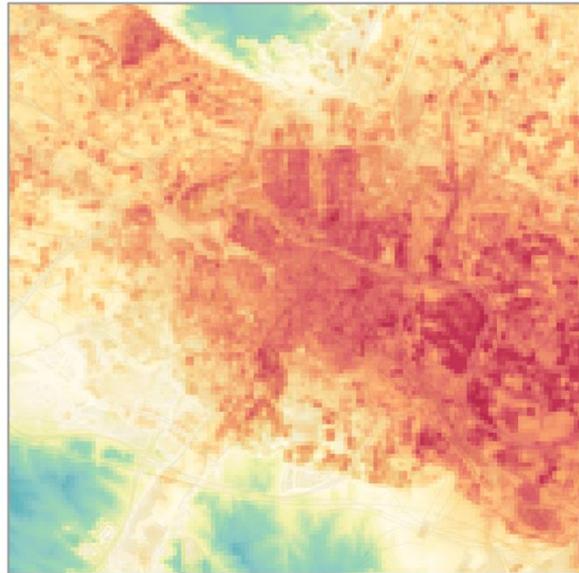
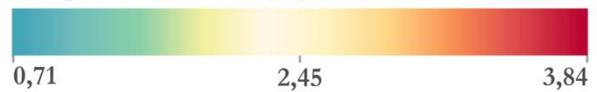
Viento con rachas máximas de 80 km/h y dirección noroeste



Temperatura máxima (°C)



Temperatura mínima (°C)



Temperatura media (°C)

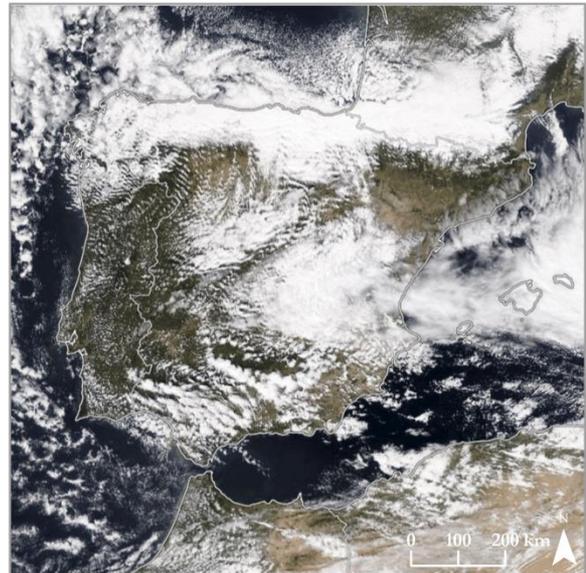
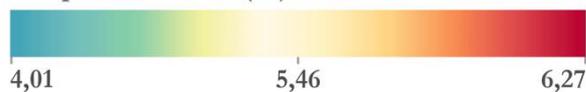


Imagen satélite (MODIS, composición RGB)



Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional.  
Imagen satélite Aqua y Terra MODIS. NASA GSFC EOSDIS ([https:// zoom.earth](https://zoom.earth)). Composición RGB: R 0,66 µm; G 0,55 µm; B 0,47 µm.  
Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.18. Mapa de temperatura del día 20 de marzo de 2018, episodio de viento del noroeste o “Cierzo”.

#### 4.1.4.4. Viento dirección sureste (Bochorno)

El viento opuesto al cierzo, de componente sureste (Hernández Navarro, 1990), es conocido como "*Bochorno*". Este viento, por lo general, trae consigo un aire más húmedo debido a su origen en el Mediterráneo, y se asocia con temperaturas más altas, lo que puede generar sensaciones sofocantes en la ciudad. Sin embargo, existen diferencias estacionales en su comportamiento. Durante la primavera e invierno, el bochorno tiende a ser más templado y húmedo, mientras que en verano se vuelve muy seco debido a su origen en el Sahara. La primavera y el otoño son las estaciones en las que el bochorno suele estar más presente, especialmente debido a las ondas de arrastre generadas por los temporales con bajas presiones en la zona de Galicia y Portugal (García de Pedraza, 1985), que afectan a la península ibérica y, específicamente, al valle del Ebro. A diferencia del cierzo, la velocidad del Bochorno no suele ser tan elevada, pero aun así los vientos con componente sureste en el observatorio del aeropuerto alcanzaron un promedio de velocidad de las rachas máximas en los últimos 5 años de más de 30 km/h.

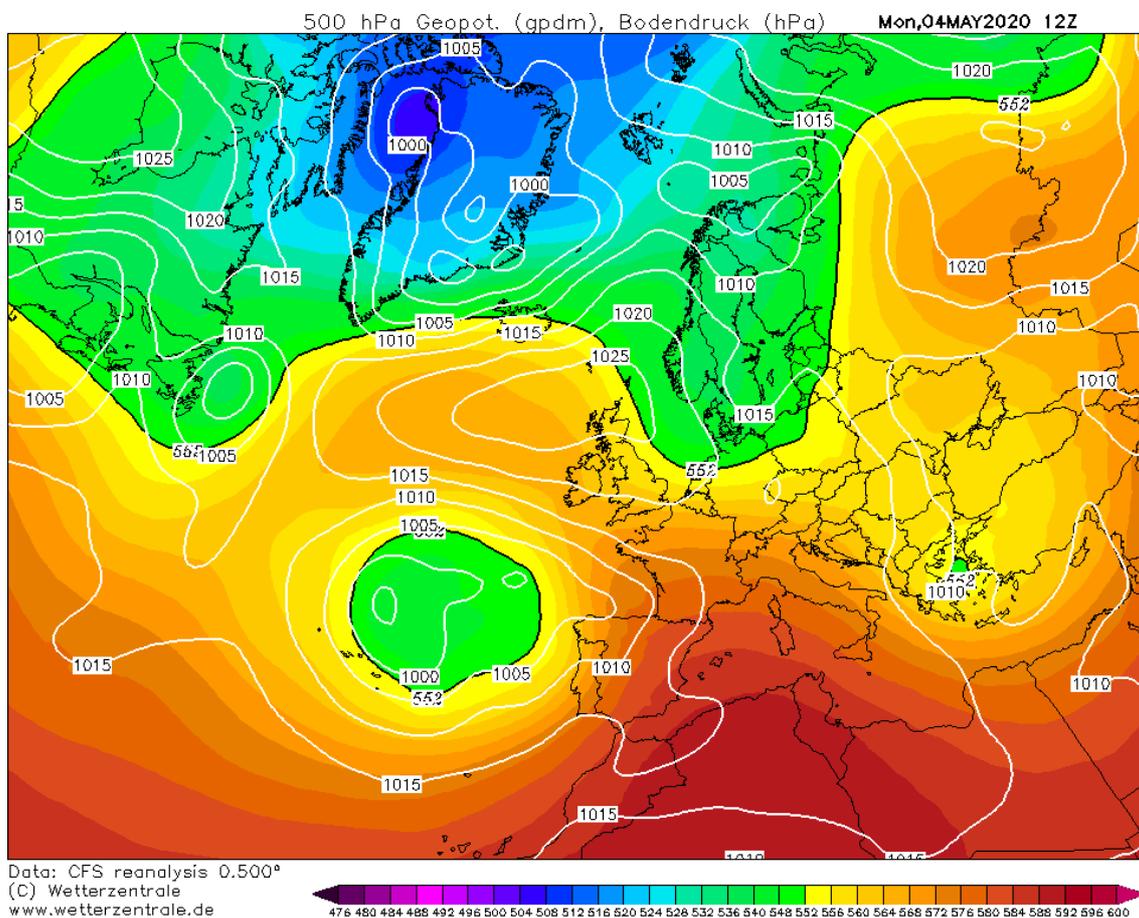


Figura 4.19. Imagen de altura geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 4 de mayo de 2020 a las 12:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR.

Fuente: [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

Para la cartografía se seleccionó representar el día 4 de mayo de 2020, un día primaveral en el que en Zaragoza se registró una racha máxima de viento de 41 km/h en dirección sureste, a 120°. Este evento de bochorno sobre la ciudad se produce debido al ascenso de masas de aire del Mediterráneo hacia el Cantábrico, impulsado por un sistema de alta presión en la zona occidental del Mediterráneo frente a un sistema de baja presión que avanza desde el noroeste de la península, principalmente a lo largo de las costas gallega y

portuguesa (Figura 4.19). La advección es principalmente sur pero el aire se encaja al llegar al valle y adquiere la dirección que se registra en Zaragoza.

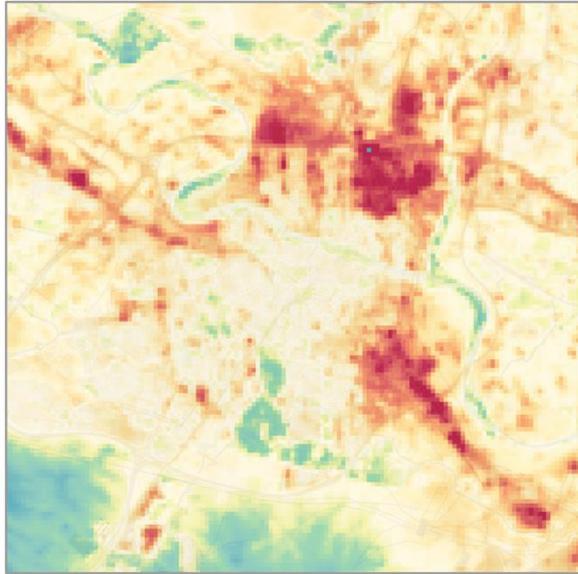
En el mapa (Figura 4.20), los resultados de la interpolación para la temperatura mínima y media muestran claramente patrones asimétricos en comparación con la Figura 4.18 y el comportamiento del cierzo. En esta ocasión, el flujo preferente proviene de la dirección sureste, lo que hace que el desplazamiento de la isla de calor se aprecie en la zona noroeste. En este escenario, la ICU se difumina principalmente en los barrios periféricos de la zona este, como Las Fuentes o Vadorrey. Sin embargo, la velocidad del viento no es tan intensa como en el caso del cierzo, lo que permite una mejor apreciación de la isla y distingue los sectores más densamente construidos. En contraposición, se observa cómo Delicias surge como una de las zonas más cálidas de la ciudad, y barrios periféricos que hasta ahora habían pasado desapercibidos por tener valores no demasiado elevados, como Valdefierro o Miralbueno, destacan ahora por tener valores elevados de temperatura. Además, zonas de viviendas unifamiliares y construcciones dispersas, ligadas a la carretera en dirección a Logroño, como La Venta del Olivar o el propio polígono industrial que surge en paralelo a la carretera nacional, alcanzan cifras prominentes y en el caso del polígono superan los 17 °C de mínima. Una temperatura elevada, pero hay que señalar que la dinámica de este momento contribuye a la llega de vientos cálidos del sur.

Si volvemos a analizar la Figura 4.17, podemos apreciar cómo este tipo de evento con un viento en dirección sureste y una velocidad tan elevada (41 km/h) no es muy común, y a menudo los flujos de aire en esta dirección son mucho más débiles. Esta situación en calma se relaciona con una mayor intensidad de la ICU. Sin embargo, como se observa en la gráfica, la intensidad de la ICU se reduce notablemente a partir de los 40 km/h y esto se puede apreciar en los mapas.

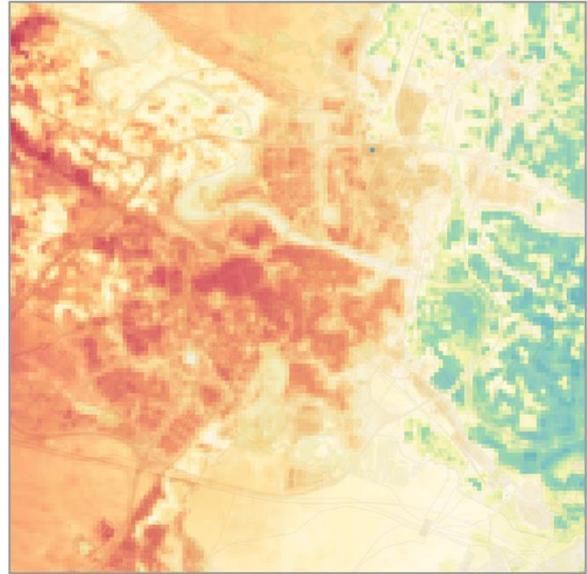
Durante el día, en las temperaturas máximas, no se aprecia una isla urbana, y tan solo destacan los polígonos industriales como principales espacios cálidos en la zona, así como los espacios de vegetación natural, especialmente los bosques, que protegen del efecto del viento y se presentan como principales zonas frías. Esto se observa en los pinares al sur, alrededor de los montes de Torrero, las repoblaciones realizadas en la zona norte sobre el escarpe de yesos en los límites del Campo de Maniobras de San Gregorio, y los bosques o sotos ligados al río Ebro y el Galacho de Juslibol.

## Temperatura del día 4 de mayo de 2020

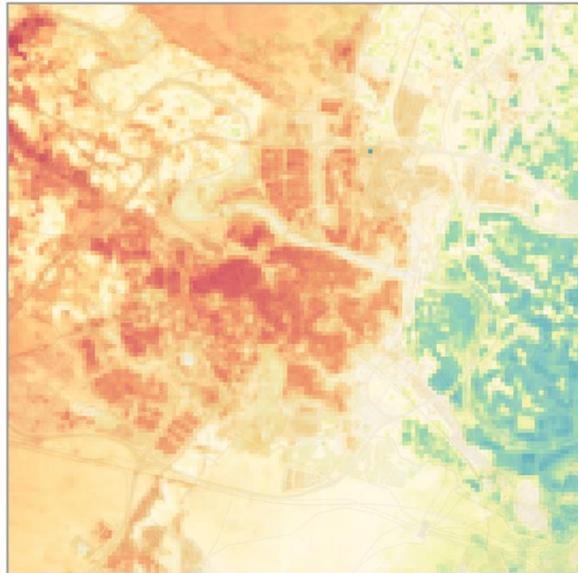
Viento con rachas máximas de 41 km/h y dirección sureste



Temperatura máxima (°C)



Temperatura mínima (°C)



Temperatura media (°C)

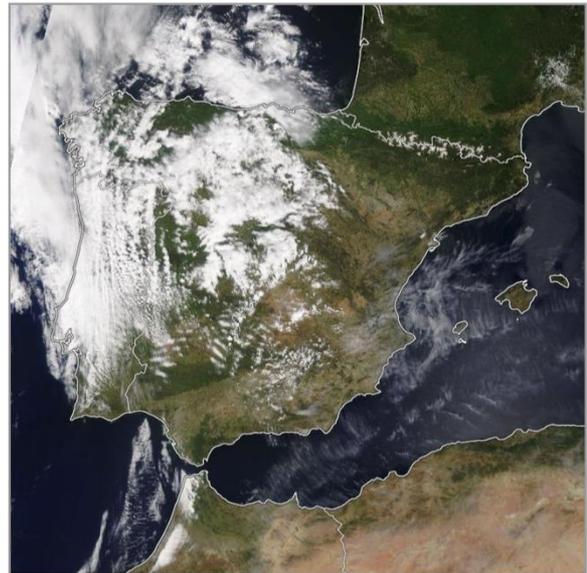
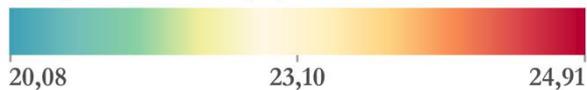


Imagen satélite (MODIS, composición RGB)



Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional.  
Imagen satélite Aqua y Terra MODIS. NASA GSFC EOSDIS (<https://zoom.earth>). Composición RGB: R 0,66  $\mu\text{m}$ ; G 0,55  $\mu\text{m}$ ; B 0,47  $\mu\text{m}$ .  
Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.20. Mapa de temperatura del día 23 de abril de 2017, episodio de viento de sureste o “Bochorno”.

#### 4.1.4.5. Borrasca invernal

La elección de analizar situaciones tormentosas o eventos pluviométricos singulares resulta muy interesante para comprender cómo afectan a Zaragoza. La borrasca Gloria, un temporal de viento, lluvia, nieve y fenómenos costeros que afectó a la península ibérica desde el 17 de enero hasta el 25 del año 2020, es un ejemplo relevante en este sentido. Esta fue la séptima borrasca de la temporada y generó numerosos avisos en gran parte del norte, este peninsular y las Islas Baleares. Este tipo de eventos extremos proporcionan una oportunidad única para examinar cómo las condiciones meteorológicas adversas pueden influir en la distribución de la temperatura urbana en Zaragoza.

Dado su impacto significativo, tanto su formación como su evolución fueron seguidas y analizadas de cerca (Berdalet et al., 2020). AEMET (*Borrasca Gloria*, 2020) recoge como el viernes 17 de enero, un vórtice en niveles altos del Atlántico norte se movió hacia Europa, generando una baja en superficie que se ubicó al noroeste de la península para el mediodía del día 18. Posteriormente, el sistema se desplazó hacia el sureste, llegando al Mediterráneo durante la tarde del 18 y las primeras horas del 19. Al pasar al sotavento de la península, la baja en superficie se profundizó ligeramente, convirtiéndose en la borrasca Gloria, centrada entre Ibiza y el cabo de la Nao al mediodía del 19.

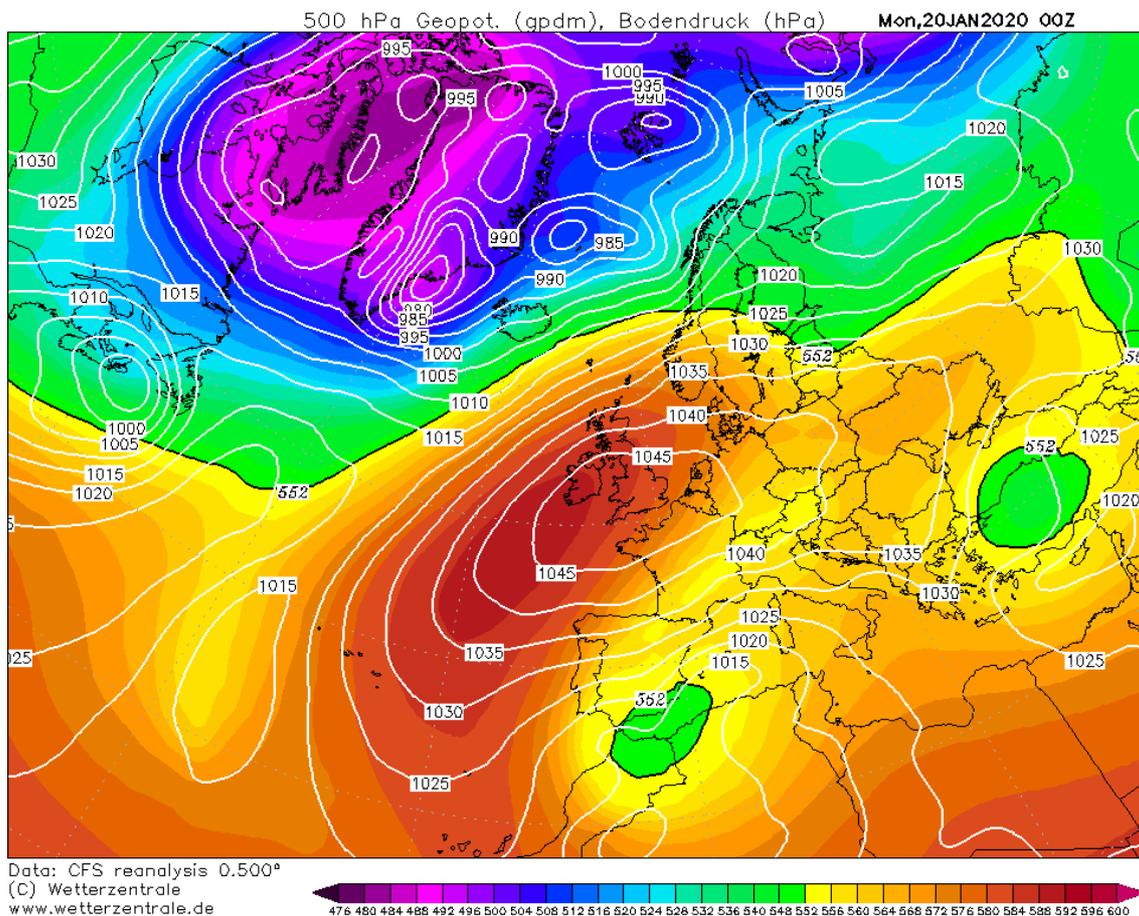


Figura 4.21. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 20 de enero de 2020 a las 00:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR.

Fuente: [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

Aunque la presión en el centro de la borrasca no era muy baja, en torno a 1011 hPa, la formación de un fuerte anticiclón al sur de Gran Bretaña estableció un intenso gradiente

de presión desde el sur de Francia hasta Baleares. Esto causó vientos y oleaje récord en el Mediterráneo, con abundantes precipitaciones en las regiones costeras y en las Baleares. Gloria permaneció menos de 24 horas en esa posición, siendo absorbida luego por una baja más grande en el mar de Alborán el día 20, como se puede apreciar en la Figura 4.21. Esta situación persistió hasta el miércoles 22, con un temporal marítimo y nieve a cotas bajas. Del jueves 23 al sábado 25, la borrasca continuó activa, con episodios convectivos intensos, hasta que el domingo 26, la baja se desplazó hacia el este, perdiendo actividad.

Al tratarse de un evento que duro varios días se optó por analizar en el mapa el día 21 de enero, ya que en Zaragoza se registró un valor extremo de precipitación máxima en un solo día, alcanzando los 41 l/m<sup>2</sup> en el observatorio de referencia. Este día se caracterizó por una lluvia prácticamente continua, pero destacaron las acumulaciones hacia el final de la tarde y el comienzo de la noche, específicamente entre las 19:00 y las 23:00 horas, con un promedio de aproximadamente 5 mm de precipitación por hora. Además, se registró una intensidad máxima de precipitación a las 19:22 horas, alcanzando los 12 mm/h. Lo que nos permite plasmar en el mapa (Figura 4.22) un buen ejemplo de las consecuencias de un evento tormentoso de lluvia intensa en invierno.

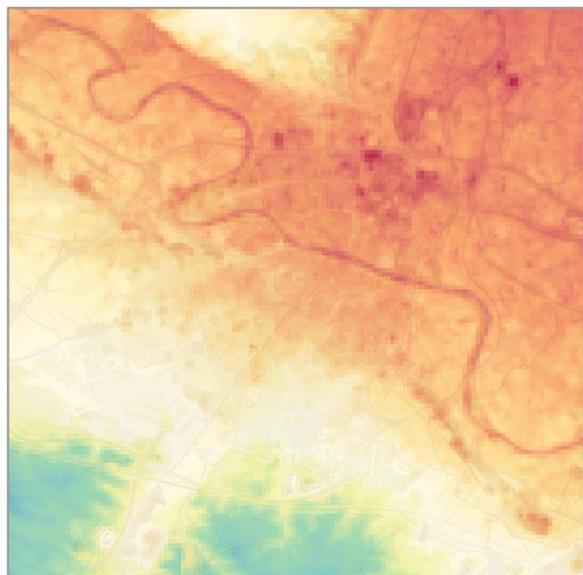
El análisis del mapa revela una situación meteorológica compleja y muy variable, donde se combinan fenómenos tormentosos con lluvias extremas hacia el final de la tarde y vientos variables en dirección y velocidad. Como resultado, los mapas de temperatura no muestran patrones tan definidos como en otros episodios climáticos. Si bien algunos autores sugieren que la presencia de lluvias puede manifestarse en un descenso de la ICU debido al aumento de la humedad y la disminución de las temperaturas urbanas (Cui et al., 2021; Manoli et al., 2019), pocos estudios profundizan en estas condiciones y cómo responde la ciudad a escala detallada. La mayoría se centran en estudiar los procesos físicos de cómo la ICU favorece la intensificación de las lluvias en las zonas urbanas (Liang & Ding, 2017; Pathirana et al., 2014).

En Zaragoza, se observa una desaparición total del efecto de la ICU sobre la ciudad en el caso de las temperaturas máximas. Esto puede deberse al efecto combinado de la lluvia y los vientos, que alcanzaron velocidades en torno a los 30 km/h desde primeras horas de la mañana hasta el mediodía. Sin embargo, se debe considerar también un fallo en el modelo de interpolación, lo que refleja la dificultad de interpolar la información térmica bajo estas condiciones extremas. Gran parte de la información adicional utilizada para mejorar la predicción de la temperatura proviene de datos satelitales. Sin embargo, estas covariables a escala mensual suelen obtenerse bajo condiciones de cielos despejados, lo que no se corresponde con las condiciones de la temperatura durante tormentas o lluvias intensas. Por lo tanto, en este tipo eventos extremos, los resultados obtenidos muestran distribuciones de temperatura menos precisas.

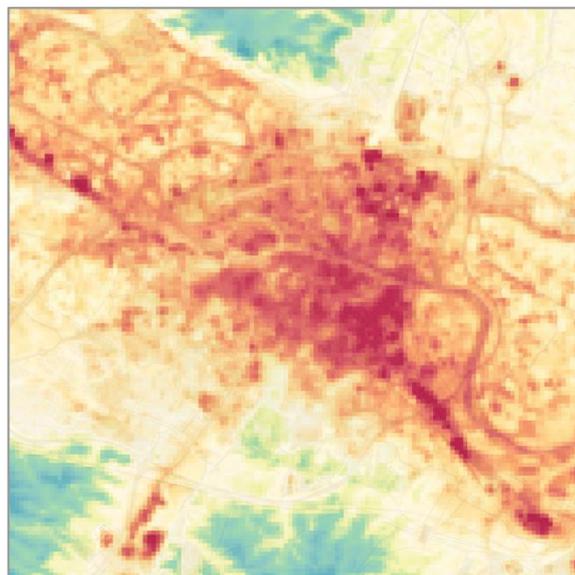
En cuanto a las temperaturas mínimas, el efecto de la ICU aún se aprecia, aunque de forma alterada y diluida. Así como ciertas zonas más cálidas en los polígonos industriales. Se observa cierto calentamiento en la zona sureste de la ciudad, que puede atribuirse al efecto del viento, como se ha observado en situaciones anteriores debido a los flujos de viento. Sin embargo, llama la atención un patrón de viento en contra, donde la dirección del viento registrada en la estación oficial es principalmente del noroeste y oeste, opuesta a la dirección de la tormenta que avanzó por el este.

# Temperatura del día 21 de enero de 2020

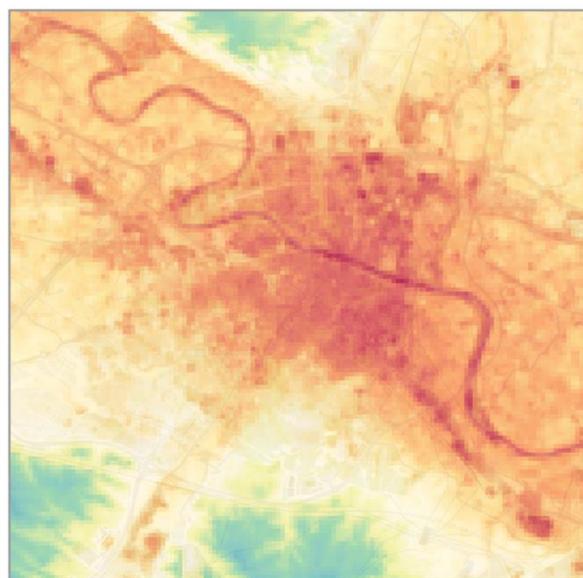
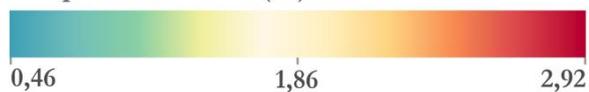
## Borrasca Gloria



Temperatura máxima (°C)



Temperatura mínima (°C)



Temperatura media (°C)

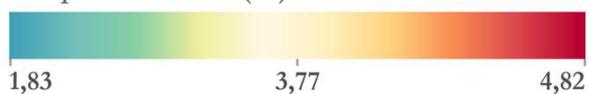


Imagen satélite (MODIS, composición RGB)



Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional.  
Imagen satélite Aqua y Terra MODIS, NASA GSFC EOSDIS ([https:// zoom.earth](https://zoom.earth)). Composición RGB: R 0,66  $\mu\text{m}$ ; G 0,55  $\mu\text{m}$ ; B 0,47  $\mu\text{m}$ .  
Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.22. Mapa de temperatura del día 21 de enero de 2020, borrasca Gloria.

#### 4.1.4.6. Gota fría o DANA

En esta ocasión, el objetivo es analizar los efectos que tienen las tormentas de verano sobre la temperatura de la ciudad. Durante el periodo de control de calidad, se observó que estos episodios generaban problemas debido a los saltos bruscos repentinos que provocan las tormentas, especialmente hacia última hora de la tarde, ocasionando descensos demasiado abruptos en la temperatura registrada. A pesar de estas dificultades, el propósito de este análisis es destacar que estos episodios, a pesar de su carácter singular, ocurren con cierta regularidad en la zona y no deben eliminarse de las bases de datos. Son fenómenos naturales que deben ser estudiados para comprender cómo afectan al clima urbano. Uno de los fenómenos meteorológicos más destacados que sirve de ejemplo como tormenta intensa de verano es la depresión aislada en niveles altos o DANA, también conocida como "gota fría". Se caracteriza por ser una zona de baja presión que se forma en los niveles superiores de la atmósfera (Fernández Monistrol, 2019), separada de la circulación típica zonal del oeste y que se mueve de manera independiente. Estas condiciones generan un marcado gradiente térmico que resulta en una atmósfera altamente inestable, propicia para el desarrollo de precipitaciones intensas y tormentas severas.

El día seleccionado para el análisis en el mapa es el 24 de agosto de 2022. Sin embargo, en esta fecha, la DANA aún no estaba completamente formada y se desarrolló gradualmente a lo largo de la semana. Optamos por examinar las condiciones previas a la formación completa de la DANA debido a que en esta fecha la ciudad experimentó un ejemplo evidente de tormenta estival en las últimas horas de la tarde. En la Figura 4.23, que muestra los datos de temperatura y precipitación horaria en el aeropuerto de Zaragoza, se observa cómo durante la tarde se produjo una tormenta intensa. Entre las 18:00 y las 20:00 horas, se acumularon 22,4 mm de precipitación. Al mismo tiempo, la temperatura descendió abruptamente en solo una hora, bajando 14 °C de golpe, como resultado de la combinación entre la precipitación y la disminución de la radiación solar. Esto provocó un refrescamiento significativo en un entorno urbano que se encontraba sobrecalentado debido a un verano extremadamente cálido. En Zaragoza en algunos sectores de la ciudad durante ese verano paso de tener un máximo de 5 noches tórridas a registrar 20 noches (Saz et al., 2022).

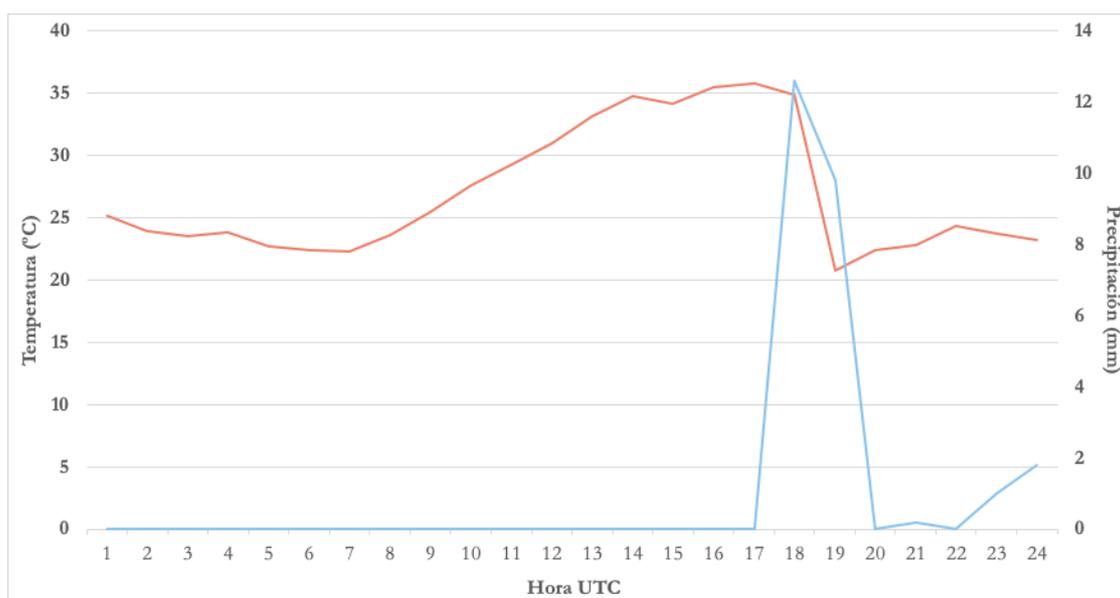


Figura 4.23. Gráfica de evolución horaria de la temperatura (°C) y precipitación (mm) del día 24 de agosto de 2022 en el observatorio de Zaragoza, Aeropuerto. Fuente: AEMET.

En el mapa de la situación atmosférica (Figura 4.24), se puede observar que la DANA se encuentra a una latitud más elevada y aún no ha cruzado la península. En su lugar, se aprecia una dorsal anticiclónica debilitada, con pequeñas bolsas de aire frío y vaguadas presentes. Al mismo tiempo, una onda en altura atravesó la región noroeste de la península en esos días, lo que contribuyó a aumentar la inestabilidad atmosférica. Estas condiciones proporcionaron el escenario propicio para la formación de aguaceros tormentosos, como los que se registraron durante la tarde de ese día.

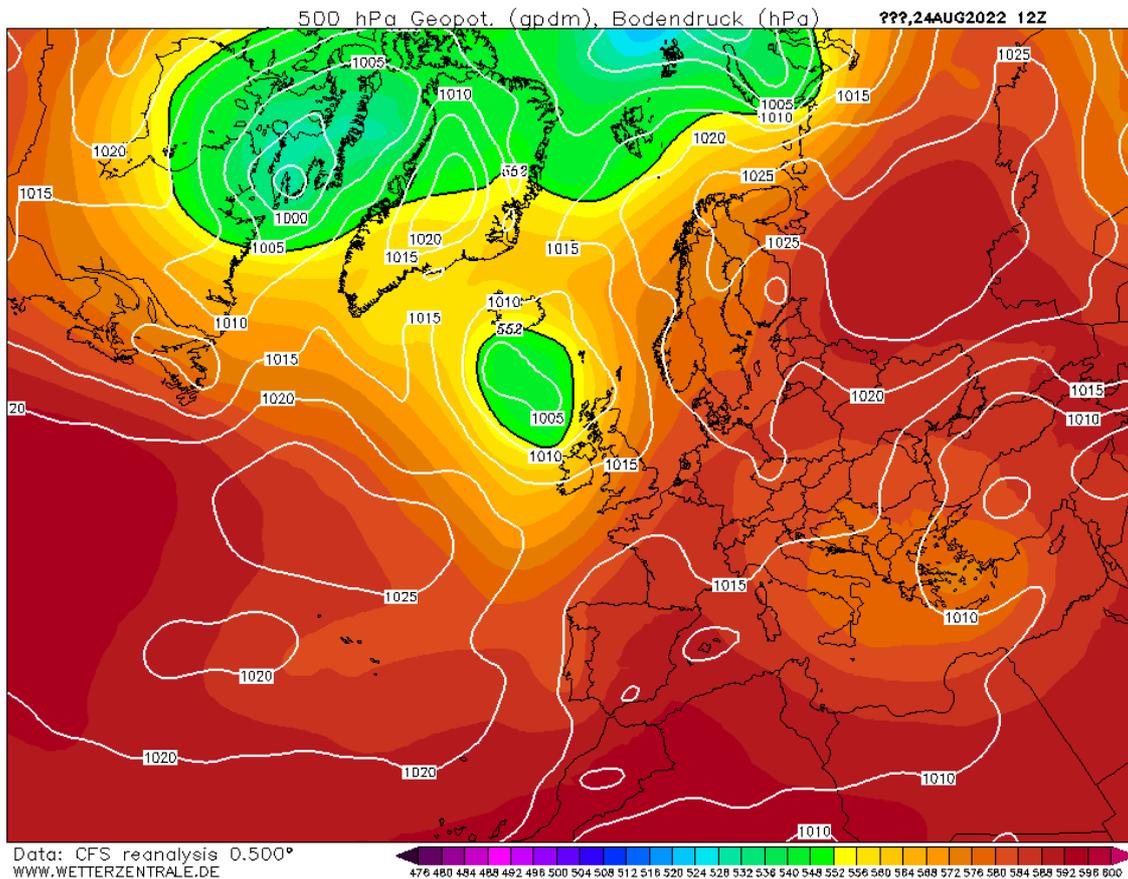


Figura 4.24. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 24 de agosto de 2022 a las 12:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR. Fuente: [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

El resultado esperado en la distribución de la temperatura en el mapa (Figura 4.26) sería la disminución o incluso la desaparición del fenómeno de la ICU debido al efecto de la tormenta, lo que debería haber provocado una reducción en las temperaturas urbanas, especialmente en áreas previamente más cálidas que su entorno. Sin embargo, en los resultados obtenidos, tanto en el caso de las temperaturas máximas como mínimas, no se observa este patrón. Por el contrario, se observa claramente el fenómeno de la ICU, con un núcleo urbano que muestra temperaturas más elevadas. En el caso de las temperaturas máximas, estas superan los 35 °C, mientras que las medias se sitúan en torno a los 28 °C y las mínimas alrededor de los 23 °C. Además, se nota que, en el caso de las temperaturas máximas, las diferencias entre el centro urbano y la periferia se reducen, con un rango de menos de 2 °C de diferencia, lo que indica una menor intensidad de la ICU. Este comportamiento, sin embargo, es algo que se ha observado en otros mapas y situaciones. Por otro lado, en el caso de las temperaturas mínimas, se observa un rango de diferencias mayor, pero lo que puede destacar en esta ocasión es que esta disparidad está muy polarizada. No solo el núcleo urbano muestra temperaturas elevadas, sino que también las zonas con

vegetación escasa o suelo desnudo presentan temperaturas cálidas, similar a lo que ocurre en muchas ocasiones con las temperaturas máximas. En contraste, las zonas de ribera o de cultivo son las más frías.

Sin embargo, la falta de observación del debilitamiento o desvanecimiento de la ICU en los mapas se debe a una limitación en la escala del análisis. En este caso, la interpolación se realizó en un diseño diario debido a la disponibilidad de datos de las covariables y a las restricciones del diseño de la investigación. Fenómenos tan específicos y fugaces como este son difíciles de captar incluso a escala diaria, a pesar de sus efectos abruptos en el clima urbano. La tormenta se desarrolló en las últimas horas de la tarde, mientras que los mapas de temperaturas mínimas y máximas representan los valores alcanzados por los sensores en un rango de horas cercano al amanecer y al mediodía, respectivamente, momentos en los cuales ese día se produjeron ambas magnitudes. Por lo tanto, los efectos de este debilitamiento de la ICU no son visibles en los mapas. Esto subraya la importancia de disponer de una red de sensores urbanos que abarque toda la ciudad, ya que proporciona una oportunidad magnífica para observar tanto la escala espacial como temporal del clima urbano de manera mucho más detallada de lo que sería posible de otra manera y analizar fenómenos o comportamientos que no podrían distinguirse. Para mostrar esta utilidad, en la Figura 4.25 se han seleccionado cuatro sensores de la red ubicados en lugares representativos del núcleo urbano y su periferia, con el objetivo de mostrar el efecto de una tormenta de verano en la temperatura de la ciudad.



Figura 4.25. a) Gráfica de evolución horaria de la temperatura y la humedad relativa en varios sensores de la red urbana de Zaragoza. b) Gráfica de intensidad de la isla de calor en varios sensores de la red urbana de Zaragoza. Casco Histórico (S01), Movera (S18), Parque Grande (S17) y C.D. Real Zaragoza (S21).

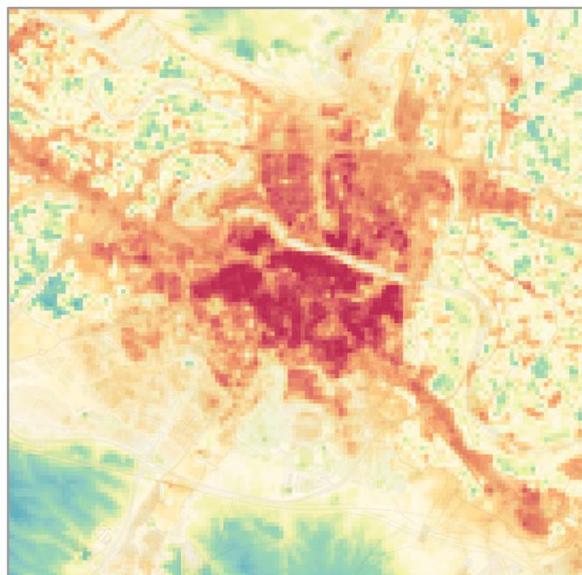
Observamos un patrón similar al de la Figura 4.23 del observatorio del aeropuerto, donde se produce un descenso abrupto de la temperatura a mitad de la tarde. Sin embargo, en esta ocasión lo que se refleja claramente en los datos no es el aumento de la precipitación, sino un aumento significativo de la humedad asociada. Durante la primera parte del día, la evolución de la temperatura sigue el curso esperado para un día de verano. El sensor más urbano, ubicado en el Casco Histórico, es el más cálido durante la noche y, a medida que avanza la mañana, la temperatura aumenta gradualmente. No obstante, por la mañana, se observa un aumento mayor en los sensores periféricos, como el del barrio rural de Movera, y en aquellos situados en zonas con una vegetación densa, como el del Parque Grande, lo que resulta en una débil y momentánea IFU. Al mediodía, las diferencias con el sensor de referencia rural de la Ciudad Deportiva del Real Zaragoza son mínimas. Hasta este punto, el comportamiento sigue la dinámica esperada. Sin embargo, con la llegada de la tormenta y la consiguiente precipitación y aumento de la humedad, la temperatura cae bruscamente. Aunque la caída se registra en todos los sensores, el sensor ubicado en las afueras de la ciudad ralentiza este descenso, y en el momento de mayor precipitación, alrededor de las 18:00 horas, su temperatura está más de 5 °C por encima del resto de los sensores. De este modo, la isla desaparece momentáneamente en toda la ciudad.

Una vez que la tormenta ha pasado, como se puede observar en el gráfico de intensidad, la ICU comienza a aumentar nuevamente, pero de manera bastante asimétrica. En el caso del parque urbano, la intensidad nunca vuelve a ser positiva en ningún momento. Por otro lado, en el núcleo urbano, donde la densidad de construcción es mayor y hay menos presencia de vegetación, el aumento es más rápido que en otras áreas con un mayor porcentaje de vegetación o menos suelo construido. Al final del día, una ligera lluvia nuevamente hace descender las temperaturas, pero esta vez el descenso es más pronunciado en los sectores construidos. Sin embargo, en Movera, donde la presencia de suelo natural es mayor, el descenso es aún más pronunciado, mientras que en los sectores con mayor presencia de vegetación apenas descienden las temperaturas. Es posible que el brusco descenso previo y la incapacidad de calentarse nuevamente en ese breve período de tiempo no hayan permitido que estos espacios naturales se enfríen nuevamente al mismo nivel que los espacios construidos.

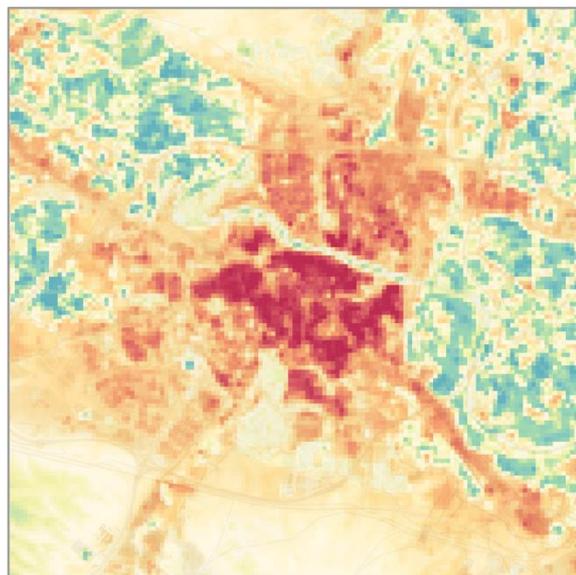
Este tipo de fenómenos tormentosos estivales, caracterizados por su brevedad e intensidad, están cada vez más presentes en la península ibérica (Merino et al., 2016). En el caso específico de la DANA, no hay un patrón claro de aumento en su frecuencia y formación, pero sí se observa una tendencia clara hacia un carácter más torrencial de las precipitaciones (Nieto Ferreira, 2021; Nieto et al., 2007). Esta tendencia se atribuye al aumento generalizado de las temperaturas y la evaporación del agua, fenómenos asociados al cambio climático, especialmente en la región del Mediterráneo. Esto subraya la necesidad de desarrollar más estudios desde la perspectiva del clima urbano para analizar las consecuencias de estos eventos para las ciudades. No solo se trata del riesgo de inundaciones debido a las cantidades de precipitación, sino también de cómo estos fenómenos tormentosos interactúan con la dinámica de la temperatura urbana y otros aspectos climáticos. El caso que hemos expuesto aquí sirve como ejemplo aislado, pero gracias a la existencia de redes urbanas y ajustando los parámetros de interpolación para una escala temporal adecuada a las condiciones de estos fenómenos, se podrían avanzar y desarrollar nuevos estudios en esta dirección.

## Temperatura del día 24 de agosto de 2022

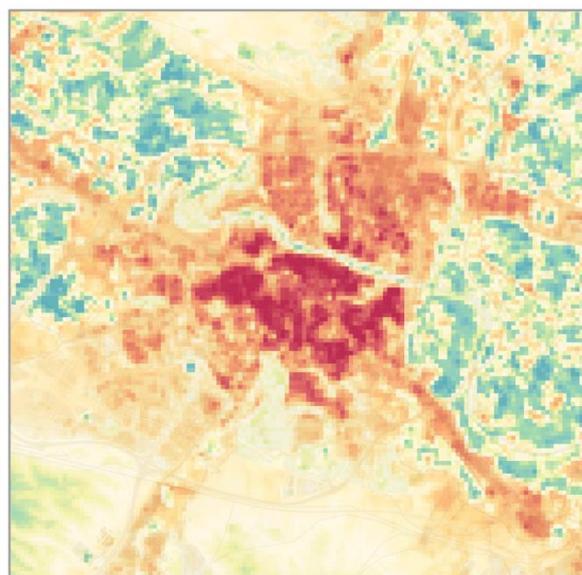
### Gota fría o DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos)



Temperatura máxima (°C)



Temperatura mínima (°C)



Temperatura media (°C)



Imagen satelital (MODIS, composición RGB)



Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional.  
 Imagen satelital Aqua y Terra MODIS, NASA GSFC EOSDIS ([https:// zoom.earth](https://zoom.earth)). Composición RGB: R 0,66  $\mu\text{m}$ ; G 0,55  $\mu\text{m}$ ; B 0,47  $\mu\text{m}$ .  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.26. Mapa de temperatura del día 24 de agosto de 2022, episodio de DANA.

#### 4.1.4.7. Ola de calor

Las olas de calor son fenómenos térmicos extremos que se caracterizan por registrar temperaturas anormalmente altas que pueden durar varios días consecutivos. Estos eventos no son aislados y pueden afectar a una parte importante de la geografía española. Tienen graves consecuencias tanto en la salud humana (Royé et al., 2020; Tobías et al., 2023) como en los ecosistemas naturales. Los espacios urbanos, con el efecto de la ICU, sumado a las repercusiones del Cambio Climático, como el aumento de las temperaturas o la frecuencia de estos episodios (Pereira et al., 2021; Vicente-Serrano et al., 2017), se convierten en zonas de especial vulnerabilidad ante estos fenómenos. Por lo tanto, resulta crucial comprender el comportamiento térmico de la ciudad ante estas situaciones. En el caso de Zaragoza, al igual que en el resto de España, las olas de calor son eventos que principalmente ocurren durante el verano, específicamente de junio a agosto. Aunque este fenómeno es recurrente en estas latitudes, en los últimos años se ha observado un aumento en su frecuencia, intensidad, extensión y duración (Serrano-Notivoli et al., 2022). Uno de los mayores desafíos en la identificación de las olas de calor radica en la falta de una definición única y precisa. En el caso de AEMET, para identificar una ola de calor, se basan en la estimación previa de una temperatura umbral, la cual se establece en función del percentil 95 de la serie de temperaturas máximas. Todos los días que superan este umbral se consideran episodios cálidos, pero para ser clasificados como olas de calor, deben superarlo al menos durante tres días consecutivos y en al menos el 10% de las estaciones analizadas. Sin embargo, existen otros métodos más completos y específicos que permiten identificar las olas de calor de manera más precisa (Díaz-Poso, Lorenzo, et al., 2023; Serrano-Notivoli et al., 2022).

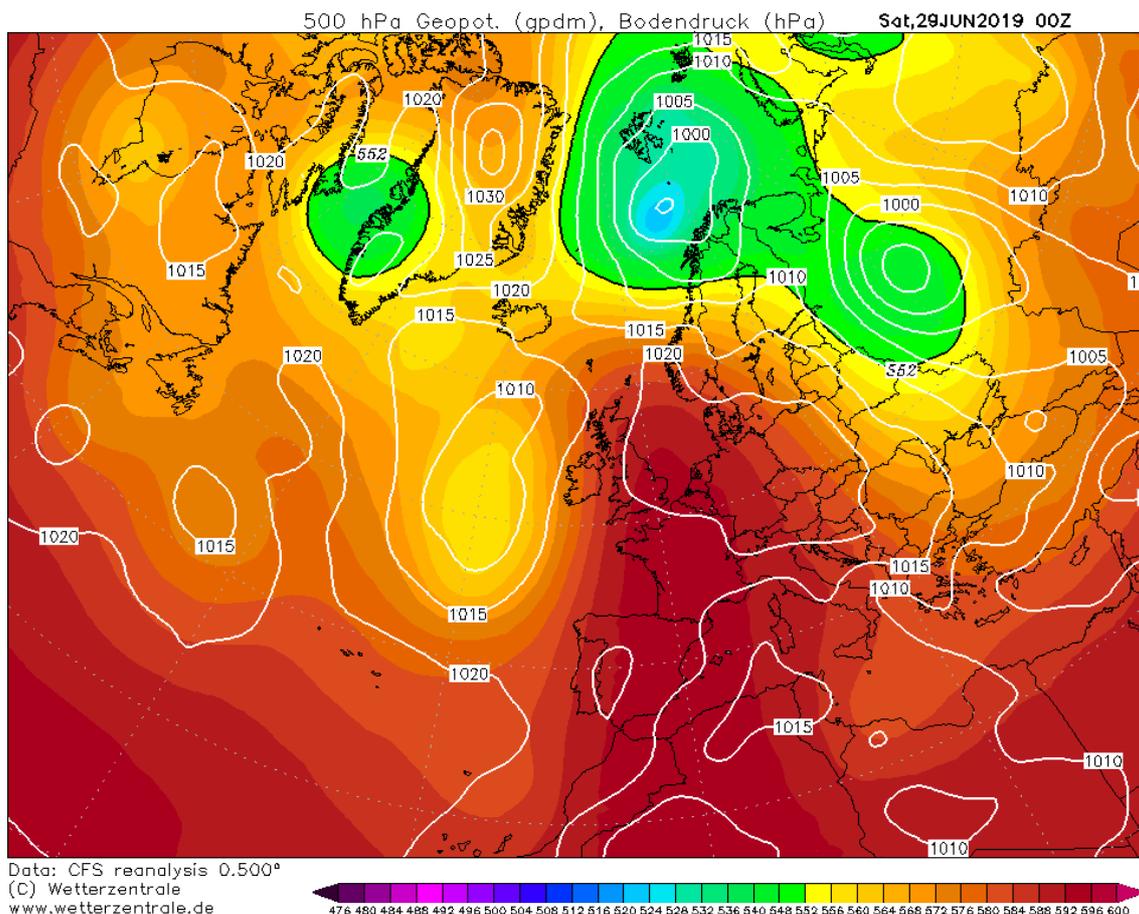


Figura 4.27. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 29 de junio de 2019 a las 00:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR. Fuente: [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

El día seleccionado para nuestro análisis fue el 29 de junio de 2019, día en el que se registró en el aeropuerto de Zaragoza la temperatura máxima histórica para un mes de junio, alcanzando los 43,2 °C. Además, este día se encuentra dentro de una ola de calor catalogada por AEMET que comenzó el 26 de junio y duró seis días hasta el 1 de julio, afectando a 29 provincias, incluyendo Zaragoza, y dejando una anomalía de 4 °C respecto a la temperatura umbral. La situación sinóptica para ese día (Figura 4.27) muestra el avance de masas de aire tropical continental, lo que resulta en la entrada de masas de aire muy cálidas y secas. Esto se debe a la presencia de un potente anticiclón en el Mediterráneo que bombea aire caliente sahariano desde el interior del continente africano, así como la presencia de una borrasca en el Atlántico. Además, estas olas de calor suelen ir acompañadas de masas de polvo en suspensión que generan calimas y empeoran la calidad del aire, como se puede apreciar en la imagen MODIS.

Los mapas de temperatura (Figura 4.28) revelan patrones significativos en la distribución de las temperaturas máximas y mínimas, especialmente en relación con la presencia de la ICU. Sin embargo, no está claro cómo afectan las olas de calor a la ICU, ya que diferentes estudios han arrojado resultados contradictorios. Algunos estudios sugieren una intensificación del fenómeno durante estos episodios (Founda & Santamouris, 2017; Ward et al., 2016; Zhao et al., 2018), ya sea durante el día como durante la noche, o en ambos. Por otro lado, en otras ciudades se ha observado el efecto contrario, con una disminución de la intensidad de la ICU (Richard et al., 2021; Scott et al., 2018), especialmente en los últimos días de estos episodios. Durante estos períodos, estos últimos estudios argumentan que la acumulación continua de calor y el aumento constante de las temperaturas máximas hacen que las diferencias entre el entorno urbano y el rural circundante sean mínimas y que por lo tanto disminuya la intensidad.

Durante las temperaturas máximas, se observa una marcada concentración de las temperaturas más cálidas en el núcleo urbano, lo que delinearía claramente la presencia de la ICU. Esta observación coincide con investigaciones previas que han documentado la intensificación de la ICU durante olas de calor. Por ejemplo, durante el verano de 2012 en Atenas, la magnitud de la ICU aumentó un promedio de 3,5 °C durante los períodos de ola de calor en comparación con las condiciones normales de verano (Founda & Santamouris, 2017). Asimismo, en grandes ciudades de Estados Unidos como Nueva York o Washington D.C., la intensificación de la ICU se sitúa entre 1,5 °C y 2 °C, mientras que en ciudades de menor tamaño como Bridgeport y Harrisburg, este aumento no es tan significativo (Ramamurthy & Bou - Zeid, 2017). En el caso de Zaragoza, la intensidad máxima de la ICU para este día durante las temperaturas máximas es de 2,99 °C, con valores superiores a 2,5 °C en el Casco, el Centro, Las Fuentes, San José y Delicias, así como en ciertas zonas de Universidad, Almozara y Arrabal, que son generalmente más cálidas. Esta distribución resalta en comparación con mapas promedio anteriores de temperatura máxima en las que el núcleo urbano no es el espacio más cálido, e incluso puede llegar a ser el espacio más frío durante el día (IFU). En mapas anteriores, los polígonos industriales son los que más se calientan durante las temperaturas máximas, pero en esta ocasión no destacan.

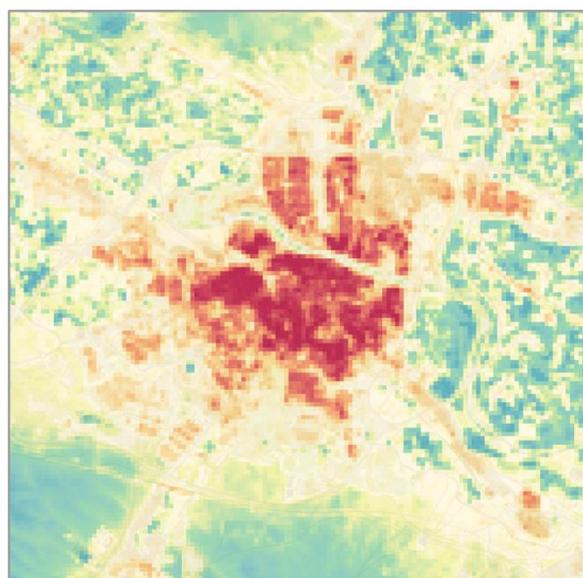
En el caso de las temperaturas mínimas, la intensidad de la ICU sigue siendo elevada en Zaragoza, con zonas de la ciudad que pueden llegar a alcanzar diferencias de hasta 6 °C respecto al entorno rural, tomando como referencia el entorno del sensor 21 en la C.D. Real Zaragoza al sur de la ciudad. Esta intensidad elevada es mayoritaria en la mayor parte del

espacio construido urbano, superando los 4 °C, mientras que estudios previos establecían un promedio de 2 °C en las zonas urbanas (Barrao, Serrano-Notivoli, Cuadrat, et al., 2022). El rango total de las temperaturas mínimas en el mapa es mayor durante las olas de calor a otros mapas analizados, con 10,73 °C de diferencia, mostrando un enorme contraste entre el entorno urbano construido y la zona de cultivos de la huerta del Ebro. Este aumento de la intensidad de la ICU durante las olas de calor es consistente con investigaciones previas, al igual que en el caso de las máximas. Sin embargo, hay estudios que han destacado el efecto contrario, principalmente en ciudades de menor tamaño y de climas templados (Scott et al., 2018). Por ejemplo, un estudio realizado en la ciudad francesa de Dijon mostró que la intensidad de la ICU disminuye durante periodos de ola de calor (Richard et al., 2021), argumentando que esto podría estar relacionado con la disminución de la temperatura real debido a la evapotranspiración y la humedad del suelo. Durante eventos prolongados de olas de calor, las temperaturas anormalmente elevadas continuadas pueden reducir la diferencia entre el interior de la ciudad y su entorno, debido al calentamiento de las zonas rurales y la disminución de la humedad del entorno rural. Sin embargo, el estudio destacó que, en épocas estivales durante la ola de calor, y principalmente al final del verano, la evapotranspiración real puede descender bruscamente debido a la cosecha y la pérdida de actividad vegetal. Esta pérdida de vegetación da paso a la presencia de un mayor porcentaje de suelo desnudo que se calienta más fácilmente y acumula más calor que con la presencia vegetal.

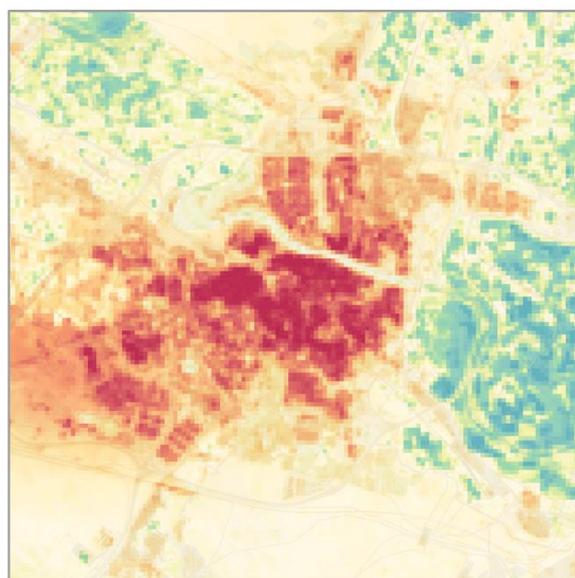
En el caso de Zaragoza en ciertas zonas del mapa de temperatura mínima, y especialmente en el caso de la temperatura media, muestran valores elevados en áreas con menor presencia vegetal, como las zonas esteparias al norte y sur, así como los suelos de futuras zonas de construcción. Esto puede deberse al efecto de calor constante y continuado que hace que estos suelos acumulen mayor calor durante las olas de calor, ya que bajo otras condiciones podrían calentarse rápidamente por la mañana y enfriarse durante la noche. Sin embargo, durante las olas de calor, estos suelos pueden retener ese calor durante más tiempo, lo que resulta en valores de temperatura más altos. En contraste, la huerta del valle del Ebro y del Gallego, un mosaico de zonas de cultivo con distinto porcentaje de vegetación que tienen actividad vegetal durante la mayor parte del año. Estas zonas de cultivo pueden actuar como áreas de enfriamiento, especialmente durante las olas de calor. La vegetación presente en estas áreas ayuda a absorber parte del calor y a aumentar la evaporación, lo que puede conducir a una disminución de la temperatura ambiental. Estos cultivos que envuelven a la ciudad por el oeste, este y noreste adquieren valores negativos de intensidad de la ICU, lo que permite crear cierto contraste con la ciudad y seguir identificando la ICU durante las olas de calor, lo que no ocurre en el caso francés.

Estas son hipótesis y conclusiones derivadas del análisis de un solo día con tres variables térmicas. Para realizar un análisis más exhaustivo, sería necesario estudiar estos episodios en conjunto, considerando también la evolución horaria y la acumulación continua de calor durante varios días consecutivos. Este enfoque permitiría comprender mejor cómo estos fenómenos afectan la distribución de la temperatura en diferentes áreas y cómo se relacionan con la ICU.

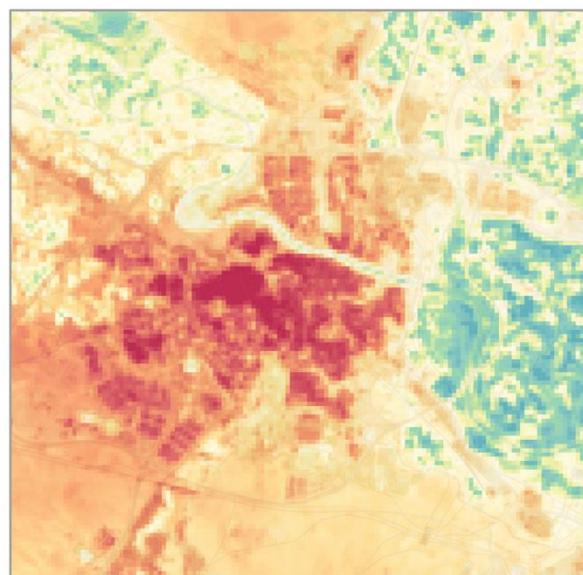
## Temperatura del día 29 de junio de 2019 Episodio de ola de calor



Temperatura máxima (°C)



Temperatura mínima (°C)



Temperatura media (°C)

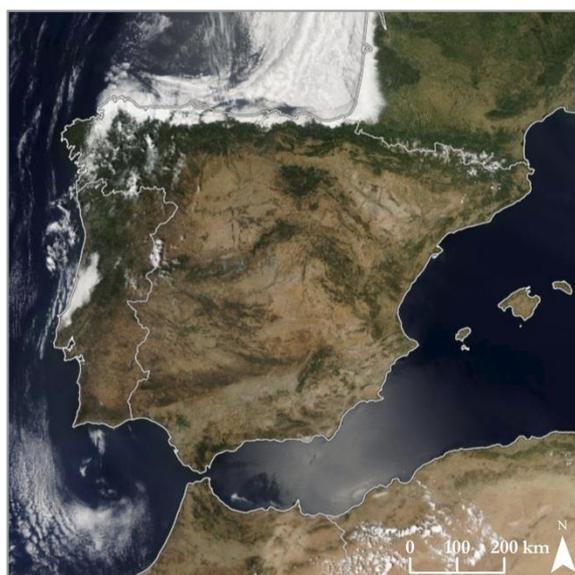
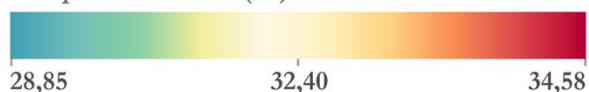


Imagen satélite (MODIS, composición RGB)



Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional.  
 Imagen satélite Aqua y Terra MODIS. NASA GSFC EOSDIS ([https:// zoom.earth](https://zoom.earth)). Composición RGB: R 0,66 μm; G 0,55 μm; B 0,47 μm.  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.28. Mapa de temperatura del día 29 de junio de 2019, episodio de ola de calor.

#### 4.1.4.8. Anticiclón invernal

Una de las situaciones sinópticas más características de la península ibérica es la presencia de un anticiclón invernal justo encima de la región (Olcina-Cantos, 2001). Estas altas presiones son causadas por la presencia del anticiclón continental europeo, el anticiclón de las Azores, o ambos, lo que resulta en un clima estable, soleado y seco durante el periodo invernal. Esta situación también se asocia con una elevada oscilación térmica diaria, es decir, fuertes contrastes de temperatura entre el día y la noche. En condiciones adecuadas, esto puede llevar a fuertes heladas nocturnas, debido a la pérdida de calor por irradiación, mientras que durante el día, con la radiación directa del sol en días despejados, se experimenta un aumento de la temperatura. Además, en las ciudades se acentúa el efecto de la ICU y empeora la calidad del aire. Sin embargo, en ocasiones también pueden producirse nieblas en los valles, especialmente las nieblas de radiación, debido a inversiones térmicas. Estas inversiones térmicas también pueden dar lugar a nieblas engelantes o “cencellada” cuando la niebla y las temperaturas por debajo de 0 °C coinciden.

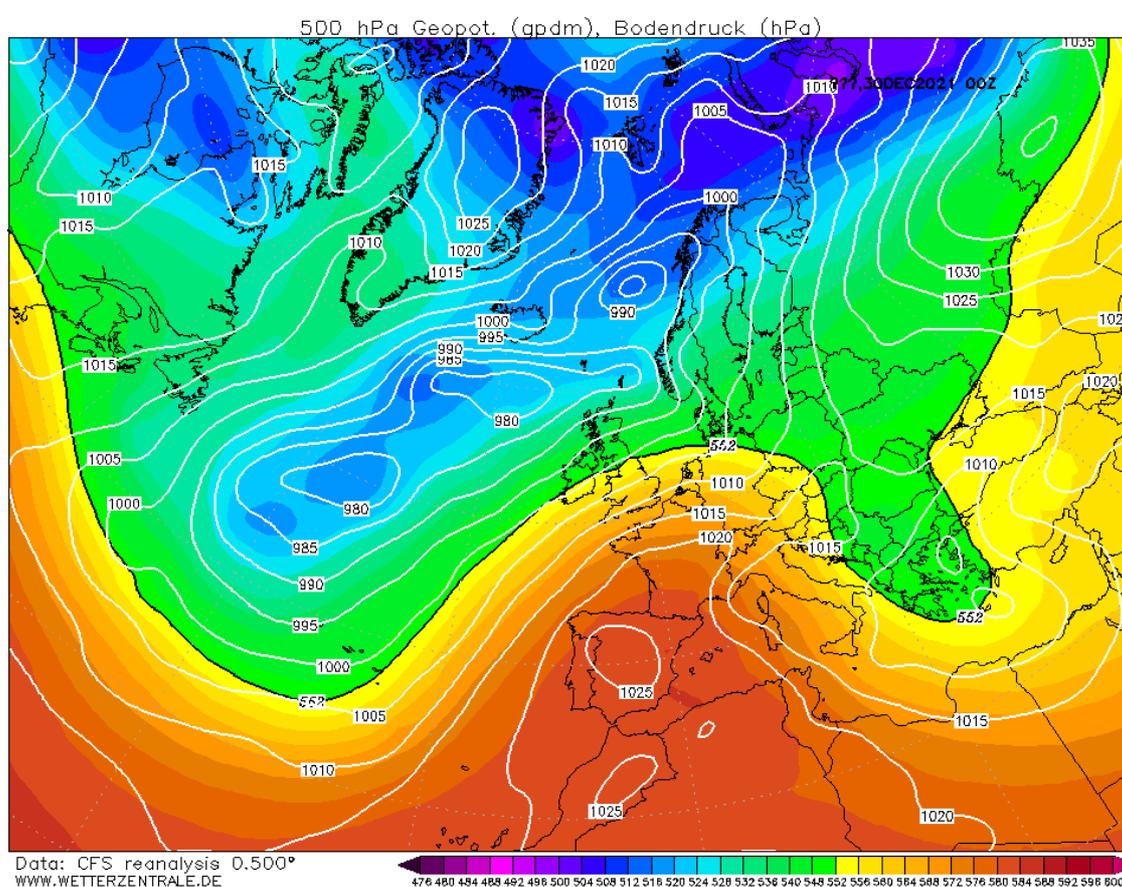


Figura 4.29. Imagen de altitud geopotencial a 500 hPa e isobaras con presión en superficie (hPa) sobre Europa, del día 30 de diciembre de 2021 a las 12:00 UTC. Reanálisis del modelo climático CFSR. Fuente: [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

Un ejemplo concreto de esta situación sinóptica (Figura 4.29) se puede observar el día 30 de diciembre de 2021, donde se registró una alta presión en superficie con un valor de 1025 hPa ubicada sobre la península ibérica. Una situación semejante a la observada el 22 de diciembre del 2020 pero en esa ocasión se desarrolló un espeso banco de niebla en el valle del Ebro. Los datos recopilados para ese día en la estación meteorológica de Zaragoza indican cielos despejados con escasa o nula presencia de nubes, y vientos suaves con una velocidad promedio de 5 km/h y dirección suroeste. Este patrón atmosférico estable típico

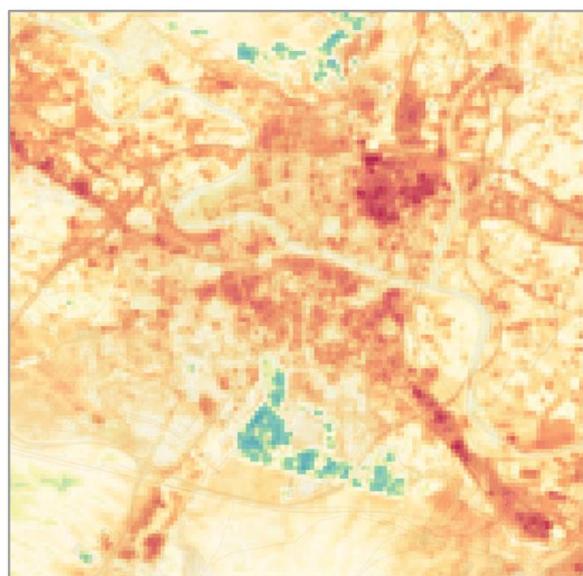
de un anticiclón invernal propicia condiciones soleadas y secas, con una alta oscilación térmica diaria. En esta ocasión, según los datos oficiales de la AEMET para la ciudad, la temperatura máxima registrada fue de 17,9 °C a las 15:00 horas UTC, mientras que la mínima fue de 5,7 °C a las 7:00 horas UTC. Esto dio lugar a una oscilación térmica de 12,2 °C en un solo día.

En la cartografía (Figura 4.30), se pueden apreciar los efectos del anticiclón sobre la distribución de la temperatura urbana. Durante el día, las temperaturas máximas muestran valores elevados en la mayoría de los espacios urbanos y rurales. Este aumento por encima de los valores normales de temperatura, debido al cielo despejado, al tiempo estable y a la radiación directa del sol, se traduce en un incremento generalizado de las temperaturas diurnas. Es importante destacar que el valor normal promedio mensual para la temperatura máxima durante un mes de diciembre en Zaragoza es de 10,8 °C, mientras que en el mapa oscila entre 14,44 °C y 18,89°C. En la imagen, los espacios más cálidos se corresponden con los polígonos industriales, una vez más, mientras que los espacios menos cálidos se encuentran en las zonas boscosas debido al cobijo y la sombra que proporcionan durante el día. En la ciudad, la isla de calor está difuminada, aunque se puede apreciar cómo resalta ligeramente el núcleo en la margen sur. Asimismo, los espacios abiertos con suelos desnudos, no pavimentados y con escasa vegetación también presentan temperaturas más altas, debido al importante papel de la radiación durante estas situaciones.

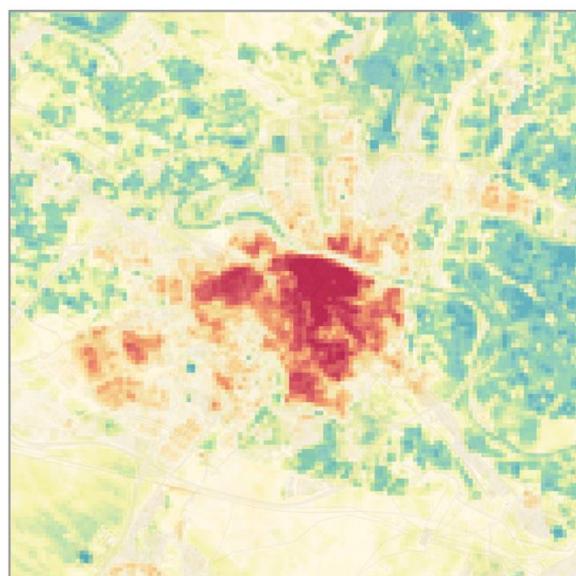
En la temperatura media, pero principalmente en la mínima, el efecto de la ICU se intensifica notablemente, como se muestra en los mapas con diferencias de 4,27 °C y 6,49 °C, respectivamente. Este aumento en la intensidad de la ICU, que explica los valores máximos de intensidad observados en época invernal en publicaciones previas (Barrao, Serrano-Notivoli, Cuadrat, et al., 2022), puede explicarse en función de la conductividad térmica de los materiales de construcción (Mohajerani et al., 2017; T. Oke, 1982). Materiales como el hormigón, el cemento o el pavimento reflejan muy poca luz (bajo albedo), lo que significa que absorben rápidamente una gran cantidad de calor durante condiciones de radiación directa en forma de onda corta. Sin embargo, durante la noche, estos mismos materiales tardan mucho en enfriarse y liberan lentamente el calor acumulado mediante onda larga. Factores que influyen en estos flujos de radiación, como la morfología urbana, la altura de los edificios o la fracción de cielo visible (SVF, por sus siglas en inglés), cobran especial importancia en estas situaciones. Por lo tanto, en el mapa, las zonas más cálidas son el núcleo central de la ciudad, con el Casco Histórico y el Centro en primer lugar, así como los barrios que surgieron en las décadas de los 50 y 60 durante la expansión industrial de la ciudad. Estos barrios se caracterizan por una alta densidad de edificios y un entramado urbano poco planificado, como algunas áreas de Delicias, Torrero o San José. En esta ocasión, al darse condiciones de calma y tiempo estable, no se producen desplazamientos generados por la dinámica atmosférica regional, como los flujos de viento en dirección noroeste y la ICU no se desplaza en dicha dirección. De todas las situaciones analizadas, las condiciones de anticiclón invernal son las que mejor permiten delimitar los límites de la ICU, especialmente en las temperaturas mínimas. Además, estas condiciones destacan perfectamente las diferencias intraurbanas entre los distintos barrios de la ciudad, debido a sus diversas características morfológicas.

## Temperatura del día 30 de diciembre de 2021

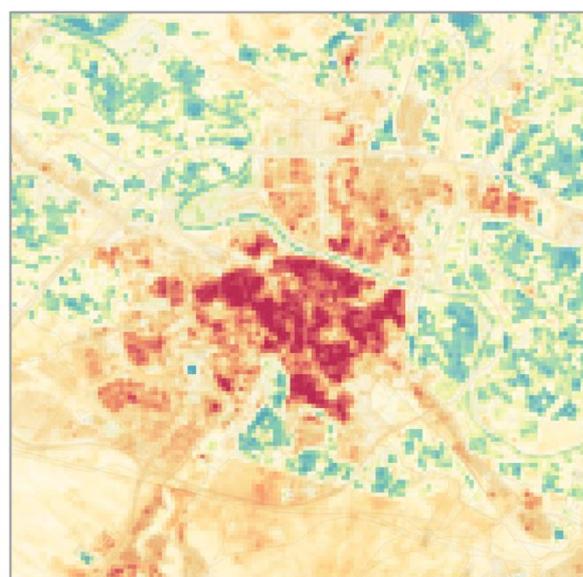
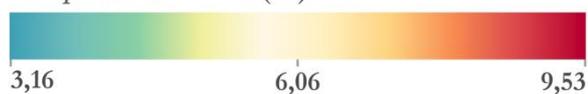
### Situación de anticiclón invernal sobre la península ibérica



Temperatura máxima (°C)



Temperatura mínima (°C)



Temperatura media (°C)

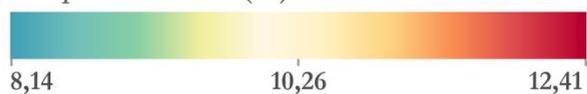


Imagen satélite (MODIS, composición RGB)



Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional.  
 Imagen satélite Aqua y Terra MODIS. NASA GSFC EOSDIS ([https:// zoom.earth](https://zoom.earth)). Composición RGB: R 0,66 µm; G 0,55 µm; B 0,47 µm.  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.30. Mapa de temperatura del día 30 de diciembre de 2021, situación de anticiclón invernal.

## 4.2. Isla de calor urbano

En este apartado, se centrará la atención en el fenómeno de la ICU. Aunque ya se ha comentado en algunos de los mapas anteriores y se ha hecho referencia a su extensión o intensidad, en esta sección se analizará de manera específica cómo varía este fenómeno estacionalmente y cuáles son sus características y comportamientos estacionales. Se desarrollará un mapa estacional de la intensidad de la ICU para las temperaturas máximas, medias y mínimas (Figura 4.32, Figura 4.33 y Figura 4.34).

En primer lugar, para calcular la intensidad, se ha restado a todos los píxeles de la imagen un valor de referencia de la temperatura que no esté afectado por el efecto urbano. Esta temperatura umbral se ha calculado promediando la temperatura interpolada de los píxeles a una distancia de 200 metros de la ubicación del sensor de referencia de la C.D. Real Zaragoza (S21) para cada *raster* diario, y luego se ha calculado el promedio estacional. En esta ocasión al contrario que los mapas anteriores la variable representada es la misma, la intensidad de la ICU, aunque el origen sea distinta variable térmica. En esta ocasión, a diferencia de los mapas anteriores, la variable representada es la misma, la intensidad de la ICU, aunque el origen sea distinta variable térmica. Esto ha permitido el diseño de una leyenda única que hace fácilmente comparable los tres mapas por medio de intervalos. Además, se ha añadido un histograma al mapa según los intervalos, lo que facilita distinguir las diferencias de valores.

La intensidad varía según la variable analizada, como ya se había observado en los mapas anteriores y estudios previos (Cuadrat, 2004; Cuadrat et al., 2022; Cuadrat, Saz, et al., 2015). El comportamiento más común es que esta intensidad sea mayor en las temperaturas mínimas, ya que están más relacionadas con la noche o el amanecer, mientras que las máximas son las que tienen menor intensidad al representar mejor la ICU diurna. Si analizamos los histogramas, podemos ver que, en el caso de las temperaturas máximas, la intensidad no supera en ningún momento los 2 °C, y rara vez supera 1 °C, tan solo en un 6,5 % de los píxeles de los 4 mapas estacionales. Mientras que el intervalo de intensidad más frecuente es de 0,25 a 0,5, con un 33,73 % de los píxeles. Como rasgos generales, también se destaca que, en el caso de las temperaturas máximas, las diferencias en el mapa de intensidad no son tan abruptas. Aunque la mayor parte de los datos son de intensidad positiva, la delimitación de la ICU no está tan marcada y las diferencias son demasiado homogéneas para mostrar un gradiente urbano-rural muy marcado.

Por estaciones, en el caso de las máximas (Figura 4.32), es durante el verano y la primavera cuando la intensidad aumenta, especialmente en el período estival, cuando algunos sectores del sureste y el centro de la ciudad muestran intensidades superiores a 1,5 °C. Este patrón de distribución es similar al que se observa en el mapa de temperatura anual máxima (Figura 4.1), donde destaca este desplazamiento debido al flujo preferente del viento en el valle del Ebro de origen noroeste (cierzo). Aunque este fenómeno es más marcado en verano, también es apreciable en primavera y otoño.

Lo que destaca en el caso de las temperaturas máximas en los mapas estacionales es la estrecha relación que la ICU diurna guarda con la radiación solar. En una ciudad como Zaragoza, con un clima mediterráneo continentalizado en el hemisferio norte, las temperaturas son generalmente más altas durante el verano debido a la mayor intensidad de la radiación solar y a la prolongada duración de la luz solar. En estas condiciones, los materiales urbanos absorben más calor y retienen más energía durante el día, lo que puede aumentar la intensidad de la ICU durante las horas diurnas (Mathew et al., 2018). La exposición prolongada a estas elevadas temperaturas durante el verano o la primavera puede

alterar los mecanismos de regulación térmica del entorno, lo que lleva a un aumento de la intensidad de la ICU durante el día. Esto evita el fenómeno de la IFU, que ocurre cuando, debido al calentamiento más rápido del entorno rural en comparación con el urbano, la ciudad muestra valores de temperatura más bajos durante la mañana y dependiendo de la época del año también el mediodía. Por otro lado, durante el invierno, las temperaturas son más bajas y la duración de la luz solar es más corta, lo que puede influir en una menor intensidad de la ICU durante el día, como se puede observar en el mapa.

También es importante considerar otros fenómenos meteorológicos, como la nubosidad y su relación con la radiación solar. Durante el verano, es más probable que las ciudades experimenten cielos despejados y niveles más bajos de humedad, lo que contribuye a una mayor absorción de radiación solar y, por lo tanto, a una mayor intensidad durante el día. En contraste, durante el invierno, la cobertura de nubes y los niveles de humedad pueden ser más altos, limitando la cantidad de radiación solar que llega a la superficie urbana y reduciendo la intensidad de la ICU durante el día. Además, el efecto del viento también juega un papel importante. Durante el verano, los vientos tienden a ser más débiles en Zaragoza, lo que permite que el calor se acumule en las áreas urbanas y aumente la intensidad de la ICU durante el día. Aunque puede desplazar la isla, no llega a disolverla, como se observa en los mapas. Por el contrario, durante el invierno, los vientos suelen ser más fuertes y pueden dispersar el calor más rápidamente. En invierno y primavera, se superan frecuentemente los 30 km/h, lo que hace que los valores de intensidad de la ICU disminuyan, como se aprecia en la Figura 4.17, lo que podría resultar en una isla menos pronunciada durante el día.

En el caso de la intensidad relacionada con las temperaturas medias (Figura 4.33), se observan patrones similares a las temperaturas máximas, pero como era de esperar, al tratarse de una variable como la media, los valores más abruptos de intensidad se reducen. El 85,2 % de los píxeles se acumulan en tan solo cuatro intervalos, que van desde  $-0,25$  °C hasta  $0,75$  °C. Los valores de intensidad superiores a  $1,5$  °C o inferiores a  $-0,5$  °C son prácticamente nulos. Esto muestra una distribución muy homogénea, aunque sigue destacando la presencia de la mancha urbana, pero sin valores de intensidad sobresalientes.

Por último, los mapas de intensidad de las temperaturas nocturnas son los que mejor muestran no solo el fenómeno de la ICU y esa dicotomía campo-ciudad respecto a la distribución de la temperatura, sino que también permiten apreciar las diferencias intraurbanas (Barrao, Serrano-Notivolí, Saz, et al., 2022) y cómo las diferentes cubiertas urbanas intervienen en el comportamiento de este fenómeno. En los mapas de intensidad de la media de las temperaturas mínimas (Figura 4.34), se observa claramente la presencia de la ICU en el núcleo central de la ciudad, con valores que superan los  $1,75$  °C de intensidad. Este es el único mapa que supera los  $2$  °C, llegando incluso al máximo de  $2,27$  °C en invierno. En otras ciudades como Londres (Giridharan & Kolokotroni, 2009), Seúl (Y.-H. Kim & Baik, 2002) o Barcelona (Martín-Vide & Moreno-García, 2020) también se alcanzan máximas de intensidad en los meses de invierno.

Sin embargo, también se observan valores abruptos negativos y ciertas zonas de cultivos situadas en el extremo noreste, en torno a la huerta del río Gállego, que descienden por debajo de los  $-1$  °C de intensidad en primavera. Esto último puede deberse a una subestimación realizada por el modelo debido a la falta de datos en estas cubiertas de cultivo en esa zona, como se aprecia en los mapas de desviación estándar en los Anexos y a una sobrestimación de las covariables relacionadas con la actividad vegetal a la hora de enfriar los valores de temperatura.

Para poder observar mejor las diferencias de la ICU, se ha creado un gráfico que muestra las intensidades estacionales a lo largo de las distintas variables térmicas, centrándose solo en los valores del núcleo central de la ciudad. Entendemos por núcleo las zonas del centro de la ciudad en la margen derecha del río, en barrios como el Casco Histórico, Centro, Delicias, Universidad y ciertas zonas de Las Fuentes, San José o La Almozara. En esta gráfica (Figura 4.31), se observan algunas de las tendencias ya descritas anteriormente, pero nos permite comprobar que respecto al núcleo central de la ICU, es durante las temperaturas mínimas de invierno cuando se alcanzan mayores intensidades, mientras que en esa misma estación para las máximas se alcanzan los valores más bajos. Este incremento en los días de invierno en el caso de las mínimas puede deberse a los procesos de inversiones térmicas que suelen ser comunes en situaciones de anticiclón invernal sobre el valle del Ebro (Barrao, Serrano-Notivoli, Saz, et al., 2022).

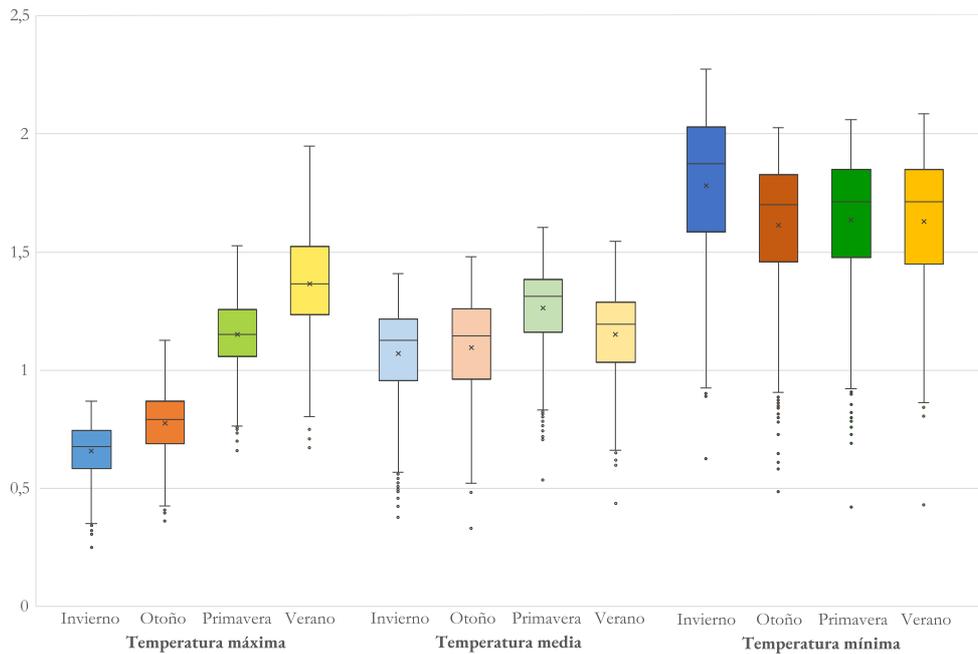


Figura 4.31. Gráfica de intensidad estacional de la ICU para el núcleo central de Zaragoza.

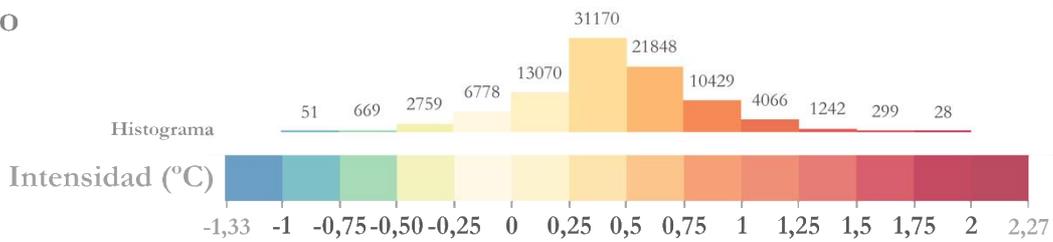
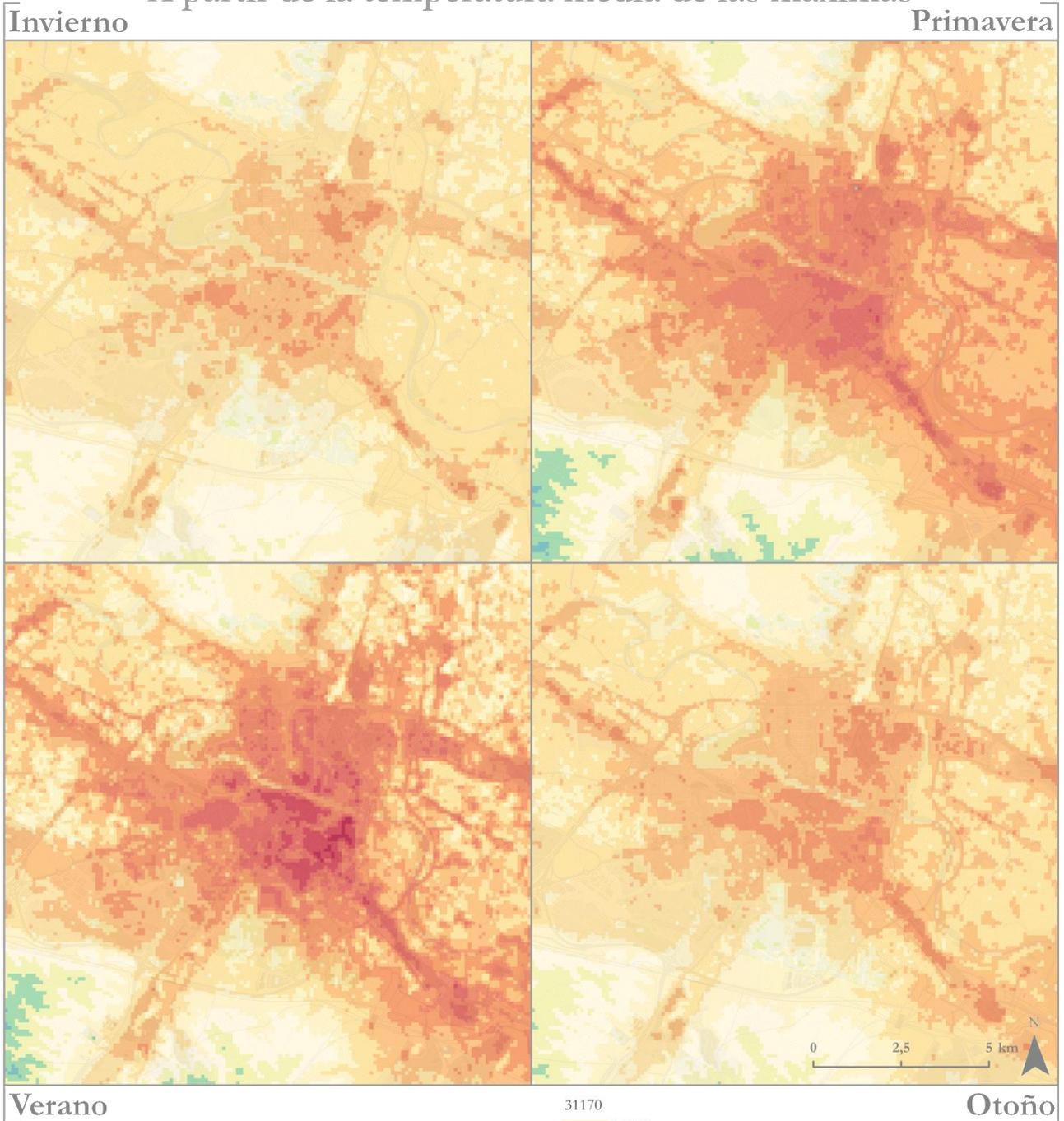
Durante el invierno, especialmente durante las noches despejadas y sin viento, la superficie terrestre se enfría rápidamente debido a la radiación térmica. Esto provoca que el aire en contacto con la superficie también se enfríe. En condiciones normales, el aire caliente tiende a ascender y el aire frío a descender, lo que permite que el aire más frío en la superficie se mezcle con el aire más cálido en altitudes superiores. Sin embargo, durante una inversión térmica, ocurre lo contrario: una capa de aire cálido se establece sobre una capa de aire más frío cerca de la superficie. Esta capa de aire frío actúa como una especie de barrera que atrapa el aire frío cerca de la superficie y evita que se mezcle con el aire más cálido en altitudes superiores. Como resultado, el calor liberado por los materiales urbanos durante el día (como el asfalto y los edificios) se retiene cerca de la superficie y no se disipa fácilmente hacia arriba. Esto contribuye a mantener las temperaturas urbanas más altas durante la noche en comparación con las áreas circundantes rurales, intensificando así la ICU durante la noche (Martilli et al., 2021).

Además, se observa que, en el caso de la intensidad de las mínimas, no solo su promedio es más elevado que el resto de variables, sino que su rango de valores es mucho más amplio. Esto nos permite mostrar lo que anteriormente se ha comentado en los mapas sobre cómo en las mínimas se pueden apreciar mejor las diferencias intraurbanas. Los valores

más bajos de intensidad que en muchos casos están por debajo de los valores del caso de las medias o las temperaturas máximas de verano se deben a los parques urbanos o zonas verdes situadas en este núcleo urbano. Esto muestra la capacidad de este tipo de infraestructuras para disipar la intensidad y refrescar el ambiente.

## Intensidad de la isla de calor estacional

A partir de la temperatura media de las máximas



Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

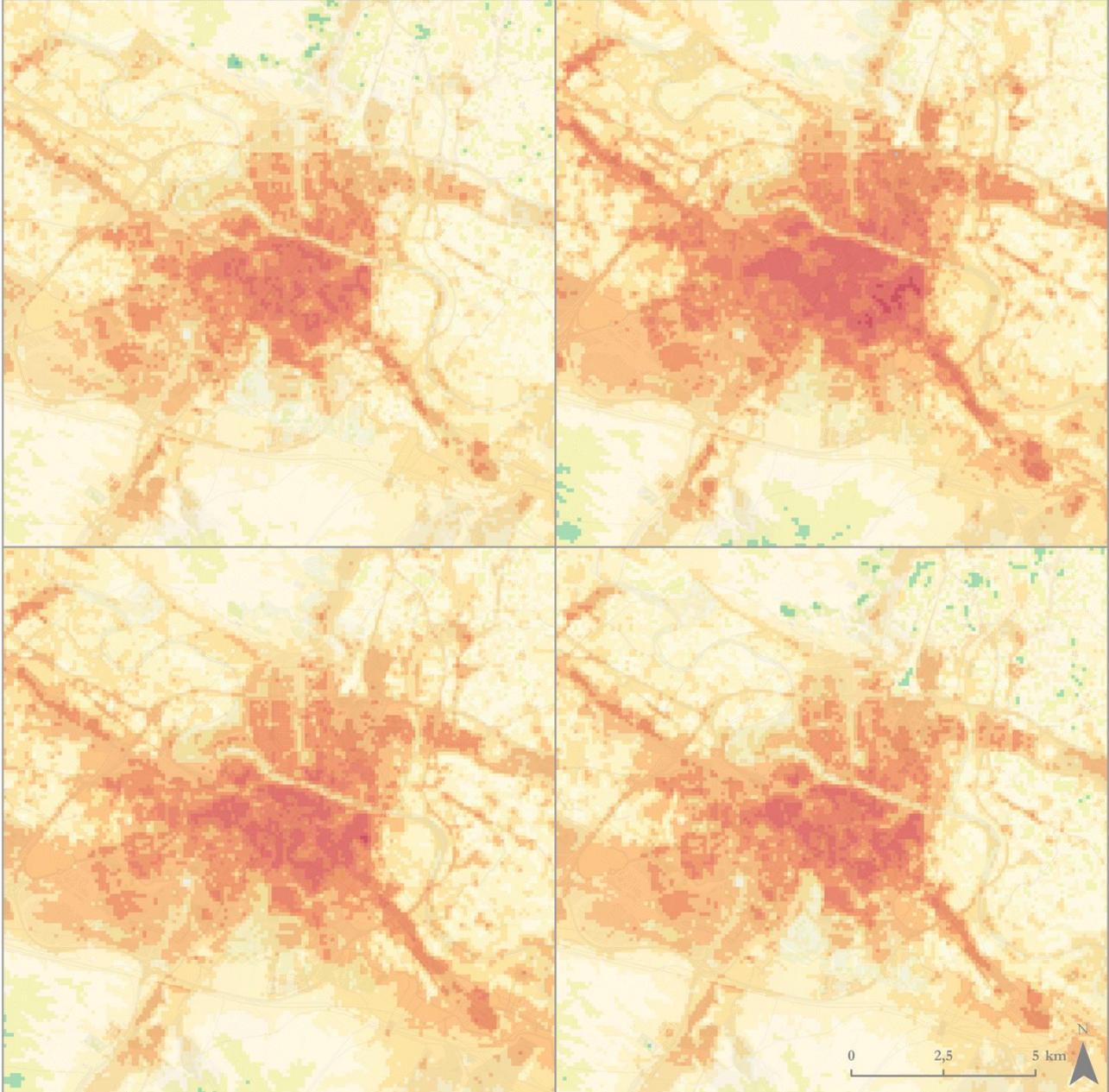
Figura 4.32. Mapa estacional de intensidad de la ICU, calculado a partir de la temperatura media de las máximas.

# Intensidad de la isla de calor estacional

## A partir de la temperatura media de las medias

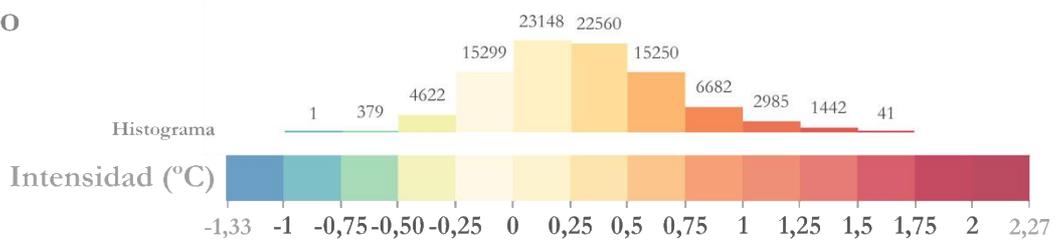
Invierno

Primavera



Verano

Otoño

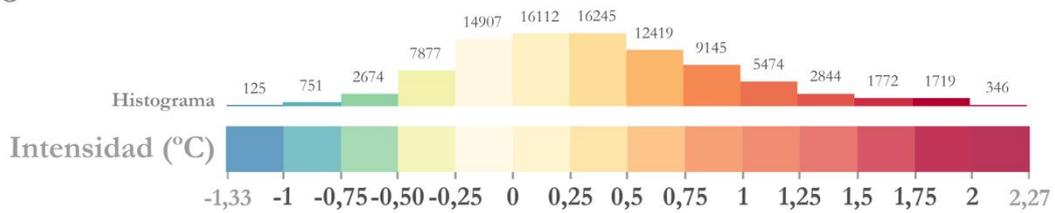
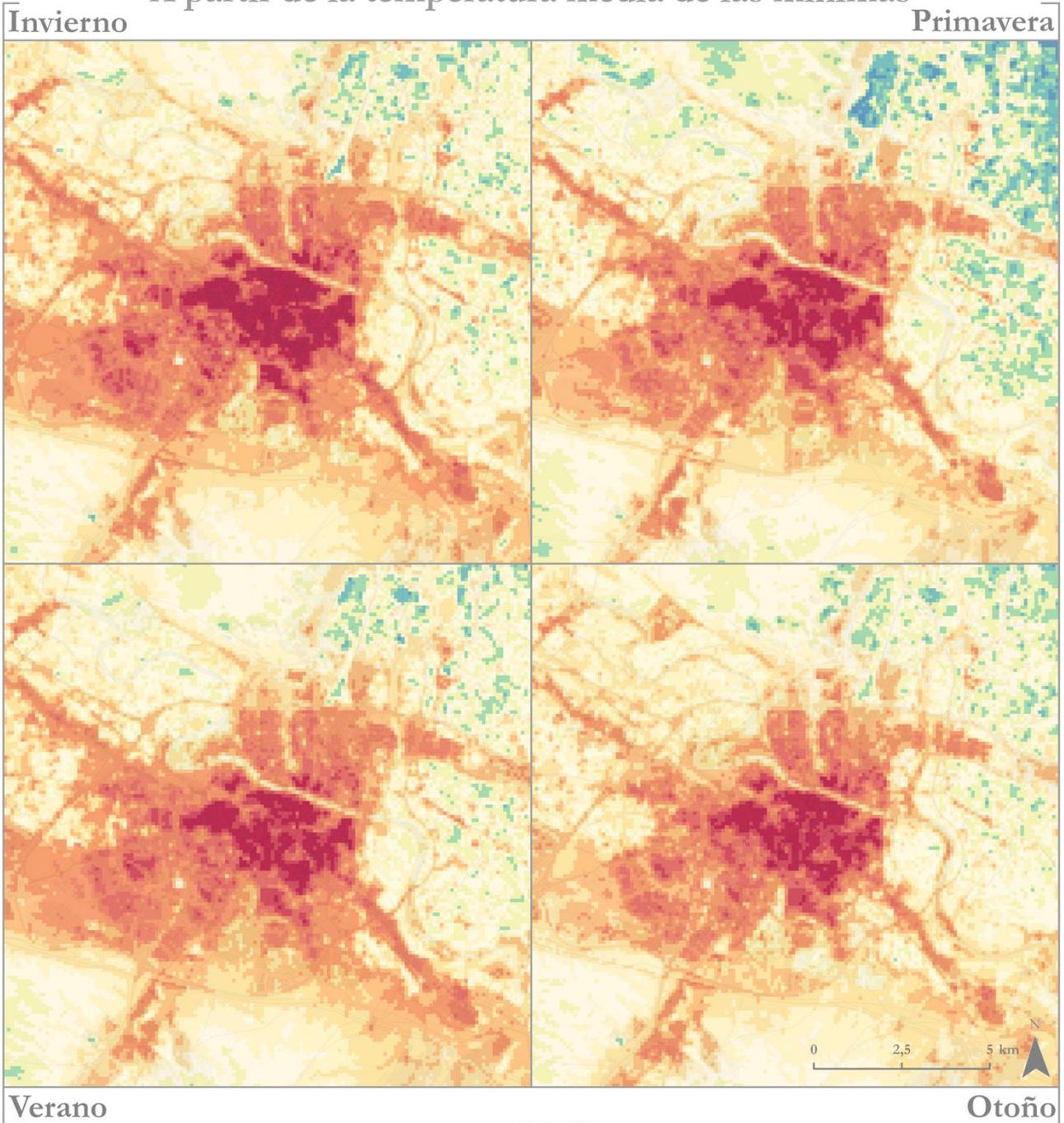


Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.33. Mapa estacional de intensidad de la ICU, calculado a partir de la temperatura media de las medias.

## Intensidad de la isla de calor estacional

A partir de la temperatura media de las mínimas



Escala: 1:80.000 Sistema de Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N. Fuente: Base Topográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional  
 Maps throughout this book were created using ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcGIS Pro™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit [www.esri.com](http://www.esri.com).

Figura 4.34. Mapa estacional de intensidad de la ICU, calculado a partir de la temperatura media de las mínimas.

Por último, antes de concluir este apartado sobre la intensidad de la ICU y esta parte de la caracterización del clima, consideramos oportuno incluir un comentario sobre el comportamiento horario de este fenómeno. Esta resolución temporal no se ha desarrollado en el caso de la interpolación, pero los datos proporcionados por la red de sensores urbanos permiten realizar análisis detallados, como ya ha sido publicado en estudios anteriores (Barrao, Serrano-Notivoli, Cuadrat, et al., 2022; Barrao, Serrano-Notivoli, Saz, et al., 2022; Cuadrat et al., 2022).

Para ilustrar el comportamiento horario de la intensidad, se presenta en la Figura 4.35 un gráfico que muestra el valor promedio de intensidad registrado de forma horaria y la desviación estándar para visualizar la variabilidad en cada hora. Este análisis revela diversas distribuciones diarias de la ICU, pero, en líneas generales, se pueden observar características comunes. En todos los casos, el efecto de la ICU es visible al mostrar una intensidad positiva, siendo más notable en momentos específicos del día y en ubicaciones concretas de la ciudad. Se intensifica durante la noche, mientras que durante el día la intensidad disminuye e incluso la ICU desaparece cuando se alcanzan valores negativos. Esto coincide con lo observado en los mapas anteriores al analizar las temperaturas máximas y mínimas, pero aquí podemos apreciar toda la evolución temporal.

La distribución temporal dibuja la forma de U o V característica de este tipo de gráficos de ICU. Cuanto mayor es el efecto urbano, más marcadas son las diferencias y más pronunciada es la gráfica en forma de U. Por el contrario, el efecto es menos notable en la periferia urbana o en grandes espacios verdes abiertos de la ciudad, donde la forma del gráfico se vuelve borrosa y aplanada. La intensidad de la ICU es más alta en las estaciones cercanas al centro, alcanzando alrededor de 2 °C en promedio, y estas formas generalmente tienen una clara forma de U o V. Sin embargo, para los sensores ubicados en la periferia de la ciudad y los grandes parques metropolitanos, la intensidad rara vez supera 1 °C en promedio durante el día, lo que resulta en una distribución temporal más plana.

Un ejemplo destacado del efecto de la ICU sobre las temperaturas de la ciudad es el caso del sensor situado en el centro (S01), que se encuentra en una zona densamente urbanizada con edificios de tamaño medio y una morfología muy compacta de calles estrechas y sinuosas, con poca vegetación. Esto se refleja en la distribución en forma de U del gráfico, con valores alrededor de 0 °C en las horas centrales del día y un aumento de la intensidad por encima de los 2 °C durante la noche hasta el amanecer. Otro caso similar es el del sensor S04 en Delicias, una de las zonas de la ciudad con mayor densidad urbana y poblacional, cuya intensidad es tan alta que siempre registra una intensidad promedio superior a 1 °C, aunque disminuye en 1 °C durante el día.

Para la mayoría de los sensores, la desviación estándar varía según el día; por ejemplo, durante la noche, la desviación es mucho mayor y la intensidad de la temperatura puede variar alrededor de  $\pm 2$  °C. Sin embargo, durante el día, esta desviación se reduce y se vuelve más estable, aunque no siempre ocurre a la misma hora, dependiendo del sensor. La desviación es más estrecha al mediodía o por la tarde, lo que indica un comportamiento más homogéneo cuando se alcanzan temperaturas más altas, con diferencias menores que en ausencia de insolación, lo que sugiere variaciones en el almacenamiento de calor por parte de la superficie.

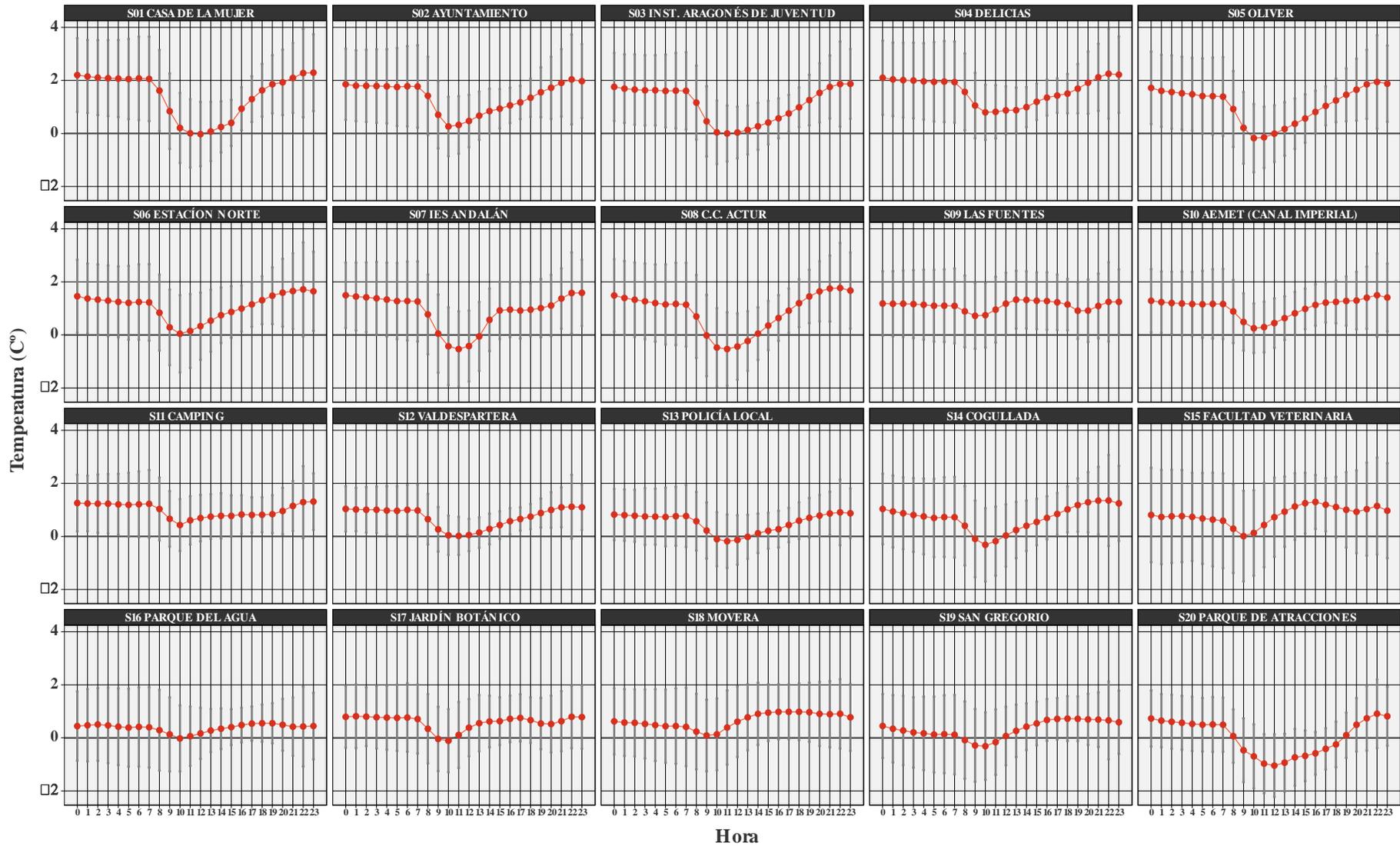


Figura 4.35. Gráfica horaria de la intensidad de la ICU por sensor. Se incluye la desviación estándar horaria para aproximar la variabilidad de la temperatura.

Además, algunos sensores cercanos al centro de la ciudad presentan una distribución en forma de V, pero con un ascenso más gradual en el margen derecho, lo que indica que durante la tarde el aumento de temperatura es menos abrupto. Sin embargo, tienen particularidades ligadas al espacio concreto dentro de la ciudad en el que se ubican y no todos tienen la misma distribución, por ejemplo, S02 o S08, en el Ayuntamiento en el sector Centro y el barrio del Actur en la zona norte de la ciudad, respectivamente. También destacan en las distribuciones algunos de los sensores que tienen doble valle o bajada en la línea. Tal es el caso del S09, S11 o S17 (Las Fuentes, Camping y Jardín Botánico); teniendo como rasgo común entre ellos la presencia de vegetación y una distancia variable al centro. Además, estos sensores están ubicados en espacios más abiertos que otros sensores urbanos por lo que pueden experimentar un rápido calentamiento durante el día debido a la exposición directa a la radiación solar y a la menor obstrucción de edificios y estructuras urbanas. Esto puede resultar en una intensidad más alta durante el mediodía en comparación con los sensores ubicados en el núcleo urbano más denso. Y pese a que el descenso nocturno es acusado debido a la presencia de vegetación, pronto las superficies pavimentadas al retener el calor y mantener una en estos espacios mixtos siga produciéndose.

En cuanto a las estaciones más distantes de la ciudad o los espacios urbanos que son grandes áreas abiertas con una vegetación abundante, como los parques metropolitanos, el efecto es menor, con una intensidad nula o cercana a 0 °C. En esta categoría, la última fila del gráfico muestra cómo en algunos casos el efecto es tan mínimo que las ligeras intensidades que se registran se observan durante la tarde y no durante la noche. Esto se evidencia en casos como los sensores S16, S18 o S19 (Parque del Agua, Movera y San Gregorio).

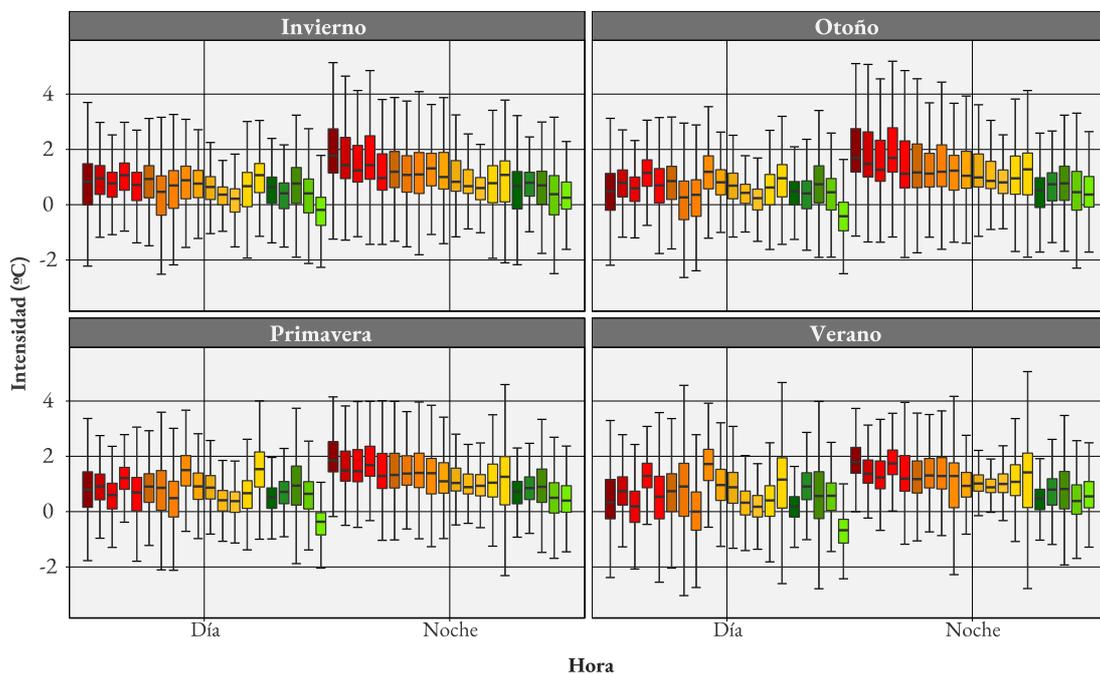


Figura 4.36. Gráfica de cajas que representa la intensidad de la ICU diurna (de 10 h a 18 h) y nocturna (de 20 h a 6 h) para cada estación y todos los sensores de la red.

La disposición del dato horario también nos permite mostrar mejor las diferencias noche y día, agrupando mejor los datos, en vez de recurrir a la asociación de las temperaturas mínimas con las nocturnas y las máximas con las diurnas. En la *Figura 4.36* no solo se analiza estas dos escalas temporales, sino que también se analiza el comportamiento estacional. De

manera que la figura muestra la variación de la intensidad durante el día (de 10 h a 18 h) y la noche (de 20 h a 6 h) para cada estación del año y cada sensor de la red. Los resultados indican que la intensidad es mayor durante la noche que durante el día en todos los sensores, con valores que pueden llegar a ser hasta 2 °C más altos en promedio durante la noche. Durante la noche, se observa claramente el comportamiento de la ICU, como en el caso de la Figura 4.34, con un gradiente descendente de temperatura desde los sensores más urbanos de las primeras filas hasta los rurales y más distantes en las últimas filas, con algunas excepciones (S15, S16). Durante el día, el comportamiento del ICU es diverso según el sensor, lo que resulta en diferencias notables entre el centro y la periferia durante la noche y más irregulares durante el día, dependiendo de las características de cada ubicación de sensor.

En verano, estas diferencias diurnas son las más marcadas dentro del año y los valores del ICU pueden variar entre sensores. Durante la noche, la intensidad del ICU es más estable y los alcances se reducen para todos los sensores, concentrando la variabilidad. En otoño e invierno, la situación es diferente y los valores del ICU durante la noche son los más altos, con algunos sensores alcanzando valores máximos que superan los 4 °C de intensidad.

### 4.3. Discusión

La caracterización climática de Zaragoza mediante mapas de temperatura interpolada revela patrones significativos sobre el comportamiento térmico de la ciudad en diferentes escalas temporales. Los resultados obtenidos muestran que el sector urbano de Zaragoza se destaca como la zona más cálida en todos los mapas anuales (Figura 4.1, Figura 4.2 y Figura 4.3), mientras que las áreas elevadas al noroeste y al sur exhiben temperaturas más frescas. Por otro lado, las áreas de cultivo a lo largo de los ríos Ebro y Gallejo presentan temperaturas más bajas, aunque de manera más heterogénea debido a la diversidad de campos cultivados y huertos irrigados. Esta variabilidad térmica delinea la ICU, la cual sigue una distribución concéntrica centrada en la margen derecha del río Ebro debido al desarrollo histórico de la ciudad hacia el sur.

La distribución espacial de la temperatura varía según la variable térmica analizada, cada una más relacionada con un momento específico del ciclo diurno. Las temperaturas mínimas, asociadas principalmente a las noches, muestran una concentración mayor en el centro urbano, con valores que superan los 12 °C, que disminuye hacia áreas menos densamente construidas, con una diferencia total de 3,12 °C. En cuanto a las temperaturas medias, la distribución es similar, pero con un rango de temperatura menor de 2,16 °C. Por otro lado, las temperaturas máximas, más vinculadas al día, evidencian un desplazamiento hacia el sureste de las zonas más cálidas de la ciudad, extendiéndose desde los barrios céntricos hacia el este y el polígono industrial de Montemolín, debido a la dinámica atmosférica local y la influencia del viento predominante del noroeste. Ya observado en estudios anteriores (Cuadrat et al., 2005, 2022; Cuadrat, De la Riva, López, et al., 1993).

La interpolación de temperaturas ofrece una imagen completa de la ciudad y su entorno, revelando la diversidad de temperaturas dentro de Zaragoza y en su periferia. Los barrios más antiguos y densamente construidos presentan temperaturas más altas, pero también cuentan con áreas verdes que reducen la temperatura, como parques, plazas ajardinadas o la propia ribera del Ebro. Por otro lado, los barrios más recientes, con una mayor planificación urbana y más zonas ajardinadas, registran temperaturas más bajas. Las áreas rurales y los polígonos industriales muestran patrones térmicos distintos dependiendo de su ubicación y densidad de edificación a lo largo del día. Calentándose rápidamente durante el día, con temperaturas máximas elevadas, pero durante la noche registran las temperaturas mínimas más bajas al enfriarse más rápido que otros espacios urbanos.

Al observar los patrones estacionales (Figura 4.6, Figura 4.7 y Figura 4.8), se destaca un aumento de temperaturas en el entorno urbano durante el invierno, con diferencias más pronunciadas entre zonas urbanas y rurales, especialmente en las temperaturas mínimas. En verano, las temperaturas elevadas predominan en el valle del Ebro y por lo tanto el efecto de la ICU se difumina, mientras que en otoño y primavera, las diferencias de temperatura son menos marcadas respecto al comportamiento anual. La presencia de vegetación y suelo permeable desempeña un papel crucial en la modulación de las temperaturas, especialmente durante las estaciones más cálidas y más frías.

En la escala mensual (Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11), se evidencian dos tendencias claras en la distribución de la temperatura: una más cálida de abril a septiembre y otra más fría de octubre a febrero. Los mapas mensuales de desviación estándar revelan la incertidumbre de los modelos de interpolación, siendo mayor en las temperaturas máximas durante los meses estivales y en las temperaturas mínimas durante los meses invernales, superando 1°C. Aunque se produce principalmente en los límites de la interpolación en las zonas más alejadas de red de sensores y en aquellos espacios naturales que la red urbana no representa como cultivos o masas de agua superficiales.

Los mapas diarios revelan cómo fenómenos atmosféricos y situaciones sinópticas específicas impactan en la temperatura urbana, y cómo la interpolación puede captar estos efectos completando la información promedio anterior con eventos que de otra forma pasan inadvertidos. Durante nieblas y nevadas (Figura 4.13 y Figura 4.15), todas las variables térmicas descienden y las diferencias entre áreas urbanas y rurales disminuyen, con diferencias inferiores a 2 °C, llegando incluso a desaparecer en el caso de la nieve, difuminando la ICU por completo. Los bosques actúan como barreras contra la niebla y el viento, y el efecto protector de los árboles aumenta la temperatura en esas áreas. La alta densidad urbana y la red de calles crean microclimas que evitan la niebla y generan temperaturas ligeramente más altas, aunque las diferencias son bajas en el caso de las mínimas la influencia de la isla se aprecia. El flujo del viento, como el cierzo (Figura 4.18) y el bochorno (Figura 4.20), modifica la distribución de la temperatura, difuminando la ICU durante las máximas y desplazándola hacia el sureste o el noroeste durante las medias y mínimas, respectivamente. La precipitación, ya sea tormentosa en invierno (Figura 4.22) o en forma de aguaceros en verano (Figura 4.26), se relaciona con descensos de temperatura y la disminución de la ICU. Sin embargo, el uso de información satelital de sensores pasivos como *Landsat* muestra limitaciones ante estos fenómenos debido a la disponibilidad de imágenes. Y el carácter breve y aislado, resalta la importancia de la información detallada de la red de sensores. Durante las olas de calor (Figura 4.28), a pesar de la falta de consenso científico sobre las implicaciones exactas de estos eventos extremos en la ICU, se observa que la intensidad se mantiene o incluso se incrementa en ciertas áreas en todas las variables térmicas. Este fenómeno resalta la importancia de las zonas verdes dentro de la ciudad como refugios de frescura en medio del calor sofocante y el entorno cultivado como zona de contraste respecto a la ciudad. Por último se analizó las condiciones de anticiclón invernal (Figura 4.30), y en esta ocasión la ICU se refleja con mayor intensidad debido al efecto de la inversión térmica y las diferencias en los procesos de irradiación nocturna entre entornos urbanos y rurales.

En definitiva, el uso de un modelo de interpolación en una red urbana de sensores ofrece numerosas ventajas para caracterizar el comportamiento climático de una ciudad. Por un lado, permite obtener una representación espacial detallada y precisa de las variables térmicas, capturando las variaciones intraurbanas y considerando la influencia de factores locales como la topografía y la vegetación. Además, al combinar múltiples fuentes de datos, como mediciones directas de sensores y datos satelitales, el *cokriging* proporciona una estimación más robusta y confiable de las condiciones climáticas en áreas donde la cobertura

de sensores puede ser limitada. Sin embargo, el uso de un modelo de interpolación también presenta algunas limitaciones. La precisión del modelo puede estar influenciada por la calidad y la cantidad de datos disponibles, así como por la elección de los parámetros del modelo de interpolación. Y aunque puede capturar variaciones espaciales finas, aún puede haber incertidumbre asociada con la extrapolación de datos fuera de las áreas de muestreo, lo que puede afectar la fiabilidad de las estimaciones en zonas menos observadas. En resumen, si se utilizan adecuadamente, los modelos de interpolación en redes urbanas ofrecen una herramienta valiosa para comprender y caracterizar el fenómeno de la isla de calor a una escala de análisis que las metodologías previas no habrían podido alcanzar por sus limitaciones, ya sean temporales o espaciales, pero es importante considerar cuidadosamente sus ventajas y limitaciones en el contexto específico de cada estudio y el fenómeno analizado.

## 5. Zonas Climáticas Locales en Zaragoza

En los apartados anteriores sobre el estudio de la climatología urbana de Zaragoza, se ha destacado la importancia de comprender la distribución espacial de la temperatura en la ciudad. Desde las zonas centrales, más cálidas y densamente pobladas, hasta los espacios más frescos y arbolados, la variabilidad térmica dentro de un entorno urbano refleja la interacción compleja entre la morfología urbana, el uso del suelo y las condiciones climáticas locales. En este contexto, las LCZ han surgido como una herramienta crucial para comprender y caracterizar la diversidad del clima urbano. Estas zonas, propuestas por Stewart y Oke (2012), proporcionan un marco sistemático para clasificar y mapear los diferentes microclimas dentro de una ciudad, teniendo en cuenta no solo las características físicas del paisaje urbano, sino también su influencia en la temperatura, la humedad y otros parámetros climáticos locales. En este sentido, explorar las LCZ en el contexto de la climatología urbana de Zaragoza y desarrollar una clasificación adecuada de la ciudad nos permite profundizar en nuestra comprensión de cómo los distintos entornos contribuyen a la configuración del clima local y, a su vez, cómo estas condiciones climáticas impactan en la calidad de vida de sus habitantes e integrarlas en la planificación urbana para mejorarla.

### 5.1. LCZ como herramienta de estudio del clima urbano y la planificación.

Desde la Revolución Industrial, el crecimiento urbano desmedido y poco planificado ha conducido a una expansión de las ciudades que no siempre ha tenido en cuenta las condiciones climáticas locales. Este modelo persistió a lo largo del siglo XX, donde tanto el urbanismo como la arquitectura a menudo pasaron por alto el comportamiento climático de las urbes (Alcoforado et al., 2009; Sachs, 2016; Salat et al., 2011). No obstante, en la última década, la conciencia sobre el cambio climático ha promovido el desarrollo de políticas de planificación urbana que toman en consideración el clima (Coutts et al., 2010; Fujii et al., 2017; Steele et al., 2012). A pesar de ello, proporcionar información climática local útil para este tipo de proyectos enfrenta frecuentemente desafíos. Estos incluyen la dificultad de establecer términos medibles y objetivos que sean aplicables a las herramientas ya utilizadas en los planes urbanos, como las restricciones en el uso del suelo y la cobertura del suelo. Esta demanda de información climática orientada a la planificación ha impulsado diversos trabajos dedicados al mapeo de áreas urbanas en clases de cobertura terrestre según sus características morfo-climáticas (Alcofarado & Matzarakis, 2014; Alexander et al., 2016; Eliasson, 2000; Mills et al., 2010; T. R. Oke, 1984; Rodríguez Algeciras & Matzarakis, 2016). Desde su publicación en 2012, el esquema de LCZ ha ido ganando impulso como punto de referencia en los estudios de este tipo.

Con el fin de delimitar y definir las condiciones de temperatura a escalas micro y local dentro de las áreas urbanas, Stewart y Oke diseñaron el concepto de LCZ. Un concepto contrastado con investigación de campo y mediciones in situ. Y que se basa en clasificaciones previas como el esquema de zonas de terreno urbano (UTZ, por sus siglas en inglés *Urban Terrain Zones*) de Ellefsen (1991), un método desarrollado a partir de la interpretación de fotografías aéreas y mediciones directa sobre el terreno sobre aspectos morfológicos y constructivo de edificios y calles en diferentes ciudades americanas. Y también influyeron las zonas climáticas urbanas (UCZ, por sus siglas en inglés *Urban Climate Zones*) que el propio Oke introdujo en las guías de la OMM (2006, 2021) para las observaciones meteorológicas de los entornos urbanos y que diseño a partir de las UTZ de Ellefsen y los datos de cobertura de suelo de Auer (1978).

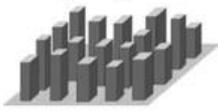
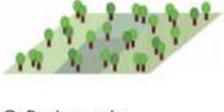
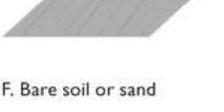
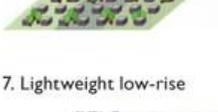
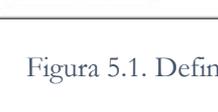
Built types	Definition	Land cover types	Definition
1. Compact high-rise 	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	A. Dense trees 	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
2. Compact midrise 	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	B. Scattered trees 	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
3. Compact low-rise 	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	C. Bush, scrub 	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
4. Open high-rise 	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	D. Low plants 	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
5. Open midrise 	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	E. Bare rock or paved 	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
6. Open low-rise 	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	F. Bare soil or sand 	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
7. Lightweight low-rise 	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	G. Water 	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
8. Large low-rise 	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	<b>VARIABLE LAND COVER PROPERTIES</b>	
9. Sparsely built 	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	Variable or ephemeral land cover properties that change significantly with synoptic weather patterns, agricultural practices, and/or seasonal cycles.	
10. Heavy industry 	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	b. bare trees	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
		s. snow cover	Snow cover > 10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		d. dry ground	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		w. wet ground	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

Figura 5.1. Definición de zonas climáticas locales (LCZ) diseñadas por Stewart y Oke. Fuente: (Stewart & Oke, 2012).

Durante el proceso de desarrollo, los autores recopilaron datos cuantitativos, tanto medidos como estimados, relacionados con la geometría urbana, la cobertura superficial, observaciones térmicas y radiativas, así como atributos cualitativos de los materiales urbanos, la textura y la morfología urbana. Estos datos abarcaron tanto áreas urbanas como rurales en diversas partes del mundo, aunque en el artículo original (Stewart & Oke, 2012) se mencionan específicamente las ciudades de Uppsala (Suecia), Nagano (Japón) y Vancouver (Canadá). A

partir de esta recopilación de datos, se diseñaron los parámetros para la clasificación de las LCZ y se establecieron los rangos de valores que determinarían el tipo de clase. Estos 10 parámetros, también conocidos como parámetros del dosel urbano (*urban canopy layer* en inglés), comprenden 7 parámetros relacionados con propiedades geométricas y de cobertura, y 3 parámetros térmicos, radiativos y metabólicos. El método de clasificación es relativamente sencillo y se basa en un proceso de tres pasos. En primer lugar, se recopilan metadatos del sitio. Luego, se define el área de la fuente térmica, y finalmente, en base a estos datos, se selecciona la LCZ correspondiente. Sin embargo, los detalles de implementación están en gran medida ausentes. Como limitación, se establece que el tamaño mínimo de cada LCZ debe ser de 400 a 1.000 m de diámetro, con el fin de minimizar la influencia de las clases circundantes en los datos climáticos. Estos pasos permiten caracterizar las propiedades de las distintas superficies en 17 clases (Figura 5.1), diferenciando entre zonas edificadas (desde LCZ 1 hasta LCZ 10) y de cobertura del suelo (desde LCZ A hasta LCZ G), con la posibilidad de identificar clases mixtas (subclases). Además, esta clasificación se esfuerza por asegurar que las clases tengan definiciones generales culturalmente neutrales y sean asimilables a las distintas formas urbanas regionales.

Con la introducción de este nuevo sistema de clasificación de LCZ, el objetivo principal de Stewart y Oke era proporcionar un marco de investigación adecuado para futuros estudios de la ICU, así como estandarizar los principios de observación urbana de variables climáticas, principalmente de temperatura, en todo el mundo. En resumen, su intención era ayudar en la selección de ubicaciones para estaciones meteorológicas locales, abordando un problema grave que ya habían destacado en publicaciones anteriores (Stewart, 2011), y proporcionar información estandarizada sobre el efecto de la ICU más allá de la dicotomía urbano-rural. Sin embargo, su implementación también ha demostrado ser útil para discriminar entre áreas climáticamente distinguibles a escala intraurbana, así como para identificar los probables efectos locales que el desarrollo urbano tiene en el calentamiento de la ciudad. Por lo tanto, el concepto de LCZ ha contribuido a un avance significativo en el análisis térmico de las áreas urbanas.

## 5.2. Desafíos en la clasificación y cartografía de LCZ

Stewart y Oke fueron responsables de diseñar y definir las diferentes clases de LCZ presentes en los diferentes entornos urbanos. Sin embargo, el proceso cartográfico para mapear esta clasificación aún no está completamente establecido. Por lo tanto, la mayoría de los estudios que se centran en la cartografía de las LCZ siguen distintas metodologías y enfoques (Quan & Bansal, 2021) con el objetivo fundamental de proporcionar un mapa detallado de una ciudad o área específica. Este objetivo es clave para generar mapas que reflejen con precisión las características climáticas y morfológicas de una ciudad, pero salvo excepciones como el proyecto WUDAPT del cual hablaremos más adelante, pocos métodos han desarrollado un modelo generalmente aceptado como la propia clasificación de las LCZ. Aun así, las diferencias en los enfoques utilizados en el proceso de elaboración de estos mapas han dado forma a una línea de investigación dedicada a mapear las LCZ, que está estrechamente vinculada al diseño cartográfico, la climatología y el urbanismo.

Estos estudios utilizan diversas fuentes de datos y metodologías, y generalmente se dividen en dos corrientes de investigación: SIG y teledetección. Esta distinción se origina en la disponibilidad y accesibilidad de los datos, lo que representa una de las principales limitaciones que influirán en todo el flujo de trabajo. Sin embargo, este no es el único desafío, ya que todo el proceso enfrenta una serie de dificultades debido a la complejidad inherente de las áreas urbanas y a las limitaciones derivadas de su gran variedad morfológica y climática.

Otro desafío importante es la disponibilidad de conjuntos de datos urbanos completos y detallados necesarios para estimar parámetros como puede ser el dosel urbano o los parámetros térmicos y radiativos. Aunque ha habido un aumento en la disponibilidad de datos urbanos en los últimos años, aún falta información detallada, como datos de altura a pequeña escala, que son tan necesarios para estimar algunos parámetros con precisión. Además, existe un dilema entre la necesidad de clasificaciones de LCZ estandarizadas para garantizar la comparabilidad entre diferentes estudios y la necesidad de considerar las condiciones locales específicas de cada área urbana (Lehnert et al., 2021; Oliveira et al., 2020a; Quan & Bansal, 2021). Esta cuestión no resuelta plantea desafíos en la interpretación y aplicación de los métodos para la cartografía de LCZ que las distintas metodologías intentan resolver.

Si analizamos las dos corrientes principales de investigación y observamos cómo enfrentan algunos de estos desafíos, junto con otros intrínsecos a su propia metodología, podemos notar que la corriente de teledetección se basa principalmente en datos de imágenes satelitales para clasificar las LCZ. Aunque esta corriente ofrece una mayor disponibilidad de datos, los métodos utilizados a menudo difieren del marco LCZ original y han sido criticados por su falta de justificación y estandarización. El proyecto *World Urban Database and Access Portal Tools* (WUDAPT) ha destacado como una plataforma que busca abordar estas preocupaciones metodológicas y compartir los resultados de la clasificación en ciudades globales (Ching et al., 2018). Este proyecto desarrolla una metodología estandarizada para llevar a cabo mapas de LCZ en cualquier ciudad del mundo y crear productos derivados de coberturas a diferentes escalas. Sin embargo, el enfoque de teledetección puede no proporcionar la información detallada requerida por el marco LCZ original, lo que puede afectar la precisión de los resultados, especialmente en áreas urbanas más complejas o de menor entidad. La resolución limitada de las imágenes satelitales y la incapacidad para distinguir características detalladas del paisaje urbano pueden dificultar la clasificación precisa y afectar la interpretación de los resultados.

Por otro lado, la corriente SIG se apoya en datos geoespaciales detallados (Hammerberg et al., 2018; Oliveira et al., 2020b). Aunque los datos SIG pueden proporcionar la información necesaria, su disponibilidad puede ser limitada en algunas áreas urbanas, dependiendo del país o el territorio. Además, existe una considerable diversidad en los métodos utilizados en esta corriente, y muchos de estos métodos carecen de una justificación teórica sólida. La falta de estandarización y la falta de claridad en los métodos utilizados plantean desafíos en la interpretación y comparación de los resultados (Geletič & Lehnert, 2016; Quan et al., 2017). La variabilidad en los enfoques utilizados puede dificultar la coherencia y la fiabilidad de los resultados, lo que puede afectar la calidad y la utilidad de los mapas generados.

En resumen, tanto la corriente de teledetección como la basada en SIG enfrentan desafíos significativos en el mapeo preciso de las LCZ. Para abordar estos desafíos, en este apartado se implementarán diferentes métodos de mapeo de LCZ y se compararán con un método específicamente adaptado para la ciudad de Zaragoza a través de la modificación de los enfoques anteriores. El objetivo será desarrollar una caracterización climática de las LCZ para la ciudad de Zaragoza, lo que permitirá comprender mejor los patrones climáticos locales y contribuirá a la planificación urbana y la toma de decisiones relacionadas con el clima en la ciudad.

### **5.2.1. Cartografía de LCZ basada en teledetección**

En el caso de este tipo de metodologías, nos enfocaremos en el modelo desarrollado por el proyecto WUDAPT, ya que es el método más conocido a nivel global y el más ampliamente utilizado debido a su fácil reproducibilidad en todo el mundo. Esta metodología podría resumirse como una clasificación supervisada de la cobertura del suelo, basada únicamente en datos satelitales fácilmente disponibles para cualquier parte del mundo. El propio proyecto se define como “una iniciativa comunitaria internacional para adquirir y difundir datos climáticos relevantes sobre las geografías físicas de las ciudades con fines de modelado y análisis” (See et al., 2015).

La base de datos de WUDAPT está estructurada en una jerarquía que representa diferentes niveles de detalle (Ching et al., 2018), y los datos se adquieren mediante protocolos que utilizan enfoques de crowdsourcing, herramientas en las cuales los propios usuarios son los que digitalizan y suben sus datos, datos de libre acceso y arquetipos de tipología de construcción. El nivel base de información (L0), el más básico y completo hasta el momento, consta de mapas de LCZ para una gran multitud de ciudades. Para su construcción, se utiliza una base de datos y un sistema de portal (<https://lcz-generator.rub.de/>). Demuzere et al. (2021) desarrollaron un protocolo que permite el mapeo de LCZ en ciudades, utilizando datos y paquetes de software libre disponibles gratuitamente. Esta herramienta, o "*LCZ Generator*", simplifica la metodología anterior desarrollada por el proyecto (Bechtel et al., 2015; Conrad et al., 2015), en la cual se necesitaban procesar imágenes *Landsat 8* previamente descargadas en un clasificador del software *SAGA GIS* en tu propio ordenador. Actualmente, consta de una plataforma en línea que mapea cualquier ciudad, en la cual solo es necesario incluir unas áreas de entrenamiento que se pueden cartografiar en *Google Earth* y añadir algunos metadatos como entrada. Estas zonas se incluyen en un algoritmo de clasificación basado en *random forest* para hacer una clasificación supervisada (Demuzere et al., 2020), en el cual se incluyen 33 capas adicionales con información sobre la cobertura terrestre a una escala de 100 m, derivadas de *Landsat 8*, *Sentinel-1*, *Sentinel-2* y características adicionales que reflejan el terreno y la altura del dosel del bosque. Junto a la clasificación con una resolución de 100 m, proporciona una evaluación automatizada de la precisión, derivada de datos de entrenamiento y basada en una validación cruzada automatizada (Bechtel et al., 2019).

En el caso de los niveles 1 (L1) y 2 (L2), proporcionan valores de mayor resolución sobre aspectos intraurbanos específicos (Ching et al., 2019), necesarios para complementar otros descriptores relevantes que demandan mayor precisión (Middel et al., 2018, 2019), como datos de formas morfológicas urbanas, parámetros de cañón urbano, datos de composición de materiales o uso de energía. Estos son más orientados a la modelización atmosférica (Demuzere, Argüeso, et al., 2022; Wouters et al., 2016).

El mapa de LCZ para la ciudad de Zaragoza realizado a partir de la metodología creada por el proyecto WUDAPT utilizando la plataforma del *LCZ-Generator* se incluye en la Figura 5.2. Este mapa se desarrolló en junio de 2022 bajo la versión del software 1.2.1 (los mapas más actuales utilizan la versión 2.1.4) y se incorporaron distintas áreas de entrenamiento seleccionadas cuidadosamente en GEE. La precisión general de la clasificación es de 0,76, mostrando el porcentaje de píxeles clasificados correctamente, aunque empeora en el caso de las clases construidas (LCZ 1 a 10), al bajar a un 0,59. Mientras que la dicotomía entre espacio construido y natural está bien recogida con una precisión de clases construidas versus naturales del 0,97. Por último, la precisión ponderada obtiene un valor alto de 0,95, en el caso de esta métrica, se encarga de ponderar las (des)similitudes al penalizar más la confusión entre tipos diferentes que la confusión entre clases similares. Es decir, la validación nos muestra que la clasificación trabaja bien las diferencias urbano-natural, sabe identificar fácilmente las superficies construidas de las naturales, pero en el

momento en cual nos adentramos a escala intraurbana el método falla y no es capaz de distinguir bien entre clases. En el propio mapa se puede apreciar fácilmente este problema, ya que la ciudad se muestra como un gran borrón o mancha con muy poca diferenciación entre clases, donde predomina la clase 2 de espacio compacto de media altura y la 4 de abierto de media altura. Se realizaron varias pruebas y se buscó la mejor manera de identificar las áreas de entrenamiento más representativas de la ciudad, sin embargo, este fue el mejor resultado. Lo más seguro es que no se deba a un fallo del clasificador o la información de partida, sino que se debe a que las características urbanas de una ciudad como Zaragoza, de tamaño medio o pequeño del ámbito mediterráneo, no son asimilables a muchas de las ciudades analizadas para la definición de esos rangos de clasificación que usa tanto las LCZ como el algoritmo de clasificación de WUDAPT. Además, se observa una especie de "punteado" en el mapa, que se debe a la presencia de zonas complejas donde las coberturas o la estructura urbana varían considerablemente en un espacio reducido. Esta variabilidad hace que el método los identifique y los individualice, ya que incluso una ligera diferencia los separa del resto de la clase a la que realmente pertenecen.

Además del mapa derivado de *LCZ-Generator*, se incluyó en la Figura 5.2 el mapa global de LCZ recortado para la ciudad de Zaragoza y sus alrededores. Este mapa es un producto creado dentro del proyecto WUDAPT, que sigue la misma metodología de mapeado. Se desarrolló con el objetivo de proporcionar información detallada sobre los paisajes urbanos a escala global para respaldar el desarrollo de modelos y políticas de planificación urbana (Demuzere, Kittner, et al., 2022). Como resultado, se obtiene un *raster* con una resolución de 100 m que presenta la clasificación de LCZ para todo el mundo, con acceso libre. La metodología utilizada en este mapa global es similar a la del *LCZ-Generator*, pero destaca por el elevado número y variedad de áreas de entrenamiento que sustentan el estudio. Estas áreas incluyen: 1) Áreas delimitadas por estudiantes asistentes con conocimientos previos sobre la clasificación de LCZ de la Universidad del Ruhr en Bochum. 2) Conjuntos de áreas de entrenamiento archivados de investigaciones y colaboraciones publicadas anteriormente. 3) Muestras de áreas de entrenamiento disponibles en el *LCZ-Generator*. Aunque los datos de precisión resultantes son adecuados, también señalan los autores que las clases construidas 1, 4, 5 y 7 son las que arrojan peores resultados. Esto se argumenta en base a la menor representación de estos espacios en comparación con el resto de clases, lo que hace que el propio modelo los subvalore. Además, la respuesta radiométrica muy similar entre algunas de estas coberturas también contribuye a los resultados menos precisos.

Al igual que con el mapa global, el proyecto también ofrece libremente el mapa de LCZ para toda Europa, y que incluimos en la Figura 5.2. Sin embargo, este mapa presenta varias diferencias significativas. En primer lugar, aunque la metodología es fundamentalmente la misma, basada en áreas de entrenamiento y clasificación mediante un algoritmo de *random forest*, en este caso el *LCZ-Generator* aún no estaba disponible, por lo que se ajustaron los algoritmos para utilizarlos en GEE. Además, en lugar de utilizar la plataforma, se seleccionaron áreas de entrenamiento de ciertas ciudades europeas que tenían una mayor calidad para llevar a cabo la clasificación. Se argumentó que debería ser posible clasificar el paisaje urbano de una ciudad utilizando los datos generados para otra ciudad, siguiendo el criterio de universalidad. Aunque estas ciudades presentan una variada representación, es importante destacar que 7 podrían considerarse de ámbito mediterráneo, como Atenas, Toulouse o Lisboa, mientras que 2 son españolas, Madrid y Barcelona. Sin embargo, la mayoría de ellas son grandes ciudades capitales de países con un tamaño poblacional considerable. Por ejemplo, solo 6 de las 24 ciudades seleccionadas tienen una población menor que Zaragoza. Todo esto puede introducir sesgo es los resultados posteriores que provoquen ciertas discrepancias en algunas zonas del continente.

Pese a que los resultados de precisión de ambos productos derivados de WUDAPT tanto del global como el europeo son aceptables. Los resultados obtenidos en Zaragoza son parecidos a los obtenidos en el caso de *LCZ-Generator*, aunque con importantes diferencias. En estos casos el efecto de simplificación se acentúa y la ciudad es una mancha que simplemente se diferencia respecto a su entorno rural pero no permite hacer ningún tipo de análisis intraurbano y apenas hay diferencias entre zonas construidas. De nuevo la clase 2 destaca junto a la clase de grandes construcciones bajas (LCZ 8), principalmente enfocadas en los polígonos industriales de la ciudad. Pero finalmente se extiende por la mayor parte de la periferia y barrios no centrales de la ciudad, envolviendo el núcleo urbano en un anillo homogéneo. Las zonas verdes desaparecen casi por completo, y solo algunos sectores del Parque Grande, debido a sus dimensiones y su elevada presencia de árboles, son visibles. En general, la mayor parte de las zonas verdes intraurbanas, debido a sus dimensiones a menudo reducidas y sus formas que normalmente no coinciden con un píxel satelital, resultan casi imperceptibles en este tipo de metodologías. Solo en el caso del mapa para Europa se aprecia el Parque del Tío Jorge en la margen izquierda del río debido a sus dimensiones y, tal vez, a su forma cuadrada, que se ajusta mejor a los datos obtenidos a través de satélites.

LCZ	GLOBAL	EUROPA	GENERATOR
1	0,01		0,33
2	11,21	12	6,08
3	0,31	0,1	4,30
4	1,08		1,85
5	3,94	2,92	7,06
6	10,97	30	10,15
8	54,53	34	15,76
9	13,92	0,35	10,93
10	0,11		0,91
A	0,90	0,1	7,29
B	1,96	2,51	17,48
C	10,40	0,99	61,08
D	96,03	111	65,17
E	0,64	12	7,90
F	23,99	24	11,99
G	1,64	1,43	3,42

Tabla 5.1. Superficie en km<sup>2</sup> de píxeles clasificados según LCZ y metodología utilizada.

En el caso de los productos derivados, la variedad de clases disminuye y solo se pueden encontrar un número reducido de ellas. Esto simplifica la ciudad a un par de clases predominantes que no reflejan con precisión el paisaje urbano real y no permiten realizar un análisis detallado. En la Tabla 5.1 se observa que no todas las clases están representadas en los tres tipos de metodologías analizadas. Por ejemplo, la LCZ 7, que representa zonas de construcción no planificada o asentamientos precarios, no aparece en Zaragoza debido a que no existen en la ciudad ni son comunes en el paisaje urbano español. Sin embargo, las LCZ

1, 4 y 10 tampoco están representadas, no porque no existan en Zaragoza, sino porque el algoritmo no pudo identificarlas debido a su nivel de detalle, fallos en la caracterización de las clases o porque son clases minoritarias poco comunes en la ciudad.

Si examinamos las clases urbanas en la clasificación global y europea, observamos que la LCZ 8 abarca el 56,7 % (54,53 km<sup>2</sup>) y el 42,5 % (34 km<sup>2</sup>) de toda la superficie urbana, respectivamente. En el caso de la aplicación web, esta categoría sigue siendo dominante, representando el 27,5 % (15,76 km<sup>2</sup>), principalmente debido a los polígonos industriales. Otra clase mayoritaria es la LCZ 6, que corresponde a construcciones abiertas de baja altura. En el mapa europeo, esta categoría representa un porcentaje muy elevado del total de la superficie urbana, alcanzando el 37,7 %. Esta discrepancia se debe a que acumula los valores de la LCZ 9, que representa construcciones dispersas, ya que estas clases tienen similitudes y el método no es capaz de diferenciarlas. Mientras tanto, el valor de esta clase es del 0,44 % en los otros métodos, oscilando entre el 14 % y el 19 %.

Tanto en la Tabla 5.1 como en la Figura 5.2 se observa cómo el mapa generado a partir del portal web, con la selección de áreas de entrenamiento realizada por alguien que conoce la ciudad, mejora notablemente los resultados. Se identifican más clases y el peso de cada una de ellas se aproxima más a la realidad. Ambos métodos desarrollan una buena distinción entre zonas construidas y naturales, pero solo en el caso del *Generator* se pueden apreciar diferencias internas entre ambas coberturas, tanto en el caso de la construida como en la natural. Sin embargo, en este caso, se produce mucho ruido debido a la resolución del método y de la ciudad, con muchos píxeles aislados de clase diferente a la de su entorno.

### 5.2.2. Cartografía de LCZ basada en GIS

Los métodos cartográficos de LCZ basados en SIG ofrecen una precisión detallada fundamental para determinar las características urbanas y de cobertura del suelo necesarias para delimitar las LCZ. Numerosas investigaciones se han centrado en este tipo de metodologías (Geletič & Lehnert, 2016; Hammerberg et al., 2018; Lelovics et al., 2014; Rodler & Leduc, 2019; Unger et al., 2014; Wang et al., 2018), las cuales utilizan conjuntos de datos urbanos SIG, aunque algunos también incorporan el uso de coberturas de suelo o imágenes satelitales desarrollando métodos mixtos. Se ha observado una diversidad de enfoques en cuanto al clasificador principal de uso, siendo predominantes aquellos basados en reglas, aunque con cierta heterogeneidad en su aplicación y respaldo teórico. La validación de estos métodos suele basarse en criterios expertos y comparaciones con observaciones de temperatura.

Sin embargo, la capacidad para clasificar áreas a gran escala, abarcando numerosas ciudades en todo el territorio, ya sea a nivel continental o global, es limitada (Quan & Bansal, 2021). Esto se debe a la necesidad de contar con una sólida base en el uso de herramientas SIG, así como con información espacial de alta resolución y evaluaciones de superficies, lo cual puede ser difícil de lograr a gran escala. Además, algunos parámetros necesarios para la clasificación, como la altura de los edificios, están disponibles solo a escalas de alta resolución, lo que requiere una generalización posterior para desarrollar LCZ homogéneas con una resolución adecuada para el análisis climático. Aunque existen conjuntos de datos abiertos, muchos de ellos están disponibles solo para áreas urbanas limitadas, lo que representa un obstáculo para la aplicación global de las evaluaciones LCZ.

A pesar de estos desafíos, los métodos basados en SIG desempeñan un papel crucial en la clasificación y modelización a escala local debido a su alta precisión y capacidad para capturar detalles específicos de las áreas urbanas (Lehnert et al., 2021).

Se ha mencionado previamente la abundancia de estudios y metodologías relacionadas con el uso de SIG. Sin embargo, al igual que en el bloque de métodos basados en teledetección, se ha optado por seleccionar un método relevante dentro de este ámbito y evaluar su idoneidad para la ciudad de Zaragoza. En este caso, se ha elegido el método desarrollado por Oliveira, et al., que se basa en una reclasificación utilizando vectores (*shapefiles*) para mapear ciudades del sur de Europa. El objetivo de esta metodología es transformar conjuntos de datos de *Copernicus* en LCZ mediante el uso de datos de *Urban Atlas* (UA) y *Corine Land Cover* (CLC) en los pasos de reclasificación. La elección de esta metodología se debe principalmente a su uso de información de acceso libre y fácil, así como a su capacidad para la reproducibilidad en diferentes ciudades, aunque con ciertas consideraciones que se abordarán más adelante.

Este método de clasificación surge como respuesta a los mapas producidos por el proyecto WUDAPT, y está justificado en las opiniones de varios expertos que han identificado la necesidad de mejoras (Hidalgo-García & Rezapouraghdam, 2023; P. Lopes et al., 2017). Argumentan que los resultados del WUDAPT no son tan precisos cuando se aplica la metodología a ciudades europeas, como también hemos observado en el caso de Zaragoza en la Figura 5.2. Esto se debe a la morfología intrincada y compleja de estas ciudades, a diferencia de las ciudades norteamericanas que suelen tener una disposición regular y cuadrículada, siguiendo un modelo de expansión urbana extensiva y bien delimitada en ejes o radios desde el núcleo central. Oliveira, et al., (2020b) también señalan que las ciudades del sur de Europa a menudo carecen de los medios para adquirir datos de muy alta resolución relacionados con la altura de los edificios. Por lo tanto, utilizan los conjuntos de datos producidos por el *European Copernicus Land Monitoring Service* (CLMS), que ofrecen una gran resolución sobre diferentes aspectos del uso y cobertura del suelo en más de 700 áreas urbanas europeas. Y con toda esta información han desarrollado una herramienta de libre acceso que se puede implementar en ArcGIS y que es capaz de categorizar este conjunto tan extenso de ciudades. Sin embargo, existen algunas limitaciones, ya que solo se puede utilizar en ciudades del ámbito europeo y no todas, y aunque la herramienta en sí es de libre acceso, el software necesario para implementarla no lo es. A pesar de estas limitaciones, la metodología está disponible y podría ser replicable en un software diferente de libre acceso, como QGIS o R.

La metodología empleada se basa en un meticuloso esquema de reclasificación vectorial. En este proceso, se utilizaron como punto de referencia los conjuntos de datos del UA y del CLC, seleccionados por su relevancia en la caracterización del entorno urbano y su cobertura del uso del suelo. La elección de estos conjuntos de datos se realizó con el objetivo de garantizar la máxima resolución espacial posible, manteniendo así la fidelidad de la representación cartográfica. En el marco de este método, las clases LCZ urbanizadas fueron reclasificadas directamente a partir de las clases proporcionadas por el UA. Esto se llevó a cabo mediante una comparación meticulosa de las especificaciones de ambas clasificaciones, teniendo en cuenta parámetros clave como la densidad poblacional, la impermeabilidad del suelo y los patrones típicos de uso del suelo en cada área. Sin embargo, vale la pena destacar que las clases de UA no permiten una distinción clara entre LCZ 8 y LCZ 10. Para superar esta limitación, se recurrió a información adicional proveniente de *OpenStreetMap* (OSM), la cual proporcionó detalles sobre el uso específico del suelo en estas zonas para distinguir las zonas industriales y comerciales. Además, de añadir la información sobre la altura de las edificaciones en base al producto *Building Height*, un *raster* con una precisión de 10 m para 870 ciudades pero que solo proporciona datos de 2012. Por otro lado, las áreas no urbanizadas, clasificadas como tipos de cobertura terrestre no edificadas (A-G de LCZ), fueron objeto de una reclasificación basada en las capas de vegetación del CLC y otros datos pertinentes del CLMS. Este proceso implicó un minucioso análisis de las características de la

vegetación y la topografía en las áreas designadas, con el fin de asignar de manera precisa la clase correspondiente a cada región no urbanizada.

El procedimiento de reclasificación no se limitó a una única iteración; más bien, implicó una serie de pasos que incluyeron pruebas y ajustes del algoritmo utilizado. Se buscó alcanzar la combinación más precisa entre las clases proporcionadas por el CLC y las capas adicionales de datos, como las relacionadas con la topografía y la geología. La implementación práctica de esta metodología se llevó a cabo utilizando el software ArcGIS, aprovechando las capacidades del *Model Builder* para gestionar y automatizar el flujo de trabajo. Además, se proporcionó una detallada documentación del algoritmo de reclasificación (Oliveira et al., 2020a, 2020b) y se puso a disposición una caja de herramientas resultante para la comunidad de investigación interesada en replicar o extender este enfoque.

Para finalizar, el resultado obtenido se transformó a un formato de píxeles rasterizados de 50 m para preservar más detalles espaciales, aunque las recomendaciones de Stewart y Oke sugieren un radio mínimo de 300 m. Posteriormente, las capas *raster* se sometieron a un análisis exhaustivo de evaluación de precisión. Para ello, se seleccionaron aleatoriamente 30 píxeles de muestra por clase LCZ, sumando un total de 510 muestras. En cada punto de muestra, se identificó la clase predominante dentro de un radio de 25 metros, utilizando imágenes satelitales en color verdadero y datos tridimensionales de *Google Earth*. La comparación entre la clasificación basada en SIG y la clase LCZ identificada en el terreno se organizó en matrices de confusión. La precisión del método se evaluó mediante diferentes métricas, incluyendo la precisión general (OA) y el coeficiente Kappa. Además, se consideró la precisión por clase LCZ, lo que permitió una evaluación detallada de la capacidad del método para distinguir entre diferentes tipos. También se utilizaron datos adicionales derivados de *Landsat 8*, como LST, NDVI o un índice de intensidad para ola de calor, para verificar el comportamiento de las LCZ clasificadas y servir también de validación.

En la Figura 5.2 se presenta una clasificación y mapeo de la ciudad de Zaragoza, siguiendo la metodología y la herramienta de ArcGIS diseñada por Oliveira, et al. Sin embargo, es crucial destacar una diferencia significativa: inicialmente, al optar por esta metodología, la capa de altura de edificaciones solo estaba disponible libremente para algunas de las ciudades más importantes de Europa, como Madrid y Barcelona en el caso de España. Con el tiempo, esta información se hizo accesible para un mayor número de ciudades y actualmente está disponible en la plataforma de descargas del CLMS. No obstante, existe la limitación de que esta capa solo abarca el año 2012 y no se ha actualizado desde entonces, a diferencia de otras capas como el UA o el CLC, que se actualizan cada 4 años. Por esta razón, se decidió no incluir esta información en el modelo, resaltando así una de las principales desventajas para las ciudades medianas o pequeñas, que no siempre cuentan con la información necesaria para llevar a cabo ciertos tipos de metodologías. En el mapa presentado, se diferencian únicamente entre las clases de construcciones compactas (LCZ 1-3) y abiertas (LCZ 4-6), debido a esta limitación. A pesar de ello, se evidencian diferencias significativas respecto a las metodologías basadas en teledetección. Lo primero que destaca es la alta resolución al utilizar una clasificación orientada a objetos y vectorial. El uso de información de elevada resolución proporcionada por el programa *Copernicus*, aunque derivada de imágenes satelitales, ofrece un marco muy detallado y nítido que permite análisis a escala intraurbana, reflejando de manera precisa el paisaje urbano.

Sin embargo, también se observan algunos problemas, como la dificultad para incorporar datos de altura de edificios actualizados, disponibles incluso para ciudades de menor tamaño. Además, se presentan desajustes en la clasificación de ciertos espacios, especialmente aquellos relacionados con usos no residenciales, como la LCZ 8 y 10. La

información de OSM se utiliza para completar estos datos, pero surge un problema en el caso de Zaragoza, donde la principal actividad industrial está relacionada con la logística y los polígonos industriales son principalmente naves, no complejos fabriles como se considera en la LCZ 10. La capa de OSM identifica estos espacios como áreas industriales cuando su morfología y comportamiento térmico se asemejan más a la clase LCZ 8 de grandes construcciones bajas. También se observaron problemas en la clasificación de coberturas naturales, especialmente en las zonas verdes urbanas, que no estaban bien representadas y muchos de estos espacios estaban siendo clasificados como espacios construidos. Asimismo, en el área periurbana, dentro del mosaico de cultivo de huerta, se encuentran espacios con pequeñas construcciones como casetas o pequeñas casas de aperos, que no estaban bien representadas en la clasificación. Esto también hace reflexionar sobre un problema de escala, ya que dependiendo de cómo se agrupe la información, estas pequeñas construcciones pueden interpretarse como LCZ 9 de espacios discontinuos construidos, o formar parte de una única LCZ 9 sin hacer diferenciación entre cultivos y construcciones, sino un continuo.

### 5.2.3. Propuesta metodológica de nuevo modelo mixto

Después de analizar y aplicar diversas clasificaciones para Zaragoza, se llegó a la conclusión de que era necesario desarrollar una clasificación propia para la ciudad. Ninguna de las metodologías anteriores proporcionaba un resultado completamente satisfactorio, como se ha podido en los apartados anteriores. El objetivo de este capítulo de la tesis no es crear un método de mapeo de LCZ generalizado que sea replicable en diferentes ciudades y contextos urbanos en todo el mundo. En cambio, el principal objetivo es obtener una clasificación que se ajuste a los parámetros de las LCZ y que refleje de manera precisa la realidad urbana de Zaragoza. Esto permitirá realizar un análisis climático de la ciudad asociado a estas clases, que no solo servirá como fuente de conocimiento climática y urbana, sino también como información de apoyo en la planificación urbana de la ciudad.

Se optó por utilizar un método basado en GIS y mantener su carácter vectorial, ya que en comparación con los métodos de teledetección permite un análisis mucho más detallado, lo cual encaja perfectamente con el tamaño de la ciudad, la red de sensores y los *rasters* térmicos de 100 m derivados del modelo de interpolación. Se seleccionó la metodología diseñada por Oliveira et al. (2020a, 2020b) debido a que, aunque los resultados obtenidos no eran perfectos, se ajustaban mejor a las características de los distintos espacios urbanos y periurbanos de la ciudad. Sin embargo, se realizaron una serie de modificaciones y complementos al método original.

Principalmente, para abordar el problema de la altura de las edificaciones, se optó por sustituir la capa de *Building Height* por el Modelo Digital de Superficies de Edificación (MDSnE) disponible en el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Este modelo proporciona un *raster* con los resultados derivados de los vuelos LIDAR del PNOA del modelo digital de superficies normalizado, pero solo para la clase de edificación y con una resolución de la malla de 2,5 m para el año 2016. Esta capa se introdujo dentro del modelo para proporcionar una mayor resolución, analizando una mayor cantidad de edificios y, por lo tanto, obteniendo datos más detallados y actualizados. Se modificó también la forma en que se calculaba el valor de altura para cada uno de los polígonos o vectores, optando por utilizar la mediana en lugar del promedio para evitar que construcciones puntuales alteraran las características generales predominantes en cada polígono.

Esta información resultó útil no solo para ajustar las categorías de la 1 a la 6, cuya altura es el rasgo diferenciador principal, sino también como información complementaria para el resto de categorías construidas. La LCZ 10 originalmente abarcaba muchas zonas de

polígonos industriales y no diferenciaba si dentro del polígono todos los solares estaban edificadas o simplemente pavimentados. Sin embargo, gracias a la capa de altura de edificaciones, fue posible diferenciar si un área pertenecía a la LCZ 10 o a otra categoría, como la E. Por otro lado, ocurrió lo contrario con otras tipologías, como la LCZ F, que pasaba a ser clasificada como 6 si realmente contaba con edificaciones en la zona. Es decir, la información proporcionada por la capa de altura de edificaciones permitió ajustar de manera más precisa las categorías de clasificación urbana, corrigiendo errores o imprecisiones que se presentaban anteriormente.

Al ver que la información de altura de las edificaciones fue útil para mejorar las clases construidas, también se incorporó una capa similar para las coberturas vegetales mediante el Modelo Digital de Superficies Vegetación (MDSnV). Esta capa, junto con la reclasificación de algunos parámetros del modelo en base al área de arbolado por polígono, permitió una mejor identificación de las zonas verdes urbanas y una diferenciación más clara entre las tipologías de arbolado denso y abierto (A y B), así como una mayor diferenciación de la clase D de cultivos.

Además, se realizaron modificaciones en el modelo para delimitar mejor la LCZ 8, que representa grandes construcciones bajas. Inicialmente, esta clase abarcaba un conjunto confuso de espacios que no diferenciaban adecuadamente los polígonos industriales, lo cual es uno de sus ejemplos más claros. Para abordar esto, se corrigió el problema derivado del uso de la capa de OMS sobre industria, transformando todos esos espacios en la clase LCZ 8. Sin embargo, se mantuvieron como LCZ 10 únicamente las fábricas reales, como *Saica*, *Torraspapel* o *La Zaragozana*, ya que eran pocas y se podían identificar y modificar individualmente. Respecto a las otras clases dentro de la LCZ 8, se ajustaron los umbrales de aspectos como el tamaño o la superficie de las edificaciones, así como la presencia de vegetación en el área, con el fin de diferenciar adecuadamente las clases correspondientes en cada polígono.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.3, donde se pueden apreciar los cambios con respecto a la clasificación original. Se observan modificaciones significativas en las clases relacionadas con las edificaciones residenciales, los polígonos industriales y las coberturas naturales, especialmente en lo que concierne a los espacios verdes urbanos. Esta nueva clasificación de LCZ para la ciudad de Zaragoza presenta un alto nivel de detalle y refleja las principales características urbanas y climáticas que componen la ciudad. En esta ocasión, no se ha considerado la necesidad de realizar un análisis de precisión del modelo, ya que se trata de un análisis específico de una zona detallada que actualmente, y siguiendo los parámetros establecidos, no se utilizará en otra ciudad. Por tanto, esta clasificación se ha desarrollado y validado mediante un criterio experto que ha ido dando forma con cada modificación para asegurar que el resultado final sea lo más ajustado posible a la realidad. Sin embargo, en la siguiente sección, este mapa se utilizará para llevar a cabo una caracterización climática de las distintas LCZ de Zaragoza. Esto respaldará la validez del método si los resultados térmicos se corresponden con el comportamiento esperado de las diferentes clases.

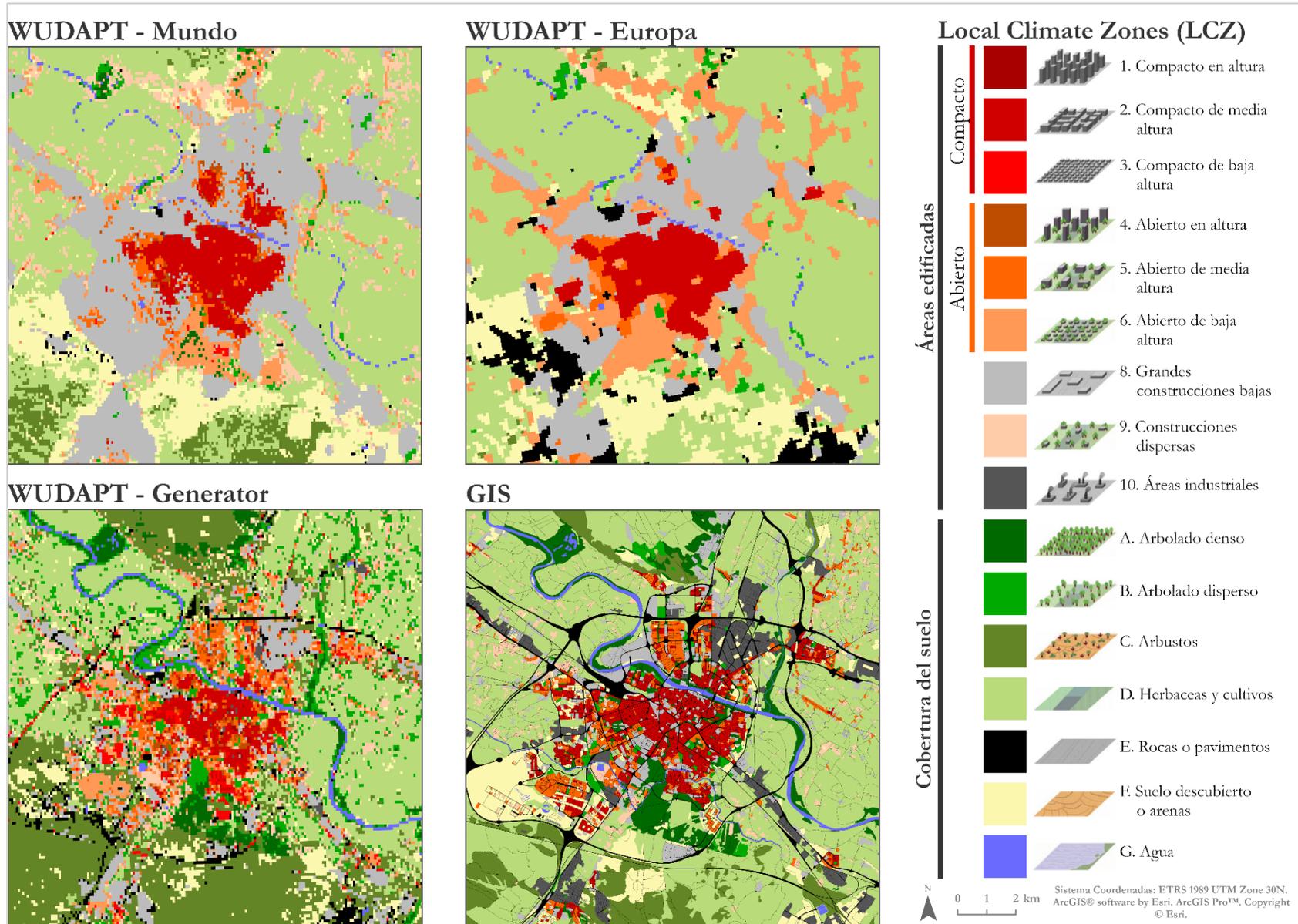


Figura 5.2. Mapa de clasificación de LCZ, siguiendo distintas metodologías. Esquina superior izquierda, producto WUDAPT de clasificación global. Esquina superior derecha, producto WUDAPT de clasificación para Europa. Esquina inferior izquierda, clasificación derivada del LCZ-Generator de WUDAPT. Esquina inferior derecha, método GIS de Oliveira, et al. (2020).

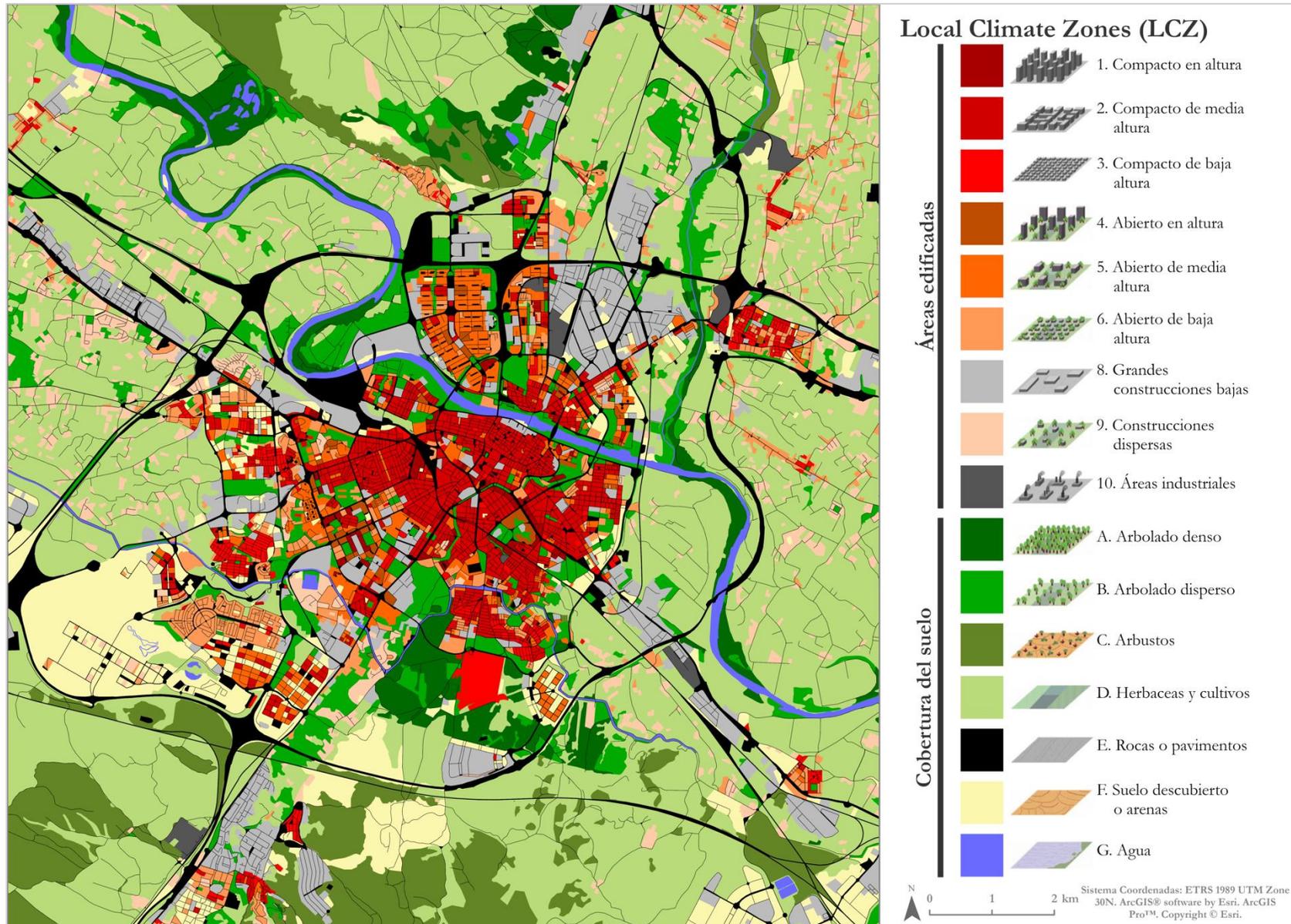


Figura 5.3. Mapa de clasificación de LCZ, siguiendo la metodología modificada de Oliveira, et al. (2020a, 2020b).

### 5.3. Caracterización climática urbana en base a la distribución de LCZ

Para comprender el comportamiento térmico de las diferentes LCZ en Zaragoza, se comparó la clasificación con los valores de temperatura de las máximas y mínimas para cada estación del año, lo cual permite resumir el ciclo diurno y la variación anual de las temperaturas de manera efectiva. Se utilizaron *rasters* promedio estacionales para extraer todos los valores que intersectaban con cada una de las LCZ. Luego, se emplearon gráficos de caja (Figura 5.4 y Figura 5.5) para visualizar la distribución de los valores térmicos para cada LCZ en cada estación. Además, se calcularon estadísticos descriptivos para cada clase, como se muestra en la Tabla 5.2.

La distribución térmica en Zaragoza revela que las clases con mayor urbanización presentan, en general, temperaturas más elevadas tanto en las mínimas como en las máximas. Sin embargo, a excepción de las LCZ E y F, que representan suelo pavimentado y suelo desnudo o arenas, el resto de clases relacionadas con las cubiertas del suelo registran valores promedio inferiores al de las áreas edificadas. Se distingue claramente entre un tejido urbano compacto (LCZ 1 a 3), más cálido debido a la morfología urbana y suelos pavimentados, y uno abierto (LCZ 4 a 6), con mayor amplitud del viario urbano y presencia de vegetación y suelos no sellados. No obstante, en el caso de las áreas compactas de baja altitud (LCZ 3), la mayoría de los valores se sitúan por debajo de la clase 4, caracterizada por un paisaje urbano abierto con mayor presencia de vegetación. Es interesante observar que, en el mapa (Figura 76), la representación de la LCZ 4 es considerablemente inferior a la de la LCZ 3, alcanzando tan solo una cuarta parte de su extensión. Además, esta tipología se encuentra frecuentemente en las proximidades de zonas compactas, aunque la escasa presencia de vegetación puede evitar su inclusión en la misma categoría. La influencia de los edificios altos y su impacto en los flujos de viento pueden explicar por qué sus valores térmicos superan a los de una clase compacta, a pesar de contar con factores que suponen mayor enfriamiento como es el caso de la vegetación. Por otro lado, las áreas edificadas compactas y abiertas (LCZ 3 y 4), relacionadas con construcciones de baja altura, muestran un amplio rango de temperatura, indicando una mayor variabilidad. Esto podría atribuirse a la dificultad para discriminar estos espacios en la clasificación, lo que podría conducir a una mezcla con otras tipologías (LCZ 8 y 9) y, como resultado, a un rango de valores más elevado al fusionarlas.

En el análisis de las LCZ 8, 9 y 10, se evidencia claramente el comportamiento observado en los mapas de temperatura anual (Figura 4.1, Figura 4.2 y Figura 4.3) al examinar las diferencias entre el ciclo diurno y nocturno. Durante el día (temperaturas máximas), estos espacios exhiben temperaturas considerablemente altas debido a la radiación directa, producto de la escasa presencia de sombras ocasionada por estructuras abiertas y edificaciones de baja altura. Estos entornos corresponden a los polígonos industriales y los barrios rurales analizados en la Figura 4.5, equiparables en el primer caso a las LCZ 8 y 10, mientras que los barrios rurales, en ciertos casos de mayor dispersión, se asemejan a la LCZ 9. Es interesante que estos espacios, que se calientan rápidamente durante el día, también experimentan un rápido enfriamiento durante la noche (temperaturas mínimas), debido a la irradiación de los materiales, especialmente en días de cielo despejado. En valores promedio estas clases, dentro de las tipologías edificadas, son las que mayor oscilación térmica diurna alcanzan con diferencias de más de 13 °C en el caso de verano.

En cuanto a las clases relacionadas con las coberturas de suelo vegetal (LCZ A a D), se observa una tendencia general hacia temperaturas más bajas en comparación con otras coberturas del suelo. Sin embargo, el comportamiento térmico varía entre las propias clases

vegetales. Los espacios clasificados como LCZ A, que corresponden a áreas con árboles densos, mayoritariamente exhiben temperaturas más bajas. Aunque la LCZ C agrupa, en promedio, los valores más bajos de temperatura, especialmente en las máximas. En el promedio anual, esta clase es aproximadamente 1,05 °C más fresca que la LCZ 2 (clase más cálida) en verano, y esta diferencia se intensifica en las mínimas, alcanzando un descenso de 1,64 °C. Sin embargo, la LCZ C representa matorrales y arbustos leñosos dispersos (maquis y garriga) típicos de la depresión del valle del Ebro y entornos mediterráneos, se encuentra principalmente en las zonas norte y sur de los relieves alomados de yeso, con escasa presencia humana y una elevación superior al fondo del valle junto al río. Estas áreas, en los límites de la interpolación, tienden a presentar un mayor margen de error, lo que puede resultar en una leve subestimación de las temperaturas de esa zona, lo que podría explicar su aparente frescura tan marcada. No obstante, esta clase está estrechamente relacionada con la cobertura natural que predominaría en la zona sin la intervención urbana, lo que la convierte en un indicador del clima natural sin influencia de la ICU.

Las clases LCZ B y D muestran un comportamiento térmico similar al señalado por Oliveira et al. (2020b), pero en el artículo relacionan la presencia de estas clases con la presencia de islas de calor superficial en días de verano. Muestran como clases suelen tener valores más altos de LST, atribuidas a la hora del paso del satélite al final de la mañana, cuando las superficies más expuestas se calientan más rápido. Sin embargo, en esta tesis al analizar la temperatura del aire y utilizar los *raster* interpolados, se pueden observar otros momentos del día, revelando que estas clases también experimentan temperaturas mínimas más bajas durante la noche debido a la inercia térmica y la liberación de calor que hace descender la temperatura. De todos modos, la presencia de temperatura más elevadas en estas clases, en comparación con otras con alta presencia de vegetación, puede deberse al mosaico de cultivos característico de la LCZ D, donde se intercalan áreas de suelo desnudo que se calientan rápidamente. En el caso de la LCZ B, muchas de las zonas intercaladas con árboles son especies leñosas de hojas escasas y, en ocasiones, secas o suelo de gravas, arenas o sin presencia de vegetación.

Por último, en todas las clases vegetales se aprecia una variación ligada a la actividad vegetal estacional, que se acentúa en las mínimas durante los períodos de mayor actividad vegetal, como la primavera y el verano. Esta variabilidad se refleja en un aumento de la desviación estándar y, por ende, en la variabilidad de la temperatura en estos espacios. Sin embargo, se observa una excepción en los bosques densos (LCZ A), posiblemente debido a que la mayoría de estas especies forestales, como los pinos, conservan sus hojas durante el invierno, lo que reduce su variabilidad estacional.

La LCZ E, que clasifica las superficies pavimentadas o de roca desnuda, se destaca por experimentar un calentamiento significativo durante el día, con valores máximos solo superados por los espacios compactos de altura media (LCZ 2). Por otro lado, durante la noche, estas superficies son las que adquieren los valores máximos absolutos. Este patrón concuerda perfectamente con las características térmicas de materiales como el asfalto o el cemento, cuyo comportamiento radiativo ya ha sido explicado anteriormente. Estos materiales tienden a absorber una gran cantidad de radiación solar durante el día y luego la liberan de manera progresiva durante la noche, lo que aumenta la temperatura del aire circundante.

ESTACIÓN	LCZ	TEMPERATURA MÍNIMA					TEMPERATURA MÁXIMA						
		MEDIA	DESV. ESTAND	MEDIANA	MÍNIMO	MÁXIMO	RANGO	MEDIA	DESV. ESTAND	MEDIANA	MÍNIMO	MÁXIMO	RANGO
INVIERNO	1	5,09	0,27	5,11	4,24	5,52	1,28	12,60	0,09	12,60	12,41	12,79	0,38
	2	5,15	0,31	5,27	3,93	5,57	1,64	12,63	0,14	12,67	12,07	12,85	0,77
	3	4,58	0,40	4,58	3,46	5,39	1,93	12,42	0,18	12,48	11,92	12,82	0,91
	4	4,92	0,20	4,95	4,37	5,32	0,95	12,52	0,09	12,53	12,37	12,69	0,32
	5	4,72	0,27	4,71	3,94	5,42	1,48	12,49	0,13	12,52	12,13	12,79	0,66
	6	4,31	0,49	4,38	3,00	5,27	2,26	12,42	0,14	12,42	11,70	12,77	1,07
	8	4,26	0,32	4,25	2,78	5,43	2,65	12,51	0,18	12,53	11,85	12,96	1,12
	9	3,86	0,39	3,88	2,71	5,27	2,56	12,33	0,13	12,33	11,69	12,70	1,00
	10	4,19	0,33	4,20	3,43	5,33	1,90	12,56	0,18	12,58	12,11	12,97	0,87
	A	3,80	0,40	3,87	2,71	4,62	1,91	12,11	0,26	12,17	11,61	12,57	0,96
	B	4,04	0,45	4,01	2,67	5,39	2,72	12,33	0,18	12,36	11,55	12,73	1,18
	C	3,56	0,22	3,53	3,09	4,47	1,38	11,97	0,21	11,92	11,54	12,52	0,98
	D	3,59	0,32	3,60	2,54	5,05	2,51	12,25	0,17	12,28	11,62	12,78	1,16
	E	4,18	0,50	4,12	2,82	5,52	2,71	12,42	0,18	12,44	11,64	12,90	1,26
F	4,05	0,26	4,05	3,19	4,95	1,76	12,28	0,17	12,30	11,74	12,78	1,05	
G	3,94	0,25	3,88	3,19	4,88	1,69	12,32	0,09	12,32	11,85	12,51	0,66	
PRIMAVERA	1	10,55	0,26	10,59	9,82	10,97	1,15	21,26	0,17	21,28	20,92	21,57	0,65
	2	10,61	0,32	10,73	9,31	11,02	1,71	21,27	0,23	21,31	20,38	21,69	1,31
	3	10,04	0,40	10,05	8,79	10,86	2,07	20,94	0,27	20,97	20,29	21,60	1,31
	4	10,35	0,19	10,37	9,81	10,79	0,99	21,17	0,15	21,17	20,90	21,45	0,55
	5	10,17	0,26	10,18	9,27	10,83	1,56	21,07	0,21	21,12	20,43	21,56	1,13
	6	9,74	0,51	9,87	8,19	10,81	2,62	20,90	0,25	20,90	19,72	21,57	1,84
	8	9,78	0,35	9,81	8,16	10,82	2,66	21,01	0,28	21,04	19,93	21,58	1,66
	9	9,26	0,45	9,29	7,88	10,68	2,80	20,78	0,23	20,78	19,57	21,53	1,96
	10	9,73	0,37	9,80	8,84	10,86	2,02	21,07	0,34	21,19	20,23	21,56	1,33
	A	9,11	0,33	9,10	8,22	10,05	1,83	20,56	0,27	20,57	19,80	21,19	1,39
	B	9,44	0,50	9,41	7,92	10,78	2,87	20,81	0,28	20,83	19,76	21,59	1,83
	C	8,90	0,27	8,84	8,34	10,06	1,73	20,05	0,41	19,96	19,30	21,15	1,85
	D	8,89	0,41	8,87	7,64	10,52	2,88	20,58	0,33	20,64	19,34	21,46	2,12
	E	9,62	0,55	9,59	8,03	11,04	3,00	20,88	0,33	20,92	19,36	21,63	2,28
F	9,51	0,32	9,57	8,33	10,47	2,14	20,60	0,32	20,62	19,66	21,48	1,82	
G	9,18	0,33	9,10	8,53	10,21	1,68	20,79	0,17	20,77	20,18	21,18	1,00	
VERANO	1	19,51	0,27	19,54	18,85	19,99	1,14	32,85	0,24	32,89	32,44	33,31	0,88
	2	19,58	0,31	19,69	18,34	20,02	1,68	32,92	0,28	32,94	31,92	33,52	1,59
	3	19,09	0,38	19,09	17,99	19,82	1,82	32,52	0,30	32,57	31,76	33,25	1,48
	4	19,29	0,19	19,29	18,87	19,78	0,91	32,73	0,19	32,75	32,38	33,13	0,75
	5	19,15	0,25	19,14	18,33	19,84	1,50	32,64	0,24	32,68	32,04	33,35	1,31
	6	18,79	0,45	18,87	17,54	19,75	2,21	32,42	0,26	32,40	31,23	33,25	2,02
	8	18,79	0,32	18,80	17,47	19,80	2,33	32,46	0,29	32,51	31,42	33,24	1,82
	9	18,39	0,40	18,42	17,28	19,66	2,38	32,23	0,24	32,24	31,03	33,13	2,09
	10	18,74	0,34	18,77	17,90	19,85	1,96	32,53	0,36	32,64	31,68	33,11	1,43
	A	18,15	0,37	18,11	17,41	19,09	1,68	31,99	0,26	31,94	31,25	32,72	1,46
	B	18,49	0,45	18,49	17,11	19,74	2,63	32,26	0,31	32,27	31,20	33,32	2,12
	C	17,98	0,29	17,95	17,34	19,11	1,78	31,55	0,42	31,48	30,71	32,68	1,96
	D	18,06	0,40	18,02	16,87	19,50	2,63	32,01	0,33	32,03	30,81	32,89	2,09
	E	18,68	0,49	18,66	17,18	20,03	2,85	32,37	0,36	32,39	30,80	33,37	2,57
F	18,59	0,32	18,65	17,68	19,47	1,80	32,12	0,32	32,11	31,17	33,12	1,95	
G	18,24	0,33	18,21	17,53	19,12	1,59	32,22	0,23	32,22	31,58	32,75	1,18	
OTOÑO	1	12,69	0,30	12,73	11,90	13,21	1,31	21,94	0,13	21,94	21,67	22,18	0,51
	2	12,76	0,35	12,90	11,43	13,23	1,80	21,99	0,17	22,02	21,37	22,35	0,98
	3	12,19	0,42	12,20	10,95	13,05	2,09	21,76	0,21	21,82	21,14	22,21	1,06
	4	12,45	0,21	12,48	11,90	13,01	1,11	21,86	0,11	21,89	21,65	22,08	0,44
	5	12,28	0,27	12,27	11,42	13,06	1,63	21,83	0,15	21,86	21,45	22,26	0,81
	6	11,89	0,49	11,96	10,47	12,94	2,46	21,74	0,17	21,74	20,90	22,19	1,29
	8	11,87	0,33	11,87	10,34	13,00	2,66	21,82	0,20	21,85	21,05	22,23	1,18
	9	11,44	0,40	11,47	10,32	12,82	2,51	21,65	0,16	21,65	20,81	22,11	1,30
	10	11,80	0,35	11,80	11,07	13,02	1,95	21,87	0,22	21,92	21,31	22,18	0,87
	A	11,22	0,32	11,25	10,24	12,12	1,88	21,38	0,25	21,39	20,85	21,96	1,12
	B	11,55	0,48	11,54	10,09	12,99	2,89	21,62	0,21	21,64	20,76	22,21	1,45
	C	11,07	0,27	11,04	10,45	12,21	1,76	21,18	0,28	21,12	20,65	21,94	1,29
	D	11,12	0,39	11,11	9,99	12,64	2,65	21,53	0,22	21,57	20,71	22,11	1,40
	E	11,76	0,52	11,73	10,21	13,25	3,04	21,74	0,22	21,77	20,71	22,26	1,55
F	11,65	0,32	11,69	10,65	12,66	2,01	21,56	0,22	21,58	20,88	22,15	1,26	
G	11,39	0,29	11,32	10,66	12,33	1,67	21,63	0,12	21,64	21,11	21,90	0,79	

Tabla 5.2. Estadísticos descriptivos de la temperatura media de máximas y mínimas estacionales para cada LCZ.

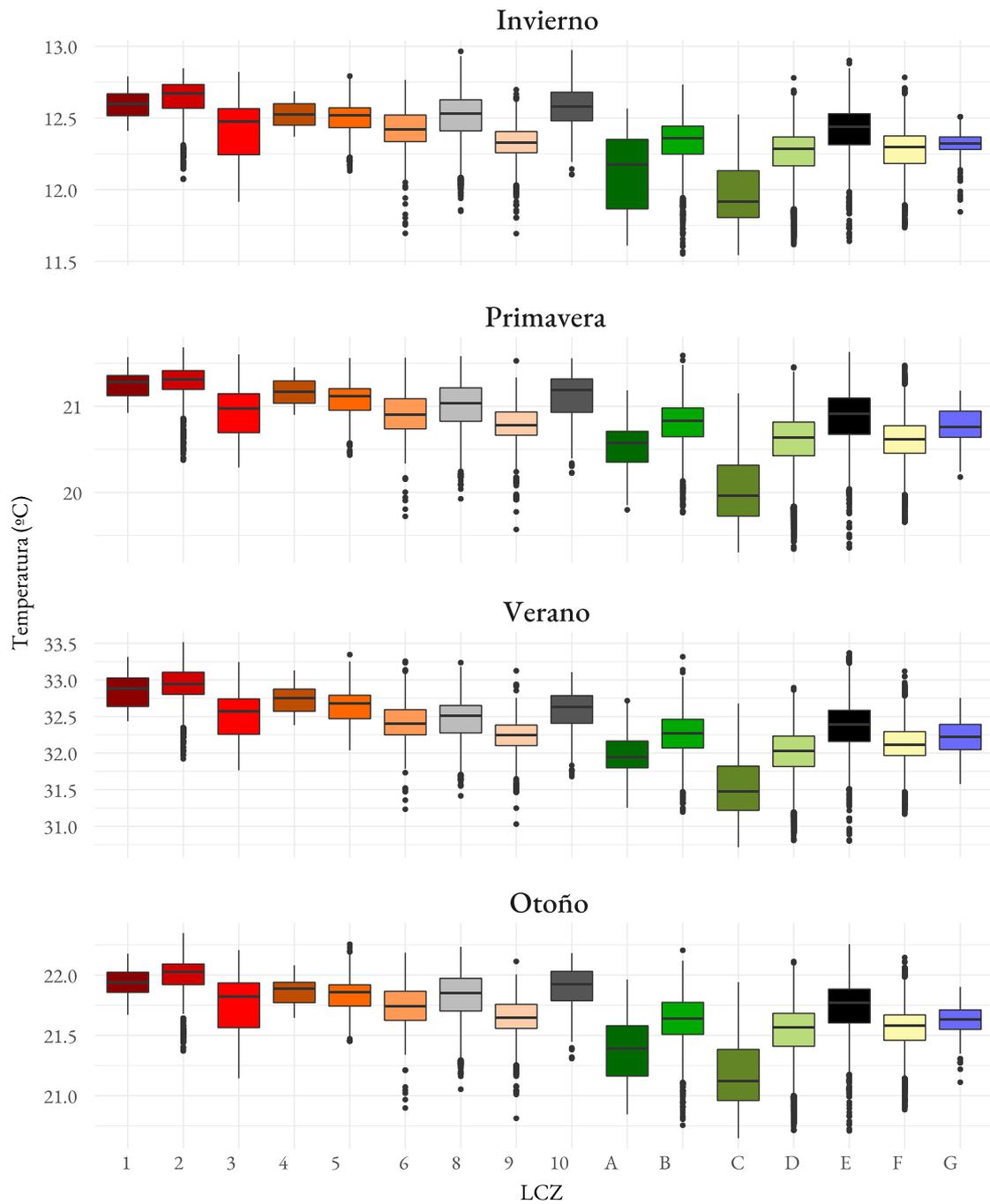


Figura 5.4. Gráfico de cajas con la distribución de la temperatura media de las máximas para cada LCZ y cada estación del año.

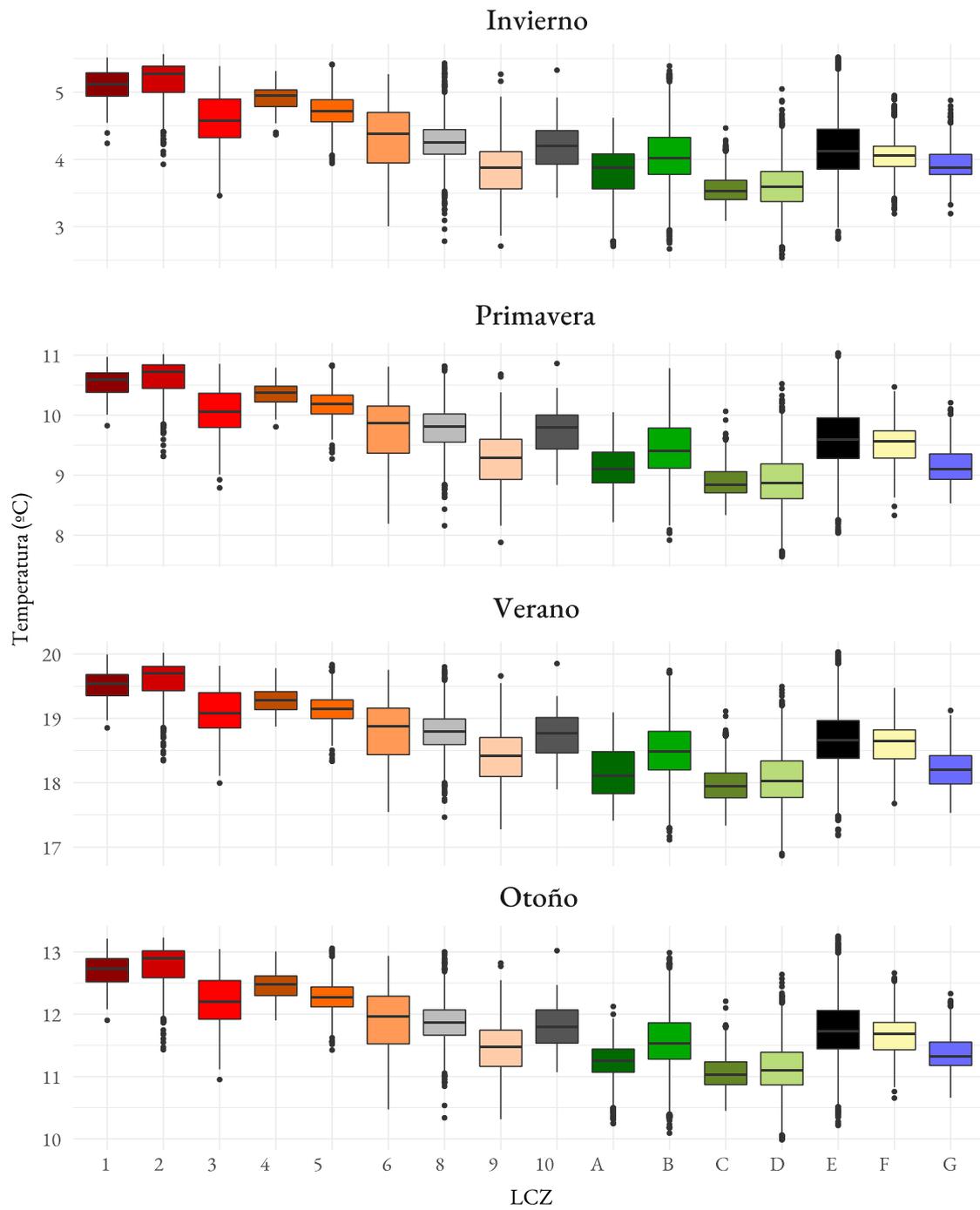


Figura 5.5. Gráfico de cajas con la distribución de la temperatura media de las mínimas para cada LCZ y cada estación del año.

## 5.4. Discusión

La comprensión de las LCZ en Zaragoza es fundamental para abordar los desafíos específicos del clima urbano en la ciudad y contribuir a una planificación más efectiva. La diversidad de LCZ en Zaragoza refleja la complejidad de su entorno urbano y sus interacciones con las condiciones climáticas locales. Desde las áreas densamente urbanizadas hasta los espacios abiertos y arbolados, cada LCZ tiene un impacto único en la distribución espacial de la temperatura y otros parámetros climáticos.

El desarrollo de un método propio para la clasificación de LCZ en Zaragoza implica enfrentar diversos desafíos, como la disponibilidad de datos detallados y la adaptación de metodologías existentes a las condiciones locales. Tanto los enfoques basados en teledetección como en SIG presentan ventajas y limitaciones, y es crucial seleccionar un método adecuado para las características específicas de la ciudad y el tipo de análisis posterior en el cual se quiera implementar las LCZ.

Al comparar y evaluar diferentes métodos de mapeo de LCZ, se optó por modificar un modelo basado en SIG de alta resolución para conseguir el mayor detalle y así poder relacionar el resultado con la información climática derivada de la red de sensores. Se siguió el método de Oliveira, et al. (2020a, 2020b) pero incorporando información del modelo digital de superficies y realizando algunas modificaciones respecto a los rangos de ajuste de algunas categorías. Se aprecia cómo el resultado obtenido mejora no solo la resolución de la clasificación, sino también la precisión al tratarse de un estudio concreto centrado solo en una ciudad. Sin embargo, este tipo de modelo actualmente no es extrapolable a más ciudades y para poder serlo debería someterse a un proceso de validación y precisión que actualmente se supera por el criterio experto.

La caracterización climática urbana basada en la distribución de las LCZ proporciona una comprensión detallada de cómo las diferentes características del entorno urbano influyen en el microclima local. A través del análisis de las temperaturas máximas y mínimas para cada estación del año en relación con las distintas clases de LCZ, se pueden identificar patrones térmicos específicos asociados a las características del uso del suelo y la morfología urbana. En general, se observa que las áreas urbanizadas con mayor densidad de edificaciones tienden a tener temperaturas más elevadas, tanto durante el día como durante la noche. Esto se debe a la mayor absorción y retención de calor por parte de las superficies pavimentadas y los materiales de construcción, así como a la menor presencia de vegetación, que actúa como regulador térmico natural. Además, los parámetros obtenidos muestran que la clasificación realizada tiene el comportamiento térmico esperado y que las diferentes clases, en gran medida, siguen las características expuestas por Stewart y Oke (2012) en su clasificación, lo que valida esta técnica de mapeo de LCZ.

La clasificación de LCZ proporciona información detallada sobre cómo la estructura y la composición del entorno urbano afectan el microclima local. Esto es fundamental para entender los fenómenos de la ICU y para informar la planificación urbana y las estrategias de adaptación al cambio climático. Además, la combinación de datos de temperatura con datos de LCZ permite identificar áreas específicas que podrían beneficiarse de intervenciones de diseño urbano orientadas a mitigar los efectos del calor urbano y mejorar la calidad de vida de los residentes.

## 6. Conclusiones y líneas futuras

### 6.1. Conclusiones

El desarrollo de esta tesis ha permitido realizar un análisis detallado de la distribución espacial y temporal de la temperatura urbana de Zaragoza mediante un modelo de interpolación diario diseñado con ese propósito. Esta caracterización climática basada en una red de sensores urbanos era el **objetivo principal** de la tesis doctoral, y para conseguirlo requirió la consecución de las tareas correspondiente a los objetivos secundarios:

**Objetivo 1:** *Recopilar, depurar y almacenar un gran volumen de datos climáticos de alta resolución temporal. Usando la metodología adecuada y desarrollando un control de calidad específico para redes urbanas de alta densidad.*

En el capítulo 2 se explica el control de calidad para depurar y rellenar las observaciones horarias recogidas por la red urbana de sensores. Un control semiautomático de cuatro pasos en los cuales: 1) se detectaron valores atípicos generales basados en los límites establecidos según el historial climático y las características del valle medio del Ebro,  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2) se identificaron valores atípicos específicos comparando la información registrada por los 21 observatorios. Aquellos valores que difirieron más allá de  $\pm 3$  desviaciones estándar de la media se consideraron sospechosos y se eliminaron; 3) se detectaron valores repetidos mediante un umbral de 10 repeticiones, desestimando los casos de la humedad que debido a la presencia de nieblas no se debieran a errores del sensor; 4) se buscaron variaciones horarias abruptas en las temperaturas, considerando cambios de más de  $\pm 5$  entre horas consecutivas. Los datos sospechosos se revisaron detalladamente. Se utilizó la evaluación sinóptica para tomar decisiones, relacionando situaciones atmosféricas específicas con los datos sospechosos. Aquellas observaciones que no se podían explicar por las condiciones meteorológicas fueron eliminadas.

Finalmente, el control de calidad recopiló 2.665.154 observaciones, de las cuales un 3,28 % eran datos faltantes y un 1,5 % fueron datos eliminados por el control. Las observaciones faltantes y las eliminadas se reconstruyeron para obtener una base de datos horaria completa. De los datos eliminados un 54,7 % pertenecieron a observaciones de temperatura y el resto a humedad. Siendo los errores más comunes los *outliers* (0,8 %) y la variación horaria (0,7 %). La mayoría de las observaciones eliminadas (37%) ocurrieron en el año 2018 debido a fallas en los sensores S17 y S18. También hubo una gran cantidad de eliminaciones al inicio de la puesta en marcha de la red en 2015. Se observó un pico en el año 2016, con una gran cantidad de observaciones eliminadas en octubre y noviembre. En promedio, se eliminaron alrededor de 400 observaciones mensuales, aunque este número disminuyó desde 2018. Aunque no hay un mes específico con un aumento significativo en las eliminaciones, se observó una ligera agrupación en los meses de otoño y primavera.

El control de calidad es un proceso fundamental para eliminar observaciones que no se ajustan a la variabilidad natural del clima. También ha sido útil para incluir datos bajo situaciones atmosféricas que generalmente no se incluyen en el seguimiento meteorológico convencional. Sin embargo, no es totalmente automático y este enfoque requiere intervención manual por parte del investigador en casos como la variabilidad horaria o saltos en los datos. A pesar de esto, el control de calidad es altamente adaptable y puede ser aplicado a otras redes de sensores termohigrométricos. Este proceso robusto asegura la obtención de una base de datos climáticos urbanos confiable para análisis climatológicos y estudios relacionados con la variabilidad climática en la ciudad.

**Objetivo 2:** *Desarrollar modelos de interpolación espacial aplicados a climatología urbana que utilicen los datos recopilados para representar con precisión el clima en diferentes partes de la ciudad, considerando factores explicativos o covariables como la urbanización, las diferentes coberturas urbanas o las características geográficas locales.*

Utilizando la base de datos recopilada, se calcularon los valores de temperatura máxima, media y mínima diaria desde marzo de 2015 hasta diciembre de 2022. 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 (capítulo 3.3), antes de avanzar hacia la formulación del modelo más adecuado. Se decidió realizar una validación a escala estacional previa a la diaria para seleccionar la combinación óptima de variables y modelos (capítulo 3.4), la cual luego se ajustaría a la escala mensual y se aplicaría al conjunto de datos diarios. Tras una evaluación exhaustiva (capítulo 3.5), se determinó que el modelo 6, que interpoló los tres primeros componentes principales del PCA de las variables MDT, SVF, GLI, NDTI, NBAI y LST, era el más adecuado. Por lo tanto, las covariables de origen satelital se ajustaron a la escala mensual y se aplicó el modelo para obtener *rasters* diarios (capítulo 3.6), los cuales fueron validados nuevamente (capítulo 3.7).

Los resultados de la interpolación *cokriging* para la temperatura diaria mostraron que el modelo tenía una buena capacidad para predecir las temperaturas diarias en la ciudad, con la mayoría de los errores 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 destacaba la dificultad de interpolar valores abruptos y extremos. Aunque el RMSE reveló valores más pronunciados, la mayoría de los datos tuvieron un error inferior a 1 °C, lo que indicó una precisión razonable en las predicciones.

El análisis temporal del error mostró un aumento durante los meses de invierno, posiblemente debido a la menor disponibilidad de imágenes y la complejidad climática asociada a esos meses. A pesar de esto, la consistencia en el rendimiento del modelo a lo largo del tiempo fue evidente. En términos mensuales, las temperaturas máximas presentaron los resultados más favorables en términos de error medio, mientras que la temperatura media tuvo la menor magnitud de error, especialmente en primavera y verano. Además, se observó un sesgo temporal en los errores, con mayores errores al principio de la serie temporal debido a la falta de datos originales. Los resultados residuales indicaron que los sensores más recientes tendían a tener mayores valores residuales, lo que sugirió que la falta de datos originales al principio de la serie podría influir en la precisión de las predicciones. Además, se observó una mejor capacidad predictiva en sensores urbanos en comparación con los ubicados en áreas periurbanas o con componentes vegetales importantes.

**Objetivo 3:** *Realizar una caracterización climática detallada de la ciudad de Zaragoza, utilizando los resultados obtenidos a partir de un modelo de interpolación urbano centrado especialmente en el comportamiento térmico. Se analizará el comportamiento de la ciudad en diferentes escalas temporales, incluyendo análisis diarios, estacionales y anuales. Esto permitirá identificar patrones climáticos a corto y largo plazo, así como evaluar la variabilidad climática bajo condiciones climáticas específicas.*

El uso de modelos de interpolación en redes urbanas de sensores brindó numerosas ventajas para caracterizar el comportamiento climático de una ciudad. Sin embargo, también se debieron tener en cuenta las limitaciones del modelo en términos de calidad y cantidad de datos disponibles, así como la elección de los parámetros del modelo. A pesar de estas limitaciones, estos modelos proporcionaron una herramienta valiosa para comprender y

caracterizar la isla de calor urbana a escalas de análisis que las metodologías previas no podrían haber alcanzado.

La caracterización climática de Zaragoza a través de mapas de temperatura interpolada reveló patrones distintivos en el comportamiento térmico de la ciudad en distintas escalas de tiempo. El sector urbano destacó como la zona más cálida en todos los mapas anuales, mientras que las áreas elevadas al noroeste y al sur presentaron temperaturas más frescas. Las áreas de cultivo a lo largo de los ríos Ebro y Gallego también mostraron temperaturas más bajas, pero de manera más heterogénea debido a la diversidad de campos cultivados y huertos irrigados. Estos patrones térmicos delinearían la ICU, que seguiría una distribución concéntrica centrada en la margen derecha del río Ebro debido al desarrollo histórico de la ciudad hacia el sur

La distribución espacial de la temperatura varió según la variable térmica analizada. Las temperaturas mínimas, asociadas principalmente a las noches, eran más altas en el centro urbano y disminuían en áreas menos densamente pobladas. Las temperaturas medias seguían una distribución similar, pero con un rango de temperatura menor. Por otro lado, las temperaturas máximas, relacionadas con el día, se desplazaban hacia el sureste de las zonas más cálidas de la ciudad debido a la dinámica atmosférica local y la influencia del viento predominante del noroeste. La interpolación de temperaturas proporcionó una imagen completa de la ciudad y su entorno, revelando la diversidad de temperaturas dentro de la ciudad y en su periferia. Los barrios más antiguos y densamente construidos presentaban temperaturas más altas, pero también contaban con áreas verdes que reducían la temperatura. Por otro lado, los barrios más recientes, con una mayor planificación urbana y más zonas ajardinadas, registraban temperaturas más bajas. Las áreas rurales y los polígonos industriales tenían patrones térmicos distintos dependiendo de su ubicación y densidad de edificación.

Al observar los patrones estacionales, se destacaba 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. 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. A nivel mensual, se observaron dos tendencias claras en la distribución de la temperatura: una más cálida de abril a septiembre y otra más fría de octubre a febrero. Los mapas mensuales de desviación estándar revelaron la incertidumbre de los modelos de interpolación, siendo mayor en las temperaturas máximas durante los meses estivales y en las temperaturas mínimas durante los meses invernales. Esta incertidumbre fue más evidente en las zonas más alejadas de la red de sensores y en los espacios naturales que no estaban representados por la red urbana. Los mapas diarios mostraron cómo los fenómenos atmosféricos y las situaciones sinópticas específicas afectaban la temperatura urbana. Durante nieblas y nevadas, las diferencias entre áreas urbanas y rurales disminuyeron, llegando incluso a desaparecer en algunos casos. El viento y la precipitación también modificaron la distribución de la temperatura y pudieron disminuir la influencia de la ICU, dependiendo de la intensidad y la dirección. Al mismo tiempo que la ola de calor, dependiendo de la zona, aumentó la intensidad de la ICU.

**Objetivo 4:** *Clasificar de manera detallada las LCZ dentro de la ciudad de Zaragoza, mejorando los métodos previos existentes y utilizando información de mayor detalle como los productos derivados de LIDAR o imágenes Satélite.*

El proceso de desarrollar un método propio para la clasificación de LCZ en Zaragoza presentó una serie de desafíos significativos, incluida la disponibilidad limitada de datos detallados y la necesidad de adaptar metodologías existentes a las condiciones específicas de la ciudad. Se exploraron enfoques basados en teledetección y SIG, cada uno con sus propias ventajas y limitaciones, antes de seleccionar cuidadosamente el método más adecuado para las características únicas de la ciudad y los objetivos del análisis posterior de LCZ.

Después de comparar y evaluar varias técnicas de mapeo de LCZ, se decidió modificar un modelo basado en SIG de alta resolución para obtener resultados más detallados y vincularlos con datos climáticos interpolados derivados de la red de sensores. Se tomó como base el método propuesto por Oliveira, et al. (2020a, 2020b), aunque se realizaron ajustes para incorporar información adicional del modelo digital de superficies que surge de los datos LIDAR y adaptar los rangos de algunas categorías. Este enfoque permitió mejorar tanto la resolución como la precisión de la clasificación, especialmente al enfocarse en un estudio específico. Al contrario que las clasificaciones propuestas por WUDAPT este modelo orientado a vectores permitió un detalle en la resolución que permitió reflejar mejor la variabilidad de espacios que también conforman las ciudades de tamaño mediano o pequeño. Espacios que difieren de la tipología de ciudad americana, asiática o capital europea.

Sin embargo, cabe destacar que este modelo aún no era aplicable a otras ciudades sin un riguroso proceso de validación y ajuste, lo cual superaba las capacidades actuales basadas en el conocimiento experto.

**Objetivo 5:** *Utilizar la modelización del clima urbano para verificar la precisión de las clasificaciones de LCZ al permitir la comprobación del comportamiento climático espacial y temporal de los diferentes espacios urbanos clasificados.*

La comprensión detallada del microclima local a través de la caracterización climática urbana basada en la distribución de las LCZ reveló cómo diversas características del entorno urbano influían en las temperaturas máximas y mínimas durante cada estación del año. Al analizar estas temperaturas en relación con las distintas clases de LCZ, se pudieron identificar patrones térmicos específicos asociados al uso del suelo y la morfología urbana. Patrones específicos que encajan con las descripciones de Stewart y Oke y que permitieron validar en cierta forma la adecuación del modelo de clasificación a la realidad urbana y su comportamiento térmico.

También permitió caracterizar la distribución térmica de la ciudad desde el punto de vista de las LCZ. Se compararon la clasificación con los valores de temperatura máxima y mínima en cada estación del año, lo que permitió sintetizar de manera efectiva las variaciones diurnas y anuales de temperatura. Se observó que las tipologías de áreas edificadas (LCZ 1 a 10) son las clases más cálidas debido al efecto que genera sobre el comportamiento térmico los espacios construidos. Mientras que las coberturas del suelo (LCZ A a G) sin el efecto de los edificios cuentan con una mayor variabilidad diurna, pero, a excepción de la clase E, adquieren valores de temperatura más bajos. Dentro de las áreas edificadas, las áreas urbanas compactas (LCZ 1 a 3) exhibían temperaturas más altas debido a la morfología urbana y a los suelos pavimentados, mientras que las áreas abiertas (LCZ 4 a 6) muestran temperaturas más bajas debido a una mayor presencia de vegetación y suelos no sellados. Sin embargo, las áreas compactas de baja altitud (LCZ 3) cuentan con temperaturas más bajas que las áreas abiertas de elevada y media altitud (LCZ 4 y 5), lo cual se atribuye a la presencia de edificios altos y su impacto en los flujos de viento principalmente. Clases edificadas, pero con edificaciones bajas (LCZ 8 a 10) con unas características urbanas muy homogéneas como los

polígonos industriales, las industrias o los suelos rurales urbanizados dispersos, muestran una variabilidad diurna entre la noche y el día más marcada que el resto de clases edificadas.

Las clases relacionadas con la vegetación (LCZ A a D) presentaban temperaturas más bajas en comparación con otras clases. Concretamente, las áreas con densidad arbórea registraban temperaturas inferiores, mientras que aquellas con matorrales y arbustos dispersos tendían a mostrar temperaturas más altas. Se observó una variabilidad estacional en las clases vegetales, aunque los bosques densos mostraban una menor variabilidad debido a la conservación de hojas durante el invierno. Las áreas con suelo desnudo o pavimentado (LCZ E) experimentaban temperaturas más elevadas durante el día y alcanzaban valores máximos durante la noche debido a su comportamiento radiativo.

Una vez alcanzados todos estos objetivos es necesario contrastar las hipótesis iniciales sobre el comportamiento térmico de la ciudad de Zaragoza y los métodos desarrollados para ello. Al igual que los objetivos estas hipótesis se comprobarán una a una argumentando la respuesta con los resultados obtenidos en la tesis.

En relación al comportamiento de la temperatura urbana en Zaragoza:

**Hipótesis 1:** *La temperatura urbana en Zaragoza muestra una variabilidad que se asemeja a los patrones típicos observados en otras ciudades, definidos por el efecto isla de calor urbano, aunque acentuada por la singularidad de los factores climáticos y geográficos característicos de la región. La alta resolución espacial y temporal de los datos climáticos permite discernir situaciones específicas, identificando patrones a nivel intraurbano del efecto isla de calor y destacando áreas más favorables a eventos climáticos.*

La caracterización climática revela patrones significativos en el comportamiento térmico de la ciudad, tanto a nivel espacial como temporal. Se confirma la presencia del efecto de la ICU, donde el área urbana se destaca como la zona más cálida, especialmente en comparación con las áreas rurales y elevadas. En el caso de la ciudad se acentúa en la margen derecha. Este fenómeno es común en muchas ciudades y se atribuye a la concentración de edificios, carreteras y otras estructuras que absorben y retienen el calor, junto con la escasez de áreas verdes que ayudarían a mitigarlo.

Además, se observa una variabilidad térmica dentro de la ciudad, con diferencias de temperatura entre diferentes áreas urbanas. Los barrios más antiguos y densamente construidos tienden a ser más cálidos, mientras que los barrios más recientes, con una planificación urbana más cuidadosa y más áreas verdes, registran temperaturas más bajas. Esta variabilidad también se extiende a las áreas rurales y polígonos industriales, donde la presencia de vegetación y el uso de determinados materiales de construcción pueden influir en los patrones térmicos.

Los resultados también destacan la influencia de factores climáticos locales, como la dinámica atmosférica y distintos meteoros, en la distribución de la temperatura urbana. Por ejemplo, se observa un desplazamiento de las zonas más cálidas hacia el sureste durante las temperaturas máximas, influenciado por el viento predominante del noroeste. Asimismo, se evidencia un aumento de las temperaturas durante el invierno, con diferencias más pronunciadas entre áreas urbanas y rurales, especialmente en las temperaturas mínimas y con situaciones de anticiclón.

La presencia de vegetación y suelo permeable se muestra como un factor crucial en la modulación de las temperaturas, especialmente durante las estaciones más cálidas y frías.

Las áreas con más vegetación tienden a tener temperaturas más bajas debido a la sombra y la evaporación, mientras que las áreas más pavimentadas y urbanizadas retienen más calor.

En resumen, los resultados del estudio confirman que la temperatura urbana en Zaragoza exhibe características típicas del efecto ICU, aunque influenciada por factores climáticos y geográficos específicos de la región. La alta resolución espacial y temporal de los datos climáticos utilizados permite identificar patrones intraurbanos y comprender mejor la variabilidad térmica en la ciudad.

**Hipótesis 2:** *El diseño de un control de calidad exhaustivo para redes de observación de alta resolución urbanas desempeña un papel esencial en el diseño y mejora de las redes climáticas intraurbanas. Este control permite obtener bases de datos de mayor precisión y utilidad para abordar los desafíos urbanos relacionados con el clima.*

El estudio detalla la importancia del diseño de un control de calidad exhaustivo para las redes de observación de alta resolución en entornos urbanos, especialmente en el análisis climático. Se resalta que este proceso desempeña un papel fundamental en la obtención de bases de datos climáticas más precisas y útiles para abordar los desafíos urbanos relacionados con el clima.

Se destaca que el control de calidad no solo elimina observaciones que no se ajustan a la variabilidad natural del clima, sino que también ha demostrado ser una herramienta valiosa para identificar situaciones atmosféricas específicas, como niebla, convección y precipitación convectiva, que a menudo no están incluidas en el seguimiento meteorológico convencional. Esta perspectiva novedosa para identificar patrones atmosféricos específicos, que no ha sido observada en otros estudios de clima urbano similares, podría ser de gran utilidad en simulaciones numéricas y modelos de predicción atmosférica, mejorando la calidad de los datos climáticos y revelando patrones atmosféricos detallados, con posibles implicaciones significativas para la comprensión y predicción de fenómenos climáticos en entornos urbanos ya que en muchas bases de datos este tipo de observaciones se desprecian.

Además, se señala que la importancia de utilizar bases de datos climáticas urbanas de alta calidad radica, sobre todo, en las diversas oportunidades que ofrece. No solo en el caso de la investigación y el avance en distintas disciplinas científicas, sino que también tiene aplicaciones cruciales en áreas como la planificación y la ordenación territorial urbana.

**Hipótesis 3:** *La modelización espacial de la temperatura urbana, al incorporar covariables no convencionales como datos derivados de la teledetección o de los SIG, permite una mejor comprensión y predicción de los patrones térmicos en zonas urbanas, especialmente durante eventos extremos (olas de calor, tormentas o viento) o situaciones sinópticas concretas.*

Los resultados obtenidos del análisis de modelización espacial de la temperatura urbana contrastan parcialmente la hipótesis planteada sobre la incorporación de covariables no convencionales en la predicción de patrones térmicos en zonas urbanas.

Si bien se reconoce que el *co-kriging*, un método geoestadístico popular utilizado en el estudio, permite utilizar información de otras variables relacionadas para mejorar la precisión de la interpolación y reducir la incertidumbre en las estimaciones. Se identifican desafíos específicos en la modelización de la temperatura urbana en Zaragoza. Se observa una ligera sobreestimación en las predicciones, especialmente en la temperatura máxima, lo que sugiere que el modelo tiende a prever valores ligeramente superiores a los observados. Además, se evidencia una mayor variabilidad en las temperaturas extremas, en comparación con la

temperatura media, lo que indica la complejidad de interpolar valores más abruptos y extremos en la modelación de variables térmicas. Los resultados obtenidos en días específicos bajo situaciones atmosféricas concretas y eventos meteorológicos destacados, como lluvias torrenciales o flujos de viento muy intenso, muestran como el modelo tiene ciertas limitaciones.

El análisis temporal del error revela un aumento durante los meses de invierno, posiblemente debido a la menor disponibilidad de imágenes para crear covariables y a la complejidad climática asociada a estos meses. Aunque se registra una consistencia en el rendimiento del modelo a lo largo del tiempo, se observa un sesgo temporal con mayores errores al principio de la serie temporal, atribuible a la falta de datos originales durante esos primeros años.

Si bien el modelo de interpolación *cokriging* muestra una consistencia general en la realización de predicciones precisas de temperatura en Zaragoza, también enfrenta desafíos específicos en la captura de la variabilidad térmica urbana y la predicción de valores extremos. Esto sugiere que la incorporación de covariables no convencionales puede mejorar la comprensión y predicción de los patrones térmicos en zonas urbanas, pero también destaca la necesidad de abordar las limitaciones y desafíos asociados con estos enfoques de modelización.

**Hipótesis 4:** *Los modelos de clasificación generalistas de las LCZ no son aplicables de manera efectiva a estudios de detalle de clima urbano en ciudades medias o pequeñas. En cambio, una clasificación personalizada proporciona resultados significativamente más confiables y precisos en la caracterización de las LCZ, ya que considera las particularidades únicas de cada entorno urbano y su influencia en el microclima local.*

Los datos y la información extraída de los resultados apoyan la hipótesis de que los modelos de clasificación generalistas de las LCZ no son efectivos para estudios de detalle de clima urbano en ciudades medianas o pequeñas. Por el contrario, una clasificación personalizada, adaptada a las particularidades únicas de cada entorno urbano, proporciona resultados más confiables y precisos en la clasificación de las LCZ. El estudio realizado en Zaragoza demostró la necesidad de desarrollar una clasificación propia para la ciudad, ya que ninguna de las metodologías existentes proporcionaba resultados satisfactorios. En lugar de buscar un método generalizado replicable en diferentes contextos urbanos, se priorizó obtener una clasificación que reflejara de manera precisa la realidad urbana de Zaragoza. Este enfoque permitió realizar un análisis climático asociado a las clases de LCZ, que no solo enriquecerá el conocimiento climático y urbano, sino que también servirá como apoyo en la planificación urbana de la ciudad.

La metodología seleccionada se basó en GIS y mantuvo un carácter vectorial para permitir un análisis detallado, adaptándose al tamaño de la ciudad y a la disponibilidad de datos. Se realizaron modificaciones al método original, como la incorporación de datos de altura de edificaciones y coberturas vegetales a través de modelos digitales de superficies, lo que permitió una mayor precisión en la clasificación urbana. Los resultados obtenidos mostraron modificaciones significativas en las clases relacionadas con edificaciones residenciales, polígonos industriales y coberturas naturales, lo que reflejó con mayor detalle las características urbanas y climáticas de Zaragoza. Aunque el modelo desarrollado no es extrapolable a otras ciudades sin un proceso de validación adicional, se demostró su eficacia en el análisis específico de la ciudad.

La caracterización climática urbana basada en la distribución de las LCZ proporcionó una comprensión detallada de cómo diferentes características del entorno urbano influyen en el microclima local. Se identificaron patrones térmicos específicos asociados a las características del uso del suelo y la morfología urbana, lo que validó la técnica de mapeo de LCZ utilizada.

## 6.2. Aportaciones de la tesis y futuras líneas de investigación

En esta tesis doctoral se ha desarrollado un control de calidad diseñado específicamente para datos de redes urbanas de sensores. Este tipo de redes se caracterizan por generar un elevado volumen de información en un espacio local no muy extenso, si se compara con las redes de observación convencionales. A pesar de que ya existen muchos controles de calidad sobre datos climáticos, en el caso de las redes de sensores urbanas han sido poco claros y/o insuficientes. Este control destaca por ser un método sencillo y eficaz, aunque necesite de interpretación por parte del investigador en algunos apartados. Las aportaciones más relevantes del mismo son:

- Obtiene bases de datos horarias con un volumen importante de información, donde se asegura la fiabilidad y precisión de las mediciones registradas;
- permite la identificación de situaciones sinópticas y la incorporación de datos de temperatura y humedad bajo eventos meteorológicos y atmosféricos, que en otro tipo de controles habrían sido eliminados;
- facilita que cualquier persona pueda generar una base de datos horaria de temperatura y humedad para ámbitos urbanos, adecuando los parámetros no automatizados a su zona de estudio.

Además, se desarrolló un modelo de interpolación diaria de las temperaturas máximas, medias y mínimas, con el fin de especializar estas variables térmicas en toda la ciudad de Zaragoza y su entorno periurbano y rural circundante. A pesar de la multitud de modelos de interpolación disponibles para datos climáticos, se optó por un enfoque geoestadístico de computación más sencilla, ya que se adaptaba mejor a las necesidades específicas del estudio y a la disponibilidad de datos en entornos urbanos. La utilización de *cokriging* permitió la incorporación de covariables en el proceso de interpolación, lo que mejoró la capacidad explicativa de las características urbanas. Este enfoque aportó una serie de innovaciones:

- Estima diversas variables térmicas a escala diaria con una resolución espacial de 100 metros, proporcionando una base de datos de temperatura del aire con un nivel de detalle y precisión sin precedentes en ninguna otra ciudad del mundo;
- este enfoque no solo captura la variabilidad de la temperatura urbana a diferentes escalas temporales, sino que también;
- incorpora una serie de covariables explicativas que reflejan las características de la morfología urbana, su estructura y las principales coberturas. Estas variables se relacionan con el comportamiento de los diversos microclimas urbanos, integrando información de teledetección y SIG en un único modelo de interpolación;

- incluye diversas métricas de incertidumbre y precisión, algunas de las cuales están también espacializadas. Esto proporciona información crucial sobre la fiabilidad de los valores interpolados, mejorando así la confianza en los resultados obtenidos.

Por otro lado, los resultados de la interpolación fueron agrupados para llevar a cabo una caracterización climática exhaustiva que permitió un análisis detallado de la temperatura en Zaragoza. Este enfoque reveló aspectos climáticos que, hasta el momento, no habían sido posibles de discernir debido a la alta resolución espacial y temporal de los datos utilizados:

- La distribución espacial de la temperatura varía según la variable térmica analizada. Las temperaturas mínimas se concentran en el centro urbano, disminuyendo hacia áreas menos densamente construidas. Las temperaturas medias tienen una distribución similar, pero con un rango de temperatura menor. Las temperaturas máximas se desplazan hacia el sureste de las zonas más cálidas de la ciudad.
- La interpolación revela la diversidad de temperaturas dentro de Zaragoza y en su periferia. Los barrios más antiguos y densamente construidos presentan temperaturas más altas, pero también cuentan con áreas verdes que reducen la temperatura. Los barrios más recientes, con una mayor planificación urbana y más zonas ajardinadas, registran temperaturas más bajas. Las áreas rurales y los polígonos industriales muestran patrones térmicos distintos dependiendo de su ubicación, la densidad de edificación y el momento del día.
- Los mapas estacionales destacan 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 predominan en el valle del Ebro y el efecto de la isla de calor urbana se difumina. En otoño y primavera, las diferencias de temperatura son menos marcadas.
- En la escala mensual, se observa una tendencia más cálida de abril a septiembre y otra más fría de octubre a febrero.
- Los mapas diarios revelan cómo fenómenos atmosféricos y situaciones sinópticas específicas impactan en la temperatura urbana. Durante nieblas y nevadas, todas las variables térmicas descienden y las diferencias entre áreas urbanas y rurales disminuyen. El flujo del viento y la precipitación también afectan la distribución de la temperatura según dirección, intensidad y momento del día. Mientras que las olas de calor pueden en algunas zonas intensificar el fenómeno de ICU.

Asimismo, el desarrollo de un método de clasificación de LCZ adaptado específicamente a las características de Zaragoza proporcionó un mapa de gran detalle y mayor fiabilidad en comparación con experiencias anteriores basadas en metodologías generales que no se ajustaban al entorno urbano ni al tamaño de la ciudad. Esta nueva metodología y el mapa resultante constituyen una contribución única, ya que previamente no se había realizado ninguna clasificación específica para la ciudad. Al relacionarse con los datos térmicos interpolados, no solo validaron la clasificación al mostrar un comportamiento térmico adecuado a las descripciones de Stewart y Oke, sino que también permitió la caracterización climática de las LCZ y los diversos microclimas urbanos.

Esta tesis marca el inicio de una trayectoria futura hacia una comprensión más profunda del clima en los entornos urbanos. Para avanzar en esta dirección y ampliar el alcance de la investigación, se delimitan diversas líneas de investigación a considerar:

En primer lugar, se propone la continuidad y expansión de la red de sensores urbanos existente en Zaragoza. Este esfuerzo implica tanto la persistencia en la recopilación de datos como su filtrado a través del riguroso control de calidad, desarrollado para garantizar la precisión y fiabilidad de la información obtenida. Además, los resultados obtenidos permiten identificar zonas dentro del entorno urbano donde se justifique la instalación de nuevos sensores, especialmente en áreas poco representadas como casas bajas, y cubiertas del entorno como las zonas de cultivo, las áreas ribereñas o las zonas esteparias circundantes.

Para facilitar la reproducibilidad y la aplicación de estos procesos en otras ciudades, se sugiere implementar todo el proceso de control de calidad, interpolación y clasificación de LCZ en lenguaje R. Esto no solo facilitará la reproducción de los resultados obtenidos en Zaragoza, sino que también establecerá una metodología estándar que pueda ser aplicada en diferentes contextos urbanos.

En relación al punto anterior, se propone el desarrollo de un modelo de clasificación estandarizado y automatizado de LCZ en lenguaje R, basado en el método adaptado utilizado en el estudio. Este modelo, alimentado por los datos obtenidos a través de la red de sensores urbanos y que fusiona las ventajas de los métodos de teledetección y SIG. Esto es especialmente relevante para los espacios que las metodologías actuales no registran adecuadamente, lo que contribuirá significativamente a una comprensión más completa de los microclimas urbanos.

Una vez establecida una base sólida, se sugiere desarrollar una escala temporal más detallada, como la interpolación de datos climáticos a nivel horario. Esto permitirá un análisis más exhaustivo del ciclo diurno de la temperatura y una monitorización más precisa de eventos climáticos extremos en diferentes áreas de la ciudad. Además, se propone ampliar la caracterización climática más allá de la temperatura, incluyendo variables como la humedad, el viento y la precipitación. Estos factores son cruciales para comprender la distribución térmica de la ciudad y enriquecerán la caracterización climática urbana.

Por supuesto, con la base de datos de interpolación diaria a una resolución de 100 metros en la ciudad, llega el momento de integrar esta información junto a otras variables. La alta resolución temporal y espacial de estos datos permite su aplicación en una amplia gama de estudios relacionados con el entorno urbano y la planificación. En particular, la vulnerabilidad de la población urbana al clima puede beneficiarse enormemente de estos mapas de temperatura. No solo revelan qué barrios son más afectados por eventos térmicos específicos, sino que también permiten un análisis detallado a nivel intraurbano de edificios y espacios. Además, los estudios sobre la relación entre clima y salud se verán fortalecidos con esta información. Ya se ha documentado el impacto negativo de las altas y bajas temperaturas urbanas en la salud de la población, especialmente en personas mayores y niños. Actualmente, no existe una red tan completa, con casi 10 años de datos y un número significativo de sensores, no solo en España sino también en el mundo, que permita un análisis tan detallado. Esto posibilita el estudio de riesgos relativos a ciertas enfermedades cardiorrespiratorias que hasta ahora solo se han abordado a nivel de ciudad y nunca con tanto detalle a nivel de barrio o zonas básicas de salud. La combinación de tecnología de vanguardia, metodologías robustas y una colaboración interdisciplinaria promete abrir nuevas fronteras en la investigación climática urbana.

## Referencias

- Acero, J. Á., Arrizabalaga, J., Kupski, S., & Katzschner, L. (2013). Urban heat island in a coastal urban area in northern Spain. *Theoretical and Applied Climatology*, 113(1–2), 137–154. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0774-z>
- Adão, F., Fraga, H., Fonseca, A., Malheiro, A. C., & Santos, J. A. (2023). The Relationship between Land Surface Temperature and Air Temperature in the Douro Demarcated Region, Portugal. *Remote Sensing*, 15(22), 5373. <https://doi.org/10.3390/rs15225373>
- Al-Obaidi, I., Rayburg, S., Pólrolniczak, M., & Neave, M. (2021). Assessing the Impact of Wind Conditions on Urban Heat Islands in Large Australian Cities. *Journal of Ecological Engineering*, 22(11), 1–15. <https://doi.org/10.12911/22998993/142967>
- Albero, V., & Calvo, F. (1981). Estudio comparativo del viento en los Observatorios de Valencia - Viveros y Valencia - Aeropuerto. In A. Blanco (Ed.), *Avances sobre la investigación en Bioclimatología (VII Simposio de Bioclimatología)* (Centro de, pp. 525–530).
- Alcofarado, M. J., & Matzarakis, A. (2014). Planning with urban climate in different climatic zones. *Geographica*, 57, 5. [https://doi.org/10.26754/ojs\\_geoph/geoph.201057808](https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.201057808)
- Alcoforado, M. J., Andrade, H., Lopes, A., & Vasconcelos, J. (2009). Application of climatic guidelines to urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 90(1–2), 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.006>
- Alcoforado, M. J., Lopes, A., Alves, E., & Canário, P. (2014). Lisbon Heat Island. *Finisterra*, XLIX(98), 61–80.
- Alerskans, E., Lussana, C., Nipen, T. N., & Seierstad, I. A. (2022). Optimizing Spatial Quality Control for a Dense Network of Meteorological Stations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 39(7), 973–984. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0184.1>
- Alexander, P. J., Fealy, R., & Mills, G. M. (2016). Simulating the impact of urban development pathways on the local climate: A scenario-based analysis in the greater Dublin region, Ireland. *Landscape and Urban Planning*, 152, 72–89. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.02.006>
- Algaba, A., Muñoz, F. M., & Solana, A. M. (1993). Ciutat i medi ambient : P'illa de calor urbana a l'Hospitalet. *Notes de Geografia Física*, 22, 77–88. <http://www.museul-h.cat/utills/obreFitxer.ashx?Fw9EVw48XS6XF7GjoOhTdMwqazCtqazAAiBygu9PZTAsqazADB6NmFWxyp6CZVjJsNRj3erag>
- Alizadeh, O. (2022). Advances and challenges in climate modeling. *Climatic Change*, 170(1–2), 18. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03298-4>
- Almendros, M. Á. (1990). *Aspectos climáticos de los parques y jardines de Madrid*. Universidad Autónoma de Madrid.
- Almendros, M. Á. (1992). Aspectos climáticos del Parque del Retiro (Madrid). *Estudios Geográficos*, 53(207), 217–239. <https://doi.org/10.3989/egeogr.1992.i207.217>
- Almendros, M. Á. (1999). Análisis térmico de los pequeños parques urbanos madrileños. In

- J. M. Raso Nadal & J. Martín-Vide (Eds.), *I Congreso AEC. La climatología española en los albores del siglo XXI* (Asociación, pp. 33–42). Editorial Oikos-Tau.
- Almendros, M. Á. (2004). Modelo para la elaboración de un mapa urbano de isotermas: el caso de Madrid. In *Historia, clima y paisaje : estudios geográficos en memoria del profesor Antonio López Gómez* (Universita, pp. 285–294).
- Almendros, M. Á., & Fernández-García, F. (1996). La precipitación y el viento como riesgos climáticos urbanos: El caso de Madrid. *Territorium*, 3, 25–34. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5773208.pdf>
- Almendros, M. Á., & López-Gómez, A. (1995). La isla de calor en Madrid y las situaciones sinópticas. *Estudios Geográficos*, 56(219), 207–221. <https://doi.org/10.3989/egeogr.1995.i219.207>
- Alomar Garau, G., & Llop Garau, J. (2018). La isla de calor urbana de Palma (Mallorca, Islas Baleares): avance para el estudio del clima urbano en una ciudad litoral mediterránea. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 78, 392–418. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6553120.pdf>
- Alonso García, M. S., Fidalgo Martínez, M. R., & Labajo-Salazar, J. L. (2007). The urban heat island in Salamanca (Spain) and its relationship to meteorological parameters. *Climate Research*, 34, 39–46. <https://doi.org/10.3354/cr034039>
- Alonso García, M. S., Labajo-Salazar, J. L., & Fidalgo Martínez, M. R. (2003). Characteristics of the urban heat island in the city of Salamanca, Spain. *Atmósfera*, 16(3), 137–148.
- Alvarez, I., Quesada-Ganuza, L., Briz, E., & Garmendia, L. (2021). Urban Heat Islands and Thermal Comfort: A Case Study of Zorrotzaurre Island in Bilbao. *Sustainability*, 13(11), 6106. <https://doi.org/10.3390/su13116106>
- Andrés-López, G. (2019). El significado de los espacios de actividad económica en la estructura urbana de las ciudades medias españolas. *Ciudades*, 22, 01–22. <https://doi.org/10.24197/ciudades.22.2019.01-22>
- Aram, F., Solgi, E., Baghaee, S., Higuera-García, E., Mosavi, A., & Band, S. S. (2020). How parks provide thermal comfort perception in the metropolitan cores; a case study in Madrid Mediterranean climatic zone. *Climate Risk Management*, 30, 100245. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100245>
- Aram, F., Solgi, E., Higuera-García, E., & Mosavi, A. (2020). Urban heat resilience at the time of global warming: evaluating the impact of the urban parks on outdoor thermal comfort. *Environmental Sciences Europe*, 32(1), 117. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00393-8>
- Aram, F., Solgi, E., Higuera-García, E., Mosavi, A., & Várkonyi-Kóczy, A. R. (2019). The Cooling Effect of Large-Scale Urban Parks on Surrounding Area Thermal Comfort. *Energies*, 12(20), 3904. <https://doi.org/10.3390/en12203904>
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>

- Arroyo-Ilera, F. (2001). Antonio López Gómez. *Boletín de La Real Sociedad Geográfica, Tomo CXXXV*, 11–44. <https://realsociedadgeografica.com/wp-content/uploads/2018/02/BOLETIN-RSG-2001-2002-CXXXVII-CXXXVIII.pdf>
- Arroyo-Ilera, F., & Fernández-García, F. (2018). ANTONIO LÓPEZ GÓMEZ y el desarrollo de la Climatología en España. *Encuentros Multidisciplinares*, 20(58), 10–14. [https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/684208/EM\\_58\\_14.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/684208/EM_58_14.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Aryaputera, A. W., Yang, D., Zhao, L., & Walsh, W. M. (2015). Very short-term irradiance forecasting at unobserved locations using spatio-temporal kriging. *Solar Energy*, 122, 1266–1278. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.023>
- Ascaso, A. (1969). Contaminación y contaminadores atmosféricos. El problema en Zaragoza. *Las Ciencias*, 1, 22–34.
- Atkinson, B. W. (2003). Numerical Modelling of Urban Heat-Island Intensity. *Boundary-Layer Meteorology*, 109(3), 285–310. <https://doi.org/10.1023/A:1025820326672>
- Auer, A. H. (1978). Correlation of Land Use and Cover with Meteorological Anomalies. *Journal of Applied Meteorology*, 17(5), 636–643. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)017<0636:COLUAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)017<0636:COLUAC>2.0.CO;2)
- Azorín-Molina, C., & Martín-Vide, J. (2007). Methodological approach to the study of the daily persistence of the sea breeze in Alicante (Spain). *Atmosfera*, 20(1), 57–81.
- Balchin, W. G. V., & Pye, N. (1947). A micro-climatological investigation of bath and the surrounding district. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 73(317–318), 297–323.
- Ballester-Olmos, J. F. (1991). El medio ambiente urbano y la vegetación. Estudio de la situación de la ciudad de Valencia. In *I curso de paisajismo y diseño en jardinería* (1st ed., Vol. 1, p. 20). Universitat Politècnica de València.
- Ballester-Olmos, J. F. (1993). Interacciones de la vegetación urbana con el microclima, la polución atmosférica y el hombre. In E. Salvo Tierra & J. C. García Verdugo (Eds.), *Naturaleza urbanizada: estudios sobre el verde en la ciudad* (Univerisda, pp. 79–128).
- Banks, R. F., Tiana-Alsina, J., Rocadenbosch, F., & Baldasano, J. M. (2015). Performance Evaluation of the Boundary-Layer Height from Lidar and the Weather Research and Forecasting Model at an Urban Coastal Site in the North-East Iberian Peninsula. *Boundary-Layer Meteorology*, 157(2), 265–292. <https://doi.org/10.1007/s10546-015-0056-2>
- Barrao, S., Cuadrat, J. M., Saz, M. Á., Serrano-Notivoli, R., & Tejedor, E. (2019). Olas de calor y olas de frío en la ciudad de Zaragoza (España) y sus efectos sobre las enfermedades cardiorrespiratorias, 2011-2015. *Crisis y Espacios de Oportunidad. Retos Para La Geografía*, 343–357. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7344875>
- 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>

- Barrao, S., Serrano-Notivoli, R., Saz, M. Á., & Cuadrat, J. M. (2021). Análisis comparado de la temperatura de superficie y temperatura del aire de la isla de calor urbano de Zaragoza. *Geografía, Cambio Global y Sostenibilidad. Comunicaciones Del XXVII Congreso de La Asociación Española de Geografía.: Tomo I: Naturaleza, Transformación Territorial y Paisaje, 2021, Págs. 399-415*, 399–415.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8432422>
- Barrao, S., Serrano-Notivoli, R., Saz, M. Á., & Cuadrat, J. M. (2022). Variabilidad estacional de la ICU en Zaragoza (España) mediante el uso de una red climática urbana. In A. Martí Ezpeleta, N. Lorenzo González, D. Royé, & A. Díaz-Poso (Eds.), *Retos del cambio climático: impactos, mitigación y adaptación* (pp. 401–411). Asociación Española de Climatología; Agencia Estatal de Meteorología.
- 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>
- Bassett, R., Young, P. J., Blair, G. S., Cai, X.-M., & Chapman, L. (2020). Urbanisation's contribution to climate warming in Great Britain. *Environmental Research Letters*, 15(11), 114014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbb51>
- Bechtel, B., Alexander, P., Beck, C., Böhner, J., Brousse, O., Ching, J., Demuzere, M., Fonte, C., Gál, T., Hidalgo, J., Hoffmann, P., Middel, A., Mills, G., Ren, C., See, L., Sismanidis, P., Verdonck, M. L., Xu, G., & Xu, Y. (2019). Generating WUDAPT Level 0 data – Current status of production and evaluation. *Urban Climate*, 27(December 2017), 24–45. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.10.001>
- Bechtel, B., Alexander, P., Böhner, J., Ching, J., Conrad, O., Feddema, J., Mills, G., See, L., & Stewart, I. D. (2015). Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1), 199–219. <https://doi.org/10.3390/ijgi4010199>
- 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 Climate*, 25(April), 152–166. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.04.007>
- Bejarano Mederos, M. C. (2002). Los estudios de la isla de calor en Madrid. *Estudios Geográficos*, 63(248–249), 775–788. <https://doi.org/10.3989/EGEOGR>
- Bello-Fuentes, V. (1995). La isla de calor nocturna y los usos del suelo en Alcalá de Henares. *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*, 15, 119–130.  
<https://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/AGUC9595220119A>
- Berdalet, E., Marrasé, C., & Pelegrí, J. L. (2020). *Resumen sobre la Formación y Consecuencias de la Borrasca Gloria (19-24 enero 2020)*. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/12496>
- Berg, H., & Metzler, H. (1934). Temperaturemessfahrten durch das Gebiet der Stadt Hannover. *Meteorologische Zeitschrift, Bioklimatische Beiblätter*, 1, 111–114.

- Bernard, J., Bocher, E., Petit, G., & Palominos, S. (2018). Sky View Factor Calculation in Urban Context: Computational Performance and Accuracy Analysis of Two Open and Free GIS Tools. *Climate*, 6(3), 60. <https://doi.org/10.3390/cli6030060>
- Berruete-Martínez, F., Berruete-Martínez, L., & Gimeno-Tomás, B. (2010). *Redescubrir el Arrabal Viejo de Zaragoza* (pp. 1–60). Zaragoza Vivienda.
- Bjerknes, V. (1921). The Meteorology of the Temperate Zone and the General Atmospheric Circulation. *Monthly Weather Review*, 49(1), 1–3. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1921\)49<1:TMOTTZ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1921)49<1:TMOTTZ>2.0.CO;2)
- Boegh, E., Soegaard, H., Broge, N., Hasager, C. B., Jensen, N. O., Schelde, K., & Thomsen, A. (2002). Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), 179–193. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00342-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00342-X)
- Borrasca Gloria. (2020). Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). [https://www.aemet.es/es/conocermas/borrascas/2019-2020/estudios\\_e\\_impactos/gloria](https://www.aemet.es/es/conocermas/borrascas/2019-2020/estudios_e_impactos/gloria)
- Bouzekri, S., Lasbet, A. A., & Lachehab, A. (2015). A New Spectral Index for Extraction of Built-Up Area Using Landsat-8 Data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 43(4), 867–873. <https://doi.org/10.1007/s12524-015-0460-6>
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Brown, R. D., Vanos, J., Kenny, N., & Lenzholzer, S. (2015). Designing urban parks that ameliorate the effects of climate change. *Landscape and Urban Planning*, 138, 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.006>
- Brunckhorst, B., Hill, R., Mansuri, G., Nguyen, T., & Doan, M. (2023). *Climate and Equity: A Framework to Guide Policy Action*. Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/39952>
- Brunet-India, M. (1989). *Los efectos de la urbanización en el clima local. Un ensayo de climatología urbana: el caso de Tarragona* [Universitat de Barcelona]. <https://doi.org/84-7875-250-1>
- Brunet-India, M. (1993). El comportamiento de la humedad relativa en la ciudad de Tarragona y sus alrededores. In *Aportaciones en homenaje al profesor Luis Miguel Albertosa* (Diputació, pp. 15–40). F. Sugrañes Editors Societat Anònima.
- Brunet-India, M. (2001). El comportamiento de la humedad relativa en la ciudad de Tarragona y sus alrededores. In *Proyectos y métodos actuales en climatología* (1st ed., pp. 15–40).
- Budel, A., & Wolf, J. (1933). Münchener stadtklimatische Studien. *Zeitschrift Für Angewandte Meteorologie*, 49, 4–10.
- Burger, M., Gubler, M., Heinimann, A., & Brönnimann, S. (2021). Modelling the spatial pattern of heatwaves in the city of Bern using a land use regression approach. *Urban Climate*, 38, 100885. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100885>

- Caballero, E. (2004). Microclimas urbanos: La importancia de los materiales. In J. C. García Codron, C. Diego Liaño, P. Fdez. de Arróyabe Hernández, C. Garmendia Pedraja, & D. Rasilla-Álvarez (Eds.), *IV Congreso AEC. El clima entre el mar y la montaña* (pp. 571–581). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria.
- Calvo-Palacios, J. L. (1976). Aportación metodológica al estudio geográfico del microclima urbano. *Boletín de La Real Sociedad de Geografía*, 112(1), 95–110.  
<https://realsociedadgeografica.com/boletines/Tomo CXII - 1976 - Parte 1.pdf>
- Cañada-Torrecilla, M. R., & Almendros, M. Á. (1998). Relación entre la intensidad de la isla de calor de Madrid y las variables del sondeo. In F. Fernández-García, E. Galán-Gallego, & M. R. Cañada-Torrecilla (Eds.), *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas* (1st ed., pp. 257–270). Parteluz.
- Cañada-Torrecilla, M. R., & Fernández-García, F. (2003). La obra de López Gómez y su influencia en la evolución reciente de la climatología española. In A. J. Pérez-Cueva, E. López-Baeza, & J. Tamayo-Carmona (Eds.), *En memoria de D. Antonio López Gómez* (Garmas Imp, pp. 115–128). Asociación Española de Climatología (AEC).
- Cañada-Torrecilla, M. R., Galán-Gallego, E., & Fernández-García, F. (1998). *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas* (R. Cañada-Torrecilla, E. Galán-Gallego, & F. Fernández-García (Eds.); Parteluz). Parteluz.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/extlib?codigo=2506>
- Cano, J. L., & Maqueda, G. (1984). Estudio de las modificaciones locales del régimen de viento modificadas por la construcción de edificios. *Revista Geofísica*, 40, 93–100.
- Carmona, R., Díaz-Jiménez, J., Mirón Pérez, I. J., Ortiz, C., Luna, M. Y., & Linares, C. (2016). Mortality attributable to extreme temperatures in Spain: A comparative analysis by city. *Environment International*, 91, 22–28.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.018>
- Carreras Verdaguer, C., Marín Ramos, M., Martín-Vide, J., Moreno-García, M. C., & Sabi Bonastre, J. (1990). Modificaciones térmicas en las ciudades: avance sobre la Isla de Calor en Barcelona. *Documents d'anàlisi Geogràfica*, 17, 51–77.  
<https://ddd.uab.cat/record/17330>
- Carvlin, G. N., Lugo, H., Olmedo, L., Bejarano, E., Wilkie, A., Meltzer, D., Wong, M., King, G., Northcross, A., Jerrett, M., English, P. B., Hammond, D., & Seto, E. (2017). Development and field validation of a community-engaged particulate matter air quality monitoring network in Imperial, California, USA. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(12), 1342–1352.  
<https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1369471>
- Casas-Castillo, M. C., Rodríguez, R., & Redaño, Á. (2010). Analysis of extreme rainfall in Barcelona using a microscale rain gauge network. *Meteorological Applications*, 17(1), 117–123. <https://doi.org/10.1002/met.166>
- Caselles Miralles, V., López-García, M. J., Meliá, J., & Pérez-Cueva, A. J. (1991). Analysis of the heat-island effect of the city of Valencia, Spain, through air temperature transects and NOAA satellite data. *Theoretical and Applied Climatology*, 43(4), 195–203.  
<https://doi.org/10.1007/BF00867455>

- Caselles Miralles, V., López-García, M. J., Meliá, J., & Pérez Cueva, A. . (1989). El efecto de isla termica de la ciudad de valencia obtenido a partir de transectos e imagenes NOAA-AVHRR. In C. Antón Pacheco & J. L. Labrandero (Eds.), *III Reunión Científica del Grupo de Trabajo de Teledetección* (pp. 259–269). Instituto Tecnológico GeoMinero de España - Asociación Española de Teledetección.
- Chandler, T. J. (1965). *The Climate of London*. Hutchinson.
- 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>
- Chapman, W. L., & Walsh, J. E. (2007). A Synthesis of Antarctic Temperatures. *Journal of Climate*, *20*(16), 4096–4117. <https://doi.org/10.1175/JCLI4236.1>
- Chemel, C., & Sokhi, R. S. (2012). Response of London’s Urban Heat Island to a Marine Air Intrusion in an Easterly Wind Regime. *Boundary-Layer Meteorology*, *144*(1), 65–81. <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9705-x>
- 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>
- Chen, X., & Yang, J. (2022). Urban climate monitoring network design: Existing issues and a cluster-based solution. *Building and Environment*, *214*, 108959. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108959>
- Ching, J., Aliaga, D., Mills, G., Masson, V., See, L., Neophytou, M., Middel, A., Baklanov, A., Ren, C., Ng, E., Fung, J., Wong, M., Huang, Y., Martilli, A., Brousse, O., Stewart, I., Zhang, X., Shehata, A., Miao, S., ... Niyogi, D. (2019). Pathway using WUDAPT’s Digital Synthetic City tool towards generating urban canopy parameters for multi-scale urban atmospheric modeling. *Urban Climate*, *28*, 100459. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100459>
- Ching, J., Mills, G., Bechtel, B., See, L., Feddema, J., Wang, X., Ren, C., Brousse, O., Martilli, A., Neophytou, M., Mouzourides, P., Stewart, I. D., Hanna, A., Ng, E., Foley, M., Alexander, P., Aliaga, D., Niyogi, D., Shreevastava, A., ... Theeuwes, N. E. (2018). WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *99*(9), 1907–1924. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0236.1>
- Cho, D., Yoo, C., Im, J., Lee, Y., & Lee, J. (2020). Improvement of spatial interpolation accuracy of daily maximum air temperature in urban areas using a stacking ensemble technique. *GIScience & Remote Sensing*, *57*(5), 633–649. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1766768>
- Chung, J., Lee, Y., Jang, W., Lee, S., & Kim, S. (2020). Correlation Analysis between Air Temperature and MODIS Land Surface Temperature and Prediction of Air Temperature Using TensorFlow Long Short-Term Memory for the Period of

- Occurrence of Cold and Heat Waves. *Remote Sensing*, 12(19), 3231.  
<https://doi.org/10.3390/rs12193231>
- Conlon, K. C., Mallen, E., Gronlund, C. J., Berrocal, V. J., Larsen, L., & O'Neill, M. S. (2020). Mapping Human Vulnerability to Extreme Heat: A Critical Assessment of Heat Vulnerability Indices Created Using Principal Components Analysis. *Environmental Health Perspectives*, 128(9). <https://doi.org/10.1289/EHP4030>
- 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>
- Cook, M. J. (2014). *Product, Atmospheric Compensation for a Landsat Land Surface Temperature* [Rochester Institute of Technology,]. <https://scholarworks.rit.edu/theses/8513>
- Cook, M. J., Schott, J., Mandel, J., & Raqueno, N. (2014). Development of an Operational Calibration Methodology for the Landsat Thermal Data Archive and Initial Testing of the Atmospheric Compensation Component of a Land Surface Temperature (LST) Product from the Archive. *Remote Sensing*, 6(11), 11244–11266.  
<https://doi.org/10.3390/rs61111244>
- Costello, A., Abbas, M., Allen, A., Ball, S., Bell, S., Bellamy, R., Friel, S., Groce, N., Johnson, A., Kett, M., Lee, M., Levy, C., Maslin, M., McCoy, D., McGuire, B., Montgomery, H., Napier, D., Pagel, C., Patel, J., ... Patterson, C. (2009). Managing the health effects of climate change. *The Lancet*, 373(9676), 1693–1733.  
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(09\)60935-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(09)60935-1)
- Cotlier, G. I., & Jimenez, J. C. (2022). The Extreme Heat Wave over Western North America in 2021: An Assessment by Means of Land Surface Temperature. *Remote Sensing*, 14(3), 561. <https://doi.org/10.3390/rs14030561>
- Coutts, A., Beringer, J., & Tapper, N. (2010). Changing Urban Climate and CO<sub>2</sub> Emissions: Implications for the Development of Policies for Sustainable Cities. *Urban Policy and Research*, 28(1), 27–47. <https://doi.org/10.1080/08111140903437716>
- Cuadrat, J. M. (1989). Las oscilaciones climáticas recientes en Zaragoza (1865-1984). *Geographica*, 26, 53. [https://doi.org/10.26754/ojs\\_geoph/geoph.1989261905](https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1989261905)
- Cuadrat, J. M. (1993). Los climas urbanos en el Valle del Ebro. In A. López-Gómez (Ed.), *El clima de las ciudades españolas* (pp. 205–230). Ediciones Cátedra.
- Cuadrat, J. M. (2004). Patrones temporales de la isla de calor urbana de Zaragoza. In M. C. Faus (Ed.), *Aportaciones geográficas en homenaje al profesor Higuera* (pp. 63–70). Universidad de Zaragoza.
- 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.
- Cuadrat, J. M., De la Riva, J., López Martín, F., & Martí, A. (1993). La ciudad y el clima, “la isla de calor” de Zaragoza. *Actas Del III Congreso de Ciudades Sostenibles*.

- Cuadrat, J. M., De la Riva, J., López Martín, F., & Martí Ezpeleta, A. (1993). Ciudad y medio ambiente: La isla de calor de Teruel. *Geographicalia*, 30, 113. [https://doi.org/10.26754/ojs\\_geoph/geoph.1993301813](https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1993301813)
- Cuadrat, J. M., Saz, M. Á., Serrano-Notivoli, R., & Tejedor, E. (2014). El clima del término municipal de Zaragoza en el contexto de cambio global. In *Ayuntamiento de Zaragoza. Agenda 21*. <https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/clima.pdf>
- Cuadrat, J. M., Saz, M. Á., Serrano-Notivoli, R., & Tejedor, E. (2015). *Patrones temporales y espaciales de la temperatura urbana de Zaragoza*.
- Cuadrat, J. M., Saz, M. Á., & Vicente-Serrano, S. (2002). *Clima urbano y calidad ambiental de la ciudad de Zaragoza*.
- Cuadrat, J. M., Saz, M. Á., & Vicente-Serrano, S. (2007). *Atlas climático de Aragón* (Gobierno d).
- 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).
- Cuadrat, J. M., Vicente-Serrano, S., & Saz, M. Á. (2005). Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): la isla de calor y sus factores condicionantes. *Boletín De La Asociación De Geógrafos Españoles*, 40(40), 311–327. <https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/2019>
- Cuadrat, J. M., Vicente-Serrano, S., & Saz, M. Á. (2015). Influence of different factors on relative air humidity in Zaragoza, Spain. *Frontiers in Earth Science*, 3(March), 1–8. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00010>
- Cui, F., Hamdi, R., Yuan, X., He, H., Yang, T., Kuang, W., Termonia, P., & De Maeyer, P. (2021). Quantifying the response of surface urban heat island to urban greening in global north megacities. *Science of The Total Environment*, 801, 149553. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149553>
- Cutillas-Lozano, L. G., López, M. S. C., Velasco, A. P., Andrés-Doménech, I., & Olcina-Cantos, J. (2023). Local-scale regionalisation of climate change effects on rainfall pattern: application to Alicante City (Spain). *Theoretical and Applied Climatology*, 154(1–2), 377–402. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04565-3>
- Cuxart, J., & Jiménez, M. A. (2012). Deep Radiation Fog in a Wide Closed Valley: Study by Numerical Modeling and Remote Sensing. *Pure and Applied Geophysics*, 169(5–6), 911–926. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0365-4>
- Daly, C., Gibson, W., Doggett, M., Smith, J., & Taylor, G. (2004). A probabilistic-spatial approach to the quality control of climate observations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 5005–5012. [https://prism.oregonstate.edu/documents/pubs/2004appclim\\_probabilisticSpatial\\_daly.pdf](https://prism.oregonstate.edu/documents/pubs/2004appclim_probabilisticSpatial_daly.pdf)

- Daly, C., Redmond, K., Gibson, W., Doggett, M., Smith, J., Taylor, G., Pasteris, P., & Johnson, G. (2005). Opportunities for improvements in the quality control of climate observations. *15th AMS Conference on Applied Climatology*, 20–23. [https://prism.oregonstate.edu/documents/pubs/2005appclim\\_QCopportunities\\_daly.pdf](https://prism.oregonstate.edu/documents/pubs/2005appclim_QCopportunities_daly.pdf)
- De Frenne, P., Zellweger, F., Rodríguez-Sánchez, F., Scheffers, B. R., Hylander, K., Luoto, M., Vellend, M., Verheyen, K., & Lenoir, J. (2019). Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution*, 3(5), 744–749. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0842-1>
- de la Paz, D., Borge, R., & Martilli, A. (2016). Assessment of a high resolution annual WRF-BEP/CMAQ simulation for the urban area of Madrid (Spain). *Atmospheric Environment*, 144, 282–296. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.082>
- De la Riva, J., Cuadrat, J. M., López Martín, F., & Martí, A. (1997). Aplicación de las imágenes Landsat TM al estudio de la isla térmica de Zaragoza. Primeros resultados. *Geographicalia*, 35, 227. [https://doi.org/10.26754/ojs\\_geoph/geoph.1997351701](https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1997351701)
- de la Rubia, E. (2020). Caracterización de la isla de calor urbana en el campus de la UAM por medio de teledetección. *Geofocus*, 26, 0–4. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7939049.pdf>
- De Miguel González, R. (2014). Metamorfosis urbana en Zaragoza. *REVISTA BIBLIOGRÁFICA DE GEOGRAFÍA Y CIENCIAS SOCIALES*, 19(1083), 27 p. <http://www.ub.edu/geocrit/b3w-1083.htm>
- Demuzere, M., Argüeso, D., Zonato, A., & Kittner, J. (2022). W2W: A Python package that injects WUDAPT's Local Climate Zone information in WRF. *Journal of Open Source Software*, 7(76), 4432. <https://doi.org/10.21105/joss.04432>
- Demuzere, M., Hankey, S., Mills, G., Zhang, W., Lu, T., & Bechtel, B. (2020). Combining expert and crowd-sourced training data to map urban form and functions for the continental US. *Scientific Data*, 7(1), 264. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00605-z>
- Demuzere, M., Kittner, J., & Bechtel, B. (2021). LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. *Frontiers in Environmental Science*, 9(April). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.637455>
- Demuzere, M., Kittner, J., Martilli, A., Mills, G., Moede, C., Stewart, I. D., van Vliet, J., & Bechtel, B. (2022). A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science. *Earth System Science Data*, 14(8), 3835–3873. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3835-2022>
- Díaz-Poso, A., Lorenzo, N., & Royé, D. (2023). Spatio-temporal evolution of heat waves severity and expansion across the Iberian Peninsula and Balearic islands. *Environmental Research*, 217, 114864. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114864>
- Díaz-Poso, A., Royé, D., & Martínez-Ibarra, E. (2023). Turismo y Cambio Climático: Aplicación del Holiday Climate Index (HCI:Urban) en España en los meses de verano para mediados y finales de siglo. *Investigaciones Turísticas*, 26, 274–296. <https://doi.org/10.14198/INTURI.23493>

- Dienst, M., Lindén, J., Saladié, Ò., & Esper, J. (2019). Detection and elimination of UHI effects in long temperature records from villages – A case study from Tivissa, Spain. *Urban Climate*, 27, 372–383. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.12.012>
- Ding, X., Zhao, Y., Fan, Y., Li, Y., & Ge, J. (2023). Machine learning-assisted mapping of city-scale air temperature: Using sparse meteorological data for urban climate modeling and adaptation. *Building and Environment*, 234, 110211. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110211>
- Dirksen, M., Knap, W. H., Steeneveld, G.-J., Holtslag, A. A. M., & Tank, A. M. G. K. (2020). Downscaling daily air-temperature measurements in the Netherlands. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(1–2), 751–767. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03313-1>
- 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>
- Donateo, A., Palusci, O., Pappaccogli, G., Esposito, A., Martilli, A., Santiago, J. L., & Buccolieri, R. (2023). Analysis of urban heat island and human thermal comfort in a Mediterranean city: A case study of Lecce (Italy). *Sustainable Cities and Society*, 98, 104849. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104849>
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J. R. G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D., & Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27–46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Duckworth, F. S., & Sandberg, J. S. (1954). The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradients. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 35(5), 198–207.
- Durre, I., Menne, M. J., Gleason, B. E., Houston, T. G., & Vose, R. S. (2010). Comprehensive Automated Quality Assurance of Daily Surface Observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(8), 1615–1633. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2375.1>
- Durre, I., Menne, M. J., & Vose, R. S. (2008). Strategies for Evaluating Quality Assurance Procedures. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(6), 1785–1791. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1706.1>
- Duvall, R., Long, R., Beaver, M., Kronmiller, K., Wheeler, M., & Szykman, J. (2016). Performance Evaluation and Community Application of Low-Cost Sensors for Ozone and Nitrogen Dioxide. *Sensors*, 16(10), 1698. <https://doi.org/10.3390/s16101698>
- Eliasson, I. (2000). The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 48(1–2), 31–44. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00034-7)
- Ellefsen, R. (1991). Mapping and measuring buildings in the canopy boundary layer in ten U.S. cities. *Energy and Buildings*, 16(3–4), 1025–1049. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90097-M](https://doi.org/10.1016/0378-7788(91)90097-M)

- Erell, E., Pearlmutter, D., Boneh, D., & Kutiel, P. B. (2014). Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. *Urban Climate*, 10, 367–386. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.10.005>
- Estrada-Peña, A., Estrada-Sánchez, A., Estrada-Sánchez, D., & de la Fuente, J. (2013). Assessing the effects of variables and background selection on the capture of the tick climate niche. *International Journal of Health Geographics*, 12(1), 43. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-12-43>
- Ezquerro, I. (2020). Sobre densidades y formas urbanas: análisis de cuatro polígonos en los barrios de la primera periferia residencial de Zaragoza. In C. Llop, M. Cervera, & F. Peremiquel (Eds.), *IV Congreso ISUF-H: Metrópolis en recomposición: perspectivas proyectuales en el Siglo XXI: Forma urbis y territorios metropolitanos* (pp. 1–13). DUOT, UPC.
- Feng, D. (2009). A New Method for Fast Information Extraction of Water Bodies Using Remotely Sensed Data. *Remote Sensing Technology and Application*, 24(2), 167. <https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2009.2.167>
- Fernández-García, F. (1982). Intensidad del viento en Madrid y sus alrededores. *Estudios Geográficos*, 43(166), 17–32.
- Fernández-García, F. (1984). Madrid: Microclima y medio ambiente. *Universidad y Sociedad. Revista Del Centro Regional de Madrid Asociado a La UNED.*, 8–9, 241–261.
- Fernández-García, F. (1998a). Las modificaciones climáticas provocadas por la ciudad: contaminación y clima urbano. In *El malestar ambiental de la ciudad*. (1st ed., pp. 65–86).
- Fernández-García, F. (2001). El clima urbano de Madrid y su influencia sobre el confort térmico. *Boletín de La Real Sociedad Geográfica, Tomo CXXXV*, 169–186. <https://realsociedadgeografica.com/wp-content/uploads/2018/02/BOLETIN-RSG-2001-2002-CXXXVII-CXXXVIII.pdf>
- Fernández-García, F. (2002). Antonio López Gómez. Reflexiones a partir de su obra. In *La información climática como herramienta de gestión ambiental bases de datos y tratamiento de series climatológicas* (1st ed., pp. 9–11).
- Fernández-García, F. (2009). Ciudad y cambio climático: aspectos generales y aplicación al área metropolitana de Madrid. *Investigaciones Geográficas*, 49, 173. <https://doi.org/10.14198/INGEO2009.49.09>
- Fernández-García, F. (2016). La climatología urbana en España en los últimos 30 años. In *Libro Jubilar en Homenaje al Profesor Antonio Gil Olcina. Edición ampliada* (pp. 125–143). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante. <https://doi.org/10.14198/LibroHomenajeAntonioGilOlcina2016-10>
- Fernández-García, F. (1998b). Clima y ambiente urbano. In F. Fernández-García, E. Galán-Gallego, & M. R. Cañada-Torrecilla (Eds.), *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas* (1st ed., pp. 13–20). Parteluz.
- Fernández-García, F., Galán-Gallego, E., & Cañada-Torrecilla, M. R. (Eds.). (2010). *Clima, ciudad y ecosistemas* (Asociación). Ediciones del Serbal. <http://aeclim.org/documentacion/vii-congreso-aec/>

- Fernández-García, F., García-Hernández, E., Allende-Álvarez, F., Fernández-Renau, A., González-Arnau, A., Gómez-Sánchez, J. A., Rasilla-Álvarez, D., & Barroso, A. (1999). Airborne remote sensing as a tool to study the links between land use and urban heat island. *3rd Historical Cities Sustainable Development: The GIS as Design and Management Support*.
- Fernández-García, F., López-Gómez, A., & Almendros, M. Á. (1992). El clima urbano del S y SE del area metropolitana madrileña. In Universidade do Porto (Ed.), *VI Coloquio Ibérico de Geografía - A Península Ibérica, um espaço em mutação* (pp. 903–909). Litogaia. <https://ler.letras.up.pt/uploads/ficheiros/17794.pdf>
- Fernández-García, F., & Montávez Gómez, J. P. (2003). A PCA analysis of the UHI form of Madrid (Spain). *5th International Conference on Urban Climate*, 55–58.
- Fernández-García, F., & Rasilla-Álvarez, D. (2008). Olas de calor e influencia urbana en Madrid y su área metropolitana. *Estudios Geográficos*, *LXIX*(265), 495–518. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.0440>
- Fernández Monistrol, J. A. (2019). Las depresiones aisladas en niveles altos (DANA): su naturaleza y sus efectos. *Consorteguros Digital*, *11*, 15.
- Ferrández Pastor, Ó. (2023). Análisis de las islas de frescor en los parques de Zaragoza en invierno. *Geographicalia*, *75*, 99–120. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9235961.pdf>
- Founda, D., & Santamouris, M. (2017). Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Scientific Reports*, *7*(1), 10973. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11407-6>
- Fu, P., & Rich, P. M. (2002). A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, *37*(1–3), 25–35. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00115-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00115-1)
- Fujii, H., Iwata, K., & Managi, S. (2017). How do urban characteristics affect climate change mitigation policies? *Journal of Cleaner Production*, *168*, 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.221>
- Gandini, A., Quesada-Ganuza, L., Prieto, I., & Garmendia, L. (2021). Climate change risk assessment: A holistic multi-stakeholder methodology for the sustainable development of cities. *Sustainable Cities and Society*, *65*, 102641. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102641>
- Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, *58*(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- García-Díez, M., Lauwaet, D., Hooyberghs, H., Ballester, J., De Ridder, K., & Rodó, X. (2016). Advantages of using a fast urban boundary layer model as compared to a full mesoscale model to simulate the urban heat island of Barcelona. *Geoscientific Model Development*, *9*(12), 4439–4450. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4439-2016>
- García-Ruiz, J. M., Ortigosa Izquierdo, L. M., Arnáez-Vadillo, J., & Gómez Villar, A. (1989). Organización espacial de las temperaturas en la ciudad de Logroño. *Cuadernos*

*de Investigación Geográfica*, 15, 87–98. <https://doi.org/10.18172/cig.978>

- García Barrón, L., Sousa, A., Jurado, V., Andrade, F., & Morales, J. (2005). Analyse saisonniere de l'ilot de chaleur urbain a Badajoz (Espagne). In G. Brancuci (Ed.), *XVIII Colloque Internationale de Climatologie. Climat urbain, ville et architecture* (pp. 105–108). Association Internationale de Climatologie.  
[http://www.climato.be/aic/colloques/actes/genes2005\\_actes.pdf](http://www.climato.be/aic/colloques/actes/genes2005_actes.pdf)
- García de Pedraza, L. (1985). La predicción del tiempo en el Valle del Ebro. *Servicio Meteorológico Nacional, Serie A*(38), 107. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9628>
- Gasparrini, A., Guo, Y., Hashizume, M., Lavigne, E., Zanobetti, A., Schwartz, J., Tobias, 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 Stagliorio Coelho, M., Saldiva, 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)
- Gavira, J. (1943). Sobre la existencia de un clima de ciudad. *Estudios Geográficos*, 854–856.
- Geiger, R. (1942). *Das Klima der bodennahen Luftschicht*. Vieweg+Teubner Verlag.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-663-06924-9>
- Geletič, J., & Lehnert, M. (2016). GIS-based delineation of local climate zones: The case of medium-sized Central European cities. *Moravian Geographical Reports*, 24(3), 2–12.  
<https://doi.org/10.1515/mgr-2016-0012>
- Geneletti, D., & Zardo, L. (2016). Ecosystem-based adaptation in cities: An analysis of European urban climate adaptation plans. *Land Use Policy*, 50, 38–47.  
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.09.003>
- Germán Zubero, L. G. (1989). La transformación de la ciudad. Zaragoza en el siglo XX (1900-1936). *Historia de Aragón*, 2(Economía y sociedad), 459–468.
- Gholamnia, M., Alavipanah, S. K., Darvishi Boloorani, A., Hamzeh, S., & Kiavarz, M. (2017). Diurnal Air Temperature Modeling Based on the Land Surface Temperature. *Remote Sensing*, 9(9), 915. <https://doi.org/10.3390/rs9090915>
- 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>
- Golkar, F., Sabziparvar, A. A., Khanbilvardi, R., Nazemosadat, M. J., Zand- Parsa, S., & Rezaei, Y. (2018). Estimation of instantaneous air temperature using remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 39(1), 258–275.  
<https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1382743>
- Gomez, F., Gaja, E., & Reig, A. (1998). Vegetation and climatic changes in a city. *Ecological Engineering*, 10(4), 355–360. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(98\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(98)00002-0)
- Gómez, F., Tamarit, N., & Jabaloyes, J. (2001). Green zones, bioclimatics studies and human comfort in the future development of urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 55(3), 151–161. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(01\)00150-5](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(01)00150-5)

- Good, E. J., Ghent, D. J., Bulgin, C. E., & Remedios, J. J. (2017). A spatiotemporal analysis of the relationship between near-surface air temperature and satellite land surface temperatures using 17 years of data from the ATSR series. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*(17), 9185–9210. <https://doi.org/10.1002/2017JD026880>
- Gubler, M., Christen, A., Remund, J., & Brönnimann, S. (2021). Evaluation and application of a low-cost measurement network to study intra-urban temperature differences during summer 2018 in Bern, Switzerland. *Urban Climate*, *37*(March). <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100817>
- Guha, S., Govil, H., Dey, A., & Gill, N. (2018). Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*, *51*(1), 667–678. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494>
- Halder, B., Karimi, A., Mohammad, P., Bandyopadhyay, J., Brown, R. D., & Yaseen, Z. M. (2022). Investigating the relationship between land alteration and the urban heat island of Seville city using multi-temporal Landsat data. *Theoretical and Applied Climatology*, *150*(1–2), 613–635. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04180-8>
- Hamdi, R., Giot, O., De Troch, R., Deckmyn, A., & Termonia, P. (2015). Future climate of Brussels and Paris for the 2050s under the A1B scenario. *Urban Climate*, *12*, 160–182. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.03.003>
- Hammerberg, K., Brousse, O., Martilli, A., & Mahdavi, A. (2018). Implications of employing detailed urban canopy parameters for mesoscale climate modelling: a comparison between WUDAPT and GIS databases over Vienna, Austria. *International Journal of Climatology*, *38*(S1). <https://doi.org/10.1002/joc.5447>
- Hang, J., Li, Y., Sandberg, M., Buccolieri, R., & Di Sabatino, S. (2012). The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas. *Building and Environment*, *56*, 346–360. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.023>
- Harlan, S. L., Brazel, A. J., Prashad, L., Stefanov, W. L., & Larsen, L. (2006). Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. *Social Science & Medicine*, *63*(11), 2847–2863. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2006.07.030>
- Harlan, S. L., & Ruddell, D. M. (2011). Climate change and health in cities: impacts of heat and air pollution and potential co-benefits from mitigation and adaptation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *3*(3), 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2011.01.001>
- He, B.-J., Ding, L., & Prasad, D. (2020). Relationships among local-scale urban morphology, urban ventilation, urban heat island and outdoor thermal comfort under sea breeze influence. *Sustainable Cities and Society*, *60*, 102289. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102289>
- Heidorn, K. C. (1978). A Chronology of Important Events in the History of Air Pollution Meteorology to 1970. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *59*(12), 1589–1597. <http://www.jstor.org/stable/26219252>
- Hereher, M. E., & El Kenawy, A. (2022). Extrapolation of daily air temperatures of Egypt

- from MODIS LST data. *Geocarto International*, 37(1), 214–230.  
<https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1713229>
- Hernández, A. I., Márquez Pérez, J. Á., Rivero, A., & Romero, L. E. (2001). La “isla de calor” en Las Palmas de Gran Canaria: Magnitud, distribución espacial y morfología urbana. In A. Pérez-Cueva, E. López Baeza, & J. Tamayo Carmona (Eds.), *II Congreso AEC. El tiempo del clima* (Asociación, pp. 519–530). Editorial Garmas Impresores.
- Hernández Navarro, M. L. (1990). Frecuencia e intensidad del viento en Zaragoza. *Geographicalia*, 27, 63. [https://doi.org/10.26754/ojs\\_geoph/geoph.1990271860](https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1990271860)
- Hernández Navarro, M. L., & Del Valle Melendo, J. (1989). Las nieblas en la Depresión del Ebro: el caso del Campo de Zaragoza y la Hoya de Huesca. *Geographicalia*, 26, 125. [https://doi.org/10.26754/ojs\\_geoph/geoph.1989261912](https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1989261912)
- Herold, M., Scepan, J., & Clarke, K. C. (2002). The Use of Remote Sensing and Landscape Metrics to Describe Structures and Changes in Urban Land Uses. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 34(8), 1443–1458. <https://doi.org/10.1068/a3496>
- Heymann, M. (2010). The evolution of climate ideas and knowledge. *WIREs Climate Change*, 1(4), 581–597. <https://doi.org/10.1002/wcc.61>
- Hidalgo-García, D. (2022). Analysis of Urban Heat Island and Heat Waves Using Sentinel-3 Images: a Study of Andalusian Cities in Spain. *Earth Systems and Environment*, 6(1), 199–219. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00268-9>
- Hidalgo-García, D., & Arco-Díaz, J. (2022a). Análisis de sinergias entre Isla de Calor Urbana y Olas de Calor mediante imágenes Sentinel 3 sobre la ciudad de Granada. *Revista de Teledetección*, 60, 1–15.  
<http://polipapers.upv.es/index.php/raet/article/view/17128>
- Hidalgo-García, D., & Arco-Díaz, J. (2022b). Modeling the Surface Urban Heat Island (SUHI) to study of its relationship with variations in the thermal field and with the indices of land use in the metropolitan area of Granada (Spain). *Sustainable Cities and Society*, 87, 104166. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104166>
- Hidalgo-García, D., & Rezapouraghdam, H. (2023). Variability of heat stress using the UrbClim climate model in the city of Seville (Spain): mitigation proposal. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(10), 1164. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11768-8>
- 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>
- Hofierka, J., Gallay, M., Onáčillová, K., & Hofierka, J. (2020). Physically-based land surface temperature modeling in urban areas using a 3-D city model and multispectral satellite data. *Urban Climate*, 31, 100566. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100566>
- Hofstra, N., Haylock, M., New, M., Jones, P., & Frei, C. (2008). Comparison of six methods for the interpolation of daily, European climate data. *Journal of Geophysical Research*, 113(D21), D21110. <https://doi.org/10.1029/2008JD010100>

- Hooker, J., Duveiller, G., & Cescatti, A. (2018). A global dataset of air temperature derived from satellite remote sensing and weather stations. *Scientific Data*, 5(1), 180246. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.246>
- Howard Frisinger, H. (1983). *History of Meteorology to 1800* (1st ed.). American Meteorological Society Boston, MA. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-940033-91-4>
- Howard, L. (1833). *The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it* (Harvey and).
- Hu, X.-M., & Xue, M. (2016). Influence of Synoptic Sea-Breeze Fronts on the Urban Heat Island Intensity in Dallas–Fort Worth, Texas. *Monthly Weather Review*, 144(4), 1487–1507. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0201.1>
- 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>
- Hu, Y., Dai, Z., & Guldman, J.-M. (2020). Modeling the impact of 2D/3D urban indicators on the urban heat island over different seasons: A boosted regression tree approach. *Journal of Environmental Management*, 266, 110424. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110424>
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Huete, A. . (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Hulley, G. C., Hook, S. J., Abbott, E., Malakar, N., Islam, T., & Abrams, M. (2015). The ASTER Global Emissivity Dataset (ASTER GED): Mapping Earth’s emissivity at 100 meter spatial scale. *Geophysical Research Letters*, 42(19), 7966–7976. <https://doi.org/10.1002/2015GL065564>
- Hulley, G. C., Hughes, C. G., & Hook, S. J. (2012). Quantifying uncertainties in land surface temperature and emissivity retrievals from ASTER and MODIS thermal infrared data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D23), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2012JD018506>
- Íñiguez, C., Royé, D., & Tobías, A. (2021). Contrasting patterns of temperature related mortality and hospitalization by cardiovascular and respiratory diseases in 52 Spanish cities. *Environmental Research*, 192, 110191. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110191>
- Javed, A., Cheng, Q., Peng, H., Altan, O., Li, Y., Ara, I., Huq, E., Ali, Y., & Saleem, N. (2021). Review of Spectral Indices for Urban Remote Sensing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 87(7), 513–524. <https://doi.org/10.14358/PERS.87.7.513>

- Jieli, C., Manchun, L., Yongxue, L., Chenglei, S., & Wei, H. (2010). Extract residential areas automatically by New Built-up Index. *2010 18th International Conference on Geoinformatics*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567823>
- Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *108*(D22), 2003JD003480. <https://doi.org/10.1029/2003JD003480>
- Jimenez-Munoz, J. C., Sobrino, J. A., Skokovic, D., Mattar, C., & Cristóbal-Roselló, J. (2014). Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, *11*(10), 1840–1843. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>
- Jin, M., & Dickinson, R. E. (1999). Interpolation of surface radiative temperature measured from polar orbiting satellites to a diurnal cycle: 1. Without clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *104*(D2), 2105–2116. <https://doi.org/10.1029/1998JD200005>
- Johnson, S., Ross, Z., Kheirbek, I., & Ito, K. (2020). Characterization of intra-urban spatial variation in observed summer ambient temperature from the New York City Community Air Survey. *Urban Climate*, *31*, 100583. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100583>
- Kaimaris, D., & Patias, P. (2016). Identification and Area Measurement of the Built-up Area with the Built-up Index (BUI). *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, *5*(1), 1844–1858. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.64>
- Kang, Y., Aye, L., Ngo, T. D., & Zhou, J. (2022). Performance evaluation of low-cost air quality sensors: A review. *Science of The Total Environment*, *818*, 151769. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151769>
- Kawamura, M., Jayamanna, S., & Tsujiko, Y. (1996). Relation between social and environmental conditions in Colombo, Sri Lanka and the Urban Index estimated by satellite remote sensing data. *International Archives of the Photogrammetry and Remtesensing*, *XXXI*, 321–326.
- Kawamura, T. (1964). Some considerations on the cause of city temperature at Kumagaya City. *Geographical Review of Japan*, *37*(10), 560–565.
- Kawashima, S., Ishida, T., Minomura, M., & Miwa, T. (2000). Relations between Surface Temperature and Air Temperature on a Local Scale during Winter Nights. *Journal of Applied Meteorology*, *39*(9), 1570–1579. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<1570:RBSTAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<1570:RBSTAA>2.0.CO;2)
- Key, C. H., Benson, N., Ohlen, D., Howard, S., McKinley, R., & Z., Z. (2002). The normalized burn ratio and relationships to burn severity: ecology, remote sensing and implementation. *Proceedings of the Ninth Forest Service Remote Sensing Applications Conference. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD.*
- Kim, Y.-H., & Baik, J.-J. (2002). Maximum Urban Heat Island Intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, *41*(6), 651–659. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0651:MUHIII>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0651:MUHIII>2.0.CO;2)

- Kim, Y., Kim, H., Gasparrini, A., Armstrong, B., Honda, Y., Chung, Y., Ng, C. F. S., Tobías, A., Íñiguez, C., Lavigne, E., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A. M., Ragettli, M. S., Scovronick, N., Acquaotta, F., Chen, B.-Y., Guo, Y.-L., Seposo, X., Dang, T. N., ... Hashizume, M. (2019). Suicide and Ambient Temperature: A Multi-Country Multi-City Study. *Environmental Health Perspectives*, 127(11).  
<https://doi.org/10.1289/EHP4898>
- Kratzer, P. (1956). *Das Stadtklima*. Friedr. Vieweg und Sohn.
- Kriegler, F. J., Malila, W. A., Nalepka, R. F., & Richardson, W. (1969). Preprocessing Transformations and Their Effects on Multispectral Recognition. *The Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 97–131.
- Kubota, M., & Shikauchi, A. (1995). Air temperature at ocean surface derived from surface-level humidity. *Journal of Oceanography*, 51(6), 619–634.  
<https://doi.org/10.1007/BF02235456>
- Lacaux, J. P., Tourre, Y. M., Vignolles, 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>
- LaDochy, S. (2005). The Disappearance of Dense Fog in Los Angeles: Another Urban Impact? *Physical Geography*, 26(3), 177–191. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.26.3.177>
- Lana, X., Serra, C., Casas-Castillo, M. C., Rodríguez-Solà, R., Redaño, Á., & Burgueño, A. (2018). Rainfall intensity patterns derived from the urban network of Barcelona (NE Spain). *Theoretical and Applied Climatology*, 133(1–2), 385–403.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-017-2193-7>
- Lee, D. O. (1979). The influence of atmospheric stability and the urban heat island on urban-rural wind speed differences. *Atmospheric Environment (1967)*, 13(8), 1175–1180.  
[https://doi.org/10.1016/0004-6981\(79\)90042-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(79)90042-8)
- Lehnert, M., Savić, S., Milošević, D., Dunjić, J., & Geletič, J. (2021). Mapping Local Climate Zones and Their Applications in European Urban Environments: A Systematic Literature Review and Future Development Trends. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4), 260. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040260>
- Lelovics, E., Unger, J., Gál, T., & Gál, C. (2014). Design of an urban monitoring network based on Local Climate Zone mapping and temperature pattern modelling. *Climate Research*, 60(1), 51–62. <https://doi.org/10.3354/cr01220>
- Lemus-Canovas, M., Lopez-Bustins, J. A., Martín-Vide, J., & Royé, D. (2019). synoptReg: An R package for computing a synoptic climate classification and a spatial regionalization of environmental data. *Environmental Modelling and Software*, 118, 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.006>
- Lemus-Canovas, M., Martín-Vide, J., Moreno-García, M. C., & Lopez-Bustins, J. A. (2020). Estimating Barcelona's metropolitan daytime hot and cold poles using Landsat-8 Land Surface Temperature. *Science of The Total Environment*, 699, 134307.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134307>

- Li, D., Sun, T., Liu, M., Yang, L., Wang, L., & Gao, Z. (2015). Contrasting responses of urban and rural surface energy budgets to heat waves explain synergies between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, *10*(5), 054009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/5/054009>
- 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>
- Liang, P., & Ding, Y. (2017). The long-term variation of extreme heavy precipitation and its link to urbanization effects in Shanghai during 1916–2014. *Advances in Atmospheric Sciences*, *34*(3), 321–334. <https://doi.org/10.1007/s00376-016-6120-0>
- Liu, H. Q., & Huete, A. (1995). A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *33*(2), 457–465. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1995.8746027>
- Liu, W., You, H., & Dou, J. (2009). Urban-rural humidity and temperature differences in the Beijing area. *Theoretical and Applied Climatology*, *96*(3–4), 201–207. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0024-6>
- Lomba-Fernández, C., Hernantes, J., & Labaka, L. (2019). Guide for Climate-Resilient Cities: An Urban Critical Infrastructures Approach. *Sustainability*, *11*(17), 4727. <https://doi.org/10.3390/su11174727>
- Lopes, A., Alves, E., Alcoforado, M. J., & Machete, R. (2013). Lisbon urban heat island updated: New highlights about the relationships between thermal patterns and wind regimes. *Advances in Meteorology*, *2013*(Figure 1). <https://doi.org/10.1155/2013/487695>
- Lopes, P., Fonte, C., See, L., & Bechtel, B. (2017). Using OpenStreetMap data to assist in the creation of LCZ maps. *2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/JURSE.2017.7924630>
- López-García, M. J., Caselles Miralles, V., Meliá, J., & Pérez-Cueva, A. J. (1991). NOAA-AVHRR contribution to the analysis of urban heat islands. *ESA, Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, 501–504.
- López-Gómez, A. (1954). La ciudad y las variaciones climáticas. *Estudios Geográficos*, *54*, 605–606.
- López-Gómez, A. (1961). ¿Esta cambiando el clima de Madrid? *Estudios Geográficos*, *82*, 575–591.
- López-Gómez, A. (1985). El clima de las ciudades. *Arbor*, *474*, 13–32.
- López-Gómez, A. (1988). *El clima urbano de Madrid: la isla de calor* (Consejo Su). CSIC, Instituto de Economía y Geografía Aplicadas. <https://books.google.es/books?id=oyNZxgEACAAJ>
- López-Gómez, A. (1995). Tres referencias al clima urbano de Madrid en la segunda mitad del siglo XIX. *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*, *15*, 445–449. <https://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/AGUC9595220445A>

- López-Gómez, A., & Fernández-García, F. (1984). La isla de calor en Madrid: avance de un estudio de clima urbano. *Estudios Geográficos*, 174, 5–34.
- López-Gómez, A., Fernández-García, F., & Arroyo-Ilera, F. (1993a). El clima de otras ciudades españolas. In A. López-Gómez (Ed.), *El clima de las ciudades españolas* (pp. 231–262). Ediciones Cátedra.
- López-Gómez, A., Fernández-García, F., & Arroyo-Ilera, F. (1993b). El clima urbano de Madrid y su entorno. In A. López-Gómez (Ed.), *El clima de las ciudades españolas* (pp. 29–146). Ediciones Cátedra.
- López-Gómez, A., Fernández-García, F., Arroyo-Ilera, F., Martín-Vide, J., & Cuadrat, J. M. (1993). *El clima de las ciudades españolas* (A. López-Gómez (Ed.)). Ediciones Cátedra.
- López-Gómez, A., Fernández-García, F., Fernández-Renau, A., García-Hernández, E., & Arroyo-Ilera, F. (1998). *Temperaturas nocturnas y diurnas en Madrid a partir de teledetección aeroportada* (Instituto). Parteluz.
- López-Gómez, A., Moreno-Jiménez, A., Fernández-García, F., & Palou, F. (1990). La temperatura diurna en la aglomeración de Madrid mediante imágenes remotas. *Estudios Geográficos*, 51(201), 705–732. <https://doi.org/10.3989/egeogr.1990.i201.705>
- López Martín, F. (1995). Nota sobre la percepción del clima urbano: el ejemplo de la ciudad de Zaragoza. *Geographicalia*, 32, 123–138.
- López Martín, F. (1997). Riesgos climáticos en la ciudad de Zaragoza. *Geographicalia*, 35, 177. [https://doi.org/10.26754/ojs\\_geoph/geoph.1997351698](https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1997351698)
- López Martín, F. (2002). *El clima en el medio ambiente urbano de Zaragoza*. Universidad de Zaragoza.
- López Martín, F. (2011). *Clima urbano y ciudad. El caso de Zaragoza* (Colegio de). Jfactory.
- López Martín, F. (1998). Nota sobre el viento en el casco urbano de Zaragoza: un factor de planificación urbana. In F. Fernández-García, E. Galán-Gellego, & M. R. Cañada-Torrecilla (Eds.), *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas* (pp. 371–380). Parteluz.
- Lorente-Plazas, R., Montávez Gómez, J. P., Jimenez, P. A., Jerez, S., Gómez-Navarro, J. J., García-Valero, J. A., & Jimenez-Guerrero, P. (2015). Characterization of surface winds over the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 35(6), 1007–1026. <https://doi.org/10.1002/joc.4034>
- Lott, J. N. (2004). The quality control of the integrated surface hourly database. *Proceedings of the Bulletin of the American Meteorological Society*, 5039–5045.
- 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>
- Lundquist, J. D., Dickerson-Lange, S. E., Lutz, J. A., & Cristea, N. C. (2013). Lower forest density enhances snow retention in regions with warmer winters: A global framework developed from plot-scale observations and modeling. *Water Resources Research*, 49(10),

6356–6370. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20504>

- Mahmuda, S., & Webb, R. (2016). Climate adaptation and urban planning for heat islands: a case study of the Australian Capital Territory. *Australian Planner*, 53(2), 127–142. <https://doi.org/10.1080/07293682.2015.1136661>
- Malevich, S. B., & Klink, K. (2011). Relationships between Snow and the Wintertime Minneapolis Urban Heat Island. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(9), 1884–1894. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-05.1>
- Manoli, G., Fatichi, S., Schläpfer, M., Yu, K., Crowther, T. W., Meili, N., Burlando, P., Katul, G. G., & Bou-Zeid, E. (2019). Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 573(7772), 55–60. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9>
- Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Sabio-Ortega, A., & García-Cruz, A. (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 736–755. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>
- Mariás Martínez, D. (2004). Bibliografía de don Antonio López Gómez. In *Historia, clima y paisaje: estudios geográficos en memoria del profesor Antonio López Gómez* (1st ed., pp. 27–54). Universidad de Valencia = Universitat de València.
- Martí Ezpeleta, A., & Miragaya Veras, A. (1998). Geometría urbana, temperaturas e isla de calor en Santiago de Compostela. In F. Fernández-García, E. Galán-Gellego, & M. R. Cañada-Torrecilla (Eds.), *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas* (1st ed., pp. 207–218). Parteluz.
- Martí Ezpeleta, A., & Royé, D. (2021). Intensidad y duración del estrés térmico en verano en el área urbana de Madrid. *Geographicalia*, 73, 95–113. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8043772.pdf>
- Martilli, A. (2012). Modelización del clima urbano a mesoescala. In F. Fernández-García, E. Galán-Gallego, & M. R. Cañada-Torrecilla (Eds.), *Clima, ciudad y ecosistemas* (Asociación, pp. 165–175).
- Martilli, A., Sánchez, B., Rasilla-Álvarez, D., Pappacogli, G., Allende-Álvarez, F., Martín, F., Román-Cascón, C., Yagüe, C., & Fernández-García, F. (2021). Simulating the meteorology during persistent Wintertime Thermal Inversions over urban areas. The case of Madrid. *Atmospheric Research*, 263, 105789. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105789>
- Martín-Vide, J. (1990). La percepción del clima en las ciudades. *Revista de Geografía*, 24, 27–34. <http://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/view/46047>
- Martín-Vide, J. (1992). L'illa de calor barcelonina i d'altres ciutats catalanes. In *Geografia General dels Països Catalans* (Vol. 1, pp. 108–109). Enciclopèdia Catalana.
- Martín-Vide, J. (1993). Los climas urbanos de Cataluña. In A. López-Gómez (Ed.), *El clima de las ciudades españolas* (pp. 147–203). Ediciones Cátedra.
- Martín-Vide, J. (2017). El cambio climático y las islas de calor urbanas. Cambios de escala y riesgos climáticos. In *Conocimiento para la equidad social* (1st ed., pp. 189–204).

Universidad de Barcelona.

- Martín-Vide, J., Gómez Navarro, L., & Moreno-García, M. C. (1998). Distribución de la precipitación según el día de la semana en varias ciudades españolas. In F. Fernández-García, E. Galán-Gellego, & M. R. Cañada-Torrecilla (Eds.), *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas* (1st ed., pp. 197–206). Parteluz.
- Martín-Vide, J., & Moreno-García, M. C. (2020). Probability values for the intensity of Barcelona's urban heat island (Spain). *Atmospheric Research*, 240, 104877. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104877>
- Martín-Vide, J., & Moreno-García, M. C. (2003). Spatial differences in the urban heat island of the Pre- and the Post-Olympic Barcelona (Spain). *5th International Conference on Urban Climate*, 1, 99–102.
- Martín-Vide, J., Moreno-García, M. C., & Sabí, J. (1992). Avance de resultados sobre la isla de calor de Barcelona y otras ciudades catalanas. *VI Trobades Científiques a La Mediterrània. Energia, Medi Ambient i Edificació*, 55–68.
- Martínez-Ibarra, E. (2015). Climate, water and tourism: causes and effects of droughts associated with urban development and tourism in Benidorm (Spain). *International Journal of Biometeorology*, 59(5), 487–501. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0851-3>
- Martínez-Juarez, P., Chiabai, A., Suárez, C., & Quiroga, S. (2019). Insights on Urban and Periurban Adaptation Strategies Based on Stakeholders' Perceptions on Hard and Soft Responses to Climate Change. *Sustainability*, 11(3), 647. <https://doi.org/10.3390/su11030647>
- Marzban, F., Sodoudi, S., & Preusker, R. (2018). The influence of land-cover type on the relationship between NDVI–LST and LST– T air. *International Journal of Remote Sensing*, 39(5), 1377–1398. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1402386>
- Masson, V., & Bougeault, P. (1996). Numerical Simulation of a Low-Level Wind Created by Complex Orography: A Cierzo Case Study. *Monthly Weather Review*, 124(4), 701–715. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1996\)124<0701:NSOALL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124<0701:NSOALL>2.0.CO;2)
- Mathew, A., Khandelwal, S., & Kaul, N. (2018). Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities. *Energy and Buildings*, 159, 271–295. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.062>
- Meliá, J., Caselles Miralles, V., & López-García, M. J. (1989). Estudio del efecto de isla térmica de la ciudad de Valencia. *Coloquio Hispano-Francés Sobre Teledetección y Planificación Integrada Del Territorio*, 296–307.
- Menne, M. J., Durre, I., Vose, R. S., Gleason, B. E., & Houston, T. G. (2012). An Overview of the Global Historical Climatology Network-Daily Database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(7), 897–910. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00103.1>
- Merino, A., Fernández-Vaquero, M., López, L., Fernández-González, S., Hermida, L., Sánchez, J. L., García-Ortega, E., & Gascón, E. (2016). Large-scale patterns of daily precipitation extremes on the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 36(11), 3873–3891. <https://doi.org/10.1002/joc.4601>

- Meyer, H., Katurji, M., Appelhans, T., Müller, M., Nauss, T., Roudier, P., & Zawar-Reza, P. (2016). Mapping Daily Air Temperature for Antarctica Based on MODIS LST. *Remote Sensing*, 8(9), 732. <https://doi.org/10.3390/rs8090732>
- Middel, A., Lukasczyk, J., Maciejewski, R., Demuzere, M., & Roth, M. (2018). Sky View Factor footprints for urban climate modeling. *Urban Climate*, 25, 120–134. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.05.004>
- Middel, A., Lukasczyk, J., Zakrzewski, S., Arnold, M., & Maciejewski, R. (2019). Urban form and composition of street canyons: A human-centric big data and deep learning approach. *Landscape and Urban Planning*, 183, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.12.001>
- Middleton, W. E. K., & Millar, F. G. (1936). Temperature profiles in Toronto. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 30, 265.
- Millán-López, A. (2019). Cambio climático y actividad turística en los espacios urbanos del interior de España: impactos sobre el modelo de aptitud climático-turística de León, Granada y Madrid. *Investigaciones Geográficas*, 72, 53. <https://doi.org/10.14198/INGEO2019.72.03>
- Millán-López, A., & Fernández-García, F. (2018). Propuesta de un índice climático-turístico adaptado al turismo de interior en la Península Ibérica: aplicación a la ciudad de Madrid. *Investigaciones Geográficas*, 70, 31. <https://doi.org/10.14198/INGEO2018.70.02>
- Millar, S. W. S. (2017). Plowing paradise: snow clearing and urban solar radiation absorption. *Physical Geography*, 38(2), 197–209. <https://doi.org/10.1080/02723646.2016.1242351>
- Mills, G., Cleugh, H., Emmanuel, R., Endlicher, W., Erell, E., McGranahan, G., Ng, E., Nickson, A., Rosenthal, J., & Steemer, K. (2010). Climate Information for Improved Planning and Management of Mega Cities (Needs Perspective). *Procedia Environmental Sciences*, 1, 228–246. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.015>
- Mira, M., Ninyerola, M., Batalla, M., Pesquer, L., & Pons, X. (2017). Improving Mean Minimum and Maximum Month-to-Month Air Temperature Surfaces Using Satellite-Derived Land Surface Temperature. *Remote Sensing*, 9(12), 1313. <https://doi.org/10.3390/rs9121313>
- Miragaya Veras, A. (2003). *Medio ambiente urbano en A Coruña: el papel de la dinámica atmosférica y de los factores locales*. Universidade de Santiago de Compostela.
- Miragaya Veras, A., & Martí Ezpeleta, A. (1998). Distribución espacio-temporal de las temperaturas en A Coruña en condiciones atmosféricas de estabilidad. In F. Fernández-García, E. Galán-Gellego, & M. R. Cañada-Torrecilla (Eds.), *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas* (1st ed., pp. 219–230). Parteluz.
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197, 522–538. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095>

- Moliní, F., & Salgado, M. (2010). SUPERFICIE ARTIFICIAL Y VIVIENDAS UNIFAMILIARES EN ESPAÑA, DENTRO DEL DEBATE ENTRE CIUDAD COMPACTA Y DISPERSA. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 54, 125–147.
- Monclús Fraga, J., Labarta, C., & Diez, C. (2012). *Paisajes urbanos residenciales en la Zaragoza contemporánea*. Prensas de la Universidad de Zaragoza.  
<https://doi.org/10.26754/uz.978-84-15538-70-7>
- Montaner-Fernández, D., Morales-Salinas, L., Sobrino, J. A., Cárdenas-Jirón, L., Huete, A., Fuentes-Jaque, G., Pérez-Martínez, W., & Cabezas, J. (2020). Spatio-Temporal Variation of the Urban Heat Island in Santiago, Chile during Summers 2005–2017. *Remote Sensing*, 12(20), 3345. <https://doi.org/10.3390/rs12203345>
- Montávez Gómez, J. P., Emilia, S., & Jiménez, J. I. (1998). Un estudio de la intensidad y forma de la isla de calor de Granada. In F. Fernández-García, E. Galán-Gellego, & M. R. Cañada-Torrecilla (Eds.), *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas* (1st ed., pp. 315–326). Parteluz.
- Montávez Gómez, J. P., González-Rouco, J. F., & Valero, F. (2008). A simple model for estimating the maximum intensity of nocturnal urban heat Island. *International Journal of Climatology*, 28(2), 235–242. <https://doi.org/10.1002/joc.1526>
- Montávez Gómez, J. P., González-Rouco, J. F., & Valero, F. (2003a). A set of equations for determining the maximum intensity of nocturnal urban heat island. *5th International Conference on Urban Climate*, 1, 107–110.
- Montávez Gómez, J. P., González-Rouco, J. F., & Valero, F. (2003b). A Study of The Three-Dimensional UHI by Using a Mesoscale Model. *5th International Conference on Urban Climate*, 1, 111–114.
- Montávez Gómez, J. P., González-Rouco, J. F., & Valero López, F. J. (2004). Un estudio de la isla de calor mediante un modelo mesoescalar. In *El agua y el clima* (1st ed., pp. 471–482). Asociación Española de Climatología. [http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0048\\_PU-SA-III-2002-J\\_PEDRO.pdf](http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0048_PU-SA-III-2002-J_PEDRO.pdf)
- Montávez Gómez, J. P., Jiménez, J. I., & Sarsa, A. (2000). A Monte Carlo Model Of The Nocturnal Surface Temperatures In Urban Canyons. *Boundary-Layer Meteorology*, 96(3), 433–452. <https://doi.org/10.1023/A:1002600523841>
- Moreno-García, M. C. (1987). Frecuencias de la precipitación según los días de la semana en Barcelona. *Revista de Geografía*, 21, 5–10.  
<http://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/view/46004>
- Moreno-García, M. C. (1990). Bibliografía sobre Climatología urbana: la “isla de calor”, I. *Revista de Geografía*, 24, 99–109.  
<http://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/view/46055>
- Moreno-García, M. C. (1991a). *Estudio del clima urbano de barcelona: “la isla de calor.”* Oikos-tau.
- Moreno-García, M. C. (1991b). La intensidad de la “isla de calor” de Barcelona. Comparación con otras ciudades españolas. *Alisios*, 1, 47–59.

- Moreno-García, M. C. (1991c). Unas notas históricas acerca de la Climatología urbana. *Notes de Geografía Física*, 20–21, 137–141.
- Moreno-García, M. C. (1992). Bibliografía sobre Climatología urbana: la “isla de calor”, II. *Revista de Geografía*, 26, 111–119.  
<http://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/view/46074>
- Moreno-García, M. C. (1994). Intensity and form of the urban heat island in barcelona. *International Journal of Climatology*, 14(6), 705–710.  
<https://doi.org/10.1002/joc.3370140609>
- Moreno-García, M. C. (1997). Una propuesta de terminología castellana en Climatología Urbana. *Investigaciones Geográficas (España)*, 17, 89–98.  
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/111659.pdf>
- Moreno-García, M. C. (2007). Climatología Urbana. In J. M. Cuadrat-Prats & J. Martín-Vide (Eds.), *La Climatología española. Pasado, presente y futuro*. (pp. 191–205). Pressas Universitarias de Zaragoza.
- Moreno-García, M. C. (2012). Cambio climático y espacios urbanos. In F. Fernández-García, E. Galán-Gallego, & M. R. Cañada-Torrecilla (Eds.), *Clima, ciudad y ecosistemas* (Asociación, pp. 135–140). Ediciones del Serbal.  
<http://aeclim.org/documentacion/clima-ciudad-y-ecosistemas/>
- Moreno-García, M. C. (2022). El clima urbano ideal ¿realidad o ficción? In *Leyendo el territorio* (1st ed., pp. 112–117). Universidad de Guadalajara.
- Moreno-García, M. C. (1998). Las investigaciones sobre el clima urbano de las ciudades españolas. In F. Fernández-García, E. Galán-Gallego, & M. R. Cañada-Torrecilla (Eds.), *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas* (1st ed., pp. 177–196). Parteluz. <https://doi.org/84-8230-016-4>
- Moreno-García, M. C., & Baena, I. (2019). The Microclimatic Effect of Green Infrastructure (GI) in a Mediterranean City: the Case of the Urban Park of Ciutadella (Barcelona, Spain). *Arboriculture & Urban Forestry*, 45(3), 99–107.  
<https://doi.org/10.48044/jauf.2019.009>
- Moreno-García, M. C., & Martín-Vide, J. (2007). Dos ejemplos de gradientes térmicos elevados en superficies naturales y artificiales en verano. *Nimbus*, 19, 181–190.  
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2573461.pdf>
- Moreno-García, M. C., & Serra Pardo, J. A. (2016). El estudio de la isla de calor urbana en el ámbito mediterráneo: una revisión bibliográfica. *Biblio 3W*, 21, 30–34.  
<http://revistes.ub.edu/index.php/b3w/article/view/26368>
- Moreno-García, M. C., & Serra Pardo, J. A. (2017). La Isla de Calor en la ciudad de Lloret de Mar. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 73, 247–267.
- Morris, C. J. G., Simmonds, I., & Plummer, N. (2001). Quantification of the Influences of Wind and Cloud on the Nocturnal Urban Heat Island of a Large City. *Journal of Applied Meteorology*, 40(2), 169–182. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<0169:QOTIOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<0169:QOTIOW>2.0.CO;2)

- Muller, C. L., Chapman, L., Grimmond, C. S. B., Young, D. T., & Cai, X.-M. (2013a). Sensors and the city: a review of urban meteorological networks. *International Journal of Climatology*, 33(7), 1585–1600. <https://doi.org/10.1002/joc.3678>
- Muller, C. L., Chapman, L., Grimmond, C. S. B., Young, D. T., & Cai, X.-M. (2013b). Toward a Standardized Metadata Protocol for Urban Meteorological Networks. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(8), 1161–1185. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00096.1>
- Myrup, L. O. (1969). A Numerical Model of the Urban Heat Island. *Journal of Applied Meteorology*, 8(6), 908–918. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1969\)008<0908:ANMOTU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1969)008<0908:ANMOTU>2.0.CO;2)
- Neves, G., Gallardo, N., & Vecchia, F. (2017). A Short Critical History on the Development of Meteorology and Climatology. *Climate*, 5(1), 23. <https://doi.org/10.3390/cli5010023>
- Ngarambe, J., Nganyiyimana, J., Kim, I., Santamouris, M., & Yun, G. Y. (2020). Synergies between urban heat island and heat waves in Seoul: The role of wind speed and land use characteristics. *PLOS ONE*, 15(12), e0243571. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243571>
- Nieto Ferreira, R. (2021). Cut-Off Lows and Extreme Precipitation in Eastern Spain: Current and Future Climate. *Atmosphere*, 12(7), 835. <https://doi.org/10.3390/atmos12070835>
- Nieto, R., Gimeno, L., Añel, J. A., De la Torre, L., Gallego, D., Barriopedro, D., Gallego, M., Gordillo, A., Redaño, Á., & Delgado, G. (2007). Analysis of the precipitation and cloudiness associated with COLs occurrence in the Iberian Peninsula. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 96(1–2), 103–119. <https://doi.org/10.1007/s00703-006-0223-6>
- 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>
- Núñez-Peiró, M., Mavrogianni, A., Symonds, P., Sánchez-Guevara, C., & Neila González, F. J. (2021). Modelling Long-Term Urban Temperatures with Less Training Data: A Comparative Study Using Neural Networks in the City of Madrid. *Sustainability*, 13(15), 8143. <https://doi.org/10.3390/su13158143>
- Oficina de Organización y Servicios Generales, & Observatorio Municipal de Estadística. (2021). Cifras de Zaragoza. Datos demográficos obtenidos del padrón municipal de habitantes. In Ayuntamiento de Zaragoza. Área de Presidencia Hacienda e Interior. (Ed.), *Revista Cifras de Zaragoza* (Vol. 7). <https://www.zaragoza.es/cont/paginas/estadistica/pdf/Cifras-Zaragoza-2021.pdf>
- Oke, T. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), 7(8),

- 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Oke, T. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, 1(3), 237–254. <https://doi.org/10.1002/joc.3370010304>
- 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. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1–3), 103–113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)
- Oke, T. (2006). *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*. <https://library.wmo.int/idurl/4/35333>
- Oke, T. (2021). Urban Observations. In *Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8)* (World Mete, pp. 387–415). World Meteorological Organization (WMO).
- Oke, T., & Fuggle, R. F. (1972). Comparison of urban/rural counter and net radiation at night. *Boundary-Layer Meteorology*, 2(3), 290–308. <https://doi.org/10.1007/BF02184771>
- Oke, T., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Oke, T. R. (1984). Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. *Energy and Buildings*, 7(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(84\)90040-9](https://doi.org/10.1016/0378-7788(84)90040-9)
- Ôkita, T. (1953). On the Mechanism of Dissipation of Fog by Model Wood. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 31(7), 237–247. [https://doi.org/10.2151/jmsj1923.31.7\\_237](https://doi.org/10.2151/jmsj1923.31.7_237)
- Olcina-Cantos, J. (2001). Situaciones atmosféricas y tipos de tiempo. In J. Martín-Vide & J. Olcina-Cantos (Eds.), *Climas y tiempos de España* (1st ed., pp. 81–102). Alianza Editorial.
- Oliveira, A., Lopes, A., & Niza, S. (2020a). Local climate zones classification method from Copernicus land monitoring service datasets: An ArcGIS-based toolbox. *MethodsX*, 7, 101150. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101150>
- Oliveira, A., Lopes, A., & Niza, S. (2020b). Local climate zones in five southern European cities: An improved GIS-based classification method based on Copernicus data. *Urban Climate*, 33(April), 100631. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100631>
- Organización Meteorológica Mundial, O. (2014). *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos: Vol. Actualizac* (OMM-N° 8).
- Organización Meteorológica Mundial, O. (2018). Gestión de datos climáticos. In *Guía de prácticas climatológicas* (OMM-N° 100, pp. 44–65).
- Organización Meteorológica Mundial, O. (2021). 3. Elementos del aseguramiento de la calidad del ciclo de vida de los datos. In *Directrices para el control de la calidad y el*

*aseguramiento de la calidad de los datos de estaciones de observación en superficie para aplicaciones climáticas* (OMM-Nº 126, pp. 9–23).

- Ortega, M., Sánchez, E., Gutiérrez, C., Molina, M. O., & López-Franca, N. (2023). Regional winds over the Iberian Peninsula (Cierzo, Levante and Poniente) from high-resolution <scp>COSMO-REA6</scp> reanalysis. *International Journal of Climatology*, 43(2), 1016–1033. <https://doi.org/10.1002/joc.7860>
- Oyler, J. W., Ballantyne, A., Jencso, K., Sweet, M., & Running, S. W. (2015). Creating a topoclimatic daily air temperature dataset for the conterminous United States using homogenized station data and remotely sensed land skin temperature. *International Journal of Climatology*, 35(9), 2258–2279. <https://doi.org/10.1002/joc.4127>
- Papanastasiou, D. K., & Kittas, C. (2012). Maximum urban heat island intensity in a medium-sized coastal Mediterranean city. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(3–4), 407–416. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0491-z>
- Pathirana, A., Denekew, H. B., Veerbeek, W., Zevenbergen, C., & Banda, A. T. (2014). Impact of urban growth-driven landuse change on microclimate and extreme precipitation — A sensitivity study. *Atmospheric Research*, 138, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.10.005>
- Pearlmutter, D., Krüger, E. L., & Berliner, P. (2009). The role of evaporation in the energy balance of an open-air scaled urban surface. *International Journal of Climatology*, 29(6), 911–920. <https://doi.org/10.1002/joc.1752>
- Pellicer Corellano, F. (2015). La recuperación de las riberas del Ebro en Zaragoza. Un efecto perdurable del evento efímero Expo 2008. In J. De la Riva, P. Ibarra, R. Montorio, & M. Rodrigues (Eds.), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación* (pp. 353–362). [https://congresoage.unizar.es/eBook/trabajos/037\\_PellicerCorellano.pdf](https://congresoage.unizar.es/eBook/trabajos/037_PellicerCorellano.pdf)
- Pellicer Corellano, F., & Monclús Fraga, J. (2006). El proyecto Expo 2008: arquitectura, ciudad, arte público. *Artigrama*, 21, 197–213. <http://www.unizar.es/artigrama/pdf/21/2monografico/08.pdf>
- Peppler, A. (1929). Das auto als hilfsmittel der meteorologischen forschung. *Das Wetter*, 46, 305–308.
- Pereira, S. C., Carvalho, D., & Rocha, A. (2021). Temperature and Precipitation Extremes over the Iberian Peninsula under Climate Change Scenarios: A Review. *Climate*, 9(9), 139. <https://doi.org/10.3390/cli9090139>
- Pérez-Cueva, Alejandro José. (1993). Brisas e isla térmica urbana en Valencia. In *Aportaciones en homenaje al profesor Luis Miguel Albentosa* (1st ed., pp. 193–204).
- Pérez-Cueva, Alejandro José, & Canet Molla, J. (1998). Análisis del confort climático en Valencia. In F. Fernández-García, E. Galán-Gellego, & M. R. Cañada-Torrecilla (Eds.), *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas* (1st ed., pp. 343–356). Parteluz.
- Pérez González, C., & Pérez Jiménez, M. (1998). La isla de calor de Mataró. In F.

Fernández-García, E. Galán-Gellego, & M. R. Cañada-Torrecilla (Eds.), *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas* (1st ed., pp. 293–304). Parteluz.

Perez Vitaller, A. (2013). *Movera, su Historia y sus Gentes*. Movera.  
<http://www.barriodemovera.es>

Pietrapertosa, F., Olazabal, M., Simoes, S. G., Salvia, M., Fokaides, P. A., Ioannou, B. I., Vigiú, 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>

*Plan Director del Parque Grande José Antonio Labordeta*. (2010).

*Plan General de Ordenación Urbana de Zaragoza*. (1999).

*Plan General de Ordenación Urbana de Zaragoza*. (2007).

Quan, S. J., & Bansal, P. (2021). A systematic review of GIS-based local climate zone mapping studies. *Building and Environment*, 196, 107791.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107791>

Quan, S. J., Dutt, F., Woodworth, E., Yamagata, Y., & Yang, P. P.-J. (2017). Local Climate Zone Mapping for Energy Resilience: A Fine-grained and 3D Approach. *Energy Procedia*, 105, 3777–3783. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.883>

Rafailidis, S. (1997). Influence of Building Areal Density and Roof Shape on the Wind Characteristics Above a Town. *Boundary-Layer Meteorology*, 85(2), 255–271.  
<https://doi.org/10.1023/A:1000426316328>

Ramamurthy, P., & Bou-Zeid, E. (2017). Heatwaves and urban heat islands: A comparative analysis of multiple cities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(1), 168–178.  
<https://doi.org/10.1002/2016JD025357>

Rasilla-Álvarez, D., Allende-Álvarez, F., & Fernández-García, F. (2015). La isla de calor urbano de Madrid durante la ola de calor de julio 2015. In *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio* (1st ed., pp. 575–584). <http://hdl.handle.net/10045/58023>

Ribeiro, I., Martilli, A., Falls, M., Zonato, A., & Villalba, G. (2021). Highly resolved WRF-BEP/BEM simulations over Barcelona urban area with LCZ. *Atmospheric Research*, 248(July 2020), 105220. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105220>

Richard, Y., Pohl, B., Rega, M., Pergaud, J., Thevenin, T., Emery, J., Dudek, J., Vairet, T., Zito, S., & Chateau-Smith, C. (2021). Is Urban Heat Island intensity higher during hot spells and heat waves (Dijon, France, 2014–2019)? *Urban Climate*, 35, 100747.  
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100747>

Risk, C., & James, P. M. A. (2022). Optimal Cross-Validation Strategies for Selection of Spatial Interpolation Models for the Canadian Forest Fire Weather Index System. *Earth and Space Science*, 9(2). <https://doi.org/10.1029/2021EA002019>

Rodler, A., & Leduc, T. (2019). Local climate zone approach on local and micro scales: Dividing the urban open space. *Urban Climate*, 28, 100457.

<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100457>

Rodríguez-Gómez, F., Fernández-Cañero, R., Pérez, G., Del Campo-Ávila, J., López-Rodríguez, D., & Pérez-Urrestarazu, L. (2022). Detection of unfavourable urban areas with higher temperatures and lack of green spaces using satellite imagery in sixteen Spanish cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 78, 127783. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127783>

Rodríguez Algeciras, J. A., & Matzarakis, A. (2016). Quantification of thermal bioclimate for the management of urban design in Mediterranean climate of Barcelona, Spain. *International Journal of Biometeorology*, 60(8), 1261–1270. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1121-8>

Rodríguez, R., Barriendos, M., Jones, P. D. D., Martín-Vide, J., & Peña, J. C. (2001). Long pressure series for Barcelona (Spain). Daily reconstruction and monthly homogenization. *International Journal of Climatology*, 21(13), 1693–1704. <https://doi.org/10.1002/joc.696>

Romero Rodríguez, L., Sánchez Ramos, J., Sánchez de la Flor, F. J., & Álvarez Domínguez, S. (2020). Analyzing the urban heat Island: Comprehensive methodology for data gathering and optimal design of mobile transects. *Sustainable Cities and Society*, 55(January), 102027. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102027>

Rosselló Verger, V. M. (2003). Antonio López Gómez, climatólogo pionero. In A. . Pérez Cueva, E. López-Baeza, & J. Tamayo-Carmona (Eds.), *En memoria de D. Antonio López Gómez* (Garmas Imp, pp. 9–11). Asociación Española de Climatología (AEC). [http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0001\\_PU-SB-2003-V\\_ROSELLO.pdf](http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0001_PU-SB-2003-V_ROSELLO.pdf)

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In S. Freden, E. Mercanti, & M. Becker (Eds.), *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* (Vol. 351, Issue 1, pp. 309–317). NASA. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>

Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J. R., Johnson, D. M., Kennedy, R., Scambos, T. A., Schaaf, C. B., Schott, J. R., Sheng, Y., Vermote, E. F., Belward, A. S., Bindschadler, R., Cohen, W. B., Gao, F., ... Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>

Royé, D., Codesido, R., Tobías, A., & Taracido, M. (2020). Heat wave intensity and daily mortality in four of the largest cities of Spain. *Environmental Research*, 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>

Ruescas Orient, A. B., Quereda Sala, J., Montón Chiva, E., Escrig Barberá, J., & Mollá Cantavella, B. (2003). La detección del efecto térmico urbano a través de las imágenes NOAA. *Cuadernos de Geografía*, 73, 343–362.

<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/1030679.pdf>

- Ruiz-Álvarez, M., Alonso-Sarria, F., & Gomariz-Castillo, F. (2019). Interpolation of Instantaneous Air Temperature Using Geographical and MODIS Derived Variables with Machine Learning Techniques. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(9), 382. <https://doi.org/10.3390/ijgi8090382>
- Sachs, A. (2016). Lewis Mumford's Urbanism and the Problem of Environmental Modernity. *Environmental History*, 21(4), 638–659. <https://doi.org/10.1093/envhis/emw034>
- 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>
- Salat, S., Labbé, F., & Nowacki, C. (2011). *Cities and forms on sustainable urbanism* (CSTB Urban). Hermann.
- Salvador, C., Gullón, P., Franco, M., & Vicedo-Cabrera, A. M. (2023). Heat-related first cardiovascular event incidence in the city of Madrid (Spain): Vulnerability assessment by demographic, socioeconomic, and health indicators. *Environmental Research*, 226, 115698. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115698>
- Salvia, M., Olazabal, M., Fokaides, P. A., Tardieu, L., Simoes, S. G., Geneletti, D., De Gregorio-Hurtado, S., Vigiú, 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>
- Sasakura, K. (1931). Air temperature difference between Tokyo and its suburb. *Geographical Review of Japan*, 7(7), 551–559.
- Saz, M. Á., Barrao, S., Cuadrat, J. M., Virto, A., López-Marqués, N., De Luis, M., Campillos, M., Serrano-Notivoli, R., & Tejedor, E. (2022). *Excepcionalidad térmica del verano de 2022 en la ciudad de Zaragoza*.
- 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.
- Schmidt, W. (1929). Die verteilung der minimumtemperaturen in der frostnacht des 12 Mai 1927 im gemeindegebiet von Wien. In *Fortschritte der Landwirtschaft* (Vol. 2, Issue 21).
- Scott, A. A., Waugh, D. W., & Zaitchik, B. F. (2018). Reduced Urban Heat Island intensity under warmer conditions. *Environmental Research Letters*, 13(6), 064003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabd6c>
- 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>

- See, L., Mills, G., & Ching, J. (2015). Community initiative tackles urban heat. *Nature*, 526(7571), 43–43. <https://doi.org/10.1038/526043b>
- Serrano-Notivoli, R. (2017). *Reconstrucción climática instrumental de la precipitación diaria en España ensayo metodológico y aplicaciones*. Universidad de Zaragoza.
- Serrano-Notivoli, R., Beguería, S., & De Luis, M. (2019). STEAD: A high-resolution daily gridded temperature dataset for Spain. *Earth System Science Data*, 11(3), 1171–1188. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1171-2019>
- Serrano-Notivoli, R., Beguería, S., Saz, M. Á., Longares, L. A., & De Luis, M. (2017). SPREAD: a high-resolution daily gridded precipitation dataset for Spain-an extreme events frequency and intensity overview. *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 721–738. <https://doi.org/10.5194/essd-9-721-2017>
- 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>
- Shen, L., & Li, C. (2010). Water body extraction from Landsat ETM&#x002B; imagery using adaboost algorithm. *2010 18th International Conference on Geoinformatics*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567762>
- Shen, T. (2015). *Evaluation of urban heat island situation in developed cities of Zhejiang province* [University of Nottingham]. <https://eprints.nottingham.ac.uk/30441/>
- 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>
- Sobrino, J. A., & Oltra-Carrió, R. (2012). La campaña DESIREX en Madrid. Determinación de la isla de calor. In F. Fernández-García, E. Galán-Gallego, & M. R. Cañada-Torrecilla (Eds.), *Clima, ciudad y ecosistemas* (Asociación, pp. 141–164). Ediciones del Serbal.
- Sobrino, J. A., Oltra-Carrió, R., Sòria, G., Bianchi, R., & Paganini, M. (2012). Impact of spatial resolution and satellite overpass time on evaluation of the surface urban heat island effects. *Remote Sensing of Environment*, 117, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.042>
- Sobrino, J. A., Sòria, G., Oltra-Carrió, R., Jiménez-Muñoz, J. C., Romaguera, M., Cuenca, J., Hidalgo, V., Franch, B., Mattar, C., Julien, Y., Bianchi, R., Paganini, M., Moreno, J. F., Alonso, L., Fernández-Renau, A., Gómez, J. A., De Miguel, E., Gutiérrez, Ó., Jiménez, M., ... Gimeno, L. (2009). DESIREX 2008: Estudio de la isla de calor en la Ciudad de Madrid. *Revista de Teledetección*, 31, 80–92.

- Soler Temprano, X. (1998). Avance sobre la isla de calor en Girona. In F. Fernández-García, E. Galán-Gellego, & M. R. Cañada-Torrecilla (Eds.), *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas* (1st ed., pp. 281–292). Parteluz.
- Steele, W., Maccallum, D., Byrne, J., & Houston, D. (2012). Planning the Climate-just City. *International Planning Studies*, *17*(1), 67–83.  
<https://doi.org/10.1080/13563475.2011.638188>
- 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. (2019). Why should urban heat island researchers study history? *Urban Climate*, *30*, 100484. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100484>
- 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>
- Středová, H., Středa, T., & Litschmann, T. (2015). Smart tools of urban climate evaluation for smart spatial planning. *Moravian Geographical Reports*, *23*(3), 47–57.  
<https://doi.org/10.1515/mgr-2015-0017>
- Su, S., Tian, J., Dong, X., Tian, Q., Wang, N., & Xi, Y. (2022). An Impervious Surface Spectral Index on Multispectral Imagery Using Visible and Near-Infrared Bands. *Remote Sensing*, *14*(14), 3391. <https://doi.org/10.3390/rs14143391>
- Sun, D., Pinker, R. T., & Kafatos, M. (2006). Diurnal temperature range over the United States: A satellite view. *Geophysical Research Letters*, *33*(5).  
<https://doi.org/10.1029/2005GL024780>
- Sundborg, Å. (1950). Local Climatological Studies of the Temperature Conditions in an Urban Area. *Tellus*, *2*(3), 222–232. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v2i3.8544>
- 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>
- Taheri-Shahraiyini, H., & Sodoudi, S. (2017). High-resolution air temperature mapping in urban areas: A review on different modelling techniques. *Thermal Science*, *21*(6 Part A), 2267–2286. <https://doi.org/10.2298/TSCI150922094T>
- Takahashi, M. (1959). Relation between the air temperature distribution and the density of houses in small cities in Japan. *Geographical Review of Japan*, *32*(6), 305–313.
- Tam, B. Y., Gough, W. A., & Mohsin, T. (2015). The impact of urbanization and the urban heat island effect on day to day temperature variation. *Urban Climate*, *12*, 1–10.  
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.12.004>
- Tardif, R., & Rasmussen, R. M. (2007). Event-Based Climatology and Typology of Fog in the New York City Region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *46*(8), 1141–1168. <https://doi.org/10.1175/JAM2516.1>

- Taulé Codinach, G. (2022). El clima urbà de Girona [Universitat de Barcelona]. In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://www.tdx.cat/handle/10803/674330>
- Tejeda Martínez, A., Utrera Zárata, A., García, L. G., Jáuregui Ostos, D. E., Víctor, Z., & Moreno-García, M. C. (2004). Posibles causas de flujos diurnos negativos de vapor de agua en el verano en Barcelona. In *El agua y el clima* (1st ed., pp. 357–366). Asociación Española de Climatología. [http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0037\\_PU-SA-III-2002-A\\_TEJEDA.pdf](http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0037_PU-SA-III-2002-A_TEJEDA.pdf)
- Tejedor, E., Cuadrat, J. M., Saz, 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. In E. Olcina Cantos, Jorge; Rico Amorós, Antonio M.; Moltó Mantero (Ed.), *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio* (Asociación, pp. 141–151). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante. <https://doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-13>
- Tobías, A., Royé, D., & Íñiguez, C. (2023). Heat-attributable Mortality in the Summer of 2022 in Spain. *Epidemiology*, *34*(2), e5–e6. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000001583>
- Tomas-Burguera, M., Jiménez Castañeda, A., Luna Rico, M. Y., Morata, A., Vicente-Serrano, S., González-Hidalgo, J. C., & Beguería, S. (2016). Control de calidad de siete variables del banco nacional de datos de AEMET. In *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio* (Universida, pp. 407–415). Servicio de Publicaciones de la UA. <https://doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-38>
- Tran, T. T. K., Bateni, S. M., Ki, S. J., & Vosoughifar, H. (2021). A Review of Neural Networks for Air Temperature Forecasting. *Water*, *13*(9), 1294. <https://doi.org/10.3390/w13091294>
- Unger, J., Lelovics, E., & Gál, T. (2014). Local Climate Zone mapping using GIS methods in Szeged. *Hungarian Geographical Bulletin*, *63*(1), 29–41. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.63.1.3>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, P. D. (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. ., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N. (2003). Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, *37*(2), 155–182. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00857-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00857-9)
- Vautard, R., Yiou, P., & van Oldenborgh, G. J. (2009). Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years. *Nature Geoscience*, *2*(2), 115–119. <https://doi.org/10.1038/ngeo414>
- Velleman, P., & Hoaglin, D. (1981). Applications, Basics, and Computing of Exploratory Data Analysis. In *Duxbury Press*. Duxbury Press. <https://hdl.handle.net/1813/78>
- Venter, Z. S., Brousse, O., Esau, I., & Meier, F. (2020). Hyperlocal mapping of urban air temperature using remote sensing and crowdsourced weather data. *Remote Sensing of Environment*, *242*(March), 111791. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111791>

- 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.
- Vicente-Serrano, S., Rodríguez-Camino, E., Domínguez-Castro, F., El Kenawy, A., & Azorín-Molina, C. (2017). An updated review on recent trends in observational surface atmospheric variables and their extremes over Spain. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 43(1), 209–232. <https://doi.org/10.18172/cig.3134>
- Videras-Rodríguez, M., Gómez-Melgar, S., & Andújar-Márquez, J. M. (2022). Assessment of aerial thermography as a method of in situ measurement of radiant heat transfer in urban public spaces. *Sustainable Cities and Society*, 87, 104228. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104228>
- von Hann, J. (1903). *Handbook of climatology*.
- 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)
- Wang, R., Ren, C., Xu, Y., Lau, K. K.-L., & Shi, Y. (2018). Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: A case study of Hong Kong. *Urban Climate*, 24, 567–576. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.001>
- Waqar, 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://doi.org/http://dx.doi.org/10.4172/scientificreports.136>
- Ward, K., Lauf, S., Kleinschmit, B., & Endlicher, W. (2016). Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers. *Science of The Total Environment*, 569–570, 527–539. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.119>
- 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>
- Weng, Q., Fu, P., & Gao, F. (2014). Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 145, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.003>
- Wilson, E. H., & Sader, S. A. (2002). Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80(3), 385–396. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00318-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00318-2)
- WMO, W. M. O. (2017). Guide to the Global Observing System. In *WMO-No. 488* (Issue 488). WMO. [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=12516#.YSYbe8btZUM](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=12516#.YSYbe8btZUM)
- WMO, W. M. O. (2018). Guide to Instruments and Methods of Observation. In

*Measurement of Meteorological Variables: Vol. I* (Issue 8). WMO.  
[https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10616](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10616)

- Wouters, H., Demuzere, M., Blahak, U., Fortuniak, K., Maiheu, B., Camps, J., Tielemans, D., & van Lipzig, N. P. M. (2016). The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v1.0 for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3027–3054. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3027-2016>
- Xia, H., Chen, Y., Song, C., Li, J., Quan, J., & Zhou, G. (2022). Analysis of surface urban heat islands based on local climate zones via spatiotemporally enhanced land surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 273, 112972. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112972>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Xu, H. (2008). A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14), 4269–4276. <https://doi.org/10.1080/01431160802039957>
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Yang, Jason, & Du, X. (2017). An enhanced water index in extracting water bodies from Landsat TM imagery. *Annals of GIS*, 23(3), 141–148. <https://doi.org/10.1080/19475683.2017.1340339>
- Yang, Jiachuan, Wang, Z.-H., & Kaloush, K. E. (2015). Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a ‘silver bullet’ for mitigating urban heat island? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 830–843. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.092>
- Yeste Navarro, I. (1993). Pervivencias y modificaciones del trazado medieval del casco urbano de Zaragoza en época contemporánea. *Aragón En La Edad Media*, 10–11, 907–924.
- Yeste Navarro, I. (2004). Reforma interior y ensanche en la segunda mitad del siglo XIX en Zaragoza: el plano geométrico. *Artigrama*, 19, 427–451. [https://doi.org/10.26754/ojs\\_artigrama/artigrama.2004198348](https://doi.org/10.26754/ojs_artigrama/artigrama.2004198348)
- Yoshino, M. M. (1975). *Climate in a Small Area: An Introduction to Local Meteorology*. UNIVERSITY OF TOKYO PRESS. <https://archive.org/details/climateinsmallar0000yosh/page/n7/mode/2up>
- Yuan, F., & Bauer, M. E. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106(3), 375–386. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003>
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in

automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>

- 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>
- Zhang, Y., Murray, A. T., & Turner, B. L. (2017). Optimizing green space locations to reduce daytime and nighttime urban heat island effects in Phoenix, Arizona. *Landscape and Urban Planning*, 165, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.04.009>
- Zhao, L., Oppenheimer, M., Zhu, Q., Baldwin, J. W., Ebi, K. L., Bou-Zeid, E., Guan, K., & Liu, X. (2018). Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 13(3), 034003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f73>
- Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Frohling, S., Yao, R., Qiao, Z., & Sobrino, J. A. (2019). Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives. In *Remote Sensing* (Vol. 11, Issue 1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs11010048>
- Ziska, L. H., Bunce, J. A., & Goins, E. W. (2004). Characterization of an urban-rural CO<sub>2</sub> /temperature gradient and associated changes in initial plant productivity during secondary succession. *Oecologia*, 139(3), 454–458. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1526-2>

## Anexos

### I. Base de datos de publicaciones sobre climatología urbana española

Año	Autor	Título	Ciudad	Variable	Metodología
1943	Gavira, J.	Sobre la existencia de un clima de ciudad		Teórico	
1954	López-Gómez, Antonio	La ciudad y las variaciones climáticas		Teórico	
1961	López-Gómez, Antonio	¿Está cambiando el clima de Madrid?	Madrid	Temperatura, Precipitación, Humedad Relativa y Viento	Un observatorio urbano
1976	Calvo-Palacios, José Luis	Aportación metodológica al estudio geográfico del microclima urbano	Zaragoza	Temperatura y Viento	Un observatorio urbano
1981	Albero, Vicente; Calvo, Fernando	Estudio comparativo del viento en los Observatorios de Valencia - Viveros y Valencia - Aeropuerto	Valencia	Viento	
1982	Fernández García, Felipe	Intensidad del viento en Madrid y sus alrededores	Madrid	Viento	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1984	Cano, J. L.; Maqueda, G.	Estudio de las modificaciones locales del régimen de viento modificadas por la construcción de edificios		Viento	
1984	Fernández-García, Felipe	Madrid: Microclima y medio ambiente	Madrid	Temperatura, Precipitación y Niebla	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1984	López-Gómez, Antonio; Fernández-García, Felipe	La isla de calor en Madrid: avance de un estudio de clima urbano	Madrid	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1985	López-Gómez, Antonio	El clima de las ciudades		Teórico	
1987	Moreno García, María Carmen	Frecuencias de la precipitación según los días de la semana en Barcelona	Barcelona	Precipitación	Un observatorio urbano

1988	López-Gómez, Antonio	El clima urbano de Madrid: la isla de calor	Madrid	Temperatura	Transectos urbanos
1989	Brunet India, Manola	Los efectos de la urbanización en el clima local. Un ensayo de climatología urbana: el caso de tarragona	Tarragona		
1989	Caselles, V.; López-García, M. J.; Meliá, J.; Pérez-Cueva, A.J	El efecto de la isla térmica de la ciudad de valencia, obtenida a partir de transectos e imágenes NOAA-AVHRR	Valencia	Temperatura y Temperatura de Superficie	Teledetección y Transectos urbanos
1989	Cuadrat Prats, José María	Las oscilaciones climáticas recientes en Zaragoza (1865-1984)	Zaragoza	Temperatura	Un observatorio urbano
1989	Furadada, M. D.; Condal, M. T.	L'illa de calor de igualada	Igualada	Temperatura	
1989	García-Ruiz, José M.; Ortigosa Izquierdo, Luis María; Arnáez-Vadillo, José; Gómez Villar, Amelia	Organización espacial de las temperaturas en la ciudad de Logroño	Logroño	Temperatura	Transectos urbanos
1989	Meliá, J.; Caselles, V.; López García, M. J.	Estudio del efecto de isla térmica de la ciudad de Valencia	Valencia	Temperatura	
1990	Almendros, Miguel Ángel	Aspectos climáticos de los parques y jardines de Madrid	Madrid		
1990	Carreras Verdaguer, Carles; Marín Ramos, Mercedes; Martín Vide, Javier; Moreno García, María Carmen; Sabi Bonastre, Joan	Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la isla de calor en Barcelona	Barcelona	Temperatura	Transectos urbanos
1990	Fernández-García, Felipe	La influencia de la ciudad sobre las precipitaciones: El caso de Madrid.	Madrid	Precipitación	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1990	García Codron, J. C.	Los microclimas urbanos y las ciudades cantábricas; papel de los factores locales.	Cantabria		

1990	López-Gómez, Antonio; Moreno Jiménez, Antonio; Fernández-García, Felipe; et al.	La temperatura diurna en la aglomeración de Madrid mediante imágenes remotas.	Madrid	Temperatura y Temperatura de Superficie	Teledetección y Transectos urbanos
1990	Martín Vide, Javier	La percepción del clima en las ciudades	Barcelona	Precipitación	Percepción mediante encuestas
1990	Moreno García, María Carmen	Bibliografía sobre Climatología urbana: la "isla de calor", I		Teórico	Revisión bibliográfica
1991	Álvarez, R.; Jiménez, A.; Lozano, R.	El fenómeno de "Isla de calor": el caso de Molins de Rei	Molins de Rei	Temperatura	
1991	Arroyo-Ilera, Fernando; Fernández-García, Felipe	Aproximación al conocimiento del confort térmico urbano de Madrid	Madrid	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1991	Ballester-Olmos Anguís, José Francisco	La vegetación y el confort humano en la ciudad	Valencia	Confort térmico	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1991	Ballester-Olmos Anguís, José Francisco	El medio ambiente urbano y la vegetación. Estudio de la situación de la ciudad de Valencia	Valencia	Confort térmico	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1991	Caselles, V.; López García, M. J.; Meliá, J.; Pérez Cueva, A. J.	Analysis of the heat-island effect of the city of Valencia, Spain, through air temperature transects and NOAA satellite data	Valencia	Temperatura y Temperatura de Superficie	Teledetección y Transectos urbanos
1991	Imanol, Goikoetxea	El medio ambiente urbano en Donostia: observaciones sobre la "isla de calor" generada en el medio urbano	Donostia	Temperatura	
1991	López, M. J.; Caselles, V.; Meliá, J.; Pérez-Cueva, A.	NOAA-AVHRR contribution to the analysis of urban heat islands	Valencia	Temperatura y Temperatura de Superficie	Teledetección y Transectos urbanos
1991	Moreno García, María Carmen	La intensidad de la "isla de calor" de Barcelona. Comparación con otras ciudades españolas	Barcelona	Temperatura	Transectos urbanos y Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1991	Moreno García, María Carmen	Notas acerca de la precipitación diaria en cuatro capitales catalanas	Barcelona, Lleida, Tarragona y Girona	Precipitación	Un observatorio urbano

1991	Moreno García, María Carmen	Unas notas históricas acerca de la Climatología urbana		Teórico	
1991	Moreno García, María Carmen	Estudio del clima urbano de Barcelona: "la isla de calor"	Barcelona		
1991	Yagüe, C.; Zurita, E.; Martínez, A.	Statistical analysis of the Madrid urban heat island	Madrid	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1992	Almendros Coca, Miguel Ángel	Aspectos climáticos del Parque del Retiro (Madrid).	Madrid	Temperatura	Transectos urbanos
1992	Arroyo Ilera, Rafael; Fernández García, Felipe; López-Gómez, Antonio	Clima urbano: la isla de calor	Madrid	Temperatura	
1992	Brunet India, Manola	La magnitud y fluctuaciones de la "isla de calor" en Tarragona	Tarragona	Temperatura	
1992	Coronas Salcedo, Alberto; Brunet India, Manola	La aplicación del análisis de Fourier al establecimiento de contrastes térmicos urbano-rurales	Tarragona	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1992	Dorta, P.; Marzol, M. V.; Rodríguez, J.	Estudio del clima urbano en una ciudad litoral. El caso de Santa Cruz de Tenerife (Islas Canarias)	Santa Cruz de Tenerife	Temperatura	Un observatorio urbano
1992	Fernández García, Felipe; Arroyo Ilera, Rafael; López-Gómez, Antonio	Clima urbano: confortabilidad térmica	Madrid	Temperatura	
1992	Fernández-García, Felipe; López-Gómez, Antonio; Almendros, Miguel Ángel	El clima urbano del S y SE del área metropolitana madrileña	Alcalá de Henares, Arganda del Rey y San Fernando de Henares	Temperatura	Transectos urbanos y Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1992	Martín Vide, Javier	L'illa de calor barcelonina i d'altres ciutats catalanes	Barcelona	Temperatura	
1992	Martín Vide, Javier; Moreno García, María Carmen; Sabí, J.	Avance de resultados sobre la isla de calor de Barcelona y otras ciudades catalanas	Barcelona	Temperatura	

1992	Marzol, M. V.; Dorta, P.; Rodríguez, J.	Variations temporelles et particularités de la température horaire dans la ville de Santa Cruz de Tenerife (Îles Canaries)	Santa Cruz de Tenerife	Temperatura	Un observatorio urbano
1992	Moreno García, María Carmen	Bibliografía sobre Climatología urbana: la "isla de calor", II		Teórico	Revisión bibliográfica
1992	Pérez-Cueva, A.	El clima urbà de Valencia	Valencia	Temperatura, Precipitación, Humedad Relativa y Viento	
1993	Algaba, Antonio; Muñoz, Francisco M.; Solana, A. Miguel	Ciutat i medi ambient : l'illa de calor urbana a l'Hospitalet	Hospitalet de Llobregat	Temperatura	Transectos urbanos
1993	Almendros, Miguel Ángel	Aspectos climáticos sobre la Casa de Campo de Madrid	Madrid	Temperatura	Transectos urbanos
1993	Ballester-Olmos Anguís, José Francisco	Interacciones de la vegetación urbana con el microclima, la polución atmosférica y el hombre		Teórico	
1993	Bello, Vicente	La isla de calor y la tipología de los espacios urbanos		Teórico	
1993	Brunet-India, M.	El comportamiento de la humedad relativa en la ciudad de Tarragona y sus alrededores	Tarragona	Humedad Relativa	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1993	Cuadrat Prats, José María	Los climas urbanos en el Valle del Ebro	Zaragoza, Logroño, Huesca y Teruel	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Transectos urbanos
1993	Cuadrat Prats, José María; De la Riva Fernández, Juan; López Martín, Fernando; Martí Ezpeleta, Alberto	Ciudad y medio ambiente: La isla de calor de Teruel	Teruel	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Transectos urbanos
1993	Cuadrat Prats, José María; De la Riva, Juan; López Martín, Fernando; Martí, Alberto	La ciudad y el clima, "la isla de calor" de Zaragoza	Zaragoza	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Transectos urbanos

1993	Cuadrat Prats, José María; De la Riva, Juan; Lopez, Fernando; Martí, Alberto	El medio ambiente urbano en Zaragoza. Observaciones sobre la "isla de calor"	Zaragoza	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Transectos urbanos
1993	Fernández-García, Felipe; López-Gómez, Antonio; Arroyo-Ilera, Fernando	Frecuencia e intensidad de la isla de calor de Madrid	Madrid	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Transectos urbanos
1993	López-Gómez, Antonio; Fernández-García, Felipe; Arroyo, Fernando	El clima de otras ciudades españolas	Cuenca, Cáceres, Burgos, Valladolid, Salamanca, Santander, San Sebastián y Valencia	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Transectos urbanos
1993	López-Gómez, Antonio; Fernández-García, Felipe; Arroyo, Fernando	El clima urbano de Madrid y su entorno	Madrid	Temperatura, Temperatura de Superficie, Precipitación y Confort térmico	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Transectos urbanos
1993	López-Gómez, Antonio; Fernández-García, Felipe; Arroyo, Fernando; Martín Vide, Javier; Cuadrat Prats, José María	El clima de las ciudades españolas		Teórico	
1993	López-Gómez, Antonio; López-Gómez, J.; Fernández-García, Felipe; Moreno-Jiménez, Antonio	El clima urbano. Teledetección de la isla de calor en Madrid	Madrid	Temperatura	Teledetección y Transectos urbanos
1993	Martín Vide, Javier	Los climas urbanos de Cataluña	Igualada, Molins de Rei, Sabadell, Terrasa, Hospitalet de Llobregat y Tarragona	Temperatura, Precipitación, Radiación, Humedad Relativa y Viento	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Transectos urbanos
1993	Pérez Cueva, Alejandro José	Brisas e isla térmica urbana en Valencia	Valencia	Temperatura y Viento	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Transectos urbanos
1994	Bello Fuentes,	La isla de calor y los usos	Guadalajara	Temperatura	Transectos urbanos

	Vicente	del suelo en Guadalajara			
1994	Moreno García, María Carmen	Intensity and form of the urban heat island in Barcelona	Barcelona	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Transectos urbanos
1994	Pérez-Cueva, A.	El clima urbà de Valencia	Valencia	Temperatura, Precipitación, Humedad Relativa y Viento	
1994	San Pedro Mendoza, Francisco	Aproximación al análisis de los climas urbanos sobre series horarias	Bilbao	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1995	Almendros Coca, Miguel Ángel; Fernández García, Felipe	Riesgos de origen climático en la ciudad: el caso de Madrid	Madrid		
1995	Almendros, Miguel Ángel; López-Gómez, Antonio	La isla de calor en Madrid y las situaciones sinópticas.	Madrid	Temperatura	Transectos urbanos
1995	Bello Fuentes, Vicente	El clima en el Valle Bajo del Henares la isla de calor en sus áreas urbanas. Las inversiones térmicas	Guadalajara y Alcalá de Henares	Temperatura	Transectos urbanos
1995	Bello Fuentes, Vicente	La isla de calor nocturna y los usos del suelo en Alcalá de Henares	Alcalá de Henares	Temperatura	Transectos urbanos
1995	Domínguez Bascón, Pedro	Inversiones de temperatura en el valle del Guadalquivir: un factor climático de gran influencia en el medio ambiente de la ciudad de Córdoba	Córdoba	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1995	López Martín, Fernando	Nota sobre la percepción del clima urbano: el ejemplo de la ciudad de Zaragoza	Zaragoza	Precipitación	Percepción mediante encuestas
1995	López-Gómez, Antonio	Tres referencias al clima urbano de Madrid en la segunda mitad del siglo XIX.	Madrid	Teórico	
1995	López-Gómez, Antonio; Almendros-Coca, Miguel Ángel; Fernández-García,	El clima urbano de Madrid. Tipologías de la isla de calor	Madrid	Temperatura	Transectos urbanos

	Felipe				
1995	López-Gómez, Antonio; Fernández-García, Felipe; Arroyo-Ilera, Fernando	Teledetección y clima urbano. Variaciones nocturnas y diurnas de las islas de calor en Madrid	Madrid	Temperatura	Teledetección y Transectos urbanos
1996	Almendros Coca, Miguel Ángel; Fernández García, Felipe	La precipitación y el viento como riesgos climáticos urbanos: El caso de Madrid	Madrid	Precipitación y Viento	Un observatorio urbano
1996	Fernández-García, Felipe; López-Gómez, Antonio	La influencia del relieve en la isla de calor de Madrid: las vaguadas del Manzanares y del Abroñigal	Madrid	Temperatura	Transectos urbanos
1997	De La Riva, Juan Ramón; Cuadrat, José María; López Martín, Fernando; Martí, Alberto	Aplicación de las imágenes Landsat TM al estudio de la isla térmica de Zaragoza. Primeros resultados	Zaragoza	Temperatura y Temperatura de Superficie	Teledetección
1997	López Martín, Fernando	Riesgos climáticos en la ciudad de Zaragoza	Zaragoza	Precipitación y Viento	Un observatorio urbano
1997	Moreno García, María Carmen	Una propuesta de terminología castellana en Climatología Urbana		Teórico	
1998	(Coord.)Cañada Torrecilla, Rosa; Galán Gallego, Encarnación; Fernández García, Felipe	Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas		Teórico	
1998	Almendros Coca, Miguel Ángel	La isla de calor en Madrid: notas sobre barrios centrales	Madrid	Temperatura	Transectos urbanos
1998	Alvarez Pedrero, Rafael Erik	La isla de calor en Valladolid	Valladolid	Temperatura	Transectos urbanos
1998	Amelia, Gómez-Villar; Ortigosa Izquierdo, Luis María; Sobrón García, Ignacio	El microclima urbano de Logroño en invierno: un modelo espacial de comportamiento higratérmico	Logroño	Humedad Relativa	Transectos urbanos
1998	Barriendos Vallvé, Mariano	Consideraciones sobre el ambiente urbano durante la revolución industrial en la Barcelona de los siglos XVII-XIX	Barcelona	Teórico	

1998	Cañada Torrecilla, Rosa; Almendros Coca, Miguel Ángel	Relación entre la intensidad de la isla de calor de Madrid y las variables del sondeo	Madrid	Temperatura y Gradiente térmico	Transectos urbanos y Un observatorio urbano
1998	Fernández-García, Felipe	Clima y ambiente urbano		Teórico	
1998	García Hernández, Ernesto; Fernández-García, Felipe; Allende Álvarez, Fernando; Soriano Carrillo, Jesús	Estimación de la inercia térmica aparente en el Parque del Retiro y centro de Madrid utilizando imágenes térmicas obtenidas desde avión	Madrid	Temperatura de Superficie	Teledetección
1998	García Marchante, Joaquín Saúl; Fernández Fernández, María Cristina	Crecimiento urbano y las modificaciones térmicas en la ciudad de Cuenca	Cuenca	Temperatura	Transectos urbanos y Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1998	Gomez, F.; Gaja, E.; Reig, A.	Vegetation and climatic changes in a city	Valencia	Temperatura	Transectos urbanos
1998	Guijarro Pastor, José Antonio	Influencia de la urbanización en las series termométricas de baleares	Palma de Mallorca	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1998	López Martín, Fernando	Nota sobre el viento en el casco urbano de Zaragoza: un factor de planificación urbana	Zaragoza	Viento	Transectos urbanos
1998	López-Gómez, Antonio	El clima de Madrid según los autores de los siglos XVI-XIX	Madrid	Teórico	
1998	López-Gómez, Antonio; Fernández-García, Felipe; Fernández-Renau, A.; García-Hernández, E.; Arroyo-Ilera, Fernando	Temperaturas nocturnas y diurnas en Madrid a partir de teledetección aeroportada	Madrid	Temperatura	Teledetección
1998	Martí Ezpeleta, Alberto; Miragaya Veras, Antonio	Geometría urbana, temperaturas e isla de calor en Santiago de Compostela	Santiago de Compostela	Temperatura y Temperatura de Superficie	Transectos urbanos y Campaña de mediciones puntuales
1998	Martín Vide, Javier; Gómez Navarro, Lidia; Moreno García, María Carmen	Distribución de la precipitación según el día de la semana en varias ciudades españolas	Madrid, Barcelona, Valencia, Málaga y La Coruña	Precipitación	Un observatorio urbano

1998	Miragaya Veras, Antonio; Martí Ezpeleta, Alberto	Distribución espacio-temporal de las temperaturas en A Coruña en condiciones atmosféricas de estabilidad	A Coruña	Temperatura	Transectos urbanos
1998	Montávez Gómez, Juan Pedro; Emilia, Sánchez; Jiménez Jiménez, Juan Ignacio	Un estudio de la intensidad y forma de la isla de calor de Granada	Granada	Temperatura	Transectos urbanos y Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1998	Moreno García, María Carmen	Las investigaciones sobre el clima urbano de las ciudades españolas		Teórico	
1998	Olcina Cantos, Jorge; Vera Rebollo, José Fernando	La propaganda del clima en Alicante a finales del siglo XIX: las obras de promoción turística como fuente para el estudio del clima de la ciudad	Alicante	Teórico	
1998	Pérez Cueva, Alejandro José; Canet Molla, Josefa	Análisis del confort climático en Valencia	Valencia	Temperatura y Confort térmico	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1998	Pérez González, C; Pérez Jiménez, M	La isla de calor de Mataró	Mataró	Temperatura	Transectos urbanos
1998	Soler Temprano, Xavier	Avance sobre la isla de calor en Girona	Girona	Temperatura	Transectos urbanos
1999	Almendros, Miguel Ángel	Análisis térmico de los pequeños parques urbanos madrileños	Madrid	Temperatura	Transectos urbanos
1999	Domínguez Bascón, Pedro	Clima, medio ambiente y urbanismo en Córdoba: contribución a la planificación ambiental en ciudades del ámbito mediterráneo	Córdoba	Temperatura y Precipitación	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
1999	Fernández-García, Felipe; García-Hernández, E.; Allende, Fernando; Fernández-Renau, A.; González-Arnau, A.; Gómez-Sánchez, J. A.; Rasilla, D.; Barroso, A.	Airborne remote sensing as a tool to study the links between land use and urban heat island	Madrid	Temperatura de Superficie	Teledetección
1999	Moreno García,	Climatología Urbana		Teórico	

	María Carmen				
2000	Caselles Miralles, Vicente; Enric, Valor; Rubio Caballero, Eva María; Sospedra Arnau, Francisco; Coll Company, César; Sánchez Aguayo, F	Análisis comparativo del efecto de isla térmica de la ciudad de Valencia con imágenes TM, MUST y AVHRR.	Valencia	Temperatura de Superficie	Teledetección
2000	Montávez, Juan P.; Rodríguez, Antonio; Jiménez, Juan I.	A study of the Urban Heat Island of Granada	Granada	Temperatura	Transectos urbanos y Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2000	Montávez, Juan Pedro; Jiménez, Juan Ignacio; Sarsa, Antonio	A Monte Carlo Model Of The Nocturnal Surface Temperatures In Urban Canyons	Granada	Temperatura de Superficie	Modelización
2001	Arroyo-Illera, Fernando	In memoriam Antonio López Gómez		Teórico	
2001	Barriendos Vallvé, Mariano; Moreno García, María Carmen	Climas urbanos y variabilidad climática		Teórico	
2001	Brunet India, Manola	El comportamiento de la humedad relativa en la ciudad de Tarragona y sus alrededores.	Tarragona	Humedad Relativa	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2001	Fernández García, Felipe; López-Gómez, Antonio; Arroyo Ilera, Fernando	Frecuencia e intensidad de la isla de calor en Madrid	Madrid	Temperatura	Transectos urbanos
2001	Fernández-García, Felipe	El clima urbano de Madrid y su influencia sobre el confort térmico	Madrid	Temperatura y Confort térmico	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2001	Fernández-García, Felipe	Clima y calidad ambiental en las ciudades: propuesta metodológica y aplicación al área de Madrid	Madrid	Temperatura	Transectos urbanos y Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2001	Gómez, F.; Tamarit, N.; Jabaloyes, J.	Green zones, bioclimatics studies and human comfort in the future development of urban planning	Valencia	Temperatura y Confort térmico	Transectos urbanos

2001	Hernández, A. I.; Márquez, J. A.; Rivero, A.; Romero, L. E.	La "isla de calor" en Las Palmas de Gran Canaria: Magnitud, distribución espacial y morfología urbana	Las Palmas	Temperatura	Transectos urbanos
2001	Moreno García, María Carmen	Alteración del clima en ciudades españolas		Teórico	
2001	Ortigosa Izquierdo, Luis María; Sobrón García, Ignacio; Amelia, Gómez-Villar	Microclima higrorotémico invernal de Logroño: Aportación al análisis del confort urbano	Logroño	Humedad Relativa	Transectos urbanos
2001	Pérez Cueva, Alejandro José	Clima i confort en les ciutats: la ciutat de València	Valencia	Temperatura y Confort térmico	Transectos urbanos
2001	Pérez Cueva, Alejandro José	Brisas e isla térmica urbana en Valencia	Valencia	Temperatura y Viento	Transectos urbanos
2001	Rodríguez, R.; Barriendos, M.; Jones, P. D.; Martín-Vide, J.; Peña, J. C.	Long pressure series for Barcelona (Spain). Daily reconstruction and monthly homogenization	Barcelona	Presión	Un observatorio urbano
2002	Alonso García, M. S.; Labajo-Salazar, J. L.; Fidalgo Martínez, M. R.	La isla de calor de Salamanca	Salamanca	Temperatura	Transectos urbanos
2002	Cuadrat Prats, José María; Saz Sánchez, Miguel Ángel; Vicente Serrano, Sergio	Clima urbano y calidad ambiental de la ciudad de Zaragoza	Zaragoza	Temperatura	Transectos urbanos
2002	Domínguez Bascón, Pedro	Clima regional y microclimas urbanos en la provincia de Córdoba	Córdoba		
2002	Fernández García, Felipe	Antonio López Gómez. Reflexiones a partir de su obra		Teórico	
2002	Fernández García, Felipe	Clima de Madrid	Madrid		
2002	López Martín, Fernando	El clima en el medio ambiente urbano de Zaragoza	Zaragoza	Temperatura	Transectos urbanos
2002	Mederos, M. del Carmen Bejarano	Los estudios de la isla de calor en Madrid		Teórico	

2002	Moreno García, María Carmen; Martín Vide, Javier	Algunas ideas propias de la climatología urbana de cara a la planificación urbana y rural		Teórico	
2002	Ramis Noguera, Climent; Joan, Perelló; Gual Frau, Mateu	La isla de calor urbana en Palma de Mallorca	Mallorca	Temperatura	Transectos urbanos
2003	(Eds) Pérez-Cueva, A.J.; López-Baeza, E.; Tamayo-Carmona, J.	En memoria de D. Antonio López Gómez		Teórico	
2003	Alonso, M. S.; Labajo-Salazar, J. L.; Fidalgo, M. R.	Characteristics of the urban heat island in the city of Salamanca, Spain	Salamanca	Temperatura	Transectos urbanos
2003	Cañada-Torrecilla, María Rosa; Fernández-García, Felipe	La obra de López Gómez y su influencia en la evolución reciente de la climatología española		Teórico	
2003	Cuadrat Prats, José María; Vicente Serrano, Sergio	Surface wind direction influence on spatial patterns of urban heat island in Zaragoza (Spain)	Zaragoza	Temperatura y Viento	Transectos urbanos y Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2003	de Salinas Estébanez, Roberto	El clima urbano y la isla de calor en Miranda de Ebro	Miranda de Ebro	Temperatura	Transectos urbanos
2003	Fernández-García, Felipe; Montavéz, J.P	A PCA analysis of the UHI form of Madrid (Spain)	Madrid	Temperatura	Transectos urbanos
2003	López-Gómez, Antonio	El clima de las ciudades		Teórico	
2003	Martín Vide, Javier; Moreno García, María Carmen	Spatial differences in the urban heat island of the Pre- and the Post-Olympic Barcelona (Spain)	Barcelona	Temperatura	Transectos urbanos
2003	Miragaya Veras, Antonio	Medio ambiente urbano en A Coruña: el papel de la dinámica atmosférica y de los factores locales	A Coruña		
2003	Montávez, J. P.; González-Rouco, J. F.; Valero, F	A Study of The Three-Dimensional UHI by Using a Mesoscale Model	Granada	Temperatura	Transectos urbanos
2003	Montávez, J. P.; González-Rouco,	A set of equations for determining the maximum	Granada	Temperatura	Transectos urbanos

	J. F.; Valero, F	intensity of nocturnal urban heat island			
2003	Pérez-González, M. E.; García-Rodríguez, M. P.; Guerra-Zaballos, A.	Análisis del clima urbano a partir de imágenes de satélite en el centro peninsular español	Madrid, Segovia, Ávila, Guadalajara y Toledo	Temperatura de Superficie	Teledetección
2003	Roselló, Vicenç Maria	Antonio López Gómez, climatólogo pionero		Teórico	
2003	Ruescas Orient, Ana Belén; Quereda Sala, José; Montón Chiva, Enrique; Escrig Barberá, José; Mollá Cantavella, Belén	La detección del efecto térmico urbano a través de las imágenes NOAA	Murcia y Alicante	Temperatura de Superficie	Teledetección y Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2003	Saz Sánchez, Miguel Ángel; Vicente-Serrano, Sergio; Serrano, J; Prats, Cuadrat	Spatial patterns estimation of urban heat island of Zaragoza (Spain) using GIS	Zaragoza	Temperatura	Transectos urbanos
2003	Vicente Serrano, Sergio; Cuadrat Prats, José María; Saz Sánchez, Miguel Ángel	Topography and vegetation cover influence on urban heat island of Zaragoza (Spain)	Zaragoza	Temperatura	Transectos urbanos
2004	Almendros, Miguel Ángel	Modelo para la elaboración de un mapa urbano de isotermas: el caso de Madrid	Madrid	Temperatura	Transectos urbanos
2004	Caballero, Elena	Microclimas urbanos: La importancia de los materiales	Córdoba	Temperatura de Superficie	Campaña de mediciones puntuales
2004	Cañada Torrecilla, Rosa	La probabilidad de la precipitación diaria en Badajoz: aplicación del modelo estocástico de la cadena de Markov de dos estados	Badajoz	Precipitación	Un observatorio urbano
2004	Cuadrat Prats, José María	Patrones temporales de la isla de calor urbana de Zaragoza	Zaragoza	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2004	García Barrón, Leoncio; González Pérez, Maribel; Antonio, Ramírez	Influencia del efecto urbano: inhomogeneidad y sistema de conversión de las series de temperatura en Badajoz	Badajoz	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural

2004	García Codrón, Juan Carlos	Las ciudades españolas y el riesgo de inundación: permanencia y cambio de un problema crónico		Teórico	
2004	Gómez Navarro, Lidia; Moreno García, María Carmen; Raso Nadal, Josep M	Tasas de mortalidad media diaria en Barcelona estimadas para distintos umbrales barométricos	Barcelona	Presión	Un observatorio urbano
2004	López Bermúdez, Francisco	Variaciones y tendencias de las temperaturas en Murcia durante los últimos 140 años	Murcia	Temperatura	Un observatorio urbano
2004	Marías Martínez, Daniel	Bibliografía de don Antonio López Gómez		Teórico	
2004	Miorenó Jiménez, Antonio; Fernández García, Felipe	Confort climático y nivel de renta en la Comunidad de Madrid: un estudio exploratorio de su relación espacial	Madrid	Temperatura y Confort térmico	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Red urbana de sensores
2004	Montávez Gómez, Juan Pedro; Fidel, González-Rouco Jesús; Valero López, Francisco José	Un estudio de la isla de calor mediante un modelo mesoescalar	Madrid	Temperatura	Modelización
2004	Montávez Gómez, Juan Pedro; Valero Rodríguez, Francisco; Fernández García, Felipe; Fidel, González-Rouco Jesús	Relación entre la estructura espacial de la isla térmica y la morfología urbana de Madrid	Madrid	Temperatura	Transectos urbanos
2004	Rosselló, Vicenç Maria	Antonio López Gómez. Semblanza personal y científica		Teórico	
2004	Tejeda Martínez, Adalberto; Utrera Zárate, Alberto; Gustavo, García Luis; Jáuregui Ostos, Domingo Ernesto; Víctor, Zarraluqui; Moreno García, María Carmen	Posibles causas de flujos diurnos negativos de vapor de agua en el verano en Barcelona	Barcelona	Variable atmosférica	Campaña de mediciones puntuales
2005	Cuadrat Prats, José María; Vicente Serrano, Sergio Martín; Saz	Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): la isla de calor y sus factores	Zaragoza	Temperatura	Transectos urbanos

	Sánchez, Miguel Ángel	condicionantes			
2005	García Barrón, L.; Sousa, A.; Jurado, V.; Andrade, F.; Morales, J.	Analyse saisonniere de l'ilot de chaleur urbain a Badajoz (Espagne)	Badajoz	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2005	Romero Martín, Lidia Esther; Máyer Suárez, Pablo Lucas; Hernández Cordero, Antonio; Ruiz Flaño, Purificación; Márquez Pérez, José Ángel	El comportamiento térmico de la ciudad de Las Palmas de G. C.: la isla de calor nocturna	Las Palmas	Temperatura	Transectos urbanos
2005	Vicente Serrano, Sergio M; Cuadrat Prats, José María.; Saz Sánchez, Miguel Ángel	Spatial patterns of the urban heat island in Zaragoza (Spain)	Zaragoza	Temperatura	Transectos urbanos
2007	Alonso, MS; Fidalgo, MR; Labajo, JL	The urban heat island in Salamanca (Spain) and its relationship to meteorological parameters	Salamanca	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2007	Azorín-Molina, Cesar; Martín-Vide, J.	Methodological approach to the study of the daily persistence of the sea breeze in Alicante (Spain)	Alicante	Viento	Un observatorio urbano
2007	Moreno García, María Carmen	Climatología Urbana		Teórico	
2007	Moreno García, María Carmen; Martín Vide, Javier	Dos ejemplos de gradientes térmicos elevados en superficies naturales y artificiales en verano	Carbonera	Temperatura y Temperatura de Superficie	Campaña de mediciones puntuales
2008	Fernández-García, Felipe; Rasilla-Álvarez, Domingo	Olas de calor e influencia urbana en Madrid y su área metropolitana	Madrid	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2008	Montávez, Juan Pedro; González-Rouco, Jesús Fidel; Valero, Francisco	A simple model for estimating the maximum intensity of nocturnal urban heat Island		Teórico	
2008	Romero Martín, Lidia Esther; Ruiz Flaño, Purificación; Máyer Suárez, Pablo Lucas;	Análisis de la distribución espacial de la isla de calor urbana en Las Palmas de Gran Canaria mediante el uso de sistemas de información geográfica.	Las Palmas	Temperatura	Transectos urbanos

	Hernández Cordero, Antonio	Resultados preliminares			
2008	Ruiz Flaño, Purificación; Romero Martín, Lidia Esther; Máyer Suárez, Pablo Lucas; Hernández Cordero, Antonio	La isla de calor en Las Palmas de Gran Canaria: intensidad, distribución y factores condicionantes	Las Palmas	Temperatura	Transectos urbanos
2009	Fernández-García, Felipe	Ciudad y cambio climático: aspectos generales y aplicación al área metropolitana de Madrid	Madrid	Teórico	
2009	Pérez Cueva, Alejandro José	El clima urbano de Valencia y el confort climático	Valencia	Teórico	
2009	Sobrino, J. A.; et al.	DESIREX 2008: Estudio de la isla de calor en la Ciudad de Madrid	Madrid	Temperatura y Temperatura de Superficie	Combinación de metodologías de medición
2010	Casas, M. Carmen; Rodríguez, Raúl; Redaño, Ángel	Analysis of extreme rainfall in Barcelona using a microscale rain gauge network	Barcelona	Precipitación	Red urbana de sensores
2010	Fernández-García, Felipe; Galán-Gallego, Encarnación; Cañada Torrecilla, María Rosa	Clima, ciudad y ecosistemas		Teórico	
2010	Fernández-García, Felipe; Rasilla-Álvarez, Domingo; Galán-Gallego, Encarnación; Cañada-Torrecilla, María Rosa	Caracterización del régimen bioclimático medio del área metropolitana de Madrid, mediante la aplicación de la temperatura fisiológica (PET)	Madrid	Temperatura y Confort térmico	Un observatorio urbano
2010	Taulé, Gerard	El efecto urbano en las temperaturas de Girona	Girona	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2011	Fernández-García, Felipe; Martilli, Alberto	Urban climate research in Spain		Teórico	
2011	López Martín, Fernando	Clima urbano y ciudad. El caso de Zaragoza	Zaragoza	Temperatura, Precipitación, Niebla y Viento	Transectos urbanos y Comparación de dos o más observatorios

					urbano y/o rural
2012	Fernández-García, Felipe; Martilli, Alberto	El clima urbano: aspectos generales y su aplicación al área de Madrid	Madrid	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Transectos urbanos
2012	Fernández-García, Felipe; Rasilla, Domingo	Thermal stress and urban influence in the Metropolitana Area of Madrid	Madrid	Temperatura	Red de distintos observatorios
2012	Martilli, Alberto	Modelización del clima urbano a mesoescala		Teórico	
2012	Moreno García, María Carmen	Cambio climático y espacios urbanos		Teórico	
2012	Salamanca, Francisco; Martilli, Alberto; Yagüe, Carlos	A numerical study of the Urban Heat Island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies	Madrid	Temperatura y Viento	Combinación de metodologías de medición
2012	Sobrino, J. A.; Oltra-Carrión, R.	La campaña DESIREX en Madrid. Determinación de la isla de calor	Madrid	Temperatura	Combinación de metodologías de medición
2012	Sobrino, J.A.; Oltra-Carrión, R.; Sòria, G.; Bianchi, R.; Paganini, M.	Impact of spatial resolution and satellite overpass time on evaluation of the surface urban heat island effects	Madrid	Temperatura de Superficie	Teledetección
2012	Taulé, Gerard	Distribución temporal y espacial de los extremos térmicos en la zona urbana de Girona	Girona	Temperatura	Red de distintos observatorios
2013	Acero, Juan A.; Arrizabalaga, Jon; Kupski, Sebastian; Katzschner, Lutz	Urban heat island in a coastal urban area in northern Spain	Bilbao	Temperatura	Transectos urbanos y Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2013	Fernández-García, Felipe; Rasilla-Álvarez, Domingo	Extreme warm events and urban comfort in the metropolitan area of Madrid: proposal of an urban heat index (UHINDEX)	Madrid	Temperatura	Red de distintos observatorios
2013	Fernández-García, Felipe; Rasilla-Álvarez, Domingo;	La isla de calor en Madrid durante los períodos cálidos	Madrid	Teórico	

	Allende, Fernando				
2013	Sanginés Coral, Daniel Eric	Metodología de evaluación de la isla de calor urbana y su utilización para identificar problemáticas energéticas y de planificación urbana	Zaragoza	Temperatura y Temperatura de Superficie	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Transectos urbanos
2013	Sobrino, J. A.; et al.	Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing	Madrid	Temperatura	Combinación de metodologías de medición
2014	Cuadrat Prats, José María; Saz Sánchez, Miguel Ángel; Serrano-Notivoli, Roberto; Tejedor, Ernesto	EL CLIMA DEL TÉRMINO MUNICIPAL DE ZARAGOZA EN EL CONTEXTO DEL CAMBIO GLOBAL	Zaragoza	Temperatura y Temperatura de Superficie	Red de distintos observatorios
2015	Banks, Robert F.; Tiana-Alsina, Jordi; Rocadenbosch, Francesc; Baldasano, José M.	Performance Evaluation of the Boundary-Layer Height from Lidar and the Weather Research and Forecasting Model at an Urban Coastal Site in the North-East Iberian Peninsula	Barcelona	Variable atmosférica	Modelización
2015	Cuadrat Prats, José María; Saz Sánchez, Miguel Ángel; Serrano-Notivoli, Roberto; Tejedor, Ernesto	PATRONES TEMPORALES Y ESPACIALES DE LA TEMPERATURA URBANA DE ZARAGOZA	Zaragoza	Temperatura y Temperatura de Superficie	Red de distintos observatorios
2015	Cuadrat Prats, José María; Vicente-Serrano, Sergio; Saz Sánchez, Miguel Ángel	Influence of different factors on relative air humidity in Zaragoza, Spain	Zaragoza	Humedad Relativa	Transectos urbanos
2015	Martín Vide, Javier; Moreno García, María Carmen; M., Artola Víctor; Cordobilla Cascales, M José	Los tipos sinópticos de Jenkinson & Collison y la intensidad de la isla de calor barcelonesa	Barcelona	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2015	Rasilla Álvarez, Domingo Fernando; Allende Álvarez, Fernando; Fernández García, Felipe	La isla de calor urbano de Madrid durante la ola de calor de julio 2015	Madrid	Temperatura y Temperatura de Superficie	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Teledetección

2016	de la Paz, David; Borge, Rafael; Martílli, Alberto	Assessment of a high resolution annual WRF-BEP/CMAQ simulation for the urban area of Madrid (Spain)	Madrid	Viento	Modelización
2016	Fernández-García, Felipe	La climatología urbana en España en los últimos 30 años		Teórico	
2016	García-Díez, Markel; Lauwaet, Dirk; Hooyberghs, Hans; Ballester, Joan; De Ridder, Koen; Rodó, Xavier	Advantages of using a fast urban boundary layer model as compared to a full mesoscale model to simulate the urban heat island of Barcelona	Barcelona	Temperatura	Modelización
2016	Moreno García, María Carmen; Serra Pardo, Juan Antonio	El estudio de la isla de calor urbana en el ámbito mediterráneo: una revisión bibliográfica		Teórico	
2016	Rodríguez Algeciras, José Abel; Matzarakis, Andreas	Quantification of thermal bioclimate for the management of urban design in Mediterranean climate of Barcelona, Spain	Barcelona	Temperatura, Humedad Relativa y Viento	Modelización
2016	Tejedor, Ernesto; Cuadrat Prats, José María; Saz Sánchez, Miguel Ángel; Serrano-Notivolí, Roberto; López, Nieves; Aladrén, Mariano	Islas de calor y confort térmico en Zaragoza durante la ola de calor de julio de 2015	Zaragoza	Temperatura	Red urbana de sensores
2017	Fernández García, Felipe	El clima urbano de Madrid y su integración en las políticas de prevención del cambio climático	Madrid	Teórico	
2017	Fernández García, Felipe; Dominic, Royé	Biometeorological aspects of hot nights in the urban area of Madrid	Madrid	Temperatura y Temperatura de Superficie	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Teledetección
2017	Martín Vide, Javier	El cambio climático y las islas de calor urbanas. Cambios de escala y riesgos climáticos		Teórico	
2017	Moreno García, María Carmen; Serra Pardo, Juan Antonio	La Isla de Calor en la ciudad de Lloret de Mar	Lloret de Mar	Temperatura	Transectos urbanos

2018	Allende Álvarez, Fernando; Fernández García, Felipe; Rasilla Álvarez, Domingo Fernando	Isla de calor nocturna estival y confort térmico en Madrid: avance para un planeamiento térmico en áreas urbanas	Madrid	Temperatura y Temperatura de Superficie	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y Teledetección
2018	Alomar Garau, Gabriel; Llop Garau, Joan	La isla de calor urbana de Palma (Mallorca, Islas Baleares): avance para el estudio del clima urbano en una ciudad litoral mediterránea	Palma de Mallorca	Temperatura	Transectos urbanos
2018	Arroyo Ilera, Fernando; Fernández García, Felipe	ANTONIO LÓPEZ GÓMEZ y el desarrollo de la Climatología en España		Teórico	
2018	Lana, Xavier; Serra, C.; Casas-Castillo, M. C.; Rodríguez-Solà, R.; Redaño, A.; Burgueño, A.	Rainfall intensity patterns derived from the urban network of Barcelona (NE Spain)	Barcelona	Precipitación	Red urbana de sensores
2018	Millán-López, Alfredo; Fernández-García, Felipe	Propuesta de un índice climático-turístico adaptado al turismo de interior en la Península Ibérica: aplicación a la ciudad de Madrid	Madrid	Temperatura y otras variables	Desarrollo de índice turístico
2018	Taulé, Gerard	L'illa de calor urbana de Girona	Girona	Temperatura	Transectos urbanos
2019	Barrao, Samuel; Cuadrat Prats, José María; Saz Sánchez, Miguel Ángel; Serrano Notivoli, Roberto; Tejedor Vargas, Ernesto	Olas de calor y olas de frío en la ciudad de Zaragoza (España) y sus efectos sobre las enfermedades cardiorrespiratorias, 2011-2015	Zaragoza	Temperatura	Un observatorio urbano
2019	López-Bueno, J. A.; Díaz, J.; Linares, C.	Differences in the impact of heat waves according to urban and peri-urban factors in Madrid	Madrid	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2019	Dienst, Manuel; Lindén, Jenny; Saladié, Òscar; Esper, Jan	Detection and elimination of UHI effects in long temperature records from villages – A case study from Tivissa, Spain	Tivissa	Temperatura	Red urbana de sensores
2020	de la Rubia, Elena	Caracterización de la isla de calor urbana en el campus de la UAM por medio de	Madrid	Temperatura de Superficie	Teledetección

		teledetección			
2020	Lemus-Canovas, Marc; Martín-Vide, Javier; Moreno García, María Carmen; Lopez-Bustins, Joan A.	Estimating Barcelona's metropolitan daytime hot and cold poles using Landsat-8 Land Surface Temperature	Barcelona	Temperatura de Superficie	Teledetección
2020	Martín Vide, Javier; Moreno García, María Carmen	La intensidad de la isla de calor urbana, nuevo riesgo en las ciudades mediterráneas con el calentamiento global: El caso de Barcelona	Barcelona	Teórico	
2020	Martín-Vide, Javier; Moreno García, María Carmen	Probability values for the intensity of Barcelona's urban heat island (Spain)	Barcelona	Temperatura	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural
2020	Núñez Peiró, Miguel; Sánchez-Guevara Sánchez, Carmen; Neila González, Francisco Javier	Monitorización de la isla de calor en la ciudad de Madrid: Compendio de experiencias derivadas del proyecto MODIFICA	Madrid	Teórico	
2020	Senciales González, José María; Rodrigo Comino, Jesús; Peter, Smith	Surveying topographical changes and climate variations to detect the urban heat island in the city of Málaga (Spain)	Málaga	Temperatura	Red de distintos observatorios
2021	Alvarez, Irantzuz; Quesada-Ganuza, Laura; Briz, Estibaliz; Garmendia, Leire	Urban Heat Islands and Thermal Comfort: A Case Study of Zorrotzaurre Island in Bilbao	Bilbao	Teórico	
2021	Arellano Ramos, Blanca; Roca Cladera, Josep	Urban-CLIMPLAN: la Isla de Calor Urbana en la Región Metropolitana de Barcelona: estudio de la intensidad de la UHI diurna y nocturna a partir de diversos sensores	Barcelona	Temperatura de Superficie	Teledetección
2021	Barrao, Samuel; Serrano Notivoli, Roberto; Saz Sánchez, Miguel Ángel; Cuadrat Prats, José María	Análisis comparado de la temperatura de superficie y temperatura del aire de la isla de calor urbano de Zaragoza	Zaragoza	Temperatura y Temperatura de Superficie	Teledetección y Red urbana de sensores
2021	Cuadrat Prats, José María; Serrano-Notivoli, Roberto; Barrao, Samuel; Saz	Temporal variability of the urban heat island in Zaragoza (Spain)	Zaragoza	Temperatura	Red urbana de sensores

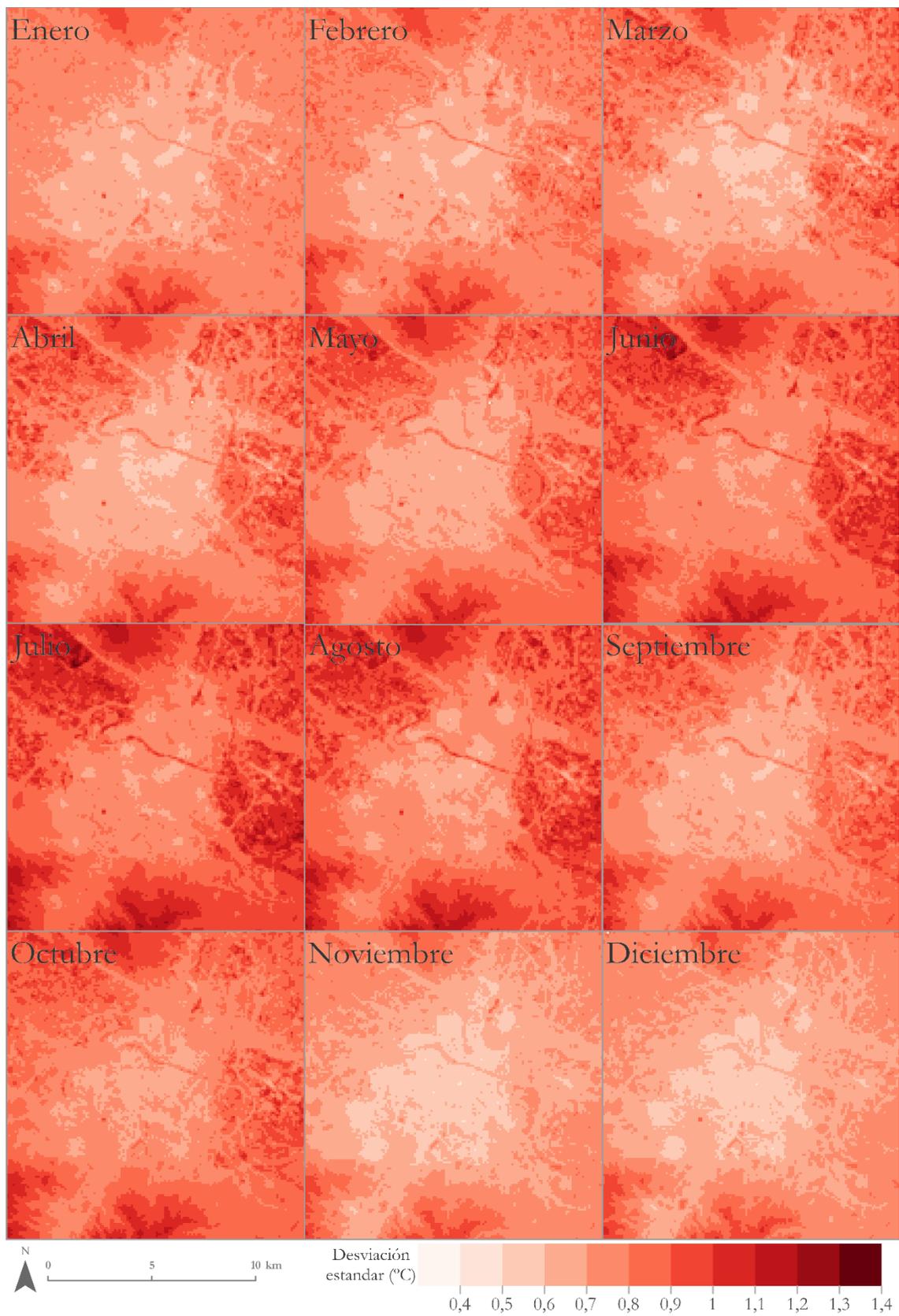
	Sánchez, Miguel Ángel; Tejedor, Ernesto				
2021	Martí Ezpeleta, Alberto; Dominic, Royé	Intensidad y duración del estrés térmico en verano en el área urbana de Madrid	Madrid	Temperatura y Confort térmico	Comparación de dos o más observatorios urbano y/o rural y UrbClim
2021	Martilli, Alberto; Sanchez, Beatriz; Rasilla, Domingo; Pappaccogli, Gianluca; Allende, Fernando; Martín, Fernando; Román-Cascón, Carlos; Yagüe, Carlos; Fernández-García, Felipe	Simulating the meteorology during persistent Wintertime Thermal Inversions over urban areas. The case of Madrid	Madrid	Temperatura	Modelización
2021	Núñez-Peiró, Miguel; Mavrogianni, Anna; Symonds, Phil; Sánchez-Guevara Sánchez, Carmen; Neila González, F. Javier	Modelling Long-Term Urban Temperatures with Less Training Data: A Comparative Study Using Neural Networks in the City of Madrid	Madrid	Temperatura	Modelización
2021	Ribeiro, I.; Martilli, A.; Falls, M.; Zonato, A.; Villalba, G.	Highly resolved WRF-BEP/BEM simulations over Barcelona urban area with LCZ	Barcelona	Temperatura y Humedad Relativa	Modelización
2022	Barrao, Samuel; Serrano-Notivoli, Roberto; Cuadrat-Prats, José María; Tejedor, Ernesto; Saz Sánchez, Miguel Ángel	Characterization of the UHI in Zaragoza (Spain) using a quality-controlled hourly sensor-based urban climate network	Zaragoza	Temperatura	Red urbana de sensores
2022	Barrao, Samuel; Serrano-Notivoli, Roberto; Saz Sánchez, Miguel Ángel; Cuadrat Prats, José María	Variabilidad estacional de la ICU en Zaragoza (España) mediante el uso de una red climática urbana	Zaragoza	Temperatura	Red urbana de sensores
2022	Cuadrat Prats, José María; Serrano-Notivoli, Roberto; Barrao, Samuel; Saz, Miguel Ángel; Tejedor, Ernesto	Variabilidad temporal de la isla de calor urbana de la ciudad de Zaragoza (España)	Zaragoza	Temperatura	Red urbana de sensores

2022	Hidalgo García, David	Analysis of Urban Heat Island and Heat Waves Using Sentinel-3 Images: a Study of Andalusian Cities in Spain	8 capitales andaluzas	Temperatura de Superficie	Teledetección
2022	Hidalgo García, David; Arco Díaz, Julián	Análisis de sinergias entre Isla de Calor Urbana y Olas de Calor mediante imágenes Sentinel 3 sobre la ciudad de Granada	Granada	Temperatura de Superficie	Teledetección
2022	Hidalgo García, David; Arco Díaz, Julián	Análisis espacio temporal de la Isla de Calor Urbana mediante imágenes satelitales: capitales de Andalucía	8 capitales andaluzas	Temperatura de Superficie	Teledetección
2022	Hidalgo-García, David; Arco Díaz, Julián; Martín Martín, Adelaida; Gómez Cobos, Emilio	Spatiotemporal Analysis of Urban Thermal Effects Caused by Heat Waves through Remote Sensing	8 capitales andaluzas	Temperatura de Superficie	Teledetección
2022	Hidalgo-García, David; Arco-Díaz, Julián	Modeling the Surface Urban Heat Island (SUHI) to study of its relationship with variations in the thermal field and with the indices of land use in the metropolitan area of Granada (Spain)	Granada	Temperatura de Superficie	Teledetección
2022	Martí Elias, Joan; Carles, Crosas	Morfología urbana y ciclo del agua en la metrópolis contemporánea: Potencial de las condiciones hidrográficas en fragmentos del Área Metropolitana de Barcelona	Barcelona	Precipitación	
2022	Moreno García, María Carmen	El clima urbano ideal ¿realidad o ficción?		Teórico	
2022	Rodríguez-Gómez, Francisco; Fernández-Cañero, Rafael; Pérez, Gabriel; del Campo-Ávila, José; López-Rodríguez, Domingo; Pérez-Urrestarazu, Luis	Detection of unfavourable urban areas with higher temperatures and lack of green spaces using satellite imagery in sixteen Spanish cities	16 ciudades	Temperatura de Superficie	Teledetección
2022	Segura, Ricard; Krayenhoff, E. Scott; Martilli, Alberto; Badia,	How do street trees affect urban temperatures and radiation exchange? Observations and	Barcelona	Temperatura y Humedad Relativa	Transectos urbanos

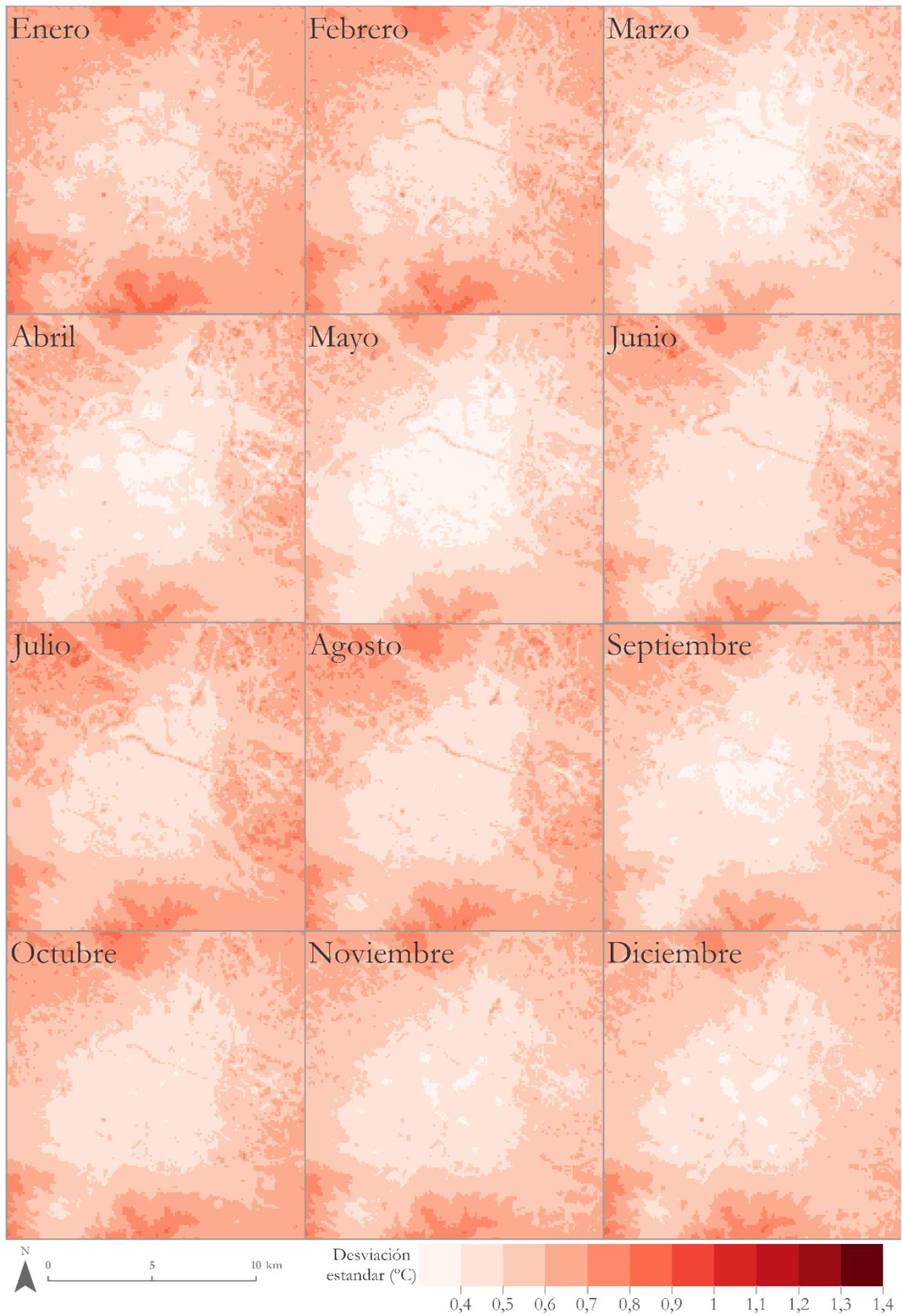
	Alba; Estruch, Carme; Ventura, Sergi; Villalba, Gara	numerical evaluation in a highly compact city			
2022	Taulé Codinach, Gerard	El clima urbà de Girona	Girona	Temperatura	Transectos urbanos
2022	Videras-Rodríguez, Marta; Gómez-Melgar, Sergio; Andújar-Márquez, José Manuel	Assessment of aerial thermography as a method of in situ measurement of radiant heat transfer in urban public spaces	Huelva	Temperatura de Superficie	Teledetección

## II. Mapa de error de la interpolación mensual

### a. Mapa mensual de la desviación estándar de la temperatura máxima



**b. Mapa mensual de la desviación estándar de la temperatura media**



c. Mapa mensual de la desviación estándar de la temperatura mínima

