



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

GRADO EN GEOGRAFÍA Y ORDENACIÓN DEL
TERRITORIO



TRABAJO FIN DE GRADO

Director: Domingo Rasilla Álvarez

Curso 2022 / 2023

TEMPERATURA DE SUPERFICIE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MADRID DURANTE UNA OLA DE CALOR

LAND SURFACE TEMPERATURE IN MADRID
METROPOLITAN AREA DURING A HEAT WAVE

|

Miguel Toribio Pérez

Julio del 2023

RESUMEN

La temperatura de la superficie terrestre es un parámetro fundamental en las interacciones entre la superficie terrestre y la atmósfera. Este Trabajo de Fin de Grado analiza la distribución diurna de la temperatura de la superficie terrestre en el área metropolitana de Madrid durante una ola de calor y su relación con los usos del suelo, con variables socioeconómicas y con la temperatura del aire.

Una imagen térmica de Landsat 8 correspondiente a la escena del 18 de julio del 2022, así como varios índices espectrales, se compararon con información procedente del CORINE Land Cover (2018), el Atlas de distribución de renta de los hogares (2019) y otras fuentes adicionales.

Los resultados muestran un patrón espacial en forma de “isla de frescor”, en el que las temperaturas más elevadas corresponden a zonas periféricas, con suelos desnudos o de escasa vegetación, y las más frescas a superficies verdes o acuáticas. Dentro de los espacios urbanizados también se observan puntos “calientes” y “frescos”. La distribución de la temperatura muestra una correlación positiva con índices que reflejan el grado de impermeabilidad del terreno (NDBI, BSI, MSI), pero negativa y ligeramente menos significativa con la extensión de las superficies verdes (NDVI, EVI etc.). Igualmente, se ha comprobado que la temperatura de superficie registra una correlación negativa con dos indicadores socioeconómicos, uno de renta y otro de envejecimiento. Finalmente, no hay relación estadísticamente significativa entre la temperatura de superficie y la temperatura máxima del aire durante las horas diurnas.

PALABRAS CLAVE: temperatura de la superficie terrestre, área metropolitana de Madrid, usos del suelo.

ABSTRACT

The Land Surface Temperature is an essential parameter in the interactions between the earth's surface and the atmosphere. This paper evaluates the distribution of land surface temperature in the Madrid metropolitan area during a heat wave episode and its relationship with land uses, socio-economic variables, and the air temperature.

A thermal Landsat 8 image corresponding to July 18th 2022 scene, as well as several spectral indices were compared with information from CORINE Land Cover (2018), the so-

called *Atlas de distribución de renta de los hogares* (2019) and many additional sources. Several indices were also calculated from the spectral bands.

The results show a spatial pattern which resembles an "urban cool island", in which the warmest temperatures correspond to the periphery, mostly covered by bare soils or sparse vegetation, and the coolest to green or water surfaces. Within urbanized spaces, "hot" and "cool" spots are also observed, the former corresponding to urbanized surfaces with small vertical development, and the latter to urban parks. The temperature distribution shows a positive correlation with indicators informing about the level of impervious of the soil (NDBI, BSI, MSI), but negative and slightly less significant with the extend of green surfaces (NDVI, EVI etc.). Likewise, it has been verified that the surface temperature registers a negative correlation with two socioeconomic indicators, one related to income and the other related to ageing. Finally, no statistically significant relationship was found between the land surface temperature and the maximum air temperature during daylight hours.

PALABRAS CLAVE: land surface temperature, Madrid metropolitan area, land uses.

AVISO DE RESPONSABILIDAD

Este documento es el resultado del Trabajo de Fin de Grado de un estudiante, siendo su autor responsable de su contenido. Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición. Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido. Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Estado de la cuestión	4
1.2. Objetivos	9
2. FUENTES Y METODOLOGÍA	10
2.1. Fuentes de información	10
2.2. Metodología	11
2.2.1. Cálculo de índices espectrales	11
2.2.2. Tratamiento estadístico de la información	13
3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	15
3.1. Medio físico	16
3.2. Medio humano	16
4. RESULTADOS	20
4.1 Distribución espacial de la temperatura de superficie en el área metropolitana de Madrid	20
4.2 Factores condicionantes de la temperatura de superficie	23
4.3. Relación entre la temperatura de la superficie terrestre y componente socioeconómica del área metropolitana de Madrid	29
4.4. Relación entre la temperatura de la superficie terrestre y la temperatura del aire	34
5. DISCUSIÓN	35
6. CONCLUSIONES	42
ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS	43
BIBLIOGRAFÍA	44

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Estado de la cuestión

El ser humano comenzó a modificar la Tierra desde el Neolítico con la aparición de la agricultura, pero esta manipulación ha alcanzado su máxima intensidad tras la Segunda Guerra Mundial, en un proceso que ha sido denominado la “Gran Aceleración” (Romans, 2023) y que ha dado inicio al “Antropoceno” – una nueva época geológica caracterizada por el impacto del ser humano en los ecosistemas terrestres-. Los grandes indicadores socioeconómicos (consumo de agua, papel, energía, transporte, etcétera) se han multiplicado en términos absolutos y proporcionales. Entre los grandes indicadores que caracterizan este periodo se encuentra la expansión de las ciudades y el crecimiento de la población urbana (fig. 1).

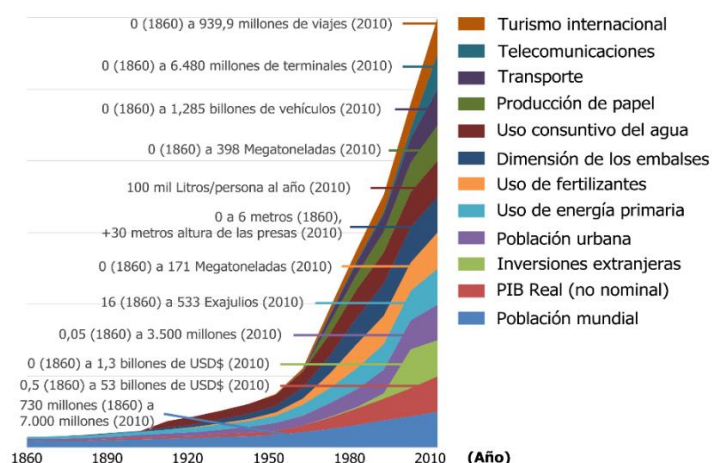


Figura 1. Tendencias socioeconómicas mundiales (1860 - 2010)

Fuente: Elaboración propia a partir de Wikimedia Commons (2023).

Si, en 1950 aproximadamente el 30 % de la población mundial vivía en ciudades, en 2021 esta cifra casi se ha duplicado y, de acuerdo con las previsiones de la ONU, en 2050 será aproximadamente el 67 % de la población mundial (UNCTAD, 2021). Estas mismas fuentes señalan que, en la actualidad, las regiones más urbanizadas del planeta son América del Norte (aproximadamente el 82% de su población vive en áreas urbanas), Iberoamérica (81%), Europa (74%) y Oceanía (68%). En contraste, solo el 43 % de la población de África vive en zonas urbanas. Pero no solamente ha crecido la población urbana, sino también las propias ciudades (de las 28 megaciudades presentes con más de 10 millones de habitantes se podría llegar hasta 49 en un futuro cercano) así como la proporción de territorio ocupado por estructuras urbanas en un fenómeno conocido como dispersión urbana o “urban sprawl”.

De acuerdo con el profesor Fernández García, “ ... la ciudad constituye la forma más radical de transformación del paisaje natural y [...] se manifiesta en una doble vertiente:

[...] modificaciones que el Hombre introduce directa y conscientemente y que tienen su mejor manifestación en el plano y morfología urbanos; de otro las que se derivan de este mismo espacio construido y cuyas manifestaciones más significativas son la contaminación de la atmósfera urbana y un aumento térmico [...], conocido como Isla de Calor”.

La Isla de Calor Urbana (en adelante, “ICU”) consiste en el aumento de la temperatura en el interior de las ciudades con respecto a las zonas rurales periféricas. En la mayor parte de los casos, el aumento de las temperaturas se intensifica proporcionalmente con la extensión y densidad del tejido urbano. Las causas que producen la aparición de este fenómeno son diversas:

1. La escasez de coberturas naturales en zonas urbanas, como la vegetación o las superficies acuáticas.
2. La mayor inercia térmica de los materiales urbanos, propensos a reflejar menos radiación solar y a emitir lentamente radiación infrarroja.
3. La geometría urbana (“cañón urbano”), dado que las calles anchas y los edificios bajos favorecen los intercambios de aire.
4. El predominio de condiciones atmosféricas favorables, como son las situaciones anticiclónicas con alta insolación y escaso viento.
5. El calor generado por algunas actividades humanas (especialmente, la industria, el transporte y la generación de energía).

De forma habitual se distinguen dos tipos de ICU: la superficial y la atmosférica, que difieren en los mecanismos de formación, los criterios utilizados para su identificación, así como sus impactos y, en cierta medida, las posibles medidas de mitigación.

Tabla 1. Diferencias entre Isla de Calor superficial y atmosférica	
ICU superficial	ICU atmosférica
Se estudia a partir de los valores de la temperatura de la superficie terrestre. Se mide a través de sensores ajustados al espectro de radiación, ya sean móviles como desde plataformas satelitales (los más comunes).	Se cuantifica a partir de la temperatura del aire. Se estudia a partir de transectos (termómetros en vehículos) o redes fijas de observación.

La primera manifestación de este fenómeno es el objeto de estudio del presente documento. La temperatura de la superficie terrestre (o en inglés “Land Surface Temperature”, LST) es un parámetro fundamental en numerosos procesos atmosféricos y biológicos. Cuantifica la radiación térmica de la superficie terrestre, por lo que es un buen indicador de los intercambios de energía entre el suelo y las capas bajas de la atmósfera, siendo sensible a los cambios que experimenta la propia superficie a lo largo del tiempo. Las mediciones de temperatura superficial proporcionadas por servicios de teledetección

permiten examinar globalmente la heterogeneidad térmica de la superficie de la Tierra y su variabilidad espacial, resultado de los cambios naturales o inducidos por las actividades humanas. Por ejemplo, la temperatura superficial se ha utilizado para examinar los cambios en la cobertura terrestre y el clima (Li et al., 2015) y para investigar la asociación entre las anomalías térmicas máximas, olas de calor, la fusión de las capas de hielo y las sequías en los bosques tropicales (Mildrexler et al., 2018) entre otros aspectos.

Otra evidencia de la magnitud de las modificaciones generadas por el ser humano es el calentamiento global. Este aumento de las temperaturas resulta de la manipulación de la composición de la atmósfera, que en el último siglo y medio ha experimentado un aumento de la proporción de gases de efecto invernadero. Estos gases no permiten la devolución al espacio de la radiación de onda larga terrestre (infrarroja) – es decir, una disminución del forzamiento radiativo – por lo que el nuevo balance resulta en un aumento de la temperatura.

Una de las consecuencias más evidentes del calentamiento global es el incremento de los eventos cálidos u “olas de calor”. Su frecuencia anual y la duración del periodo propenso a estos eventos ha aumentado en las últimas décadas, y la Península Ibérica no escapa de esta realidad planetaria, especialmente en los ámbitos interiores. En el caso de Madrid, la serie histórica del observatorio del Parque de El Retiro muestra un aumento a largo plazo tanto de la temperatura máxima media durante el verano (JJA), de la temperatura máxima absoluta y del número de días con calor extremo (EHD), particularmente durante el subperiodo 1980-2017. De hecho, Madrid registró en 2015 y 2022 las dos “olas de calor” más intensas de los últimos decenios, con duraciones superiores a los 15 días consecutivos.

Este aumento global de los episodios de calor extremo se intensifica en las ciudades a causa de la ICU. Las altas temperaturas derivadas de la combinación de la ICU y de las olas de calor tienen consecuencias negativas sobre la salud de las personas y el medio ambiente. Supone un incremento de la demanda de energía y de agua, que se puede traducir en un aumento del precio de la electricidad y una mayor presión sobre los recursos hídricos (generación de energía hidroeléctrica, uso consuntivo, regadíos, ...). La calidad del aire también se ve afectada. Las altas temperaturas favorecen la emisión de contaminantes primarios – como el dióxido de azufre (SO₂) o los óxidos de nitrógeno (NO_x) –, y su transformación en contaminantes secundarios (como el ozono O₃). Las personas expuestas al calor extremo pueden sufrir “golpes de calor”, potencialmente mortales; las altas temperaturas también pueden contribuir a muertes por ataques cardíacos o accidentes cerebrovasculares (Díaz, 2002).

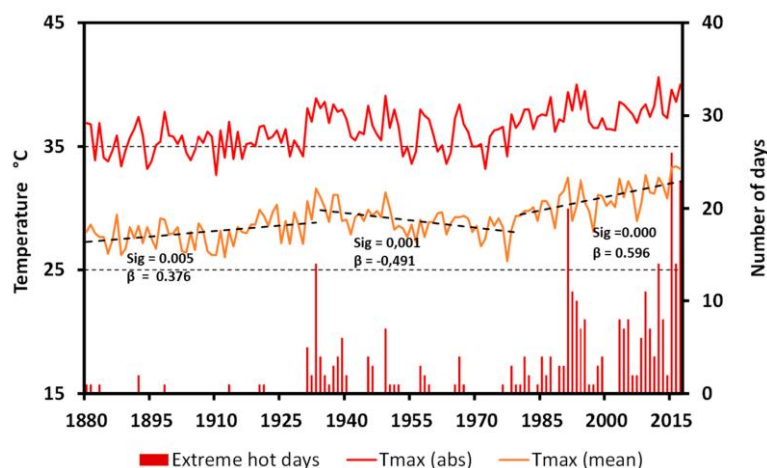


Figura 2. Temperaturas máximas y olas de calor en El Retiro (1880 – 2017)

Fuente: Rasilla et. Al, 2019.

Pero el calor no afecta a toda la población por igual. Otra reciente línea de investigación vincula las desigualdades socioeconómicas intraurbanas con la distribución espacial de la temperatura para detectar las áreas y poblaciones más vulnerables a los efectos del calor (Klein Rosenthal et al. 2014; Harlan et al. 2015). Así, las personas dependientes (menores de 18 años y mayores de 65), las familias con bajos ingresos, los trabajadores al aire libre y los enfermos crónicos son los más afectados por este tipo de fenómenos según el Índice Kairós (ISCI, 2023). También existen otros factores de riesgo adicionales. Por ejemplo, el nivel de renta también es determinante puesto que la población con menores ingresos habita en viviendas de peor calidad, tiene mayores dificultades para emplear sistemas de refrigeración (ventiladores de techo o aire acondicionado) ni puede acceder a refugios climáticos (piscinas, parques acuáticos, campos de golf, jardines, centros comerciales, etcétera).

En este sentido, Moreno Jiménez (2003) correlacionó el confort térmico urbano con la distribución de la renta en la Comunidad de Madrid, señalando que las zonas con menores recursos eran también las menos confortables. Según López et al (2020), el nivel de ingresos, si se dispone o no de unidades de aire acondicionado y el porcentaje de la población mayor de 65 años son las variables que explicaban el impacto las olas de calor en la mortalidad diaria. Teniendo en cuenta que, a causa del aumento de las temperaturas, la demanda de refrigeración puede duplicarse en los próximos años, pero que aproximadamente el 25 % de la población no podría hacer frente a los gastos derivados de este uso creciente (Sánchez-Guevara et al. 2014), es interesante analizar en qué medida se detectan relaciones similares entre la temperatura de la superficie terrestre y algunos indicadores socio-económicos.

La morfología urbana es otro de los grandes factores. Algunos espacios urbanos registran temperaturas más elevadas que el conjunto en el que se inscriben (islas de calor "intraurbanas"), y se asocian con mayores densidades de población, viviendas más baratas, antiguas y/o de peor calidad constructiva, superficie construida o ausencia de espacios verdes (Tapia et al. 2015).

Según el informe no. 6 del IPCC (Grupo II), las temperaturas planetarias continuarán aumentando y las olas de calor se producirán con mayor frecuencia e intensidad en un futuro cercano. Por su parte, la expansión continuada de las ciudades y de la población urbana incrementarán el impacto de la ICU en la salud pública, en especial en aquellos países donde el envejecimiento de la población es cada vez mayor. Por todo ello, la comunidad científica y las autoridades políticas están implementando, aún en sus primeros estadios, medidas para aminorar el impacto real de las ICU. Estas medidas son de muy diversa naturaleza, y recogen actuaciones tan distintas como:

1. Aumento de la cobertura arbórea, proporcionando sombra y enfriamiento a través de la evapotranspiración y ayudando a retener la escorrentía de las aguas pluviales.
2. Integrar la vegetación en las arquitecturas: instalando plantas, arbustos, pastos y árboles en azoteas ("green roofs") o balcones, ayudando a reducir la inercia térmica de los materiales con los que se componen los edificios originalmente.
3. Instalación de techos y pavimentos fríos (reflectantes o permeables), contruidos con materiales o revestimientos que reflejan la luz solar y mejoran la evaporación del agua.
4. Prácticas de crecimiento inteligentes. Se entienden así las prácticas de desarrollo espacial que contribuyan a reducir la movilidad y el consumo de combustibles fósiles acercando los equipamientos de forma equitativa a todas las personas.
5. Creación y redistribución de refugios climáticos, facilitando el acceso a todas las personas a espacios de sombra y frescor.

La mayoría de estas actividades de mitigación ofrecen beneficios adicionales, fomentando otros servicios ecosistémicos como un aumento de la biodiversidad y una mejora de la calidad de vida. Además, ayudan a mitigar el calentamiento global eliminando o reduciendo el papel de las principales fuentes contaminantes en las ciudades (consumo energético y tráfico rodado; Hope, 2003; Gerrish, 2018; UNC, 2021; Sultana, 2022).

1.2 Objetivos

Dada la relevancia de que la interacción entre olas de calor e isla de calor urbana está adquiriendo para el confort ambiental en las ciudades, el presente trabajo tiene por objetivo

analizar la distribución de la temperatura de la superficie terrestre en el área metropolitana de Madrid durante uno de los días de una ola de calor, y su relación con el tipo de superficie, morfología urbana y diversos condicionantes socioeconómicos. En función de este objetivo general, la investigación se ha centrado en los siguientes aspectos:

1. El estudio detallado de la distribución espacial de la temperatura de la superficie terrestre en el área Metropolitana de Madrid durante una ola de calor.
2. Valoración de los factores (usos del suelo, morfologías urbanas) que explican los patrones espaciales de la temperatura superficial en el área metropolitana de Madrid.
3. Evaluación de la relación entre la temperatura de la superficie terrestre y las dinámicas socio-demográficas en el ámbito de estudio.
4. La cuantificación de la relación entre la temperatura de superficie y la temperatura del aire durante ese evento.

2. FUENTES Y METODOLOGÍA

El presente trabajo se articula en varios ejes temáticos. A continuación, se resumen las fuentes de información y metodología empleadas en torno a estos grandes ejes.

2.1 Fuentes de información.

Las fuentes de información utilizadas en este trabajo, de diversa naturaleza (tanto cartográficas como estadísticas) se resumen a continuación.

Tabla 2. Fuentes de información empleadas en la investigación	
Landsat 8 Colección II Level 2	Esta colección de imágenes ofrecida por el USGS a través de su web EarthExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/) permite visualizar, seleccionar y descargar productos de teledetección haciendo uso de varios filtros de área, cronología, nubosidad y serie. Las imágenes de Landsat 8 Colección II Nivel 2 se ofrecen, a diferencia de colecciones anteriores, con correcciones de luminosidad, nubosidad y reflectancia. El paquete se compone de 10 bandas (.tif) y un archivo de metadatos, todo ello comprimido para su descarga (.zip). Las imágenes tienen una resolución espacial de 30 metros, proyección UTM y Datum WGS84. La cronología de esta serie es algo limitada, con tomas cada 7 días aproximadamente. Se empleará la imagen del 18 de julio del 2022 al ser coincidente con la ola de calor que se inició el 13 de julio.
Copernicus Land Cover	Esta cartografía de usos del suelo es descargable a través del portal web europeo Copernicus (https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018) o del Centro de Descargas del CNIG (https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp). Se oferta en formatos ráster y vectorial con proyección UTM (Zona 30) y Datum ETRS89 a partir de una malla de 100 metros de resolución. Clasifica la información en 44 categorías o usos, agrupadas en 15 secciones a su vez englobadas en 5 grupos generales de un tercer nivel (superficies artificiales, zonas agrícolas, naturales, húmedas y superficies de agua).
Datos meteorológicos	Los datos meteorológicos utilizados en este trabajo proceden de: - Red Meteorológica Municipal, integrada en el Sistema Integral de la Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid (https://datos.madrid.es/portal/site/egob/menuitem.c05c1f754a33a9f4b2e4b284f1a5a0/?vgnextoid=fa8357cec5efa610VgnVCM1000001d4a900aRCRD&vgnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aRCRD&vgnextfmt=default). - Red Meteorológica integrada en la Red de Calidad del Aire de la Comunidad de Madrid (https://datos.comunidad.madrid/catalogo/dataset/calidad_aire_datos_meteo_historico). - La red meteorológica de AeMet (https://www.ogimet.com/). Los datos correspondientes a los días 18 y 19 de julio de 2022 fueron descargados con resolución horaria, para extraer los valores máximos (durante las horas de luz del día 18) y mínimos (durante la noche del segundo día). Estos mismos organismos presentan sus estaciones georreferenciadas con proyección UTM (Zona 30) y Datum ETRS89.

Atlas de Distribución de Renta por Hogares (ADHR)	El Atlas de Distribución de Renta de los Hogares (ADRH), elaborado por el INE (https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177088&menu=ultiDatos&idp=1254735976608), proporciona indicadores de nivel y distribución de renta por persona y hogar, completándose dicha información con indicadores de tipo demográfico. La descarga se puede realizar desde el portal web del INE en diversos formatos de tabla (en este caso, en formato Excel) con la consulta total de información o la selección deseada (municipios y distritos que se ajusten al área metropolitana).
Catastro 2022	Los servicios INSPIRE permiten descargar información catastral desde su portal web u otro tipo de conexiones, como el Plugin de QGIS “Descarga Catastro Inspire” (http://www.catastro.minhap.es/INSPIRE/buildings/02/ES.SDGC.bu.atom_02.xml) que, a través de una interfaz da la oportunidad de seleccionar el área de estudio (provincia o municipio), el directorio de la descarga y el tipo de información (parcelas catastrales, edificios y/o direcciones). La cartografía se sucede con proyección UTM (Zona 30) y Datum ETRS89, y algunos productos como los edificios incorporan información adicional de interés (año de construcción, superficie).
Fotocasa 2023	Este servicio de consulta online a través de la web Fotocasa (https://www.fotocasa.es/) recoge la información más reciente del mercado inmobiliario sobre precio medio de la vivienda a escala de barrios y municipios.

2.2 Metodología

Dado que este trabajo combina fuentes de información cartográficas y estadísticas con diferentes formatos y resoluciones espaciales, una parte de su desarrollo requirió un tratamiento previo. Por ejemplo, dado que el sistema de proyección habitual para la Península Ibérica es la proyección ETRS89 en zona 30N (UTM), se mantuvo como sistema de proyección predeterminado. Por su parte, la información estadística fue revisada con objeto de identificar posibles errores.

2.2.1. Cálculo de índices espectrales

El producto Landsat 8 Collection 2 Level-2 es un nuevo paquete del Servicio Geológico de los E.E.U.U. (USGS) resultado del reprocesamiento del archivo completo de imágenes Landsat, mejorando sustancialmente versiones anteriores. Cada una de las escenas contiene varios ficheros en formato *.tiff:

Los datos y mapas elaborados con la temperatura de la superficie terrestre utilizados en este trabajo provienen del fichero “ST_B10.tiff”, que no proporciona directamente la temperatura, sino “números digitales” que deben ser transformados en °K a través de la

siguiente ecuación: $0.00341802 * DN + 149.0$. Posteriormente, los valores de temperatura en °K fueron transformados en °C mediante la ecuación $^{\circ}C = ^{\circ}K - 273.15$.

Con los ficheros que contienen cada una de las bandas de reflectancia superficial es posible calcular una serie de índices espectrales que resaltan elementos de la superficie terrestre como la vegetación, los espacios construidos, la presencia de agua etc.... Los índices calculados son:

- Normalized Difference Vegetation Index (“NDVI”). Sus valores fluctúan entre “-1” y “1” (-0,04 mínimo y 0,52 máximo, en este caso) siendo “-1” un estado inerte de la unidad vegetal y “1” un desarrollo y densidad óptimos.

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

- Green Normalized Difference Vegetation Index (“GNDVI”). Difiere del anterior por su mayor sensibilidad a la variación del contenido de clorofila en la vegetación.

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

- Soil Adjusted Vegetation Index (“SAVI”). Aunque, las imágenes de la colección II presentan la reflectancia y luminosidad superficial (L) ya corregidas, este índice está diseñado para identificar la vegetación en suelos donde representa menos del 15% y generan, naturalmente, grandes niveles de luminosidad.

$$SAVI = [(IRC - R) / (IRC + R + L)] (1 + L)$$

- Bare Soil Index (“BSI”). Cuantificar el estado del suelo que aflora bajo la vegetación (composición mineral de la superficie). Esto, al igual que las propias masas vegetales, determina con su albedo la capacidad superficial para acumular energía.

$$BSI = \frac{(Red + SWIR) - (NIR + Blue)}{(Red + SWIR) + (NIR + Blue)}$$

- Normalized Difference Water Index (“NDWI”). Identifica superficies acuáticas a partir de las bandas 3 y 5 con la fórmula invertida del GNDVI (Gao, 1995) o la banda verde (McFeeters, 1996). Una fórmula más reciente (“MNDWI”) combina las bandas 3 y 6 (verde y SWIR1).

$$NDWI_{(Gao, 1995)} = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad NDWI_{(McFeeters, 1996)} = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad MNDWI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$$

- Enhanced Vegetation Index (“EVI”). Este índice está diseñado para discernir los niveles de clorofila en masas vegetales densas, especialmente en zonas poco montañosas y de gran productividad biológica. En el caso del área metropolitana, permite la observación de los distintos estratos y estados de salud donde aparece vegetación ya desarrollada.

$$EVI = G \times \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C1 \times RED - C2 \times Blue + L)}$$

- Build-Up Index (“BUI”). Este índice delimita zonas construidas.

$$BUI = NDBI - NDVI$$

2.2.2 Tratamiento estadístico de la información

Para identificar ámbitos con valores extremos de temperatura de la superficie dentro del ámbito de estudio (“hot spots”), se utilizaron las puntuaciones Z. El valor de estas puntuaciones equivale al número de desviaciones estándar que están comprendidas entre el promedio y un cierto valor de la variable sometida a análisis. En otras palabras, es la diferencia entre un valor de la variable y el promedio, expresada en desviaciones estándar.

Se calcula mediante la siguiente fórmula, siendo “ x_i ” el valor de la temperatura en superficie de cada píxel, “ $\bar{X}$ ” la media de la temperatura de superficie, calculada a partir de todos los valores del fichero ráster, y “S” su desviación típica. Asumiendo que los valores de temperatura siguen una distribución normal, un valor de Z por encima o por debajo de $\pm 1,95996$ corresponde a una probabilidad de aparición del 5% o del 95 %, pudiendo asumirse que corresponden a valores extremos con una baja probabilidad de aparición.

$$z_i = \frac{x_i - \bar{X}}{S}$$

Dado que uno de los objetivos del trabajo es la búsqueda de relaciones entre la temperatura de la superficie terrestre y un conjunto de variables cuantitativas (índices espectrales, usos del suelo, renta etc.) las técnicas estadísticas más apropiadas son el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson, y el Análisis en Componentes Principales. Ambas técnicas se aplicaron pixel a pixel.

Para el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson se aplica la fórmula:

- S_{xy} : Covarianza entre las dos variables.
- S_x : Desviación típica de la variable X.
- S_y : Desviación típica de la variable Y.

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$$

El valor del índice de correlación varía entre (-1,1), siendo el signo el que indica el sentido de la relación. A partir de los valores del coeficiente de correlación se elaboraron los “mapas

de calor”, que constituyen una herramienta de visualización de datos que muestra la magnitud de la correlación entre cierto número de variables

Para el análisis de las relaciones entre la temperatura de superficie y la información proporcionada por las fuentes estadísticas se recurrió al Análisis de Componentes Principales (en adelante, “ACP”). Es un procedimiento de análisis multivariado cuyo objetivo es simplificar un gran número de variables correlacionadas entre sí, a partir de las que se obtiene un número más reducido de variables, llamadas Componentes Principales (CP), que son combinaciones lineales de las variables originales, pero que conservan la mayor parte de la información original. De esta manera, se simplifica la información contenida en una base de datos, facilitando su posterior interpretación. La interpretación del significado de los Componentes Principales se obtiene a través del análisis de:

- a) El «Porcentaje de valores propios» muestra la representatividad de cada CP (cantidad de variabilidad original de los datos resumida por cada componente).
- b) La matriz de ponderaciones (“loadings”), que se interpreta como la correlación existente entre las variables originales y las nuevas variables obtenidas. Las variables con una mayor ponderación en un componente principal serán aquellas que más influencia tengan en ese componente principal.
- c) Una matriz de puntuaciones (scores), que incluye el valor que tiene cada nueva variable (CP) en cada una de las entidades espaciales analizadas.

3.- CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Publicaciones anteriores que analizan el fenómeno de la isla de calor en Madrid (Fernández García, 2001; Allende, 2016; Rasilla, 2019; López Bueno et al., 2020) se han centrado en el término municipal. López Gómez, con su publicación *El Clima de las Ciudades* (1985), ya advertía entonces muchos de los procesos que hoy constituyen la casuística más fundamental en la distribución de la LST, pero el marco de análisis espacial se circunscribió al término municipal: desde el año en que se publicó aquel texto, la ciudad de Madrid ha crecido hacia la periferia con modelos distintos de alta y baja densidad.

Madrid carece de una definición jurídica oficial de área metropolitana. De facto, se han empleado diferentes criterios para su posible delimitación, llegando a abarcar las ciudades de Guadalajara y Toledo (según el Consorcio Regional de Transportes, por ejemplo) e incluso Ciudad Real si se considera la línea de Alta Velocidad. El criterio más compartido en documentos técnicos y establecido por el organismo estadístico de la Comunidad de Madrid (desde 2015) es el adoptado en la presente investigación, y combina parámetros de naturaleza demográfica, económica y urbanística. Siguiendo estos criterios, se ha dividido la corona metropolitana en municipios y el término municipal de Madrid en distritos (Figura 3). Esta división crea entidades espaciales de dimensiones relativamente homogéneas, reduciendo el ruido que podría suponer el análisis a escala de barrio o de sección censal, lo cual dificulta la interpretación de algunos resultados.

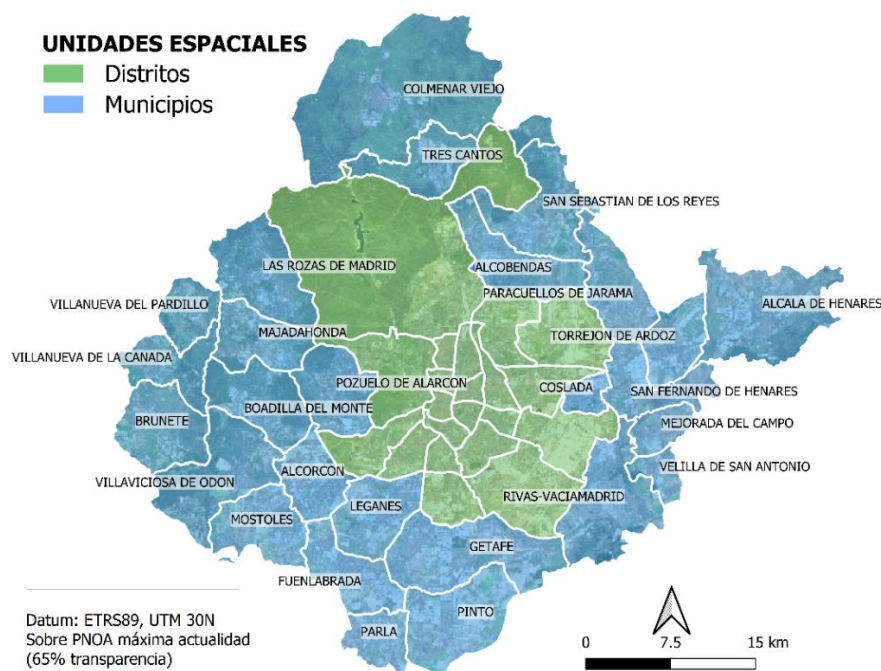


Figura 3. Área metropolitana de Madrid
Fuente: Elaboración propia a partir del CNIG, 2023.

3.1. Medio físico

El área metropolitana de Madrid se desarrolla fundamentalmente sobre la unidad geomorfológica conocida como las campiñas, páramos y vegas. Esta es una zona en la que los ríos que provienen de la Sierra han labrado un relieve de lomas y valles orientados en líneas generales de Norte a Sur (salvo el Henares, con orientación NE-SO) con elevaciones entre los 800 y los 500 ms.n.m.

Su clima puede clasificarse como *Csa*, según Köppen. Como rasgos fundamentales puede destacarse la gran amplitud de las temperaturas, tanto diarias como anuales, y las escasas precipitaciones, inferiores a los 500 mm.

Los inviernos son frescos, con promedios inferiores a los 8 °C y frecuentes heladas nocturnas. Por el contrario, los veranos son calurosos, con temperaturas medias superiores a los 24°C en julio y agosto y con máximas diurnas que superan fácilmente los 35 °C. La oscilación diaria es de aproximadamente de 10 °C. La mayor parte de las precipitaciones se concentran en primavera y otoño. Otro de sus rasgos característicos es el predominio de condiciones de estabilidad atmosférica (cielos despejados, ausencia de viento), que favorecen la génesis de la ICU.

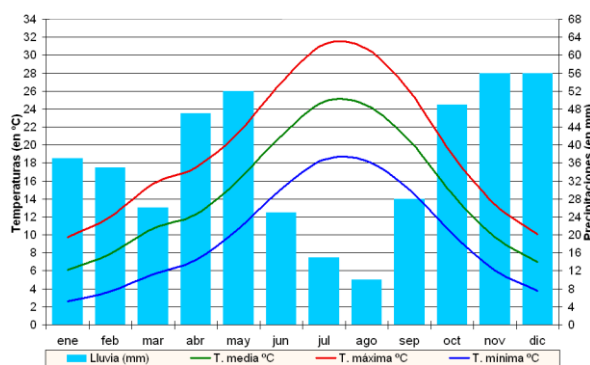


Figura 4. Clima en Madrid (El Retiro)

Fuente: AEMET, 2023.

3.2. Medio humano

El área metropolitana de Madrid es la más poblada y extensa de España, y la quinta de Europa solo por detrás de Moscú, Londres, París y Milán. En 2022 reunía 7.703.024 habitantes según el INE.

La distribución espacial de la población de la Comunidad de Madrid refuerza los límites establecidos para el área de estudio (fig. 5 y 6). Desde el centro metropolitano – que recoge los mayores volúmenes poblacionales en distritos como La Latina, con medio millón de habitantes – la concentración demográfica se extiende primero en los espacios de rededor (Usera, Carabanchel, Alcobendas, Rivas) y, en segundo lugar, a través de los grandes ejes corredores (San Sebastián de los Reyes, Alcalá de Henares, Valdemoro) que vienen a coincidir con los límites establecidos en el marco de análisis espacial de la presente investigación.

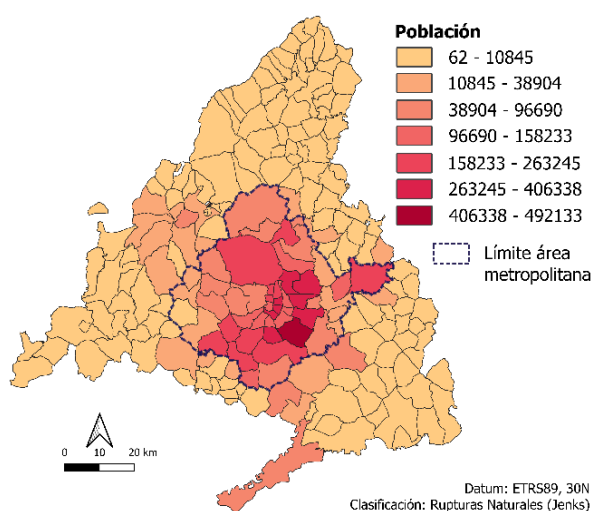


Figura 5. Población en la Comunidad de Madrid, 2022

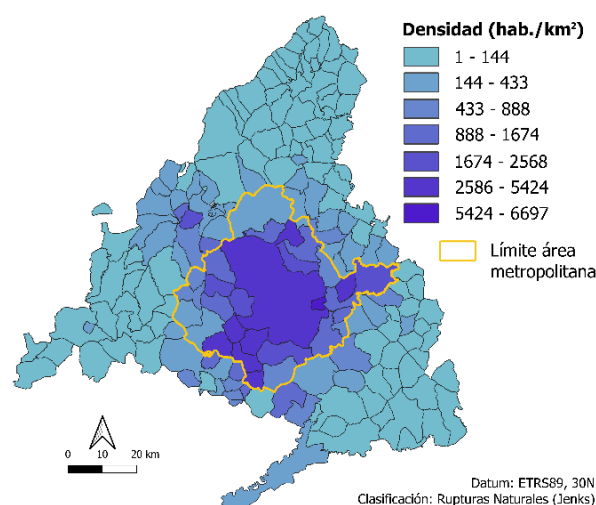


Figura 6. Densidad de población en la Comunidad de Madrid, 2022

Fuente: Elaboración propia a partir de INE, 2023.

La estructura demográfica de Madrid, si bien todavía lejos de la regresión que apunta a otros espacios rurales e interiores de España, avanza hacia el envejecimiento. Las ciudades encabezan los municipios con la edad media más baja en España de forma generalizada, pero, tal y como indicaba el observatorio del SMS en 2018, muchas de estas tendencias se ven alentadas por la llegada de inmigrantes jóvenes y con comportamientos demográficos

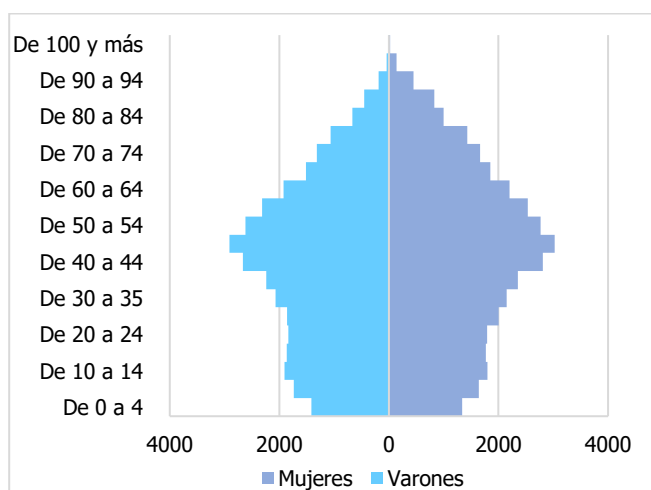


Figura 7. Estructura demográfica de la Comunidad de Madrid (1 de enero del 2022)

Fuente: Elaboración propia a partir de INE, 2022.

pretransicionales. En este sentido, la llegada de población inmigrante en las dos últimas décadas ha sido determinante en este comportamiento.

Cerca de la mitad de la superficie del área metropolitana está ocupada por suelo urbanizado según Corine Land Cover. La otra mitad restante, se reparte entre cultivos de secano y vegetación natural.

La distribución de estos espacios merece especial atención. En las superficies artificiales (categoría no. 1 de CLC), que agrupan los tejidos urbanos, las infraestructuras, los espacios industriales y comerciales, las zonas en construcción, mineras y las instalaciones deportivas o recreativas, se estructuran

desde un tejido nuclear compacto hacia los espacios de periferia donde van perdiendo intensidad y segregándose a lo largo de los grandes ejes corredores.

En esta corona metropolitana con suelos artificiales ya dispersos, únicamente articulados por infraestructuras de transporte como carreteras o la red ferroviaria que circunda la ciudad, aparecen los suelos agrícolas (categoría no. 2) y la vegetación natural (categoría no. 3: Zonas forestales con vegetación natural y espacios abiertos). Las superficies cultivadas tienen una presencia superlativa de secano en toda su extensión y los cultivos de regadío, que representan un 2,86% de la superficie, quedan ajustados a las riberas del Jarama y afluentes. Predominan así los cultivos al sur del área metropolitana.

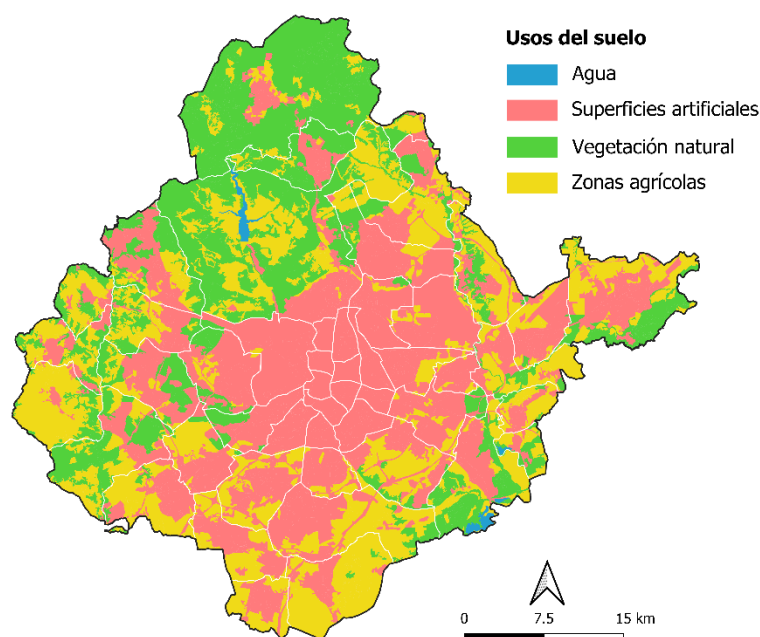
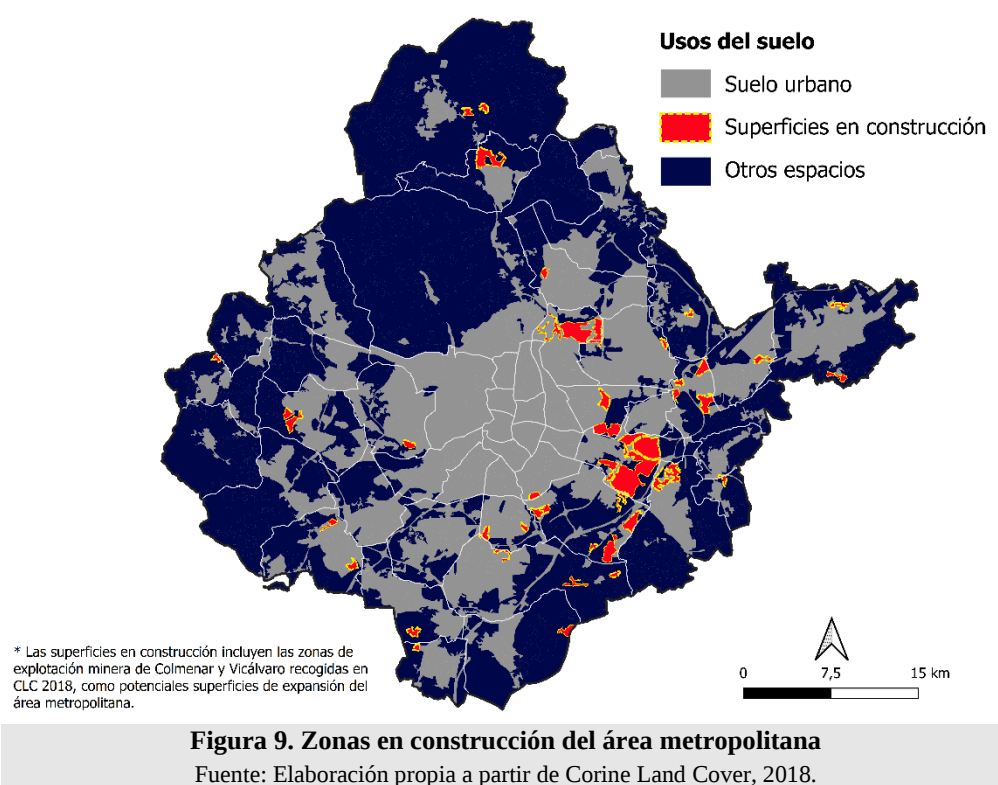


Figura 8. Usos del suelo en el área metropolitana.

Fuente: Elaboración propia a partir de CORINE Land Cover, 2018.

Con una superficie urbanizada de 85.000 ha, el área metropolitana de Madrid presenta grandes vías de expansión que determinarán su configuración espacial en un futuro cercano. Algunas de las más importantes son la solana de Valdebebas (al sur de Alcobendas), la pieza Norte de Tres Cantos, los Berrocales-El Cañaveral, Valdecarros (Vallecas) y, aunque no figure según Corine Land Cover como zona en construcción – pues se trata de un proyecto sobre suelo ya construido –, el programa Madrid Nuevo Norte (en el entorno de la Estación de Chamartín). Todos estos proyectos dentro sumarán más de 156 mil viviendas en los próximos 25 años con una fuerte proyección de espacios verdes (El Mundo, 2021).



4. RESULTADOS

A continuación, se exponen los resultados fundamentales del trabajo estructurados en los niveles de análisis planteados en el apartado de los objetivos.

4.1 Distribución espacial de la temperatura de superficie

El análisis estadístico de los valores de la temperatura de superficie durante la jornada analizada muestra una distribución claramente gaussiana (curva normal), con un valor medio de 51°C y una desviación típica de 3,6°C (fig. 10). La amplitud térmica supera los 36,15°C.

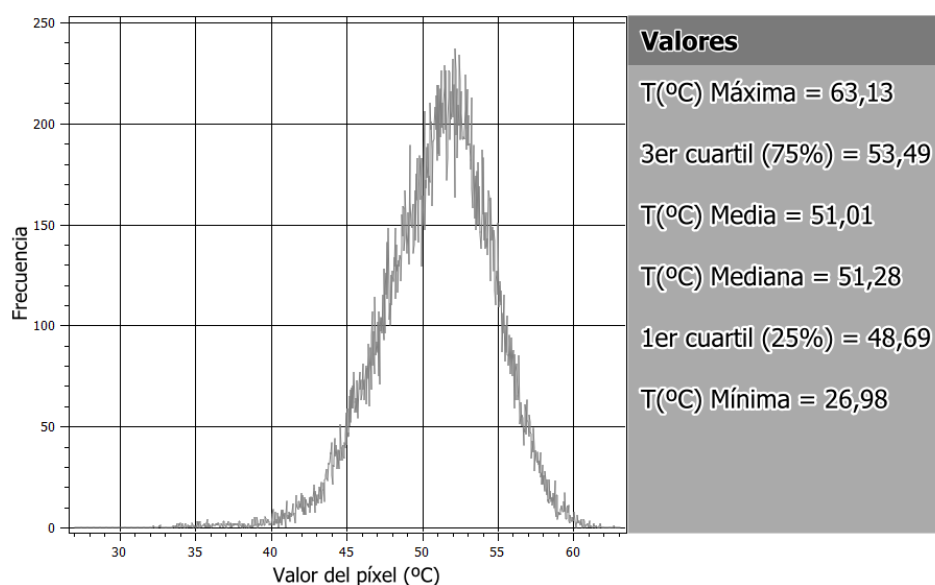


Figura 10. Valores de LST (18-VII-2022)

Fuente: Elaboración propia, 2023.

La fig. 11 muestra amplitudes térmicas próximas a los 40°C entre el Parque del Retiro y los vertederos de Valdemingómez (una superficie de 23 km² al Sureste del área metropolitana que impide en gran medida el desarrollo de vegetación en el continuo depósito de residuos y la reposición constante de capas de tierra) o en los terrenos en construcción de Rivas del Jarama, Los Berrocales de Vallecas, entre otros ejemplos significativos.

Algunos espacios, como los aeropuertos (Adolfo Suárez, Cuatro Vientos, Torrejón de Ardoz o Getafe), que suman una superficie cercana a las 3.000 ha, tampoco permiten el desarrollo de vegetación superior. Del mismo modo que las zonas en construcción, los aeropuertos se emplazan en suelos de la periferia. En este caso, el área metropolitana de Madrid experimenta durante el día temperaturas de superficie más altas en algunos espacios de su periferia que en el casco urbano central, acompañado de parques urbanos y otras infraestructuras verdes que contribuyen a suavizar la LST.

Todo este conjunto de observaciones generales, apreciables en la escala que ofrece la fig. 11, merecen atención específica en detalle tal y como se repasa más adelante, estableciendo el límite particular entre las zonas frescas y más calientes (“hot/cold spots”, fig. 12), e inmiscuyendo la escala de análisis dentro de los propios espacios señalados. Así, se han establecido dos casos de estudio dentro del área metropolitana, fig. 13 y 14, mas estas apreciaciones pueden trasladarse a cualquier punto del mapa.

El siguiente mapa de puntos fríos y calientes (fig. 12) representa las superficies con valores de temperatura más extremos (por encima y debajo del 95% y 5% de LST, respectivamente). Como superficies de frescor, se pueden identificar las grandes riberas (del Guadarrama, Manzanares y Jarama), los parques urbanos, las urbanizaciones de lujo y sus equipamientos (Santo Domingo, Ciudadcampo, La Moraleja, Puerta de Hierro) y los espacios acuáticos (Embalse del Pardo y regadíos del Jarama).

Por el contrario, las zonas en construcción (Los Berrocales, Tres Cantos Zona Norte), los vertederos (Valdemingómez y Colmenar Viejo) y las minas (en el entorno de Colmenar) son las superficies con valores más intensos de temperatura por encima de los 60°C.

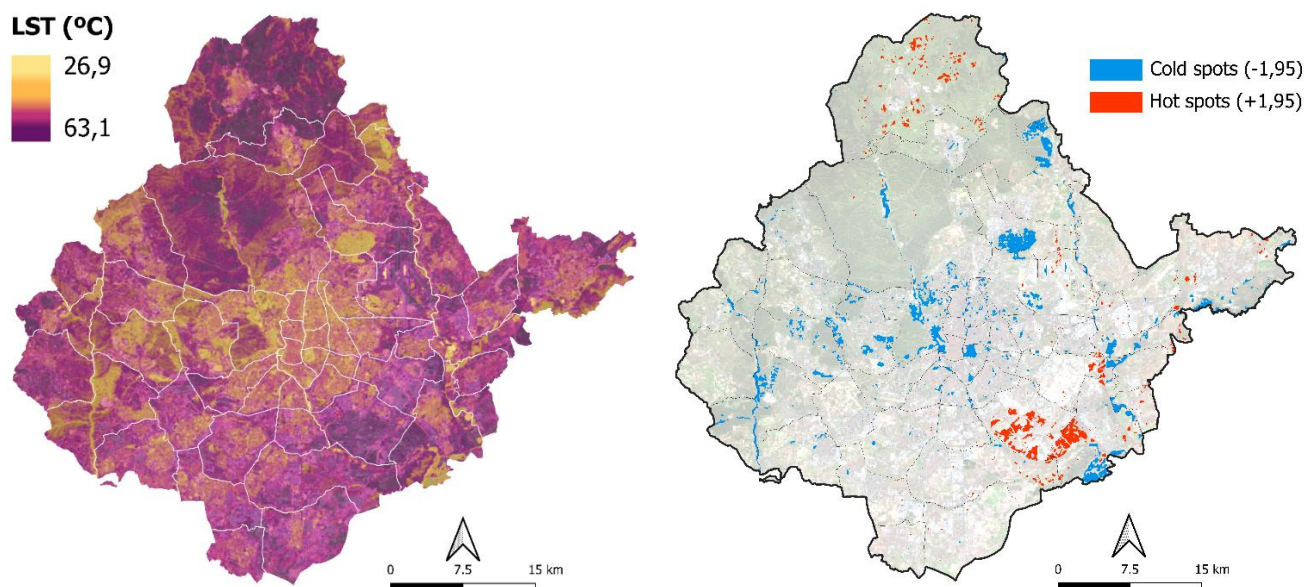


Figura 11. Temperatura de superficie (LST) sobre color natural

Fuente: Elaboración propia a partir de Landsat 8 Colección II (18 de julio del 2022) y PNOA máxima actualidad. | Datum: ETRS89, UTM 30N.

Figura 12. Puntos fríos y calientes (Hot/Cold spots)

Se ejercen a continuación distintas observaciones de la LST entre espacios naturalizados y contruidos a partir de dos casos de estudio señalados anteriormente.

En primer lugar, merecen atención los distintos espacios verdes del núcleo metropolitano (fig. 13). Según el Ayuntamiento de Madrid, Casa de Campo es el parque urbano más grande del municipio, con una superficie de 3500 ha. Su temperatura superficial supera a la de otros

parques de menor entidad como El Retiro, Campo del Moro o el Parque del Oeste. El problema fundamental radica en la dispersión de las masas vegetales y la disponibilidad hídrica (Endreny, 2017; Xiao, 2018; Schwaab, 2021), junto a otros factores ya indicados como la proyección de sombras (Adoras, 2021).

El segundo caso significativo se sucede en el entorno del Aeropuerto de Barajas y la urbanización La Moraleja, al noreste del área metropolitana (fig. 14). En un ambiente de baja densidad poblacional (38 hab/km², INE 2022), es evidente el fortísimo contraste calórico entre la superficie que ocupa La Moraleja y sus alrededores más inmediatos, con una amplitud térmica que supera los 15°C. La morfología predominante es el chalé unifamiliar ajardinado. A estos espacios residenciales de baja densidad los acompañan otras dotaciones recreativas como campos de golf, tenis, parques y piscinas, ocupadas por vegetación que se mantiene en buen estado a partir del riego ininterrumpido.

Además, merece atención la diferencia de temperatura entre las pistas asfaltadas del aeropuerto y la cubierta de sus terminales. Las primeras acumulan una LST próxima a los 60°C, mientras que las cubiertas de la Terminal 4, con un albedo mayor, se mantienen en los 30°C. Pueden observarse del mismo modo en la fig. 11 como una de las superficies con valores más extremos de LST.

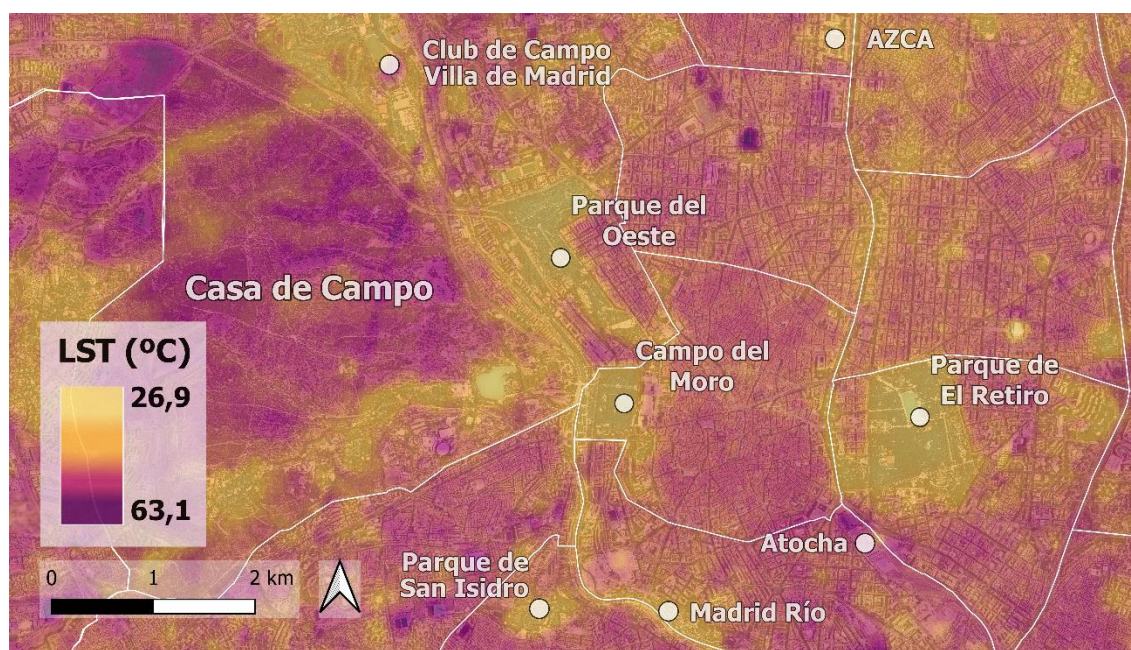


Figura 13. Temperatura superficial en Madrid - Centro

Fuente: Elaboración propia a partir de Landsat 8.

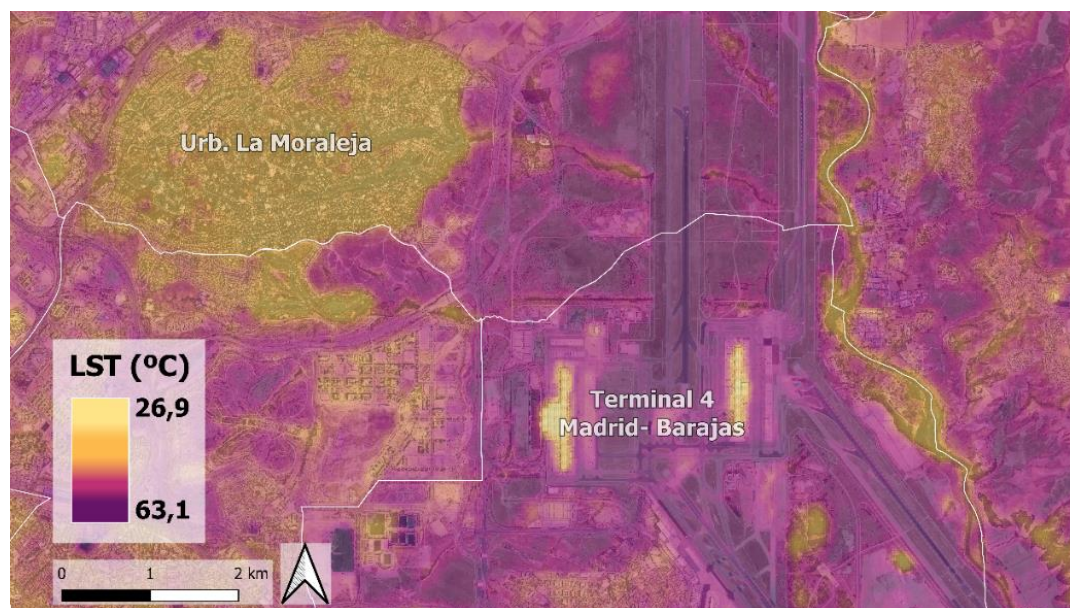


Figura 14. Temperatura superficial en Valdebebas

Fuente: Elaboración propia a partir de Landsat 8.

4.2. Factores condicionantes de la temperatura de superficie

Gracias a las apreciaciones visuales del apartado anterior, pueden intuirse qué tipos de espacios se asocian con las temperaturas más elevadas y cuáles lo hacen con las superficies más frescas. A partir de aquí, es preciso establecer una relación estadística entre los usos del suelo (según Corine Land Cover) y el estado de la superficie terrestre (según los índices espectrales calculados) para validar estas asociaciones.

A partir de la clasificación original de usos de suelo proporcionada por el Corine Land Cover 2018, se procedió a su agrupación en cuatro usos de suelo o categorías (superficies artificiales, usos agrícolas, vegetación natural y láminas de agua). Dada la diferente resolución espacial del CLC y de la imagen de temperatura superficial del terreno, se remuestreó esta última a la resolución de la primera, extrayéndose posteriormente la temperatura correspondiente a cada categoría del CLC pixel a pixel. Posteriormente, se ha calculado el valor medio de la temperatura para cada una de las grandes categorías.

- a) Superficies artificiales. Esta categoría abarca todo el tejido urbano, tanto continuo como discontinuo, así como zonas industriales o comerciales, redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados, aeropuertos, minas, escombreras y vertederos etc... (códigos 1 a 10). Representan el 40,57 % de la superficie total del área metropolitana de Madrid, y registra una temperatura media de 50,24°C.
- b) Terrenos agrarios. Esta categoría incluye fundamentalmente terrenos en secano, regadíos, cultivos arbóreos (viñedos, olivares etc., categorías 11 a 17) y representa el

25,97 % de la superficie. La temperatura media de estas superficies es la más elevada de las analizadas, con un valor de 52,23°C.

- c) Las superficies con vegetación natural (bosques, pastizales, matorrales etc.) constituyen el 33,05 % de la superficie total, y su temperatura media es ligeramente más baja que la de los terrenos agrarios (51,39°C).
- d) La última categoría son las láminas de agua, que sólo representan el 0,41 % de la superficie regional, pero son las superficies más frescas (43,38°C).

Tabla 3. Temperatura superficial y usos del suelo

Corine Land Cover Usos del suelo	LST	
	Media (°C)	Superficie (%)
Superficies artificiales	50,54	40,57
Usos agrícolas	52,23	25,97
Vegetación natural	51,39	33,05
Láminas de Agua	43,38	0,41

Fuente: Elaboración propia a partir de Corine Land Cover (2018) y Landsat 8 (2022).

Los valores medios encubren, no obstante, una gran variabilidad si el nivel de análisis desciende a las categorías originales. Por ejemplo, en el caso de las superficies artificiales (fig. 15), las instalaciones deportivas y las zonas verdes urbanas son las superficies más frescas (unos 48°C), pero al mismo tiempo las que presentan una mayor variabilidad de la temperatura superficial. Esto se puede achacar a la diversidad morfológica de estos espacios, donde conviven respuestas térmicas diferentes como, por ejemplo, un campo de fútbol en el Parque de Santander (Vallehermoso) junto a un campo de golf. El primero, que presenta valores de LST llamativamente elevados (supera los 51°C), tiene un césped artificial regado de caucho negro, que una cubierta muy oscura y sin capacidad de evapotranspiración que absorbería gran parte de la radiación solar. El campo de golf está compuesto de hierba natural y arena fina (de color claro) que induce al comportamiento contrario (inferior a 46°C), es decir, un gran albedo y la capacidad de suavizar la LST por medio de la evapotranspiración del césped natural.

Este ejemplo se puede trasladar a demás equipamientos, como el Hipódromo de Madrid o el complejo deportivo de Valdebebas, donde conviven superficies con aptitudes radiativas absolutamente contrarias bajo la misma categoría de usos del suelo. Del mismo modo, esto sucede con los parques urbanos (gran variabilidad) como ya se observó y desarrolló en el comentario de la fig. 13: esta definición aúna parques con sistemas de riego y un estrato arbóreo que proyecta sombras contiguas como El Retiro, Parque del Oeste o Campo del

Moro, y otros parques con vegetación dispersa y ausencia de riego (así lo revela el índice espectral MSI) como Casa de Campo o El Pardo.

Por el contrario, las redes de transporte, los aeropuertos, las zonas de extracción minera, escombreras y vertederos son las superficies artificiales más cálidas ($> 52^{\circ}\text{C}$). El tejido urbano constituye un espacio homogéneo en sus valores de temperatura superficial, a medio camino entre los dos conjuntos anteriores, siendo el tejido continuo algo más cálido ($48,4^{\circ}\text{C}$) que el discontinuo ($47,56^{\circ}\text{C}$).

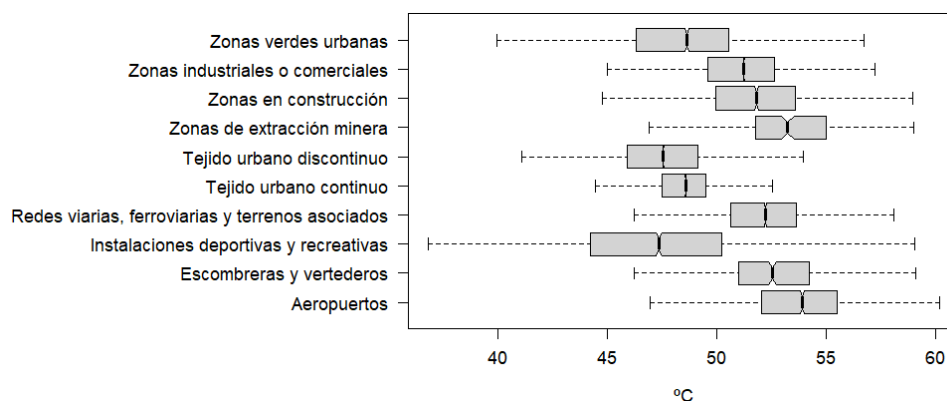


Figura 15. Variabilidad de LST en “Superficies artificiales”

Fuente: Elaboración propia, 2023.

La segunda categoría que establece Corine Land Cover son las superficies agrícolas, predominantes en la mitad sur del área metropolitana. A grandes rasgos, la variabilidad térmica de estos espacios es menor que en las superficies artificiales y su temperatura media es superior al predominar los cultivos de secano (desaparición del agua como elemento termorregulador; fig. 16).

Los regadíos, que suponen menos del 3% de las superficies agrícolas en el área de estudio, son los espacios más frescos, pero además con mayor variabilidad. Cabría señalar que esta variabilidad térmica del regadío se puede atribuir al estado particular de algunos de estos cultivos en la fecha en la que se tomó la escena (18 de julio del 2022), que podría implicar la convivencia de superficies con distintos niveles de riego (situación real), cuando Corine Land Cover les atribuía en 2018 riego permanente (indiscreción).

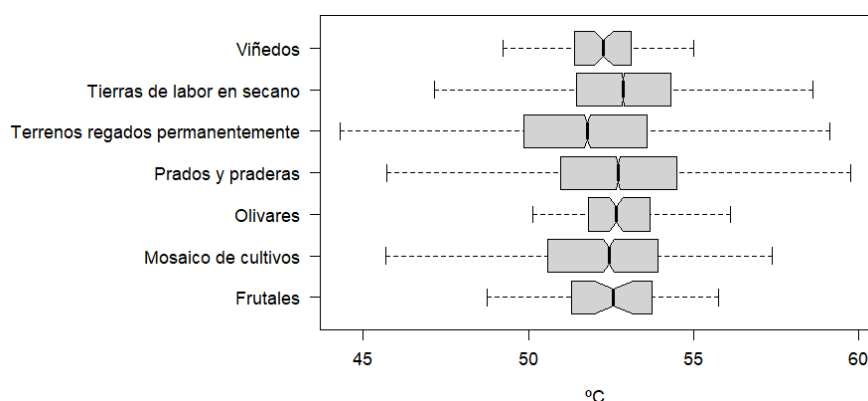


Figura 16. Variabilidad de LST en “Superficies agrícolas”

Fuente: Elaboración propia, 2023.

La tercera categoría establecida por Corine Land Cover son las superficies naturales, con predominio en la mitad norte del área metropolitana. Su temperatura media es más elevada que las superficies artificiales, pero reúne usos de suelo con una notable variabilidad térmica. Los espacios más frescos son los bosques, particularmente los de coníferas (47°C), mientras que los matorrales y pastizales superan los 50°C (fig. 17). La mayor parte de estos espacios, a diferencia de las superficies agrícolas, presentan niveles de humedad y clorofila (salud de la unidad vegetal) más altos y menor superficie ocupada por suelo desnudo. Entonces, ¿cómo cabe explicar que la vegetación más desarrollada contribuya a intensificar el efecto calórico superficial?

Los espacios forestales y la vegetación de zonas más naturalizadas (pastizales y matorral) es más sensible a los cambios de temperatura que las superficies artificiales como los parques urbanos y los jardines (Tanjina, 2021). La mayor parte de los estudios que señalan a las masas forestales como principal herramienta de mitigación del calor (Endreny 2017, EPA 2022) omiten reconocer la disponibilidad hídrica como piedra angular para su desarrollo, pues dan este elemento por sabido y versan sobre geografías con grandes aptitudes naturales para el desarrollo de bosques (situación no tan favorable en la periferia de Madrid).

Más adelante se mostrará el papel del contenido de humedad del suelo mediante el índice NDWI y su impacto en la capacidad de estas superficies para suavizar las temperaturas. Así se explica esta variabilidad térmica de las zonas naturales: no tanto por su heterogeneidad morfológica (como fue señalado en las superficies artificiales, y que ahora sucede de forma secundaria entre pastos y bosques, o entre tipo de bosques) sino por el papel del agua.

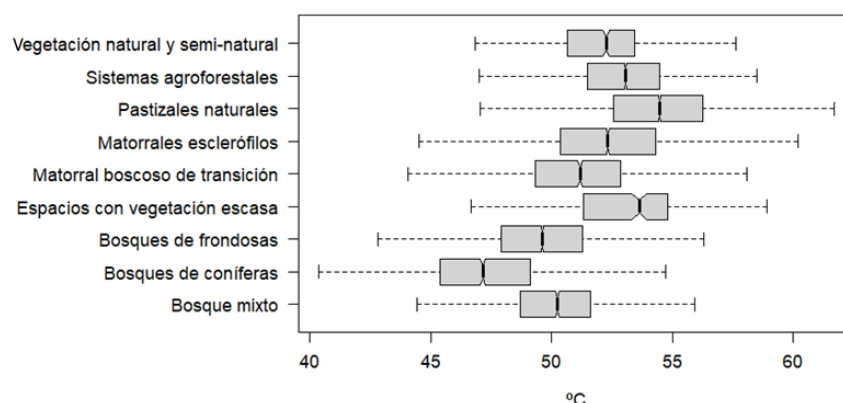


Figura 17. Variabilidad de LST en “Superficies naturales”

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Un segundo método para analizar los factores que explican la distribución de la temperatura de superficie consiste en el cálculo de una serie de índices espectrales a partir de las diferentes bandas proporcionadas por la escena de Landsat. Estos índices espectrales se utilizan para identificar y delinear fácilmente características específicas de la superficie terrestre, como la presencia o ausencia de nieve, el estado de la vegetación, etcétera. Asimismo, se han seleccionado un conjunto de índices que, a priori, mejor podrían representar alguno de los factores avanzados en líneas precedentes, como la vegetación, la humedad del suelo, la superficie edificada, etcétera (fig. 18).

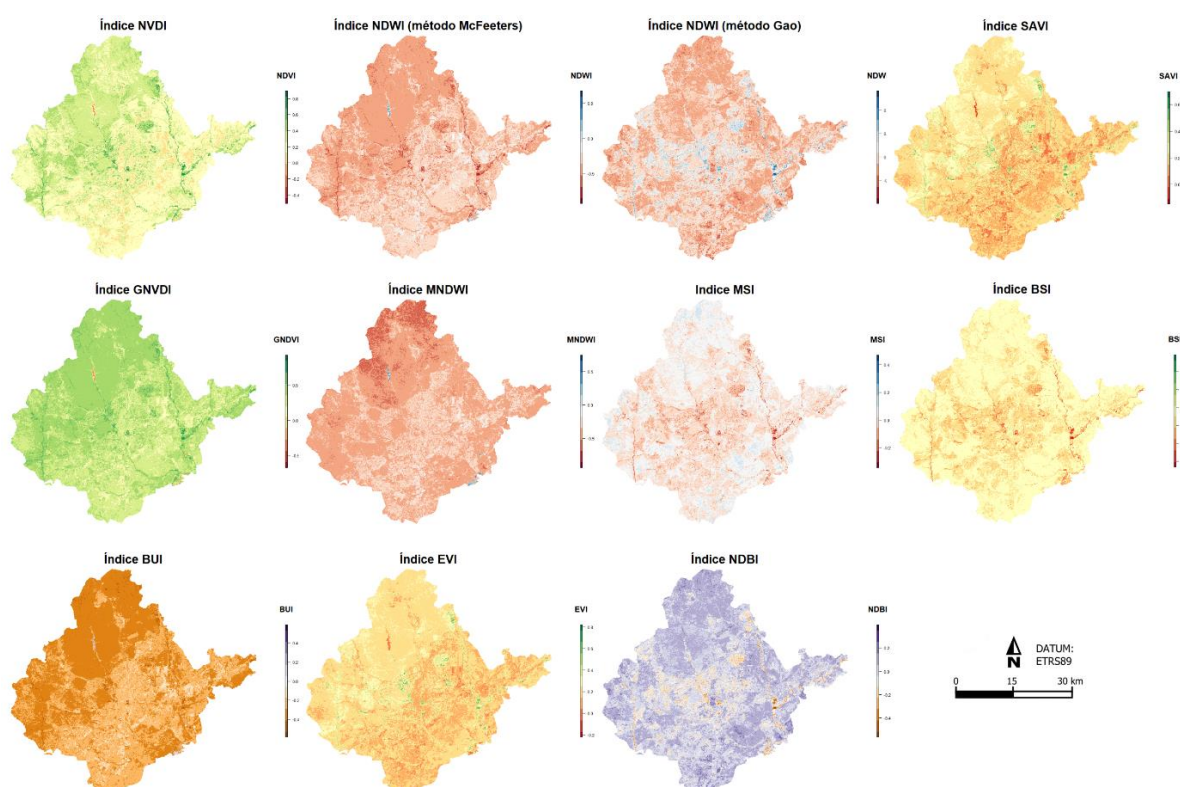


Figura 18. Índices espectrales (Landsat 8), 18 de julio del 2022

Fuente: Elaborado a partir de Landsat 8.

La relación entre la temperatura de superficie y cada uno de estos índices se ha evaluado mediante el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson, elaborándose una matriz de correlaciones (“mapa de calor”; fig. 19). Este último gráfico resalta dos asociaciones entre la temperatura de superficie y los índices espectrales calculados, diferentes tanto en el signo del coeficiente de correlación como en la magnitud de la relación esperable.

En un primer grupo se hallaría la relación positiva y muy significativa (correlaciones superiores a 0,70) entre la temperatura de la superficie terrestre y los índices MSI, BSI y NDBI. Estos índices identifican aquellas superficies construidas (NDBI) y suelos al descubierto (BSI) y con bajo contenido de humedad (MSI), superficies que tendrían aptitudes muy deficientes para el desarrollo de la vegetación. Por lo tanto, una temperatura elevada es esperable sobre áreas sometidas a estrés hídrico, bajo recubrimiento vegetal y alta artificialización.

Un segundo grupo corresponde a la relación negativa y menos significativa (correlaciones en el rango de $-0,40$ y $-0,50$) entre la temperatura de la superficie y los índices que cuantifican el la presencia y el estado de la vegetación, como son el EVI (niveles de clorofila en la unidad vegetal), el NDVI (de la mano del anterior en torno a la salud de la planta) o el SAVI (más apropiado para el análisis de la vegetación en áreas de bajo recubrimiento). En este caso, cuanto mayores son estos niveles, las masas vegetales gozan de un mejor estado natural y salud, y la temperatura de la superficie terrestre es más baja. Considerando las variables que representan estos índices, la relación conocida entre temperatura y espacios naturalizados existe en el área metropolitana de Madrid, contribuyendo a atenuar el efecto de la ICU, pero su capacidad mitigadora parece ser inferior a la de los índices correspondientes al primer grupo.

Cabe igualmente señalar que el índice NDWI de Gao (de disponibilidad hídrica, la versión aproximadamente contraria al índice MSI) ofrece una correlación muy estrecha, pero negativa, con la temperatura de superficie, destacando la disponibilidad hídrica del suelo como uno de los factores determinantes de la distribución espacial de la temperatura de superficie en el ámbito analizado.

Los demás índices analizados (BUI, GNDVI y NDWI de McFeeters), si bien cumplen con la relación estadística esperada (positiva o negativa según el caso), esta no es especialmente significativa.

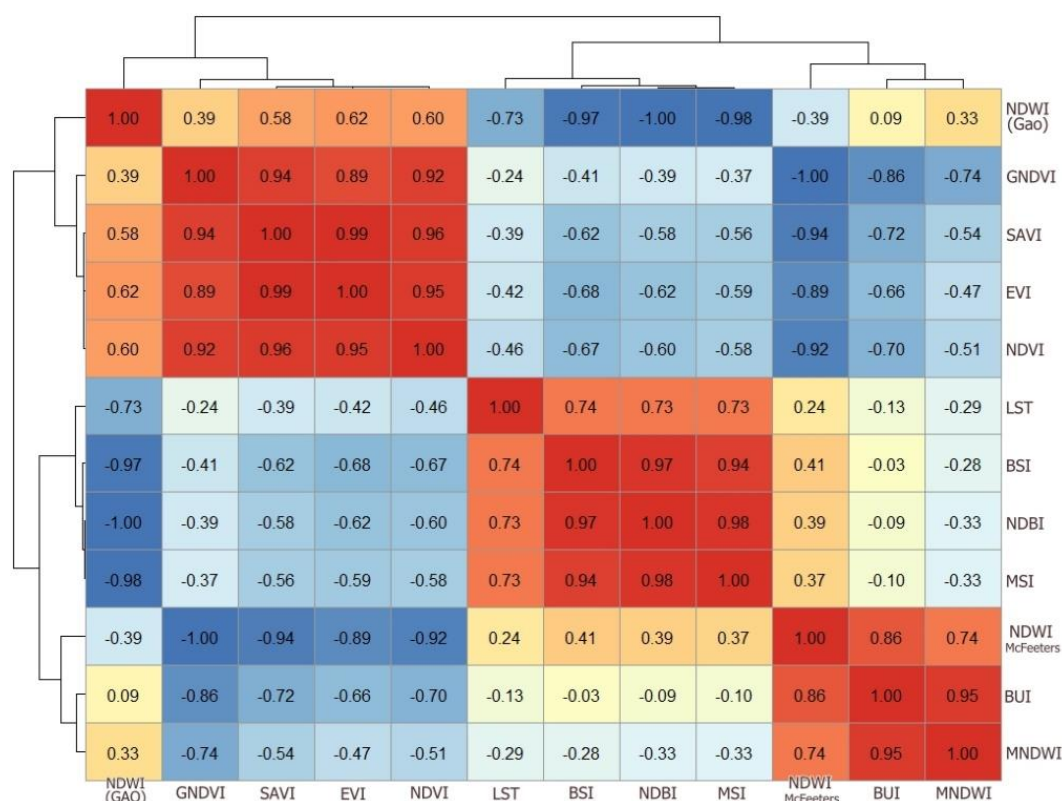


Figura 19. Mapa de calor relacionando la temperatura de superficie y los índices espectrales.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

4.3. Relación entre la temperatura de la superficie terrestre y componente socioeconómica del área metropolitana de Madrid

En el capítulo introductorio se han señalado evidencias que relacionan el confort térmico en las ciudades con diferentes indicadores socioeconómicos, señalando que normalmente las temperaturas más altas suelen corresponder a barrios con mayor densidad edificatoria y menor renta (Díaz 2002, Xiao 2018, Rasilla 2019). En este apartado del TFG se analizará si la temperatura de la superficie terrestre calculada a partir de la imagen del satélite Landsat durante la ola de calor de julio del 2022 presenta alguna relación con los indicadores socioeconómicos contenidos en el Atlas de Distribución de Renta de los Hogares (ADRH). Para ello, el análisis se divide en dos fases:

- En una primera, se identificarán los patrones espaciales que muestran esos indicadores socioeconómicos a escala de municipio/distrito, utilizando para ello el Análisis en Componentes Principales.
- En una segunda fase, se relacionarán estos patrones espaciales con los valores medios de la temperatura de superficie y de los índices espectrales más significativos

identificados en el apartado anterior, calculados según municipio/distrito, mediante el procedimiento conocido como “estadísticas zonales”.

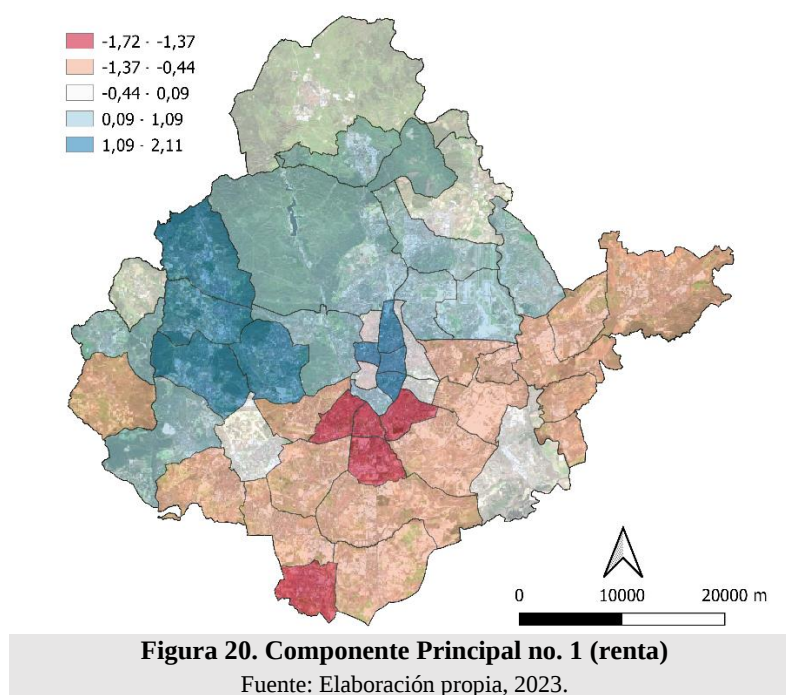
4.3.1 Identificación de patrones espaciales

Los resultados de la aplicación del Análisis en Componentes Principales (ACP) a la base de datos original muestran que es posible definir tres nuevas variables o “Componentes Principales”, sin pérdida de la información original.

Tabla 3. Ponderaciones de cada componente principal en cada una de las variables originales.			
Variable	CP1	CP2	CP3
Densidad (hab/km ²)	0,06	0,88	0,06
Precio (€/m ²)	0,84	0,41	0,13
Renta neta media por persona	0,98	0,16	0,11
Renta neta media por hogar	0,93	-0,17	0,23
Media de la renta por unidad de consumo	0,98	0,04	0,15
Mediana de la renta por unidad de consumo	0,99	-0,01	0,02
Renta bruta media por persona	0,98	0,14	0,15
Renta bruta media por hogar	0,93	-0,14	0,24
Renta bruta media por persona	0,98	0,14	0,15
Fuente de ingreso: salario	0,96	-0,11	0,21
Fuente de ingreso: pensiones	0,59	0,69	-0,37
Fuente de ingreso: prestaciones por desempleo	-0,78	-0,28	0,04
Fuente de ingreso: otras prestaciones	0,83	0,33	-0,19
Fuente de ingreso: otros ingresos	0,89	0,24	0,29
Población con ingresos por unidad de consumo < 5.000 Euros	-0,72	0,47	0,43
Población con ingresos por unidad de consumo < 7.500 Euros	-0,81	0,40	0,36
Población con ingresos por unidad de consumo < 10.000 Euros	-0,88	0,35	0,27
Población con ingresos por unidad de consumo < 40% de la mediana	-0,63	0,28	0,33
Población con ingresos por unidad de consumo < 50% de la mediana	-0,82	0,39	0,35
Población con ingresos por unidad de consumo < 60% de la mediana	-0,86	0,35	0,29
Población con ingresos por unidad de consumo > 140% de la mediana	0,98	-0,06	0,03
Población con ingresos por unidad de consumo > 160% de la mediana	0,98	-0,02	0,07
Población con ingresos por unidad de consumo > 200% de la mediana	0,98	0,05	0,13
Edad media de la población	0,10	0,87	-0,43
% de población < 18 años	0,03	-0,88	0,22
% de población entre 18 y 64 años	-0,27	-0,25	0,51
% de población de > 64 años	0,17	0,82	-0,48
% de hogares unipersonales	0,12	0,88	-0,01
Población (hab.)	-0,30	0,71	-0,26
% de población española	0,64	-0,44	-0,55
Índice de Gini	0,61	0,24	0,66
Distribución de la renta P80/P20	0,47	0,42	0,71
Fuente: Elaboración propia, 2023.			

El Componente Principal acumula el 57 % de la información original. De acuerdo con las ponderaciones de cada una de las variables originales en este Componente Principal, puede

considerarse un buen indicador sintético de la distribución espacial de los niveles de renta y riqueza en el área metropolitana de Madrid. Los valores positivos más altos equivalen a mayores ingresos (por salarios y otros ingresos), precio del suelo, porcentaje de población nacional, desigualdad y fuentes de ingresos pasivas, identificando aquellas unidades espaciales con mayor capacidad económica (fig. 20). Estas unidades espaciales “ricas” se sitúan tanto en los municipios de la periferia oeste (Pozuelo de Alarcón, Boadilla del Monte, Las Rozas) como en distritos del interior de la propia ciudad de Madrid (Chamartín, Salamanca, Chamberí). Por el contrario, las unidades espaciales con valores negativos más bajos representan el modelo contrario (bajos niveles de renta, menor precio de la vivienda, menores ingresos por unidad de consumo y un aumento de las prestaciones por desempleo como fuente de ingresos, entre otras variables). Corresponden a tres distritos de Madrid (Usera, Puente de Vallecas, Villaverde) y al municipio de Parla. De acuerdo con estos resultados, se observa en Madrid una clara diferenciación espacial entre una mitad norte más pudiente y una mitad sur, que se extiende por el valle del Henares, con menos recursos.



El segundo componente acumuló el 20,67 % de la varianza representa un conjunto de variables sociodemográficas relacionadas con el envejecimiento de la población. Así, las ponderaciones positivas más elevadas corresponden variables como la densidad de la población, el envejecimiento, los ingresos por pensiones de jubilación y el porcentaje de hogares unipersonales. Los espacios con valores negativos ejemplifican todo lo contrario

(baja densidad, población menos envejecida y mayores tasas de actividad; fig. 21). El patrón espacial correspondiente a este componente principal separa claramente la ciudad de Madrid, con valores claramente positivos, de los municipios de la periferia. Dentro de estos últimos destacan los de Paracuellos del Jarama, Velilla de San Antonio y Villanueva del Pardillo, municipios tradicionalmente agrícolas y ganaderos pero que han experimentado un crecimiento urbanístico espectacular en los últimos años. Por ejemplo, la población de Villanueva del Pardillo ha pasado de 2120 habitantes según el censo de 1991 a 17382 según el Padron Municipal de 2022.

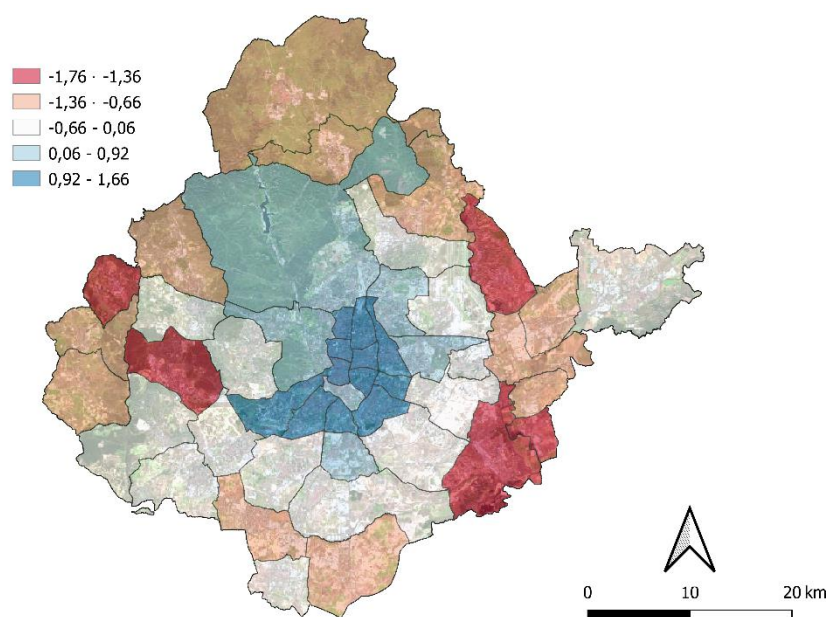


Figura 21. Componente Principal no. 2 (envejecimiento)

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El tercer componente principal sólo acumuló el 10,15 % de la varianza, siendo por ello su capacidad explicativa mucho menor que los 2 restantes (aunque en conjunto representan el 88,50 % de toda la información presente en los datos originales. A partir de las ponderaciones de las variables originales se puede considerar un componente relacionado con la inmigración, ya que las variables con ponderaciones más altas son la población con ingresos por unidad de consumo por debajo de 5.000 €, el porcentaje de población entre 18 y 64 años, el índice de Gini y la diferencia entre los percentiles 80 y 20 de la renta, mientras que los valores negativos resaltan la edad media de la población, el porcentaje de población con 65 y más años y el porcentaje de población española (fig. 22).

Por lo tanto, este componente discriminaría aquellas entidades espaciales con mayor porcentaje de población inmigrante, que suponen una fracción considerable de la fuerza laboral entre los 18 y 64 años, y que muestran una mayor desigualdad en la renta (índice de

Gini elevado), frente a aquellas en las que predomina la población nacional, más envejecidas y con un mayor equilibrio en la renta. Los primeros se sitúan en mayor medida en la corona metropolitana (a excepción del distrito Madrid-Centro), aunque en la periferia también aparecen entidades con características contrarias (El Pardo, Fuenlabrada, Leganés, Hortaleza, Barajas) que refuerza la heterogeneidad de los espacios que estructuran el área metropolitana de Madrid.

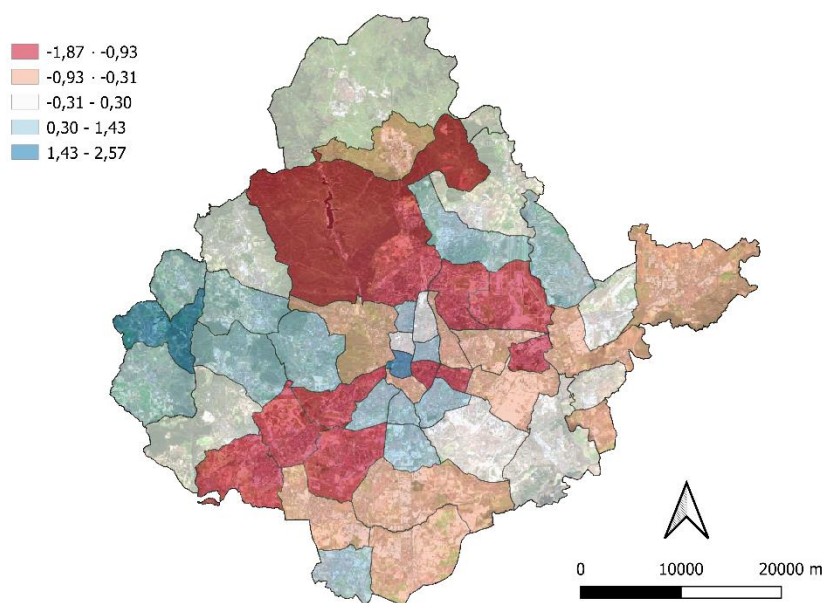


Figura 22. Componente Principal no. 3

Fuente: Elaboración propia, 2023.

A continuación, se relacionarán estos patrones espaciales con los valores medios de la temperatura de superficie y de los índices espectrales más significativos identificados en el apartado anterior, mediante el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson. Sólo se han correlacionado los 2 primeros Componentes Principales, dada la complejidad del 3er componente y su notable dispersión en el espacio, y los principales índices espectrales definidos previamente.

En lo que hace referencia al primer Componente Principal, la tabla 5 muestra que, a mayor renta menor temperatura de superficie, vegetación más abundante (EVI, NDVI) y menor proporción de suelos desnudos o superficie construida (BSI, NDBI). Por su parte, el segundo Componente Principal también muestra una correlación negativa con la temperatura de superficie y con los índices BSI y NDBI. Esta relación tiene que ver con el envejecimiento de la población en el interior de la ciudad de Madrid y, en cierta manera, con los procesos de gentrificación que han expulsado a la población más joven hacia la periferia.

Tabla 5. Relaciones entre índices espectrales y Componentes Principales (1 y 2)

	Temperatura de superficie	EVI	NDVI	BSI	NDBI
PC1	-0,49	0,47	0,56	-0,38	-0,37
PC2	-0,67	-0,19	-0,10	-0,51	-0,43

Fuente: Elaboración propia, 2023.

4.4. Relación entre la temperatura superficial y temperatura del aire

El último aspecto analizado en este trabajo ha sido la relación entre la LST y la temperatura del aire durante este episodio de calor. Son numerosas las publicaciones que analizan dicha relación para cuantificar, entre otras cosas, la transferencia de energía desde la superficie terrestre al aire. Aún con todo, este análisis da con algunos problemas: la temperatura del aire se ofrece en registros con una evolución diaria, con máximos diurnos y mínimas nocturnas, mientras que los procedentes de la imagen de satélite corresponden a las 11:00 A.M. del día 18 de julio, por lo que no coincide con la hora de máxima intensidad.

Los registros de la temperatura del aire han sido comparados con los registros de temperatura de la superficie terrestre correspondientes al pixel en el que se ubicó la estación meteorológica. Como puede observarse en la fig. 23, no se aprecia una relación estadísticamente significativa entre la SAT de esa hora (11 UTC) y la LST (coeficiente de correlación -0,02). Cabe destacar el amplio rango de valores de la superficie terrestre (entre los 44 y 56 °C) frente a la menor variabilidad de los valores de la temperatura del aire (entre 34 y 43 °C), siendo especialmente llamativo el contraste entre ambas variables en los espacios aeroportuarios de la periferia (Colmenar Viejo, Torrejón de Ardoz, Cuatro Vientos y Getafe). La representación gráfica de la SAT tampoco arrojó patrones espaciales claros.

Por último, cabe remarcar que la correlación entre la temperatura de la superficie a mediodía y la temperatura del aire en la madrugada anterior (03:00 A.M. UTC) sí arrojó una correlación significativa estadísticamente (0,47).

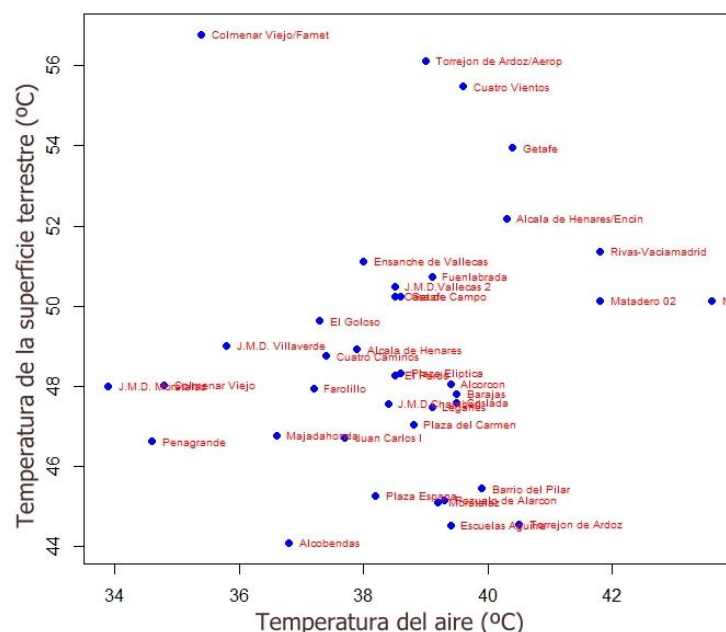


Figura 23. Relación de la temperatura superficial y temperatura del aire
Fuente: Elaboración propia, 2023.

5. DISCUSIÓN

El análisis de la distribución espacial de la temperatura de la superficie terrestre durante la ola de calor de julio de 2022 en el área metropolitana de Madrid muestra una isla de frescor (patrón inverso respecto al de la clásica isla de calor urbano). En este último, los espacios de la periferia (teóricamente, naturalizados) son más frescos que los cascos compactos del centro metropolitano (en teoría, totalmente artificiales). El patrón observado en Madrid ha sido denominado “isla de frescor urbano” al ser la temperatura de las áreas urbanas inferior a la de sus alrededores. Este patrón espacial es habitual en áreas urbanas ubicadas en regiones semiáridas, y se atribuye a escasa vegetación y reducida humedad del suelo de las zonas periféricas (Rasul et al, 2015).

Esta explicación se ve reforzada por el análisis de la temperatura de la superficie según usos del suelo. Las áreas metropolitanas están constituidas por distintos tipos de superficies y diferentes capacidades para absorber o suavizar el calor, dependiendo de la edad del material, su albedo y permeabilidad (Alchapar 2012, Xiao 2018) o contenido de clorofila y agua en unidades vegetales. Los resultados obtenidos en Madrid sobre las categorías de usos de suelo del Corine Land Cover muestran que las superficies artificiales son, por término medio, más frescas que las superficies dedicadas a la agricultura, ya en la zona estudiada predominan los cultivos de secano. Las zonas ocupadas por el agua (cultivos regados

permanentemente y láminas acuáticas como embalses o riberas), si bien minoritarias, son fundamentales a la hora de reducir la temperatura superficial.

Dentro de las superficies artificiales se detectan puntos calientes, que coinciden con áreas descubiertas (aeropuertos, redes viarias) frente a puntos “frescos” que corresponden a superficies verdes (parques y jardines). El tejido urbano muestra un comportamiento intermedio dentro de las superficies artificiales, pero hay que tener en cuenta que las áreas urbanas son espacios complejos, resultado de una larga evolución urbanística. En el caso del área metropolitana de Madrid, el criterio de antigüedad de las arquitecturas – que apunta a un centro más antiguo y una periferia de reciente creación – muestra esa complejidad del espacio urbano (fig. 24).

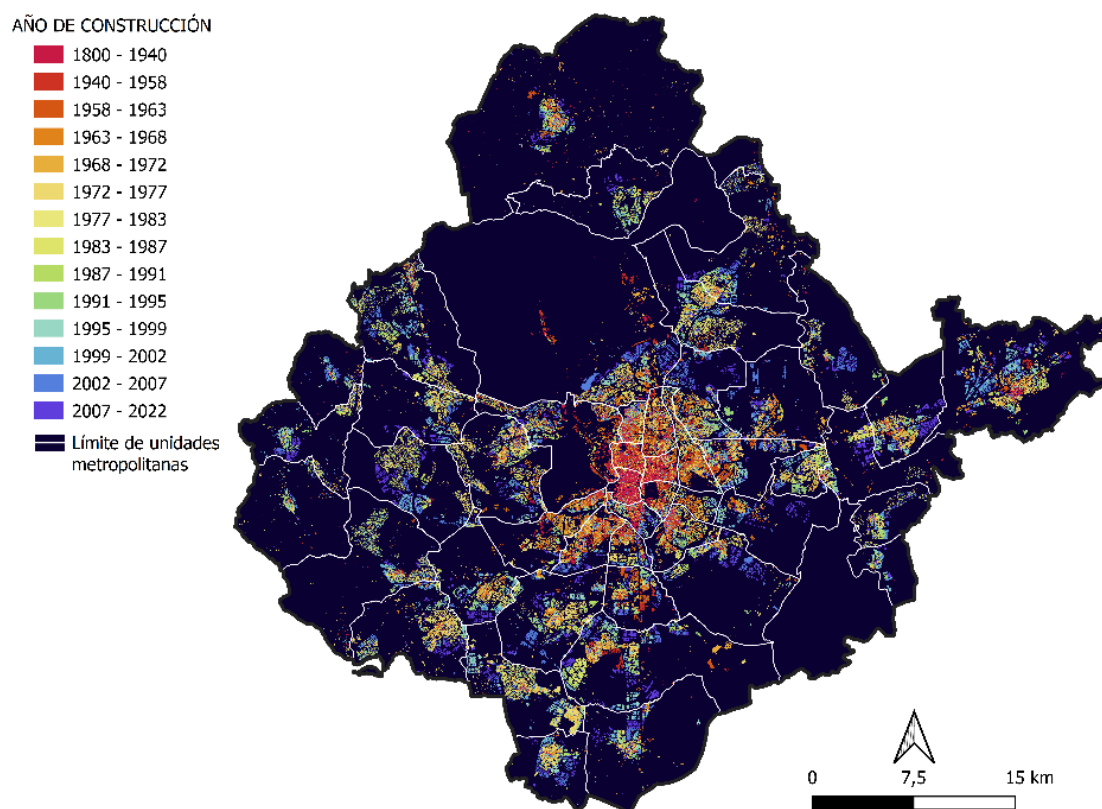


Figura 24. Edad de las arquitecturas de Madrid

Fuente: Elaboración propia a partir de Catastro, 2023.

Sin embargo, no todos los espacios que pertenecen al centro metropolitano son iguales, como tampoco lo son los atribuidos a la periferia. Según López de Lucio (2004), que analizó las distintas configuraciones urbanísticas de la corona metropolitana de Madrid, estas diferencias son aún más acusadas en la periferia. Estableció una clasificación morfológica de subsistemas urbanos (hacia el oeste en Pozuelo y Boadilla, hacia el sur con Leganés,

Getafe y Loranca), núcleo metropolitano (hasta Los Llanos) y *new towns* (referido a Santo Domingo y Tres Cantos en el norte). Por esta razón, ulteriores investigaciones sobre la temperatura en zonas urbanas deberían utilizar categorizaciones alternativas como las *Local Climate Zones* (Chiba, 2022) que discrimina las superficies artificiales por su nivel de desarrollo vertical y horizontal, presencia de espacios verdes o actividad industrial.

El análisis de la relación entre la temperatura de superficie y diferentes índices espectrales plantea que, para el caso de Madrid, la temperatura superficial depende más de las características del suelo, en especial de su contenido de humedad, que de la vegetación. Este hecho tiene repercusiones a la hora del diseño e implementación de medidas de mitigación para reducir el calor en los espacios urbanos, donde, de manera genérica, se han apuntado varias líneas de actuación, como el uso de sombras, agua, vegetación y materiales de gran albedo (Sultana, 2022).

La proyección de sombras de unos elementos sobre otros hace que los segundos presenten valores de temperatura de superficie más reducidos que los primeros, resultado de una menor insolación a lo largo del día. Un ejemplo representativo de este tipo de actuación es *Allonbay Village*, en Alicante. Se trata de un complejo turístico de apartamentos diseñado a propósito para proyectar sombras sobre los espacios utilitarios (pasillos, vías de acceso) y las zonas de descanso (piscinas, terrazas) durante las horas de máxima intensidad solar (fig. 25).



Figura 25. Arquitectura de Allonbay Village, en Alicante

Fuente: ADORAS, 2021.

Por otro lado, el uso de materiales constructivos diferentes a los actuales podría reducir significativamente los valores de temperatura superficial. Esto es una medida ya observada en las arquitecturas populares tradicionales (“casas blancas”). En Estados Unidos, por ejemplo, se usa la tecnología *CoolSeal* y el hormigón para sustituir el asfalto de las ciudades. Otras propuestas señalan el uso de células fotovoltaicas como elemento de cubrición en arquitecturas y medida de aprovechamiento energético (Hulley, 2018).

Uno de los recursos más citados para reducir la temperatura de superficie es el uso del agua en el interior de las ciudades. Como se ha podido apreciar durante las observaciones en detalle, las láminas de agua contribuyen a reducir los valores de temperatura de superficie, gracias a su capacidad para absorber la radiación. Este recurso se utiliza en ciudades de dominio marítimo o fluvial, con disponibilidad hídrica suficiente, mediante la implementación de “elementos azules” (fuentes, parques acuáticos, estanques, aspersores, *water fronts*) como herramientas clave para mitigar el calor (García Sánchez, 2022). En el caso de Madrid, este tipo de actuaciones urbanísticas ha dado lugar a “Madrid Río” (Figura 26), que cuenta, entre otras instalaciones, con una serie de recintos en los que el agua se convierte en un elemento básico de confort bioclimático.



Figura 26. Madrid Río (Arganzuela)

Fuente: EsMadrid.com (página oficial de turismo de Madrid), 2023.

Sin embargo, el uso del agua como elemento de mitigación del calor dentro de la ciudad puede chocar con dificultades derivadas del incremento, a largo plazo, de los déficits hídricos en el interior de la Península Ibérica (a consecuencia del cambio climático) en un ambiente de expansión urbana y consecuente aumento en la demanda de estos recursos (fig. 27).

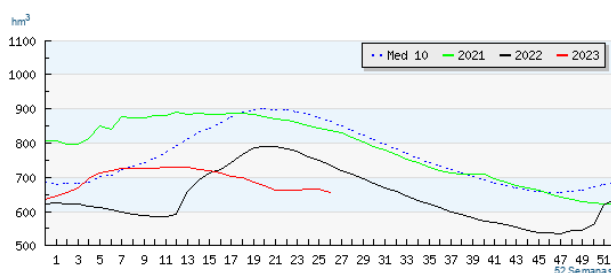


Figura 27. Agua embalsada de la Comunidad de Madrid (2013 – 2023)

Fuente: Embalses.net, 2023.

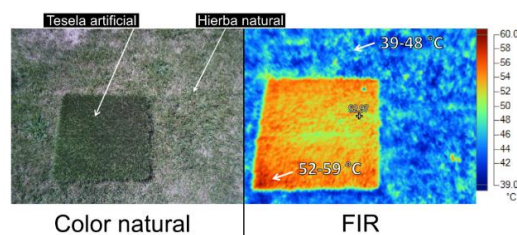


Figura 28. FIR de cámara Fluke TiX580 ≈ 1 metro de distancia

Fuente: Hulley, 2018.

La renaturalización de los medios urbanos a través del aumento de la superficie verde es considerada otra de las actuaciones más efectivas para la mitigación del calor. Las áreas con vegetación reducen la temperatura a través de la evapotranspiración, que devuelve a la

atmósfera parte de la energía recibida, mientras crea espacios de sombra bajo los que protegerse (EPA, 2022), evitando con ello la acumulación de calor durante las noches y moderando los valores máximos de temperatura durante el día.

Adicionalmente, los equipamientos verdes también presentan beneficios indirectos, asociados a servicios ecosistémicos culturales (fomenta el deporte, ayuda a mejorar la salud mental y la calidad de vida, actúa como espacio de reunión y recreo) y es una pieza clave en la biodiversidad urbana (Hope, 2003; UNC, 2021). Además, la fotosíntesis aprovecha la radiación solar, convirtiendo a las masas vegetales en grandes sumideros de CO₂.

Con relación a su potencialidad para mitigar la ICU, la publicación de Schwaab (2021), apunta dos grandes variables en el análisis de la vegetación: el estrato vegetal y su continuidad espacial. Según esta publicación, las masas arbóreas con una cobertura de copa ininterrumpida son el modelo ideal de vegetación para atenuar la LST (observado en ciudades tropicales). Por su parte, la OMS indica que la relación más recomendable de espacios verdes es de 9 m² por habitante (Nieuwenhuijsen, 2021).

Sin embargo, se ha constatado la relativa importancia que tiene la vegetación a la hora de explicar la variabilidad espacial de la temperatura de superficie en el área metropolitana de Madrid. Esta aparente contradicción entre la teoría y la realidad espacial se explica porque muchas zonas verdes de la periferia están ocupadas por masas arbóreas dispersas (Casa de Campo, El Pardo).

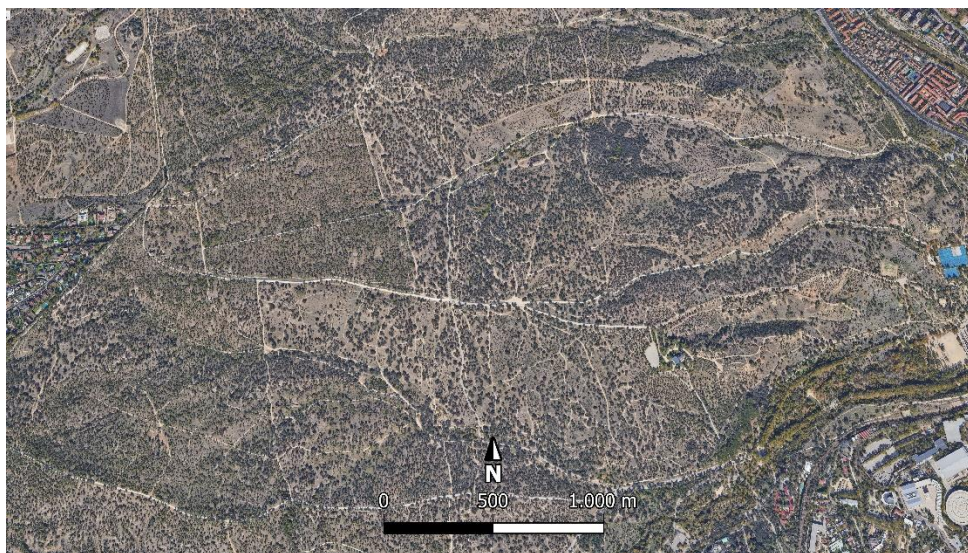


Figura 29. Ortofotografía de Casa de Campo

Fuente: Google Earth, 2023.

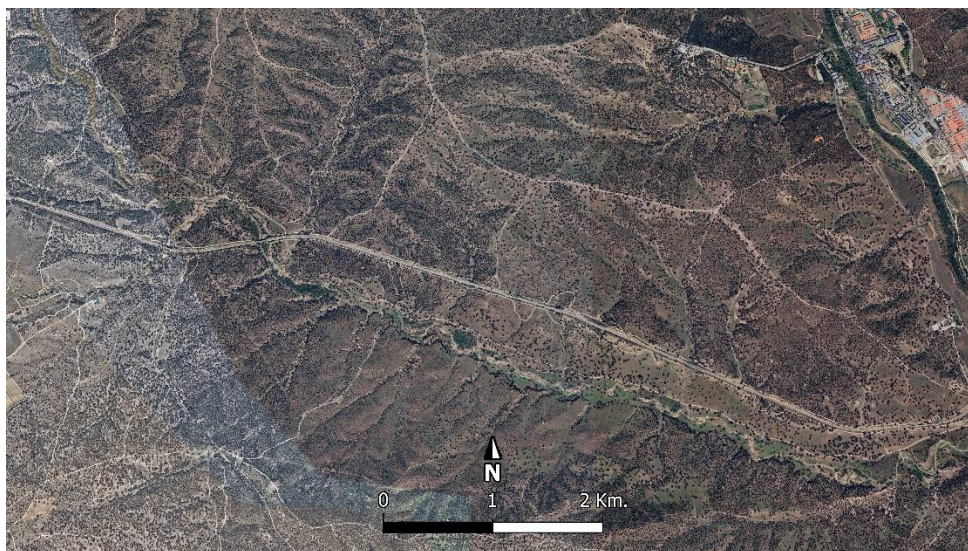


Figura 30. Ortofotografía de El Pardo

Fuente: Google Earth, 2023.

Por otro lado, es importante considerar la fecha de la escena analizada. En el mes de julio la vegetación mediterránea ya ha superado el momento de máxima productividad (normalmente en mayo) y la combinación de altas temperaturas y baja disponibilidad hídrica disminuye la evapotranspiración, y con ello, el papel mitigador de la vegetación. De hecho, la vegetación en áreas urbanas necesita unas condiciones específicas para mantenerse en buen estado y ofrecer esos servicios ecosistémicos (Schwaab, 2021). Un estudio de la Universidad de Alcalá de Henares (2021) ha concluido que las especies mediterráneas presentan mayores dificultades para adaptarse a los episodios extremos de calor. Aquellas que requieren mayores volúmenes de agua pueden acabar muriendo.

Cabe preguntarse si es posible revegetar Madrid introduciendo nuevos elementos verdes en las arquitecturas y en los espacios degradados del área metropolitana. Como hemos señalado, la principal limitación a esta actuación urbana es la disponibilidad de agua, y las condiciones climáticas regionales y su evolución futura exigirán un notable volumen de agua para mantener en buen estado esa vegetación en el marco de una tendencia hacia la disminución de los recursos hídricos, lo que puede redundar en conflictos entre los diferentes usos del agua.

Por otro lado, la revegetación de amplias superficies dentro y alrededor de las zonas urbanas debe ser una actuación integral que contemple posibles consecuencias no deseadas. Algunas actuaciones urbanas que han incorporado espacios verdes han generado un “efecto lujo” al revalorizar el precio del suelo, desembocando en el proceso conocido por “gentrificación verde” observado en ciudades como Valencia o Barcelona (Anguelovski 2022, Triguero 2022). En otros

casos, las actuaciones urbanas tendentes a crear grandes paseos y avenidas arboladas (que concentran casi la totalidad de la vegetación) han acabado convirtiéndose en ejes vertebradores del tráfico rodado y por lo tanto, emisores de grandes volúmenes de contaminantes. De ahí que, en las políticas de creación de espacios verdes, López de Lucio (2004) abogue por la generación de zonas accesibles para todas las personas y que actúen verdaderamente como puntos de reunión (*...mucha cantidad de masas naturales de nada sirve si los espacios que ocupan no son utilizables...*).

Además, un aumento de las superficies verdes podría agravar dolencias respiratorias (alergias, asma) si se plantan especies alergénicas. En este sentido, durante los 3 últimos decenios se observa en Madrid un aumento significativo de las concentraciones de polen en la atmósfera, particularmente de especies vegetales ornamentales como los plátanos de sombra o plátanos de paseo (género *Platanus*), una de las especies más alergénicas de la comunidad de Madrid (Palinocam, 2021). Si bien, en general se vincula este aumento de la concentración de polen a una mayor productividad ligada al aumento de las temperaturas, tanto global como local (isla de calor urbana), no cabe duda de que también podría ser atribuido a factores humanos (revegetación).



Figura 31. Bosco Verticale (Milán) construcción 2014



Figura 32. Guinigi, construcción del siglo XIV

Fuente: Wikimedia Commons, 2023.

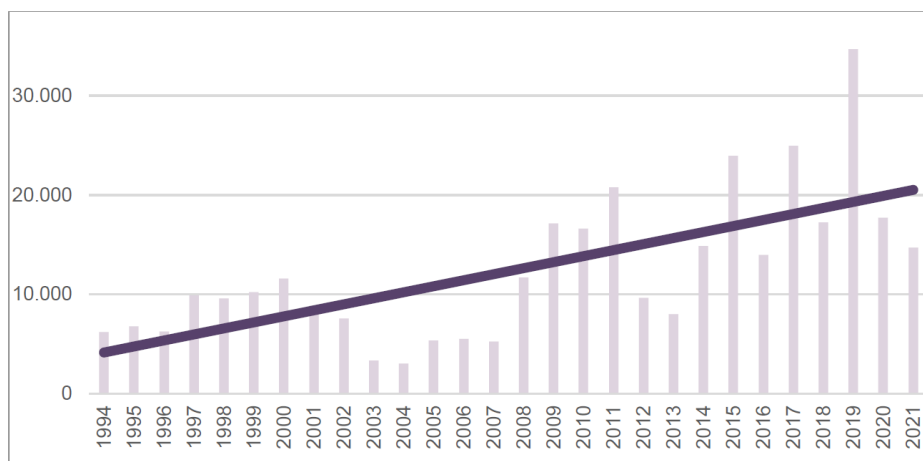


Figura 33. Evolución de la concentración (gr/m3) de polen de Platanus (PLAT) en Madrid (1994 – 2021)

Fuente: Palinocam, 2021.

En términos de equidad socioeconómica, se ha confirmado que las entidades espaciales con menos ingresos tienden a experimentar mayores niveles de temperatura debido a la menor falta de espacios verdes, a la menor calidad de las viviendas y, probablemente, a una menor capacidad para acceder a sistemas de refrigeración. Esto puede llevar a disparidades en la exposición al calor y a un mayor riesgo de impactos negativos para las comunidades más desfavorecidas. Las altas temperaturas tienen un impacto en la salud de los residentes urbanos, multiplicando por 5 la incidencia de las olas de calor en España (Tobías, 2023). Así, aumentan los riesgos por golpes de calor, enfermedades cardiovasculares, deshidratación y problemas respiratorios entre los grupos más vulnerables, como los ancianos, los niños y las personas con enfermedades crónicas (Alahmad, 2022). Esto se traduce en un aumento en la demanda de servicios de salud, con todos los costes humanos y materiales que ello implica. Para abordar estos problemas, es importante implementar estrategias de adaptación urbana que promuevan el confort térmico, como la creación de espacios verdes, refugios climáticos, la promoción de la eficiencia energética y la implementación de medidas de protección para los grupos más vulnerables (Tomlinson 2011, Xiao 2018). En este sentido, la composición social de un espacio puede amplificar el impacto potencial de las olas de calor en la salud de las personas.

6. CONCLUSIONES

En Madrid se puede hablar de una isla de frescor superficial, con un núcleo metropolitano más fresco que la periferia. Al elevar la escala de análisis, pueden apreciarse irregularidades en el tejido urbano o en los usos del suelo que inducen a la presencia de superficies más frescas o cálidas que el entorno en el que se inscriben.

En el área metropolitana de Madrid se ha observado un comportamiento espacial de agrupaciones morfológicas, funcionales y sociales por sistemas suburbanos y distritos indiferentes a la distancia lineal que guardan respecto al centro metropolitano. Cabría hablar, en cualquier caso, de “distintas periferias”: desde los barrios con mayor densidad poblacional y menor renta en la franja sur (Carabanchel, Leganés, Vallecas, Getafe) a los modelos contrarios en el oeste (Boadilla, Pozuelo) y en el norte (Tres Cantos, Santo Domingo).

Estas diferencias en la dimensión socioeconómica de la periferia metropolitana guardan una relación directa con la realidad física de estos espacios. Las unidades de mayor renta son, además, las que mejores valores de vegetación y humedad presentan. Por el contrario, las zonas de la franja sur (mayor densidad poblacional, inmigración, envejecimiento y menor renta) carecen de grandes jardines, campos de golf o piscinas, es decir, representan valores más altos de superficie construida y temperatura superficial.

Especialmente llamativo es el caso del núcleo metropolitano, que reúne las condiciones socioeconómicas y urbanísticas más propensas a devaluar el nivel de renta: mayor antigüedad de las arquitecturas, densidad poblacional y envejecimiento. Sin embargo, el centro de Madrid aún los mayores precios medios de suelo y renta per cápita. Del mismo modo que las demás unidades de mayor renta (urbanizaciones de lujo en la periferia), el centro metropolitano de Madrid presenta valores de temperatura moderados y un buen estado en la vegetación (allí donde la hay, mayormente parques urbanos e instalaciones deportivas).

Con todo, la situación actual demuestra una dicotomía entre los espacios de mayor renta como más frescos y los más pobres como más cálidos, precisamente porque algunas zonas están favorecidas por la presencia de vegetación y agua, y porque otras zonas carecen de ello (por el elevado coste que supone mantener estos recursos escasos o por la presencia de usos del suelo incompatibles, como infraestructura, industria, etcétera).

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figuras	Págs.
Figura 1. Tendencias socioeconómicas mundiales (1860 - 2010)	4
Figura 2. Temperaturas máximas y olas de calor en El Retiro (1880 – 2017)	6
Figura 3. Área metropolitana de Madrid	15
Figura 4. Clima en Madrid (El Retiro)	16
Figura 5. Población en la Comunidad de Madrid, 2022	17
Figura 6. Densidad de población en la Comunidad de Madrid, 2022	17
Figura 7. Estructura demográfica de la Comunidad de Madrid (1 de enero del 2022)	17
Figura 8. Usos del suelo en el área metropolitana	18
Figura 9. Zonas en construcción del área metropolitana	19
Figura 10. Valores de LST (18-VII-2022)	20
Figura 11. Temperaturas de superficie (LST) sobre color natural	21
Figura 12. Puntos fríos y calientes (Hot/Cold spots)	21
Figura 13. Temperatura superficial en Madrid - Centro	22
Figura 14. Temperatura superficial en Valdebebas	23
Figura 15. Variabilidad de LST en “Superficies artificiales”	25
Figura 16. Variabilidad de LST en “Superficies agrícolas”	25
Figura 17. Variabilidad de LST en “Superficies naturales”	26
Figura 18. Índices espectrales (Landsat 8), 18 de julio del 2022	27
Figura 19. Mapa de calor relacionando la temperatura de superficie y los índices	28
Figura 20. Componente Principal no. 1 (renta)	31
Figura 21. Componente Principal no. 2 (envejecimiento)	32
Figura 22. Componente Principal no. 3	33
Figura 23. Relación de la temperatura superficial y la temperatura del aire	34
Figura 24. Edad de las arquitecturas de Madrid	36
Figura 25. Arquitecturas de Allobay Village, en Alicante	37
Figura 26. Madrid Río (Arganzuela)	38
Figura 27. Agua embalsada de la Comunidad de Madrid (2013 – 2023)	38
Figura 28. FIR de cámara Fluke TiX580 $\approx$ 1 metro de distancia	38
Figura 29. Ortofotografía de Casa de Campo	39
Figura 30. Ortofotografía de El Pardo	39
Figura 31. Bosco Verticale (Milán) construcción de 2014	40
Figura 32. Guinigi, construcción del siglo XIV	40
Figura 33. Evolución de la concentración (gr/m3) de polen de Platanus en Madrid (1994 - 2021)	41
Tablas	
Tabla 1. Diferencias entre la Isla de Calor superficial y atmosférica	5
Tabla 2. Fuentes de información empleadas en la investigación	10
Tabla 3. Temperatura superficial y usos del suelo	24
Tabla 3. Ponderaciones de cada componente principal en cada una de las variables originales	30
Tabla 4. Relaciones entre índices espectrales y Componentes Principales (1 y 2)	33
Tabla 5. Relaciones entre índices espectrales y Componentes Principales (1 y 2)	34

BIBLIOGRAFÍA

- ADORAS (2021). *El efecto isla de calor en la arquitectura: el caso de Allonbay Village*. Alicante: Taller de Arquitectura ADORAS, Blog. Publicado el 6 de agosto del 2021. Disponible en junio del 2023, en: <https://adoras.es/el-efecto-isla-de-calor-en-la-arquitectura-el-caso-de-allonbay-village/>
- AEMET (2019). *Estadística del índice meteorológico de riesgo de incendio (BUI)*. Madrid: Agencia Estatal de Meteorología, Proyecto Técnico. Publicado el 6 de marzo del 2019. Disponible en mayo del 2023, en: https://www.ine.es/normativa/leyes/cse/proyecto_IndiceMeteorologicoIncendio.pdf
- Alahmad, B.; Khraishah, H.; Royé, D.; Vicedo-Cabrera, A.M.; Guo, Y.; Papatheodorou, S.I.; Achilleos, S.; Acquaotta, F.; Armstrong, B. et. Al. (2022). *Associations Between Extreme Temperatures and Cardiovascular Cause-Specific Mortality: Results From 27 Countries*. Dallas (Estados Unidos): American Heart Association, Circulation (Revista), Issue 1, Vol. 147. Publicado el 12 de diciembre de 2022. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.122.061832
- Alchapar, N.; Correa, E.; Cantón, A. (2012). *Influencia del envejecimiento de los materiales en su desempeño térmico*. Argentina: Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (INCIHUSA), Revista Latinoamericana de Metales y Materiales, 2013; 33(2). 282-291 pp. Publicado el 12 de septiembre del 2012. eISSN: 2244-7113
- Allende Álvarez, F.; Fernández García, F.; Rasilla Álvarez, D.; et. Al. (2016). *Estudio de detalle del clima urbano de Madrid*. Madrid: Ayuntamiento de Madrid, Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad. Consultado en marzo de 2023. Publicado en abril del 2016, en: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Medio-ambiente/Publicaciones/Estudio-de-detalle-del-Clima-Urbano-de-Madrid/?vgnextfmt=default&vgnextoid=563d8e15ac0c6510VgnVCM1000001d4a900aRCRD&vgnnextchannel=f6ff79ed268fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD>
- Anguelovski, I.; Conolly, J.J.; Cole, H.; García-Lamarca, M.; Triguero-Mas, M.; Baró, F.; Martin, N. et. Al. (2022). *Green gentrification in European and North American Cities*. Reino Unido: Nature, Communications, 13:3816. Publicado el 2 de julio del 2022. DOI: 10.1038/s41467-022-31572-1
- Azad, R.; Balzter, H.; Smith, C. (2015). *Spatial variation of the daytime Surface Urban Cool Island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8*. Urban Climate: Vol. 14, Parte II. Publicado en diciembre del 2015. DOI: 10.1016/j.uclim.2015.09.001
- Bello Fuentes, V. (1995). *La isla de calor nocturna y los usos del suelo en Alcalá de Henares*. Madrid: UCM, Anales de Geografía de la Universidad Complutense, 1995. 15. Disponible en mayo de 2023, en: https://www.researchgate.net/publication/27579237_La_isla_de_calor_nocturna_y_los_usos_de_l_suelo_en_Alcala_de_Henares
- Chiba, E.; Ishida, Y.; Wang, Z.; Mochida, A. (2022). *Proposal of LCZ categories and standards considering super high-rise buildings suited for Asian cities based on the analysis of urban morphological properties of Tokyo*. Japan architectural review: 5. DOI: 10.1002/2475-8876.12269.
- Comunidad de Madrid (2015). *Atlas Estadístico de la Comunidad de Madrid 2015*. Madrid: Dirección General de Economía y Política Financiera. Publicado en junio de 2015. Disponible en mayo de 2023, en: <https://www.madrid.org/iestadis/gazeta/publicaciones/atlasestadistico.htm>
- Comunidad de Madrid (2023). *Datos meteorológicos desde 2020*. Madrid: Portal Estadístico de la Comunidad de Madrid, Red de Calidad del Aire. Disponible en mayo del 2023, en: https://datos.comunidad.madrid/catalogo/dataset/calidad_aire_datos_meteo_historico
- DatosAbiertos (2023). *Datos meteorológicos horarios*. Madrid: Ayuntamiento de Madrid, Portal de DatosAbiertos, Datos meteorológicos, Estaciones de Control. Disponible en mayo del 2023, en: <https://datos.madrid.es/portal/site/egob/menuitem.c05c1f754a33a9f9be4b2e4b284f1a5a0/?vgnextoid=2ac5be53b4d2b610VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aRCRD&vgnnextfmt=default>
- Díaz, J.L.; Jordán, A.; García, R.; López, C.; Alberdi, J.C.; Hernández, E.; Otero, A. (2002). *Heat waves in Madrid 1986-1997: Effects on the health of the elderly*. Int. Arch. Occup. Environ. Health, 75, 163–170. DOI: 10.1007/s00420-001-0290-4

- Embalses.net (2023). *Agua embalsada en Madrid*. España: Embalses.net, Estado de los Embalses, Madrid (provincia). Disponible en junio de 2023, en: <https://www.embalses.net/provincia-45-madrid.html?Origen=Bole-26-06-2023>
- Endreny, T.; Santagata, R.; Perna, A.; De Stefano, C.; Rallo, R.F. (2017). *Implementing and managing urban forests: A much needed conservation strategy to increase ecosystem services and urban wellbeing*. Ecological Modelling and Systems Ecology, Volume 360, 328-335 pp. Publicado el 30 de julio del 2017. ISSN: 0304-3800
- EPA (2022). Using Trees and Vegetation to Reduce Heat Islands. Estados Unidos: United States Environmental Protection Agency (EPA). Publicado el 25 de octubre de 2022. Disponible en mayo del 2023, en: <https://www.epa.gov/heatislands/using-trees-and-vegetation-reduce-heat-islands>
- Fernández García, F.; López Gómez, A.; Almendros, M.A. (1995). *El clima urbano del S y SE del área metropolitana madrileña*. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid, VI Coloquio Ibérico de Geografía, actas, La Península un espacio en evolución, Vol. 2. 903 – 910 pp.
- Fernández García, F. (2001). *Clima y calidad ambiental en las ciudades: propuesta metodológica y su aplicación al área de Madrid*. Barcelona: Katelani (ed.), Proyectos y métodos actuales en Climatología, 41 - 46 pp. ISBN: 978-8493199012
- Fernández García, F.; Rasilla Álvarez, D. (2008). *Olas de calor e influencia urbana en Madrid y su área metropolitana*. Madrid: CSIC, Estudios Geográficos, LXIX, 265. 495-518 pp. Publicado en diciembre del 2008. ISSN: 0014-1496
- Fotocasa (2023). *Índice precio medio de la vivienda*. Madrid: Fotocasa (web), buscadores índices. Disponible en mayo del 2023, en: <https://www.fotocasa.es/indice-precio-vivienda>
- Galvani, E.; do Nascimento, A.C.L.; Gobo, J.P.A.; Wollmann, C.A. (2022). *Comparison between Air Temperature and Land Surface Temperature for the City of São Paulo, Brazil*. Atmosphere: 2022; 13(3):491. Publicado el 18 de marzo del 2022. DOI: 10.3390/atmos13030491
- García Haro, A. (2019). *Procedimiento de cálculo de LST y NDVI con imágenes de Landsat-8 en ArcGIS*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Centro de Política de Suelo y Valoraciones. Publicado en abril del 2019. Disponible en marzo del 2023, en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/183369/07_ProcesoCalculoLST_Landsat8_ArcGIS.pdf?sequence=1
- García Sánchez, F.; Govindarajulu, D. (2022). *Integrating blue-green infrastructure in urban planning for climate adaptation: Lessons from Chennai and Kochi, India*. Land Use Policy, Vol. 124, 2023, 106455. ISSN 0264-8377. DOI: 10.1016/j.landusepol.2022.106455.
- Gerrish, E.; Watkins, S.L. (2018). *The relationship between urban forests and income: A meta-analysis*. Landscape and Urban Planning, 170. 293 - 208 pp. ISSN: 0169-2046. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.09.005.
- Harlan, S.L.; Brazel, A.J.; Jenerette, G.D.; Jones, N.S.; Larsen, L.; Prashad, L.; Stefanov, W.L. (2007). *In the shade of affluence: the inequitable distribution of the urban heat island*. Equity and the Environment, 15, 173–202 pp. DOI: 10.1016/S0196-1152(07)15005-5
- Hope, D.; Corinna, G.; Weixing, Z.; et. Al. (2003). *Socioeconomics drive urban plant diversity*. California: Universidad de Stanford, Peter Vitousek (editor). Publicado el 20 de mayo del 2003. DOI: 10.1073/pnas.1537557100
- Hsu, A.; Sheriff, G.; Chakraborty, T; et Al. (2021). *Disproportionate exposure to urban heat island intensity across major US cities*. Nature: Communications, No. 12, 2721. Publicado el 25 de mayo del 2021. DOI: 10.1038/s41467-021-22799-5
- Huang, Q.; Lu, Y. (2015). *The Effect of Urban Heat Island on Climate Warming in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration in China*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12 (8): 8773 - 8739 pp. Publicado el 27 de julio del 2015. DOI: 10.3390/ijerph120808773
- Hulley, G.; Shivers, S.; Wetherley, E.; Cudd, R. (2018). *New ECOSTRESS and MODIS Land Surface Temperature Data Reveal Fine-Scale Heat Vulnerability in Cities: A Case Study for Los Angeles County*. California: NASA, Instituto de Tecnología, Remote Sens. 2019, 11, 2136. DOI: 10.3390/rs11182136

- ISCIII (2023). *Panel del Índice Kairós*. Madrid: Instituto de Salud Carlos III, Vigilancia de mortalidad, Índice Kairós. Disponible en junio del 2023, en: <https://momo.isciii.es/kairos/>
- Klein Rosenthal, J.; Kinney, P.L.; Metzger, K.B. (2014). *Intra-urban vulnerability to heat-related mortality in New York City, 1997-2006*. *Health and Place*, 30, pp.45–60. DOI: 10.1016/j.healthplace.2014.07.014
- Kyum Kin, S.; Bennett, M.M.; van Gevelt, T.; Joose, P. (2021). *Urban agglomeration worsens spatial disparities in climate adaptation*. Londres: Nature Communications, Articles, 11:8446. DOI: 10.1038/s41598-021-87739-1
- Li, T.; Horton, R.M.; Bader, D.A.; Huang, G.; Sun, Q.; Kinney, P.L. (2015). *Heat-related mortality projections for cardiovascular and respiratory disease under the changing climate in Beijing, China*. *Nature: Scientific Reports*, 5:11441. Publicado el 6 de agosto del 2015. DOI: 10.1038/srep11441
- López, JA.; Díaz, J.; Sánchez, C.; Sánchez Martínez, G.; Franco, M.; Gullón, P.; Núñez Peiró, M.; Valero, I.; Linares, C. (2020). *The Impact of Heat Waves on Daily Mortality in Districts in Madrid. The Effect of Sociodemographic Factors*. *Environmental Research*: 190, 109993. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109993
- López de Lucio, R. (2004). *Morfología y características de las nuevas periferias. Nueve paisajes residenciales de la región urbana de Madrid*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Urban (Revista), Proyecto Residencial en la Región urbana de Madrid (I), No. 9. 56 - 80 pp. ISSN: 1138-0810
- López Gómez, A. (1985). *El clima de las ciudades*. Madrid: Arbor (Revista), Tomo 121, No. 474, 13-32 pp. Publicado el 1 de junio de 1985. ISSN: 0210-1963
- López-Bueno, J.A.; Díaz, J.; Sánchez-Guevara, C.; Sánchez-Martínez, G.; Franco, M.; Gullón, P.; Núñez Peiró, M.; Valero, I.; Linares, C. (2020). *The impact of heat waves on daily mortality in districts in Madrid: The effect of sociodemographic factors*. *Environmental Research* 190, 109993. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109993.
- López Moreno, H.; Sánchez-Guevara Sánchez, C.; Román López, E.; Neila González, F.J. (2015). *Thermal characterization of urban heat island according to urban morphology of Madrid*. III International Congress on Construction and Building Research. ISBN: 978-84-933567-6-7
- Mildrexler, D.J.; Maosheng, Z.; Running, S.W. (2011). *A global comparison between station air temperatures and MODIS land surface temperatures reveals the cooling role of forests*. AGU: Biogeosciences, Revista de Investigaciones Geofísicas. Publicado en agosto de 2011. DOI: 10.1029/2010JG001486
- Mildrexler, D.J.; Zhao, M.; Cohen, W.B.; Running, S.W.; Song, X.P.; Jones, M.O. (2018). *Thermal Anomalies Detect Critical Global Land Surface Changes*. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 57: Issue 2. 391 – 411 pp. Publicado el 1 de febrero del 2018. DOI: 10.1175/JAMC-D-17-0093.1
- Moreno Jiménez, A.; Fernández García, F. (2003). *El confort climático en los entornos residenciales de las capas altas, medias y bajas de la Comunidad de Madrid: otra forma de desigualdad socioespacial*. UAM: Geografía Humana, La distribución espacial de la renta en la Comunidad de Madrid. Disponible en junio del 2023, en: <http://hdl.handle.net/10486/668622>
- Nieuwenhuijsen, M.J. (2021). *Por qué es esencial que las ciudades tengan más espacios verdes*. Barcelona: ISGlobal, Salud Ambiental, Artículos. Disponible en junio del 2023, en: <https://www.isglobal.org/healthisglobal/-/custom-blog-portlet/why-more-green-space-is-essential-for-cities/4735173/0>
- Oyler, J.W.; Dobrowski, S.Z.; Holden, Z.; Running, S. (2016). *Remotely Sensed Land Skin Temperature as a Spatial Predictor of Air Temperature across the Conterminous United States*. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 55 (7). 1441-1457 pp. Disponible en mayo del 2023, en: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/55/7/jamc-d-15-0276.1.xml>

- Palinocam (2021). *Informe técnico anual de situación 2021*. Madrid: Comunidad de Madrid, Consejería de Sanidad, Servicios e Información, Red Palinocam, Publicaciones, año 2021. Disponible en junio del 2023, en: https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/sanidad/pole/red_palinocam._informe_tecnico_anual_de_situacion_2021.pdf
- Rasilla Álvarez, D.; Allende, F.; Martilli, A.; Fernández, F. (2019). *Heat waves and Human Well-Being in Madrid (Spain)*. Atmosphere (revista), 10(5), 288. Publicado el 22 de mayo del 2019. ISSN: 2073-4433. DOI: 10.3390/atmos10050288
- Romans, A. (2023). *La gran aceleración (¿o el gran colapso?)*. Ethic: Cambio Climático, Opinión. Publicado el 23 de junio del 2023. Disponible en julio de 2023, en: <https://ethic.es/2023/06/antropoceno-gran-aceleracion-o-el-gran-colapso/>
- Sánchez-Guevara, C.; Sanz Fernández, A.; Hernández Aja, A. (2014). *Income, energy expenditure and housing in Madrid: retrofitting policy implications*. Building Research & Information, 3218, 1 – 13 pp. Publicado en mayo del 2015. ISSN: 1466-4321
- Sarricolea, P. (2012). *La isla de calor urbana de superficie y sus factores condicionantes. El caso del área metropolitana de Santiago de Chile*. Barcelona: Universidad de Barcelona, Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Tesis, Javier Martín Vide (dirección). Publicado en julio de 2012. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/279577284_La_isla_de_calor_urbana_de_superficie_y_sus_factores_condicionantes_El_caso_del_area_metropolitana_de_Santiago
- Schwaab, J.; Meier, R.; Musetti, G.; Seneviratne, S.; Davin, E.L. (2021). *The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities*. Reino Unido: Nature Communications, Articles, 12:6763. Publicado el 23 de noviembre del 2021. DOI: 10.1038/s41467-021-26768-w
- SMS (2018). *Dinámicas demográficas*. Madrid: Servicio Madrileño de Salud (SMS), Observatorio, Estado de salud de la población. Disponible en mayo del 2023, en: <http://observatorioresultados.sanidadmadrid.org/GraficosEstadoPoblacion.aspx?ID=2>
- Sultana, S.; Satyanarayana, A. (2022). *Urban heat island: land cover changes, management, and mitigation strategies*. Global Urban Heat Island Mitigation, Capítulo 4 - Urban heat island: land cover changes, management, and mitigation strategies, 2022, 71-93 pp. ISBN: 9780323855396, DOI: 10.1016/B978-0-323-85539-6.00009-3
- Sun, T.; Sun, R.; Chen, L. (2020). *The Trend Inconsistency between Land Surface Temperature and Near Surface Air Temperature in Assessing Urban Heat Island Effects*. Remote Sensing: MDPI, 12, 1271. Publicado el 17 de abril del 2020. DOI: 10.3390/rs12081271
- Tanjina Hasnat, G. N. (2021). *A Time Series Analysis of Forest Cover and Land Surface Temperature Change Over Dudpukuria-Dhopachari Wildlife Sanctuary Using Landsat Imagery*. India: Universidad de Panjab, Front for Global Change, Sec. Forest Disturbance, Volume 4. Publicado en agosto de 2021. DOI: 10.3389/ffgc.2021.687988
- Tapia, C.; Abajo, B.; Feliu, E.; Fernández, J.G.; Padró, A.; Castaño, J. (2015). *Análisis de vulnerabilidad ante el cambio climático en el Municipio de Madrid*. Madrid: Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental. DOI: 10.13140/RG.2.1.3941.0965
- Tobías, A.; Royé, D.; Iñiguez, C. (2023). *Heat-attributable Mortality in the Summer of 2022 in Spain*. Filadelfia (EEUU): Epidemiology 34(2). Consultado en marzo del 2023. Publicado en diciembre del 2022. DOI: 10.1097/EDE.0000000000001583
- Tomlinson, C.J.; Chapman, L.; Thornes, J.E.; Baker, C.J. (2011). *Including the urban heat island in spatial heat health risk assessment strategies: A case study for Birmingham, UK*. Int. J. Health. Geography. 2011, 10. DOI: 10.1186/1476-072X-10-42
- Triguero-Mas, M.; Anguelovski, I.; Conolly, J.; Martin, N.; Matheney, A.; VS Cole, H.; Pérez-del-Pulgar, C.; García-Lamarca, M.; Shokry, G.; Argüelles, L. et. Al. (2022). *Exploring green gentrification in 28 global North cities: the role of urban parks and other types of greenspaces*. Reino Unido: IOP, Environmental Research Letters, no. 17 (104035). Publicado el 4 de octubre del 2022. DOI: 10.1088/1748-9326/ac9325

- UAB (2022). *Las ciudades más verdes promueven las desigualdades sociales y climáticas*. Barcelona: Universidad Autónoma, Nota de Prensa. Publicado el 19 de diciembre del 2022. Disponible en marzo de 2023, en: <https://www.uab.cat/web/sala-de-prensa/detalle-noticia/las-ciudades-mas-verdes-promueven-las-desigualdades-sociales-y-climaticas-1345830290069.html?detid=1345877042077>
- UAH (2021). *La diversidad de árboles en los bosques no es suficiente para evitar la sequía*. Alcalá de Henares: UAH, Blog, Opinión. Publicado el 24 de marzo del 2021. Disponible en marzo de 2023, en: <https://portalcomunicacion.uah.es/diario-digital/actualidad/la-diversidad-de-arboles-en-los-bosques-no-es-suficiente-para-evitar-la-sequia.html>
- UCM (2002). *Atlas de la Comunidad de Madrid en el umbral del siglo XXI*. Madrid: Comunidad de Madrid, Consejería de Economía e Innovación Tecnológica, Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Geografía Humana. ISBN: 84-7491-685-2
- UNC (2021). *Islas de calor urbanas, biodiversidad de mosquitos, y el efecto de la vegetación como servicio ecosistémico regulador*. Argentina: Universidad Nacional de Córdoba, IIBYT (CONICET). Publicado el 9 de octubre del 2021. Disponible en mayo del 2023, en: https://www.iibyt.conicet.unc.edu.ar/proyecto_islas_de_calor/
- UNCTAD (2021). *Total and urban population*. ONU: UNCTAD, Handbook of Statistics 2022. Disponible en junio del 2023, en: <https://hbs.unctad.org/total-and-urban-population/>
- Varquez, A.; Kanda, M. (2018). *Global urban climatology: a meta-analysis of air temperature trends (1960 - 2009)*. Londres: Nature, Climate & Atmospheric Science, 2018 (32). Publicado el 25 de septiembre del 2018. DOI: 10.1038/s41612-018-0042-8
- Wilson, B. (2020). *Urban Heat Management and the Legacy of Redlining*. Estados Unidos: Journal of the American Planning Association 86 (4), 443 – 457 pp. Publicado el 2 de mayo del 2020. DOI: 10.1080/01944363.2020.1759127
- Xiao, H.; Kopecká, M.; Guo, S.; Guan, Y.; Cai, D.; Zhang, C.; Zhang, X.; Yao, W. (2018). *Responses of Urban Land Surface Temperature on Land Cover: A Comparative Study of Vienna and Madrid*. Sustainability: no. 10, 260. Publicado el 23 de febrero del 2018. DOI: 10.3390/su10020260
- Zhou, W.; Huang, G.; Pickett, S.T.A.; Wang, J.; Cadenasso, M.L.; McPhearson, T.; Morgan, J.; Wang, J. (2021). *Urban tree canopy has greater cooling effects in socially vulnerable communities in the US*. One Earth 4, No. 12. 1764 - 1775 pp. DOI: 10.1016/j.oneear.2021.11.010
- Zihan, L.; Wenfeng, Z.; Bechtel, B.; Voogt, J.; Lai, J.; Chakraborty, T.; Wang, ZH.; Li, M.; Huang, F.; Lee, X. (2022). *Surface warming in global cities is substantially more rapid than in rural background areas*. Londres: Nature Communications, No. 3/219. DOI: 10.1038/s43247-022-00539-x