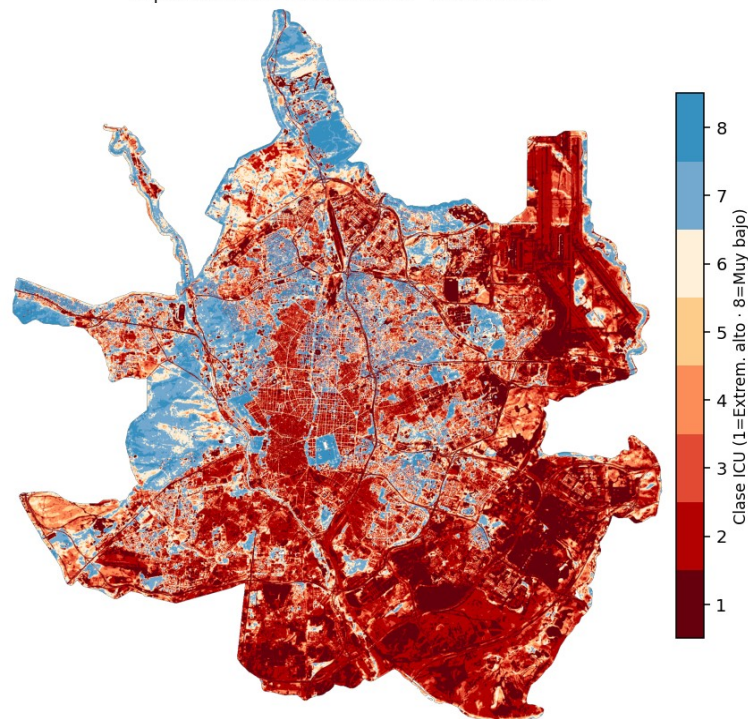


SERVICIO TEMÁTICO ISLA DE CALOR URBANA

Mapa Analítico de Clima Urbano — Madrid 2025



Cliente:

**Área de Gobierno de Urbanismo, Medio Ambiente y
Movilidad del Ayuntamiento de Madrid**

Preparado por:

Telespazio Ibérica



HOJA DE CONTROL

Título	Memoria del Servicio Temático ICU 2025: Mapa Analítico de Clima Urbano de la ciudad de Madrid.		
Autor			
Clasificación de seguridad	No Aplicable		
Referencia	Expediente 300/2025/00226 · E 6-2 / E 6-3		
Versión	1.0	Fecha	21/05/2026
Revisado por		Fecha de Revisión	21/05/2026
Aprobado por		Fecha de Aprobación	21/05/2026
		Número de Páginas	42

CONTROL DE CAMBIOS

Versión	Motivo del cambio	Responsable	Fecha
1.0	Versión inicial del documento en formato Telespazio.		21/05/2026

TABLA DE CONTENIDOS

1.: Introducción.....	6
1.1.: Salvaguarda metodológica sobre las comparaciones.....	6
2.: Objetivo.....	8
3.: Metodología.....	9
3.1.: Selección de imágenes satelitales.....	9
3.2.: Tratamiento digital de las imágenes satelitales.....	10
3.3.: Obtención de variables y componentes principales.....	10
3.3.1.: Temperatura superficial terrestre (TST) — Peso EMC: 30.....	11
3.3.1.1.: Categorización (factor de impacto).....	11
3.3.2.: Temperatura ambiental (TMA) — Peso EMC: 20.....	12
3.3.2.1.: Categorización (factor de impacto).....	13
3.3.3.: Verdor — Peso EMC: 18.....	14
3.3.3.1.: Categorización (factor de impacto).....	15
3.3.4.: Compacidad urbana — Peso EMC: 12.....	16
3.3.4.1.: Categorización (factor de impacto).....	17
3.3.5.: Sombras — Peso EMC: 10.....	18
3.3.5.1.: Categorización (factor de impacto).....	19
3.3.6.: Pendiente — Peso EMC: 5.....	20
3.3.6.1.: Categorización (factor de impacto).....	21
3.3.7.: Cercanía a ríos y cuerpos de agua — Peso EMC: 5.....	22
3.3.7.1.: Categorización (factor de impacto).....	23
3.3.bis.: Variables contextuales no incluidas en la EMC.....	24
3.3.8.: Brillo — variable contextual.....	24
3.3.9.: Distancia al centro urbano — variable contextual.....	25
3.3.10.: Altitud media — insumo indirecto.....	25
3.4.: Análisis multicriterio (EMC) ponderado.....	26
3.4.1.: Fórmula ponderada.....	26
3.4.2.: Tabla de pesos.....	26
3.4.3.: Determinación de umbrales de categorización.....	27
4.: Obtención del mapa analítico de clima urbano.....	28
5.: Resultados.....	30
6.: Enmascarado, NoData y consistencia espacial.....	31
6.1.: Enmascarado de cuerpos de agua.....	31
6.2.: NoData y consistencia espacial.....	31
7.: Control de calidad.....	32
7.1.: Verificación de los datos de entrada.....	32
7.2.: Verificación de la consistencia del procesado.....	33
7.3.: Verificación del producto resultante.....	34
7.4.: Trazabilidad y reproducibilidad.....	35



8.: Entregables.....	37
9.: Conclusiones.....	38
10.: Bibliografía.....	39

1. Introducción

El presente informe describe la metodología utilizada para la obtención del Mapa Analítico de Clima Urbano o Mapa de Isla de Calor Urbana (ICU) para la ciudad de Madrid correspondiente al año 2025, obtenido mediante una evaluación multicriterio (EMC) de los diferentes factores —variables físicas y geoespaciales— que influyen en el aumento de la temperatura local. Se han tenido en cuenta variables temporales como la temperatura ambiental y el verdor, y variables constantes en el tiempo como la pendiente, la compacidad urbana y la distancia a los cuerpos de agua.

Diferentes estudios confirman la influencia de múltiples factores en la generación de la ICU, como el factor de visión del cielo y el albedo, la densidad de la población, la escasa vegetación o la falta de esta, la contaminación del aire asociada a los medios de transporte convencionales y el uso del suelo de tipo industrial conocido como calor antropogénico, además de la velocidad del viento, entre otros (Rizwan et al., 2008; Mirzaei, 2015).

Este informe da continuidad a la serie histórica de Mapas Analíticos de Clima Urbano de Madrid elaborada anualmente para el Ayuntamiento, manteniendo la arquitectura conceptual de la metodología y ampliando el detalle metodológico, las tablas y las figuras técnicas para facilitar la trazabilidad, la reproducibilidad y la auditoría del producto.

1.1. Salvaguarda metodológica sobre las comparaciones con la serie histórica

⚠ Las comparaciones directas con los Mapas ICU de años anteriores deben realizarse con prudencia técnica. Aunque la arquitectura conceptual del producto 2025 es coherente con la serie histórica —mismas variables, mismas categorías de impacto, mismo modelo de evaluación multicriterio—, parte de la cadena operativa de cálculo no está explícitamente documentada en los informes técnicos y los metadatos de las anualidades anteriores. Aproximadamente quince pasos operativos concretos (umbrales numéricos exactos de categorización por variable, parámetros del modelo GAM y del Regression Kriging, coeficientes precisos de la transformación Tasseled Cap, criterios numéricos de la compacidad urbana basada en polígonos de Thiessen, parámetros del cálculo de sombras y reglas finales de reclasificación) no se publican con el detalle necesario para una réplica exacta.

Para el cálculo del año 2025 estos pasos se han reconstruido por criterios técnicos propios coherentes con la literatura científica y con la apariencia de los productos publicados de la serie. El resultado es por tanto metodológicamente equivalente —no

idéntico— al de anualidades anteriores. Cualquier análisis comparativo interanual cuantitativo debe acompañarse de la advertencia de que diferencias inferiores a un determinado umbral pueden ser atribuibles a la reconstrucción metodológica y no a un cambio físico real.

2. Objetivo

Generación del Mapa Analítico de Clima Urbano o Mapa de Isla de Calor Urbana de la ciudad de Madrid correspondiente al año 2025, junto con sus variables asociadas, garantizando la coherencia espacial, temática y cartográfica con la serie histórica del producto y proporcionando un nivel de detalle metodológico suficiente para su reproducibilidad.

3. Metodología

A continuación se describe cada una de las fases llevadas a cabo para la obtención del Mapa Analítico de Clima Urbano para la ciudad de Madrid junto con los recursos utilizados y las fuentes consultadas.

El periodo estudiado es de un año completo (2025) para considerar las cuatro estaciones del año. La toma de las imágenes utilizadas, de acuerdo con los metadatos, corresponde a una hora específica del día —en torno a las 11:00 UTC—; en hora local peninsular esto equivale al rango aproximado de las 12:00 a las 13:00 horas durante el invierno (y una hora más en horario de verano).

Conviene recordar que las diferencias máximas de temperatura entre el entorno urbano y el periurbano se dan a últimas horas de la noche coincidiendo con las temperaturas mínimas, mientras que durante las horas diurnas las diferencias en la superficie son más pequeñas. La ICU alcanza su efecto máximo pocas horas después de la puesta de sol, debido a que la energía absorbida por las superficies urbanas se libera lentamente si se compara con la energía liberada en las zonas rurales (Rizwan et al., 2008).

3.1. Selección de imágenes satelitales

Se han empleado escenas Landsat 8 y Landsat 9 (Collection 2 Level 1, WRS Path/Row 201/032) para cada uno de los meses del año 2025, buscando mantener la coherencia temporal entre las imágenes con el propósito de obtener datos diferenciados y consistentes para cada uno de los meses. Se priorizan estos satélites porque las imágenes obtenidas con el sensor TIRS tienen como objetivo principal obtener las características de la temperatura de la superficie de la tierra. Las imágenes se descargan del sitio web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

La selección de las imágenes de cada mes se realiza de acuerdo con la disponibilidad y la cobertura de nubes:

Mes	Producto Landsat	Fecha	Sensor	Nubes	Estado
Enero	LC09_L1TP_201032_20250115	2025-01-15	Landsat 9	0,12 %	Incluida
Febrero	LC09_L1TP_201032_20250216	2025-02-16	Landsat 9	12,24 %	Incluida
Marzo	LC08_L1TP_201032_20250328	2025-03-28	Landsat 8	7,46 %	Incluida
Abril	—	—	—	—	Excluida por nubosidad

Mes	Producto Landsat	Fecha	Sensor	Nubes	Estado
Mayo	LC08_L1TP_201032_20250531	2025-05-31	Landsat 8	1,31 %	Incluida
Junio	LC08_L1TP_201032_20250616	2025-06-16	Landsat 8	0,26 %	Incluida
Julio	LC09_L1TP_201032_20250710	2025-07-10	Landsat 9	0,03 %	Incluida
Agosto	LC08_L1TP_201032_20250819	2025-08-19	Landsat 8	6,18 %	Incluida
Septiembre	LC08_L1TP_201032_20250920	2025-09-20	Landsat 8	2,26 %	Incluida
Octubre	LC09_L1TP_201032_20251014	2025-10-14	Landsat 9	3,22 %	Incluida
Noviembre	—	—	—	—	Excluida por nubosidad
Diciembre	LC09_L1TP_201032_20251201	2025-12-01	Landsat 9	0,60 %	Incluida

Tabla 1. Imágenes seleccionadas para la obtención del Mapa Analítico de Clima Urbano 2025.

3.2. Tratamiento digital de las imágenes satelitales

Teniendo en cuenta el propósito y uso de las imágenes satelitales en este estudio, se han seleccionado las bandas 2, 3, 4, 5, 6 y 7 para la obtención del verdor y el brillo, y la banda 10 para la estimación de la temperatura superficial terrestre. La banda pancromática B8 se conserva para la preservación de la textura espacial a 15 m.

A las bandas de la 2 a la 7 se les han realizado las correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas necesarias. En primer lugar, se transformaron de niveles digitales a radiancia en el techo de la atmósfera; posteriormente, estas radiancias se transformaron en reflectividades a nivel de superficie y, finalmente, se realizó la conversión a reflectancia TOA con corrección angular. La banda 10 se transformó de niveles digitales a radiancia en el techo de la atmósfera y posteriormente se hizo la conversión a temperatura de brillo en el satélite.

3.3. Obtención de variables y componentes principales

Para la obtención del Mapa Analítico de Clima Urbano se seleccionaron las capas de información correspondientes a la temperatura superficial terrestre —obtenida a través de las imágenes— y la temperatura ambiental a 2 metros del suelo —obtenida a través de la información climática de las estaciones meteorológicas de la ciudad de Madrid—, complementadas con variables de vegetación, brillo, morfológicas y topográficas.

De cara a la lectura de este capítulo, conviene distinguir dos grupos de variables. Un primer grupo está formado por las siete variables que participan en el Análisis

Multicriterio (EMC) ponderado que produce el Mapa ICU final: temperatura superficial terrestre, temperatura ambiental, verdor, compacidad urbana, sombras, pendiente y cercanía a ríos. Un segundo grupo está formado por variables que se entregan como productos contractuales conforme al Pliego de Prescripciones Técnicas y como capas analíticas de contexto —brillo, distancia al centro urbano y altitud media—, pero que no participan directamente como entrada del modelo EMC.

3.3.1. Temperatura superficial terrestre (TST) — Peso EMC: 30

Para la estimación de la temperatura superficial terrestre (TST) se hizo uso de la banda 10 de cada una de las imágenes. Tras convertir a temperatura de brillo en satélite, se calculó el índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y la emisividad de la superficie terrestre. Finalmente, con estos valores se obtuvo la temperatura superficial terrestre a través de la siguiente fórmula (Jiménez-Muñoz y Sobrino, 2003):

$$LST = BT / (1 + (\lambda \cdot BT / c_2) \cdot \ln(E))$$

Adicionalmente se aplica una máscara con los bits 1 (Dilated Cloud), 3 (Cloud), 4 (Cloud Shadow) y 5 (Snow) de la banda QA_PIXEL y el bit 0 de QA_RADSAT para descartar píxeles afectados por nubes, sombras de nube, hielo o saturación. Tras el cálculo mensual, se promedia sobre los meses útiles del año (10 escenas en 2025; abril y noviembre excluidos por nubosidad).

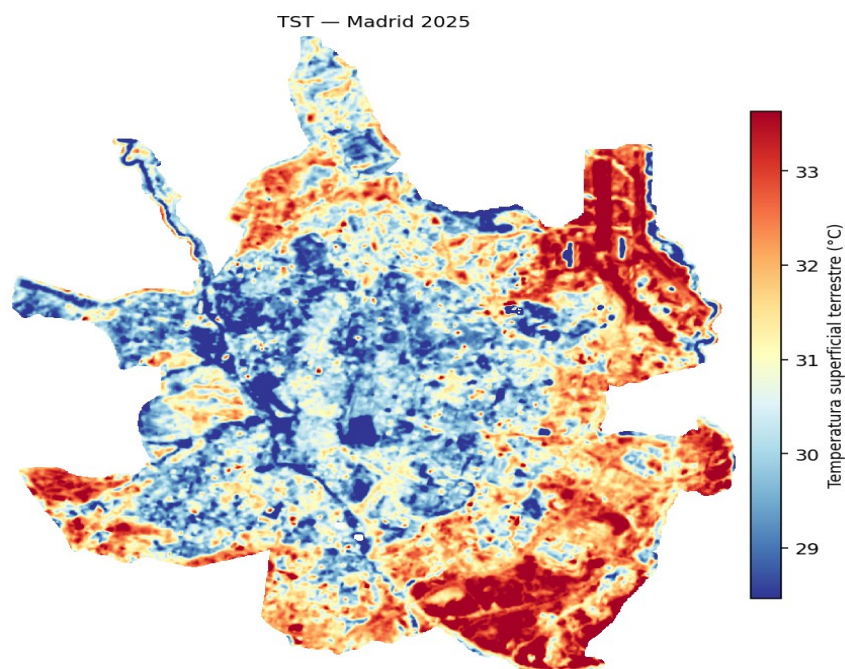


Figura 1. Temperatura superficial terrestre (TST) — media anual 2025, valor continuo en °C.

3.3.1.1. Categorización (factor de impacto)

Las superficies con menor TST tienen mayor capacidad de atenuar la intensidad de la ICU. Se reclasifica la TST continua en 6 clases de impacto (Muy alto = 1, Muy bajo = 6) sobre los cuantiles equiprobables Q16-Q33-Q50-Q66-Q83 de la distribución 2025.

TST 2025	Factor de impacto
Muy alto	1
Alto	2
Regular alto	3
Regular bajo	4
Bajo	5
Muy bajo	6

Tabla 2. Categorización TST 2025 en 6 clases de impacto.

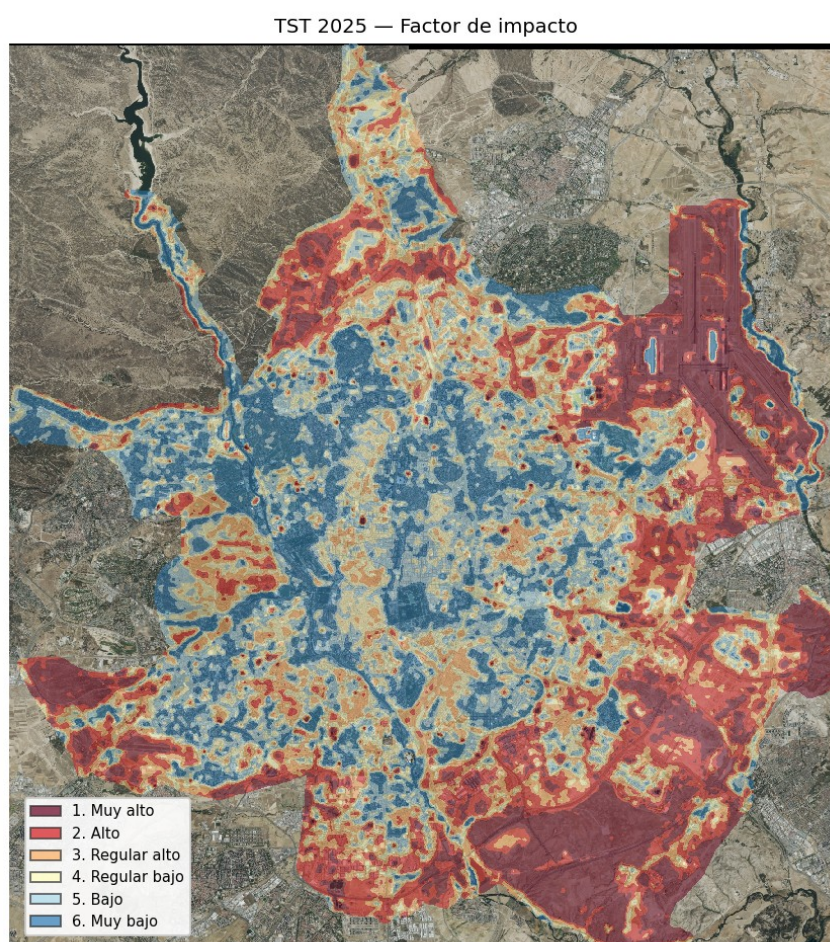


Figura 2. TST 2025 — Factor de impacto categorizado en 6 clases.

3.3.2. Temperatura ambiental (TMA) — Peso EMC: 20

Para la estimación de la temperatura ambiental en toda la zona de estudio se han empleado los datos públicos del Ayuntamiento de Madrid para las estaciones meteorológicas distribuidas en la ciudad. Se ha diseñado un algoritmo que filtra y recalcula los datos horarios para las 11:00 UTC.

Posteriormente, el código emplea una técnica avanzada de interpolación conocida como Regression Kriging. Esta técnica de predicción espacial combina una variable dependiente (en este caso la temperatura ambiental) con variables auxiliares (latitud,

longitud y elevación sobre el nivel del mar). El modelo utilizado es el modelo aditivo generalizado (GAM — Generalized Additive Model). El GAM se ajusta sobre las estaciones; los residuos se interpolan por kriging ordinario con un variograma esférico/exponencial; el ráster final es la suma de la predicción GAM y el kriging del residuo, validado por validación cruzada Leave-One-Out.

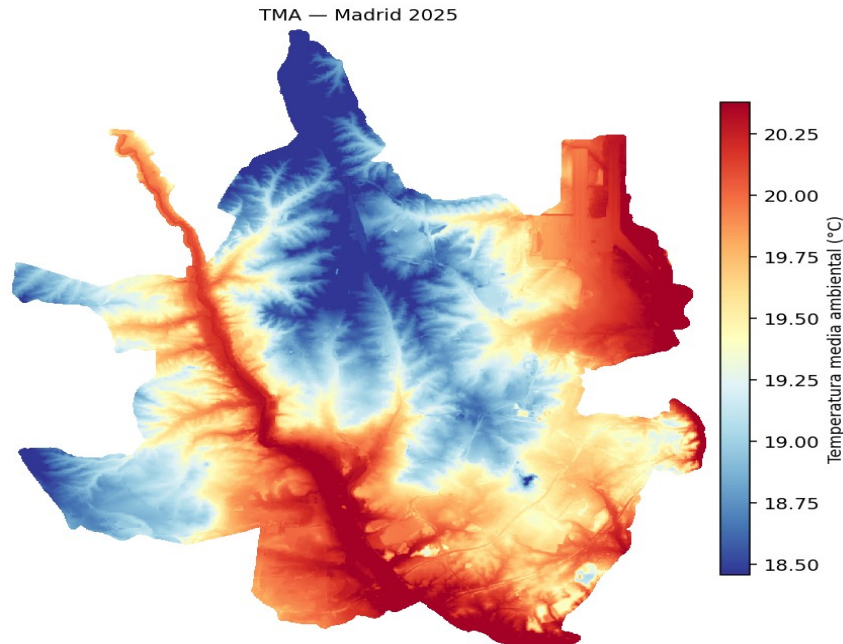


Figura 3. Temperatura media ambiental (TMA) — modelización GAM + Regression Kriging 2025.

3.3.2.1. Categorización (factor de impacto)

Cuanto menor es la temperatura del aire, mayor impacto mitigador tiene sobre la intensidad de la isla de calor. Se reclasifica la TMA continua en 6 clases de impacto (Muy alto = 1, Muy bajo = 6) sobre los cuantiles equiprobables de la distribución 2025.

TMA 2025 — Factor de impacto

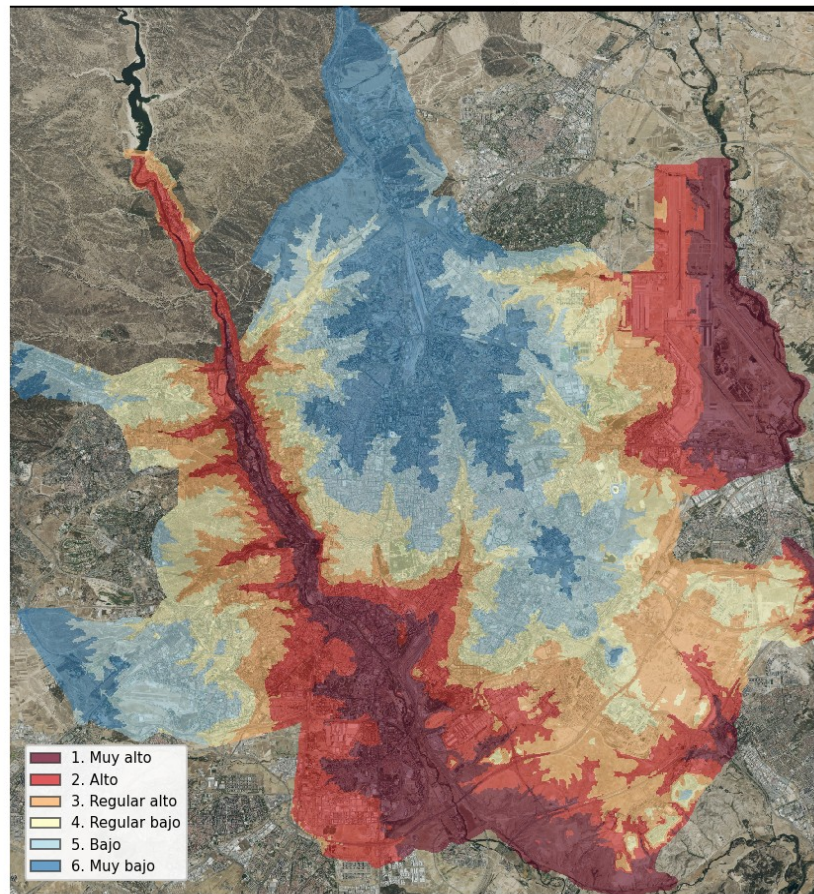


Figura 4. TMA 2025 — Factor de impacto categorizado en 6 clases.

3.3.3. Verdor — Peso EMC: 18

El verdor se obtuvo con el propósito de determinar la distribución de las áreas con masas vegetales, dado que la vegetación juega un papel fundamental en la regulación térmica de los microclimas del área urbana, debido a la evapotranspiración y la sombra ofrecida. El verdor se obtuvo a partir de las bandas 2 a 7 para cada una de las imágenes, mediante los coeficientes de la transformación Tasseled Cap aplicados al satélite Landsat 8/9 OLI (Baig et al., 2014; Insaurralde, 2019):

$$\text{Verdor} = -0,2941 \cdot B2 - 0,2430 \cdot B3 - 0,5424 \cdot B4 + 0,7276 \cdot B5 + 0,0713 \cdot B6 - 0,1608 \cdot B7$$

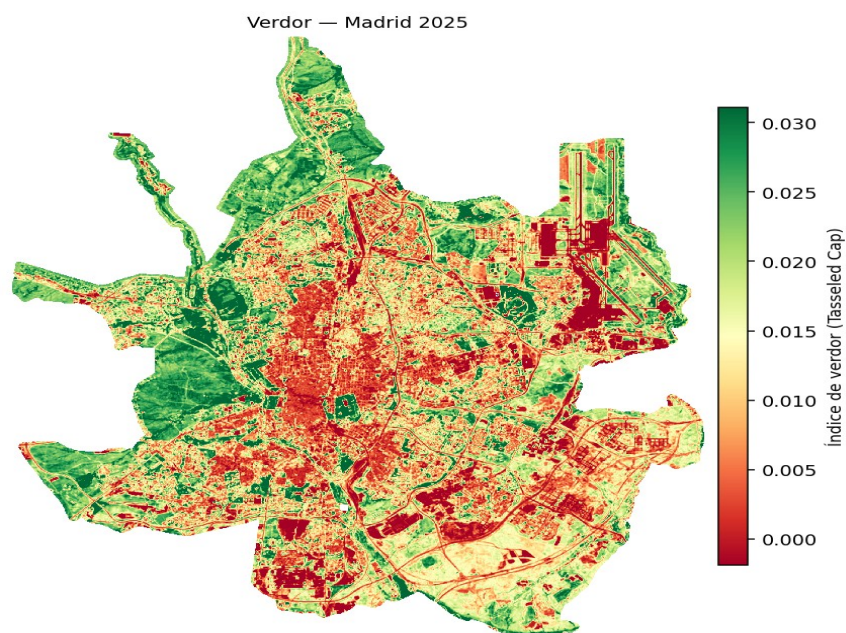
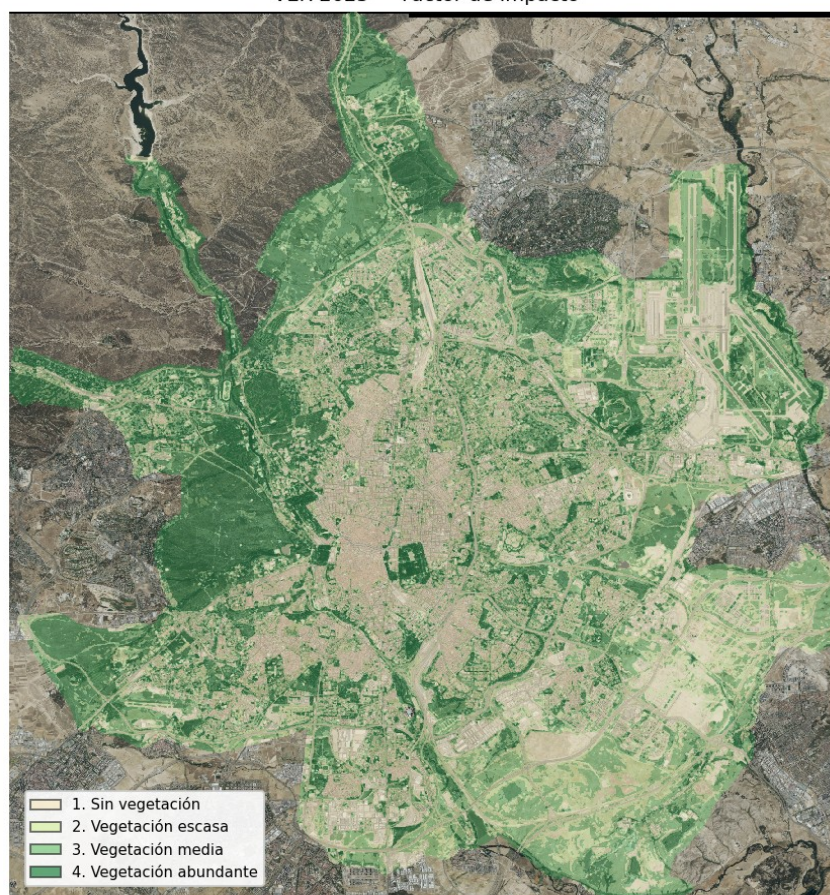


Figura 5. Verdor — transformación Tasseled Cap 2025.

3.3.3.1. Categorización (factor de impacto)

Los espacios con menor cantidad de vegetación tienen poco impacto de mitigación sobre la isla de calor; a medida que aumenta la vegetación, aumenta el impacto mitigador. Se reclasifica el verdor continuo en 4 clases (Sin vegetación = 1, Vegetación abundante = 4) sobre los cuantiles equiprobables Q25-Q50-Q75 de la distribución 2025.

VER 2025 — Factor de impacto

**Figura 6. Verdor 2025 — Factor de impacto categorizado en 4 clases.**

3.3.4. Compacidad urbana — Peso EMC: 12

La compacidad urbana se ha calculado a través de la distancia entre parcelas de la ciudad de Madrid. Es una medida de la compacidad de la edificación, que cuantifica el número de edificios sobre una superficie determinada. Se han generado polígonos de Thiessen entre los centroides de las parcelas, teniendo como resultado polígonos de mayor tamaño que representan las áreas con menor compacidad urbana, y polígonos de menor tamaño en el centro de la ciudad de Madrid, correspondiendo a las áreas con mayor compacidad urbana.

CompUrb — Madrid 2025

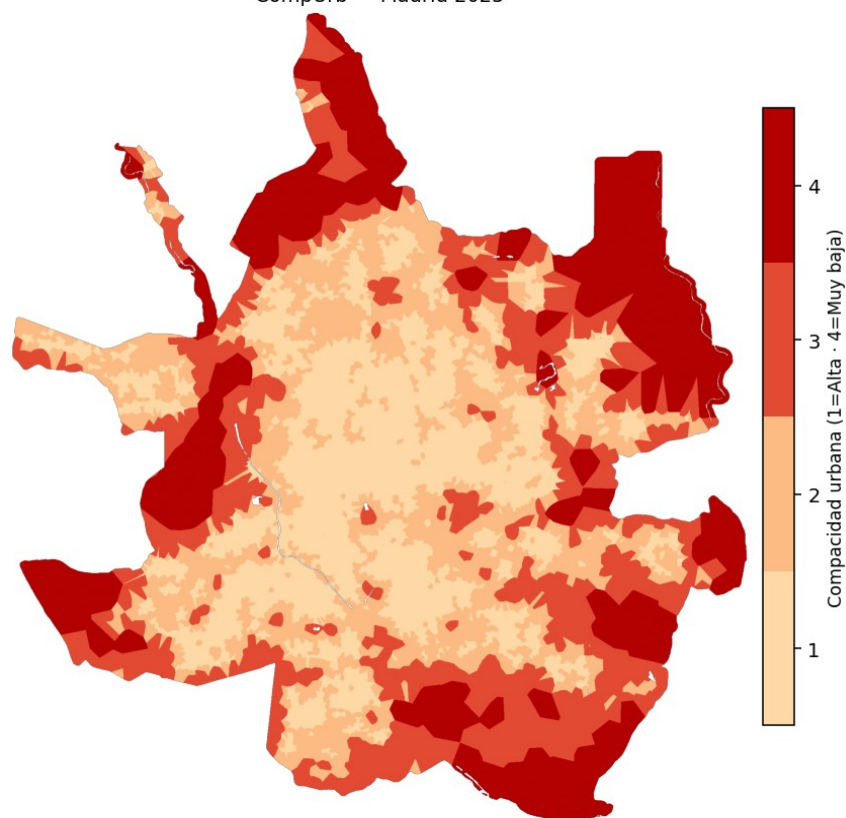


Figura 7. Compacidad urbana — polígonos de Thiessen, ráster nativo categórico 1-4.

3.3.4.1. Categorización (factor de impacto)

Las zonas con baja compacidad tienen un efecto positivo en la ICU debido al poco almacenamiento de calor asociado a la infraestructura urbana. Esta variable se entrega y se utiliza directamente categorizada en 4 clases nativas (no requiere reclasificación adicional).

COMPURB 2025 — Factor de impacto

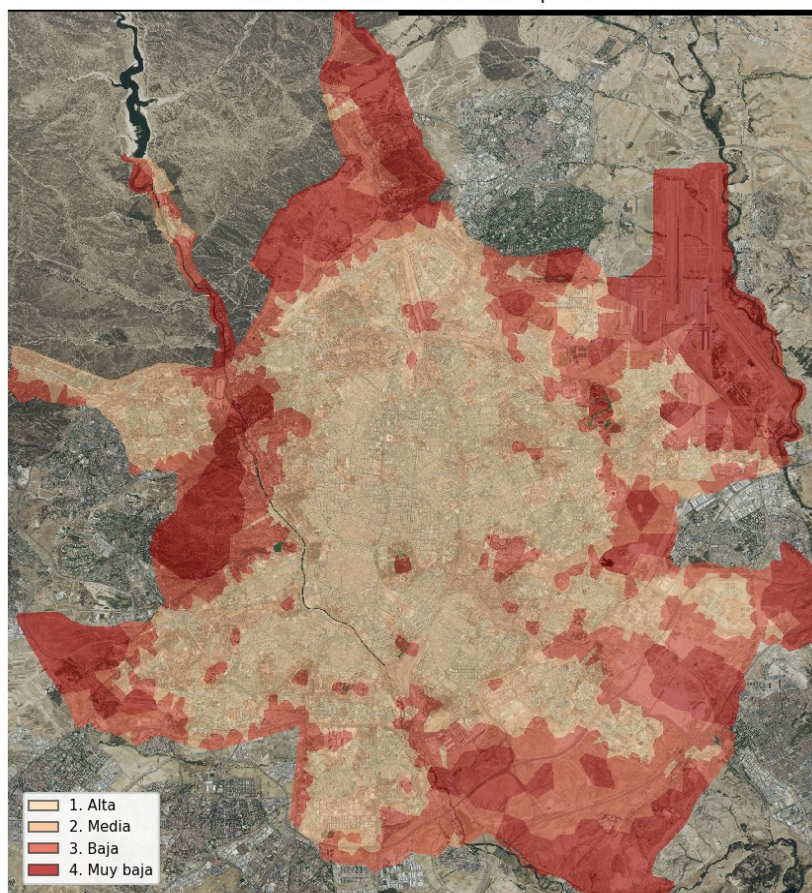
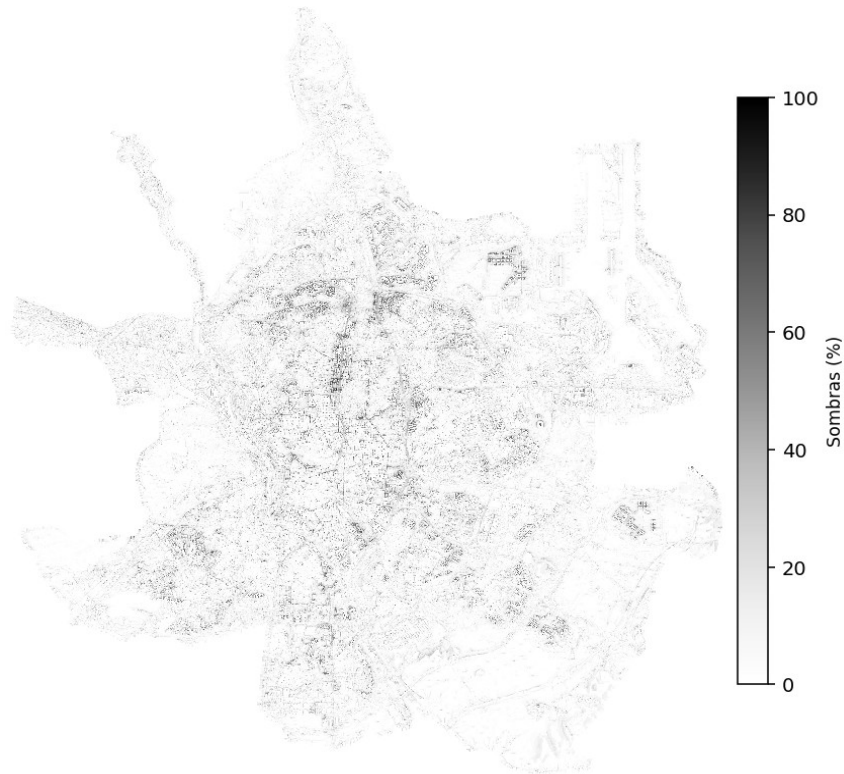


Figura 8. Compacidad urbana 2025 — Factor de impacto categorizado en 4 clases nativas.

3.3.5. Sombras — Peso EMC: 10

La sombra se obtiene a través del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) para la ciudad de Madrid, considerando la posición solar representativa. En las zonas urbanas, la sombra de los edificios y la presencia de árboles mitigan el efecto negativo de la Isla de Calor más que en las zonas periféricas con suelos desnudos.

Sombras — Madrid 2025

**Figura 9. Sombras urbanas — porcentaje continuo derivado del MDE.**

3.3.5.1. Categorización (factor de impacto)

Las sombras reducen la radiación recibida por la superficie, evitando la emisión de calor hacia el ambiente. Se reclasifica la sombra continua en una variable binaria con factor de impacto «Sin sombra = 1, Sombra = 3» —siguiendo literalmente la codificación de 2024, que salta deliberadamente el valor 2—. La razón de saltar el 2 es metodológica: al asignar 3 en vez de 2 a la clase «con sombra», su contribución multiplicada por el peso 10 se duplica (30 vs 20 puntos EMC), reforzando la influencia diferencial de la sombra dentro del modelo.

SOM 2025 — Factor de impacto

**Figura 10. Sombras 2025 — Factor de impacto categorizado binario (codificación 1/3).**

3.3.6. Pendiente — Peso EMC: 5

La influencia de los vientos en el efecto de la isla de calor es relevante. El fenómeno de los vientos se encuentra asociado a las zonas montañosas y a los valles largos, por lo que una forma de tener en cuenta los vientos predominantes es a través de las variaciones en la topografía local. El modelo de pendientes utilizado se ha obtenido haciendo uso del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del término municipal de Madrid, derivando el gradiente máximo de elevación en cada píxel mediante la utilidad `gdaldem slope`.

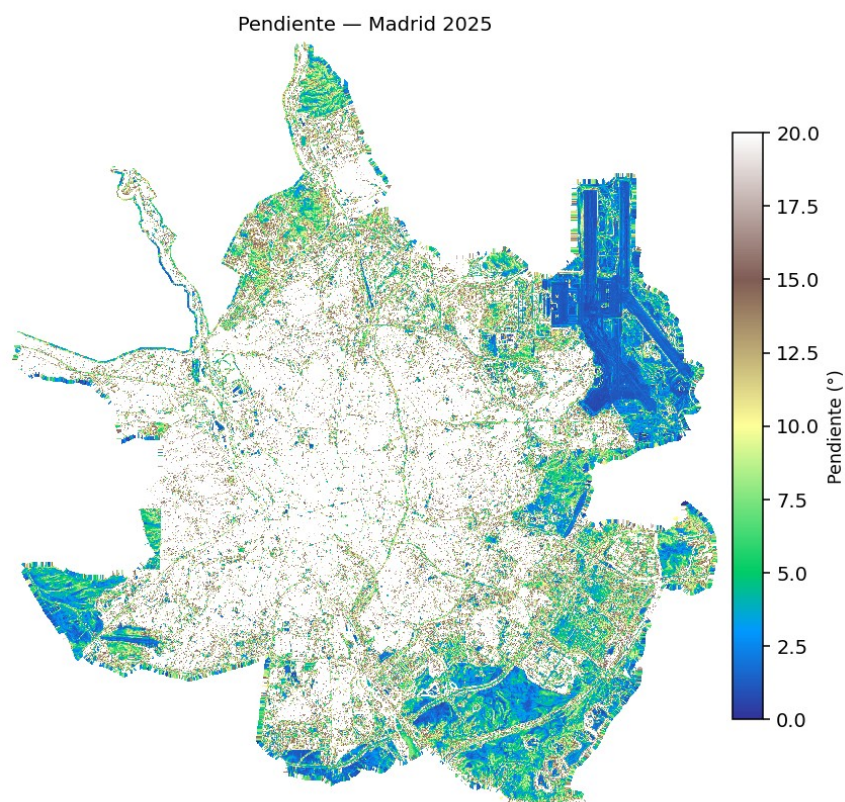


Figura 11. Pendiente — gradiente de elevación derivado del MDE, valor continuo en grados.

3.3.6.1. Categorización (factor de impacto)

En las zonas urbanas, el potencial dinámico del viento se incrementa proporcionalmente al desnivel topográfico. Se reclasifica la pendiente continua en 2 clases binarias documentadas en los informes de 2024 con el umbral fijo de 5°: Pendiente < 5° = 1, Pendiente ≥ 5° = 2.

PEN 2025 — Factor de impacto

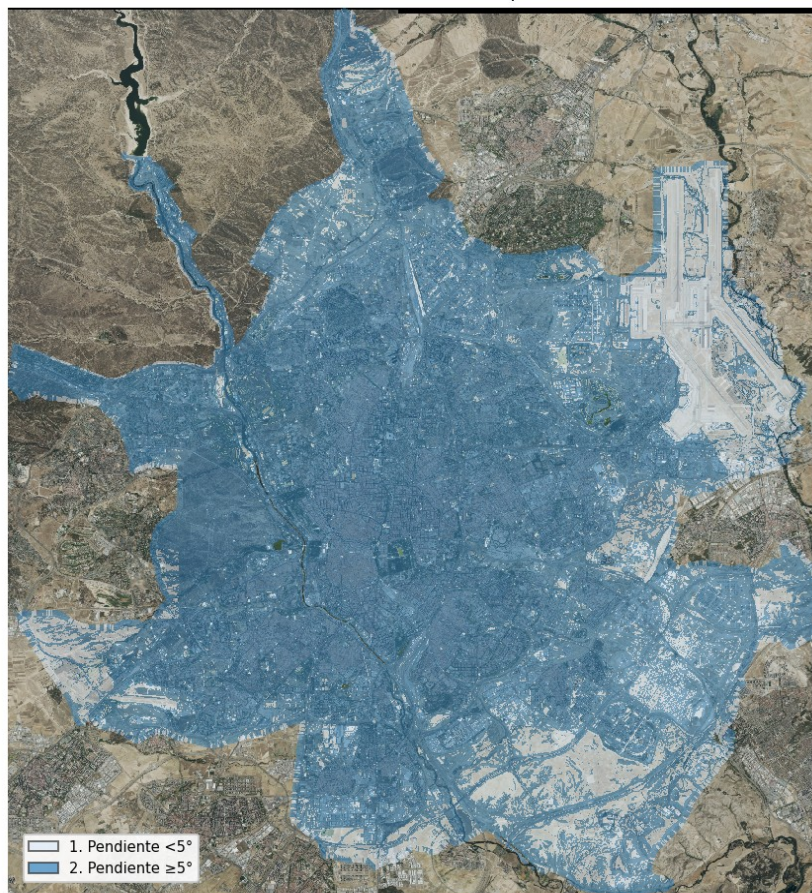


Figura 12. Pendiente 2025 — Factor de impacto categorizado binario con umbral 5°.

3.3.7. Cercanía a ríos y cuerpos de agua — Peso EMC: 5

Teniendo en cuenta el papel fundamental de los ríos y los cuerpos de agua como reguladores del clima urbano —al proporcionar humedad y facilitar el flujo del aire—, se seleccionan las masas de agua de la zona de estudio del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE) para el año 2014. Se calcula la distancia euclidiana 2D a la red hidrográfica oficial sobre la malla de 15 m EPSG:25830, expresada en metros.

DistRío — Madrid 2025

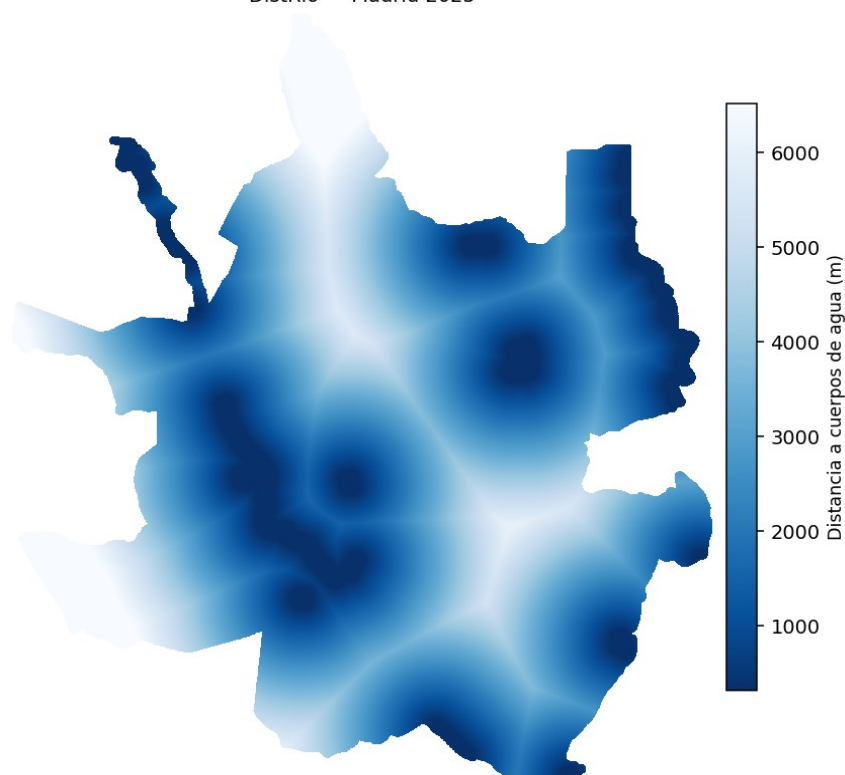
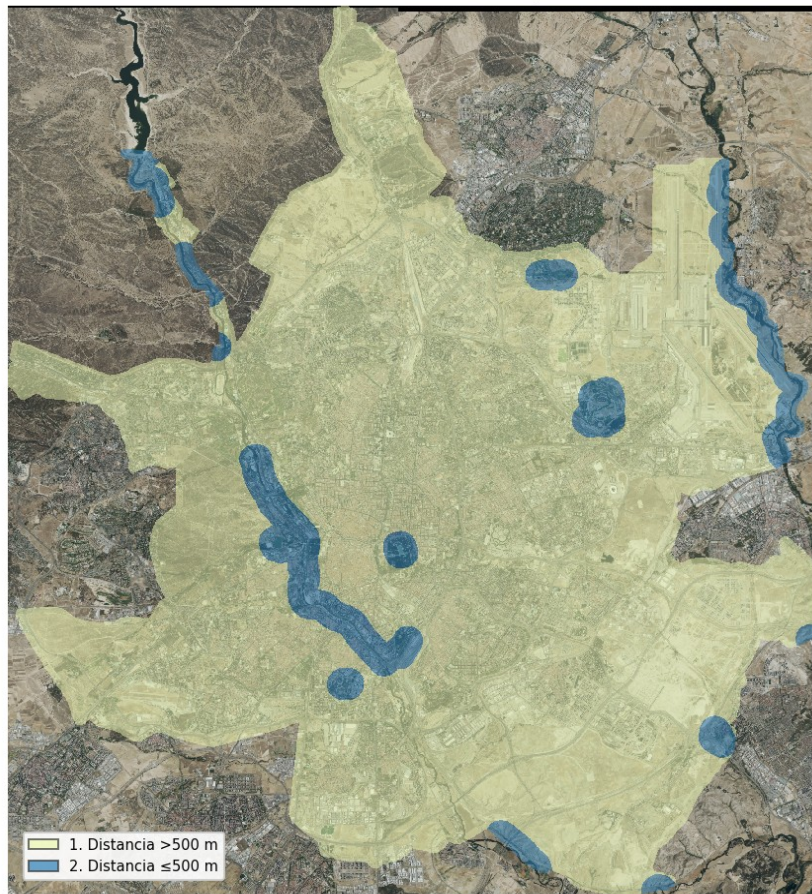


Figura 13. Distancia a ríos y cuerpos de agua — valor continuo en metros (SIOSE 2014).

3.3.7.1. Categorización (factor de impacto)

Las zonas ubicadas en las inmediaciones del río o a menos de 500 m de éste tendrán mayor potencial dinámico del viento, mitigando el impacto negativo de la ICU. Se reclasifica la distancia continua en 2 clases binarias documentadas en 2024 con el umbral fijo de 500 m: Distancia > 500 m = 1, Distancia ≤ 500 m = 2.

DISTRIO 2025 — Factor de impacto

**Figura 14. DistRío 2025 — Factor de impacto categorizado binario con umbral 500 m.**

3.3.bis. Variables contextuales no incluidas en la EMC

Las tres variables que se describen a continuación —brillo, distancia al centro urbano y altitud media— forman parte de los entregables del Servicio Temático E 6-2 conforme al Pliego de Prescripciones Técnicas, y se mantienen como capas analíticas de contexto. Sin embargo, ninguna de ellas participa directamente como entrada del Análisis Multicriterio (EMC) ponderado: el brillo y la distancia al centro urbano son productos auxiliares; la altitud media se utiliza únicamente como insumo intermedio para derivar la pendiente, que sí es variable EMC con un peso del 5 %.

3.3.8. Brillo — variable contextual

El brillo se calculó como componente complementaria del Tasseled Cap, útil para diferenciar superficies urbanas duras (cubiertas, viarios) frente a superficies vegetadas o suelos desnudos. La fórmula utilizada es (Baig et al., 2014):

$$\text{Brillo} = 0,3029 \cdot B2 + 0,2786 \cdot B3 + 0,4733 \cdot B4 + 0,5599 \cdot B5 + 0,5080 \cdot B6 + 0,1872 \cdot B7$$

Brillo — Madrid 2025

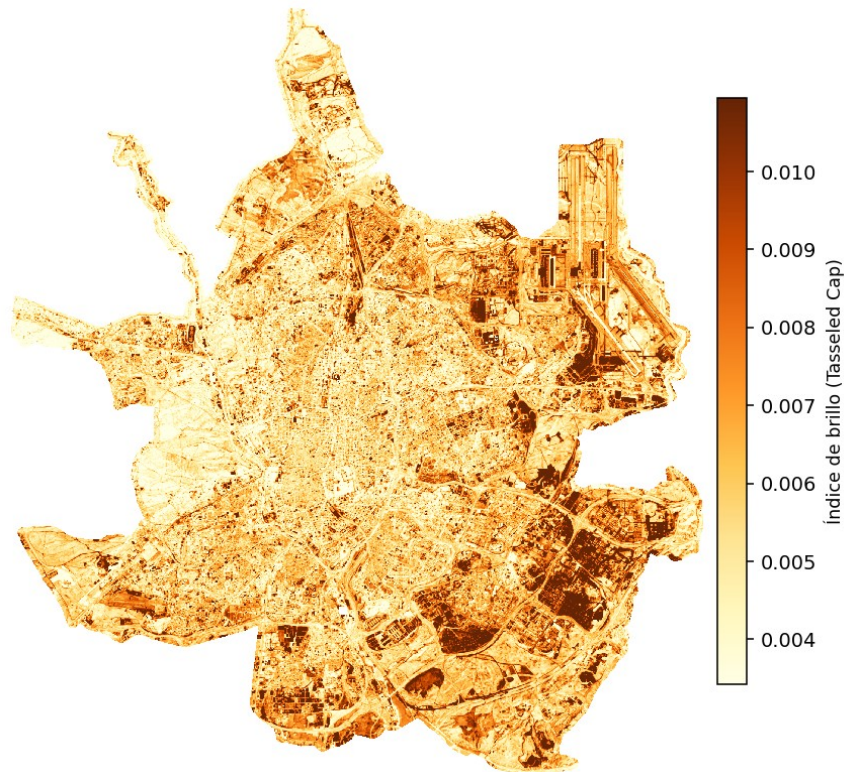


Figura 15. Brillo — transformación Tasseled Cap 2025 (variable contextual, no EMC).

3.3.9. Distancia al centro urbano — variable contextual

Se calcula la distancia euclidiana 2D al centro urbano consolidado de Madrid. La capa se obtiene rasterizando el polígono del centro urbano sobre la malla de 15 m EPSG:25830 y generando el ráster de proximidad píxel a píxel con la utilidad `gdal_proximity`, expresado en metros. La variable es constante en el tiempo. Se mantiene como producto contractual del paquete E 6-2-5.

3.3.10. Altitud media — insumo indirecto

La altitud media se obtiene del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del Instituto Geográfico Nacional. Se reproyecta a EPSG:25830, se remuestrea a 15 m con método bilinear y se recorta al AOI del término municipal de Madrid. Las unidades son metros sobre el nivel medio del mar. La altitud no entra directamente en la EMC, pero se utiliza como insumo intermedio para derivar la pendiente topográfica (§3.3.6).

AltMed — Madrid 2025

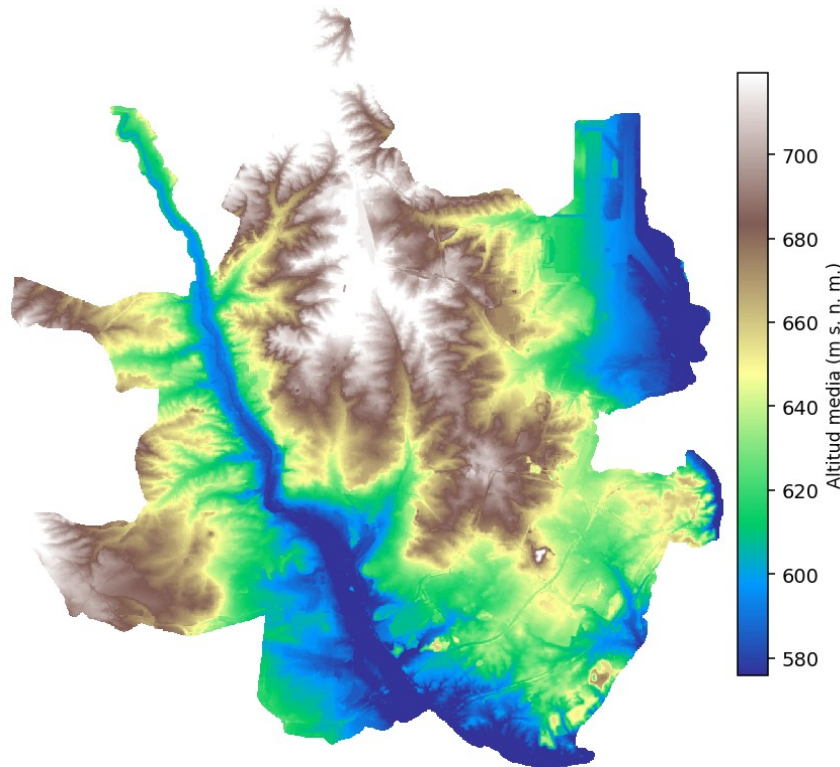


Figura 16. Altitud media — modelo digital de elevaciones (variable contextual, insumo indirecto).

3.4. Análisis multicriterio (EMC) ponderado

Una vez obtenidas y categorizadas las siete variables del modelo conforme al esquema descrito en cada §3.3.x, se realiza una Evaluación Multicriterio (EMC) que combina dichas variables mediante superposición ponderada. El cálculo final del ICU se obtiene multiplicando, píxel a píxel, el factor de impacto categorizado de cada variable por su peso de importancia, sumando todas las contribuciones y reclasificando el resultado final en 8 clases de impacto sobre el confort térmico.

3.4.1. Fórmula ponderada

$$ICU_{raw} = (TST \cdot 30 + TMA \cdot 20 + Verdor \cdot 18 + CompUrb \cdot 12 + Som \cdot 10 + Pen \cdot 5 + DistRío \cdot 5) / 100$$

Donde cada término representa el factor de impacto categorizado de la variable (no el valor crudo continuo). El ráster ICU_raw resultante se reclasifica posteriormente en 8 clases definitivas en función de la intensidad del clima urbano (ver §4).

3.4.2. Tabla de pesos

Criterio (orden decreciente de peso)	Peso	Tipo
TST — Temperatura superficial terrestre	30	Continua, 6 clases

Criterio (orden decreciente de peso)	Peso	Tipo
TMA — Temperatura ambiental	20	Continua, 6 clases
Verdor	18	Continua, 4 clases
Compacidad urbana	12	Nativa, 4 clases
Sombras	10	Binaria, 2 clases (1, 3)
Pendiente topográfica	5	Binaria, 2 clases (umbral 5°)
Cercanía a ríos y cuerpos de agua	5	Binaria, 2 clases (umbral 500 m)
TOTAL	100	

Tabla 3. Ponderación de cargas para las variables seleccionadas (Ng et al., 2009; Acero, 2011; metodología 2024 mantenida en 2025).

3.4.3. Determinación de umbrales de categorización

La metodología de 2024 documenta las etiquetas semánticas de cada clase y los umbrales fijos de las variables binarias (DistRío 500 m, Pendiente 5°, Sombra con/sin), pero no documenta los umbrales numéricos exactos para las variables categorizadas en 4 o 6 clases (TST, TMA, Verdor). En el modelo 2025 se han adoptado los siguientes criterios:

- Variables binarias documentadas (DistRío, Pendiente, Sombras): se aplican los umbrales literales de 2024.
- Compacidad urbana: la variable se entrega y se utiliza directamente en sus 4 clases nativas.
- Variables continuas (TST, TMA, Verdor): se aplican cuantiles equiprobables sobre la distribución 2025 (Q16-Q33-Q50-Q66-Q83 para 6 clases; Q25-Q50-Q75 para 4 clases). Este criterio garantiza una distribución por clases equilibrada y es reproducible a partir del propio ráster entregado.

4. Obtención del mapa analítico de clima urbano

Una vez realizadas todas las EMC para cada uno de los meses, se obtiene una media para el año 2025 y se reclasifica en función de la intensidad del clima urbano, obteniendo los niveles de confort térmico. El producto final 2025 se calcula como media de 10 meses útiles, excluyéndose abril y noviembre por nubosidad. Sobre el producto continuo medio anual se aplican ajustes morfológicos para representar de forma más adecuada cubiertas, calles, edificios, autopistas y zonas de cultivo del noroeste y, posteriormente, se reclasifica en 8 clases de impacto sobre el confort térmico.

Mapa Analítico de Clima Urbano — Madrid 2025

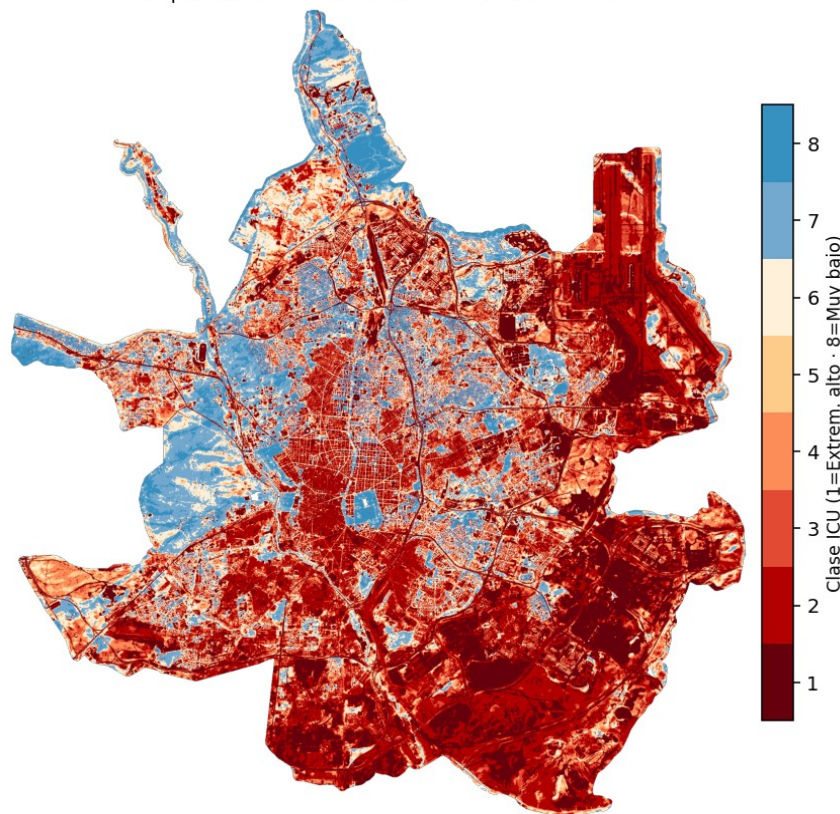


Figura 17. Mapa Analítico de Clima Urbano de Madrid 2025.

Se clasifica en 8 clases con el propósito de maximizar las diferencias en la ciudad de Madrid, aprovechando la resolución del producto final y la información que se puede proporcionar al tener mayor nivel de detalle:

Categorí a	Impacto en el confort térmico	Descripción
1	Extremadamente alto	Carga térmica muy alta y bajo potencial dinámico.
2	Alto	Alta carga térmica y bajo potencial dinámico.
3	Moderadamente alto	Carga térmica moderadamente alta y bajo potencial dinámico.
4	Moderado	Carga térmica moderada y esporádico potencial dinámico.
5	Suave	Esporádica carga térmica y esporádico potencial dinámico.
6	Neutro	Baja carga térmica y buen potencial dinámico.
7	Bajo	Carga térmica ligeramente negativa y buen potencial dinámico.
8	Muy bajo	Carga térmica moderadamente negativa y buen potencial dinámico.

Tabla 4. Impacto en el confort térmico por clase del Mapa ICU.

5. Resultados

La distribución final del Mapa ICU 2025 por clase es la siguiente:

Clase	Impacto	Píxeles	Área (km²)	%
1	Extremadamente alto	474 328	106,72	23,67
2	Alto	434 975	97,87	21,70
3	Moderadamente alto	174 778	39,33	8,72
4	Moderado	196 912	44,31	9,83
5	Suave	142 126	31,98	7,09
6	Neutro	262 902	59,15	13,12
7	Bajo	248 852	55,99	12,42
8	Muy bajo	69 285	15,59	3,46

Tabla 5. Distribución del Mapa ICU Madrid 2025 por clase (área total válida: 450,94 km²; píxeles válidos: 2 004 158).

6. Enmascarado, NoData y consistencia espacial

6.1. Enmascarado de cuerpos de agua

Una vez obtenido el mapa de confort térmico se observa que las áreas correspondientes a los cuerpos de agua, como el lago del Parque del Retiro o los lagos del Parque Juan Carlos I, presentan muy bajo confort térmico, lo que no corresponde con la realidad: los cuerpos de agua deberían encontrarse con un confort térmico más alto que las zonas aledañas. Sin embargo, al hacer una ponderación de factores donde, por ejemplo, estas zonas tienen un verdor extremadamente bajo y una compacidad alta, son esperables los resultados obtenidos. Por ello se decide enmascarar los cuerpos de agua y dejar estos valores como NoData; se utilizan los mismos cuerpos de agua empleados en la obtención de la variable «cercanía a cuerpos de agua», correspondientes a los presentes en la cartografía del SIOSE 2014.

6.2. NoData y consistencia espacial

El producto final mantiene NoData fuera del área válida de análisis y en aquellas zonas no evaluables. En los rásteres categóricos el NoData se codifica como 0; en los rásteres continuos se conserva el NoData propio de cada producto (típicamente -9999). Se ha verificado la ausencia de huecos internos no justificados en el ráster final. Las variables Pendiente y Sombras han sido armonizadas al AOI común del ICU para conservar cobertura homogénea.

7. Control de calidad

El control de calidad del Mapa Analítico de Clima Urbano 2025 se articula en cuatro ejes: verificación de los datos de entrada, verificación de la consistencia del procesado, verificación de la verosimilitud del producto resultante y trazabilidad y reproducibilidad de la cadena de cálculo. El cálculo del ICU es determinista (no clasificación supervisada), por lo que el control se centra en garantizar la integridad de las entradas, la coherencia interna de los pasos intermedios y la continuidad del producto con la serie histórica del Ayuntamiento de Madrid.

7.1. Verificación de los datos de entrada

7.1.1. Imágenes satelitales Landsat 8/9

Se han descargado del USGS las 10 escenas Landsat 8/9 Collection 2 Level-1 incluidas en el cálculo 2025 (path/row 201/032). Para cada escena se ha verificado: integridad de las bandas 2-7 y 10, presencia de la máscara QA_PIXEL y QA_RADSAT, ausencia de píxeles saturados (bit 0 QA_RADSAT) y coherencia de la cobertura sobre el AOI. Los meses de abril y noviembre quedan excluidos por nubosidad excesiva conforme a la Tabla 1 (umbral aproximado de ≥ 30 % de cobertura nubosa sobre el AOI). Las escenas conservan su huella original WRS-2 sin recorte previo al cálculo.

7.1.2. Estaciones meteorológicas municipales (TMA)

Se han incorporado las 18 estaciones meteorológicas del Ayuntamiento de Madrid recogidas en la Tabla 2 del informe. Para cada estación se ha verificado: completitud horaria del año 2025 al filtrar los datos a las 11:00 UTC (cobertura objetivo ≥ 80 % de horas válidas), rango plausible de temperatura ambiental ($-10\text{ °C} \leq T \leq 45\text{ °C}$), y coordenadas válidas en EPSG:4326 con altimetría coherente con el MDE. Las estaciones con cobertura inferior al 50 % horario se documentan pero no se utilizan en el ajuste GAM.

7.1.3. Modelo Digital de Elevaciones y de Superficies

El MDE/MDS empleado para Sombras, Pendiente y Altitud media procede del Instituto Geográfico Nacional y de la cartografía del Ayuntamiento. Se ha verificado: cobertura completa del AOI más buffer de 100 m, rango altimétrico coherente con el término municipal de Madrid (aproximadamente 540-960 m sobre el nivel medio del mar), ausencia de píxeles NoData internos y proyección EPSG:25830.

7.1.4. Cartografía SIOSE 2014 (cuerpos de agua) y polígonos de Thiessen

Para Cercanía a ríos (DistRío) y Enmascarado §6.1 se utilizan los polígonos de cuerpos de agua del SIOSE 2014 (clase 200), validados mediante OGR (geometría válida, sin auto-intersecciones, en EPSG:25830). Para Compacidad urbana se han generado polígonos de Thiessen sobre los centroides de las parcelas del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid; se ha verificado la integridad de la teselación (cobertura del AOI sin solapes, ajuste a los límites del término municipal).

7.2. Verificación de la consistencia del procesado

7.2.1. Temperatura superficial terrestre (TST)

La fórmula aplicada (Jiménez-Muñoz y Sobrino, 2003) se ha validado en una muestra de 4 escenas representativas (enero, mayo, julio y octubre), reproduciendo los cálculos manualmente sobre 5 píxeles por escena. Los rangos esperados de la temperatura de brillo (BT, en kelvin) y de la temperatura superficial resultante (LST, en °C) son coherentes con la latitud de Madrid y la estación del año. La máscara QA_PIXEL (bits 1, 3, 4, 5) y QA_RADSAT (bit 0) se aplican antes del cálculo del NDVI y la emisividad; el porcentaje de píxeles enmascarados por escena oscila entre 0,1 % (enero) y 12,2 % (febrero), conforme a la cobertura nubosa declarada en la Tabla 1.

7.2.2. Temperatura ambiental (TMA) — GAM + Regression Kriging

El modelo aditivo generalizado (GAM) se ha ajustado sobre las estaciones activas con variables auxiliares latitud, longitud y elevación. La validación cruzada Leave-One-Out (LOO-CV) se ha aplicado para evaluar la capacidad predictiva: se reportará el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2) sobre las 18 estaciones, así como la inspección de residuos para detectar tendencias espaciales no capturadas por las covariables. El kriging ordinario de los residuos se efectúa con un variograma esférico (rango y meseta calibrados sobre los datos 2025) y se valida visualmente con el ráster final.

7.2.3. Verdor y Brillo (Tasseled Cap)

Los coeficientes Tasseled Cap aplicados a Landsat 8/9 OLI son los publicados por Baig, Zhang, Shuai y Tong (2014) y replicados literalmente en el informe (fórmulas en §3.3.3 y §3.3.8). Se ha verificado que el rango de Verdor y Brillo es coherente con la literatura (típicamente $-0,3 \leq \text{Verdor} \leq 0,3$ sobre superficies urbanas y vegetadas). El valor agregado anual es el promedio de las 10 escenas útiles.

7.2.4. Sombras — Codificación binaria 1/3

El cálculo de sombras inter-edificio se efectúa con r_{sun} sobre el MDS a resolución 1 m, integrando sobre 12 días representativos del año (DOY 15, 46, 74, 105, 135, 166, 196,

227, 258, 288, 319, 349). La codificación final del factor de impacto en el modelo EMC es binaria con valores 1 (sin sombra) y 3 (con sombra) — se ha auditado el ráster entregado para confirmar que se aplica esta codificación literal de los informes 2024, saltando deliberadamente el valor 2 para reforzar la contribución EMC de la sombra (peso 10).

7.2.5. Pendiente y DistRío — Umbrales binarios

Pendiente: se ha calculado con gdaldem slope sobre el MDE a resolución nativa, reclasificada en 1 ($< 5^\circ$) y 2 ($\geq 5^\circ$). DistRío: distancia euclidiana 2D a los cuerpos de agua SIOSE 2014, reclasificada en 1 (> 500 m) y 2 (≤ 500 m). Ambos umbrales son los literales documentados en la serie histórica 2020-2024.

7.2.6. Análisis multicriterio EMC ponderado

Se ha verificado que la suma de pesos = 100 (TST 30 + TMA 20 + Verdor 18 + CompUrb 12 + Som 10 + Pen 5 + DistRío 5). El ráster ICU_raw resultante se ha contrastado mediante un cálculo manual sobre 10 píxeles muestrales repartidos por el AOI (centro histórico, ensanches, periferia, espacios verdes consolidados, polígonos industriales): los valores caen dentro del rango esperado [1, 5] tras la ponderación y antes de la reclasificación final en 8 clases.

7.3. Verificación del producto resultante

7.3.1. Estadísticas globales por clase

La distribución por las 8 clases de impacto sobre el confort térmico se reporta en la Tabla 5 del informe. Se ha verificado que el área total válida (450,94 km²) coincide con el AOI declarado (excluyendo NoData y máscaras de cuerpos de agua) y que los 2 004 158 píxeles válidos a 15 m son congruentes con esa superficie. La distribución es unimodal con mayor presencia de las clases 1 y 2 (45,4 % combinado), coherente con un Madrid mayoritariamente compactado, edificado y con presencia limitada de cubierta arbórea en el área central.

7.3.2. Continuidad de la serie histórica

La salvaguarda metodológica del §1.1 y la discusión del §3.4.3 documentan que parte de la cadena de cálculo se ha reconstruido por criterios técnicos coherentes con la literatura ante la falta de detalle en los informes 2020-2024. La comparativa cuantitativa píxel a píxel con anualidades anteriores debe interpretarse con cautela; sin embargo, el ranking espacial relativo (qué zonas son más calientes y qué zonas más frescas) se mantiene estable entre años, lo que respalda la utilidad operativa del producto.

7.3.3. Inspección visual sobre áreas representativas

Se han revisado por inspección visual cuatro áreas representativas del AOI para verificar la coherencia espacial:

- Centro histórico (Sol-Malasaña): clases ICU 1-2 mayoritarias, coherente con tejido urbano de alta compacidad, escasa cubierta vegetal y baja cobertura arbórea.
- Eje financiero (AZCA-Castellana): clases ICU 1-2 mayoritarias con bolsas locales de clase 3-4 en torno a parques (Parque del Norte, Castellana-Plaza de Castilla).
- Ensanche residencial este (San Blas-Canillejas, Hortaleza): mezcla de clases 2-4 reflejando la heterogeneidad del tejido urbano (manzana cerrada, manzana abierta, vacíos urbanos).
- Borde periurbano y espacios verdes (Casa de Campo, Monte de El Pardo): clases ICU 6-8 mayoritarias, coherente con la cobertura forestal continua y el efecto regulador del agua.

7.3.4. Conformidad técnica del producto entregado

Indicador técnico	Valor verificado
Sistema de referencia	EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zone 30N)
Resolución espacial	15 m
Tipo de dato	UInt8 (1-8 clases + 0=NoData)
NoData	0
Formato	COG (Cloud-Optimized GeoTIFF) con overviews internas
Compresión	DEFLATE nivel 6
Cobertura	AOI del término municipal de Madrid (450,94 km ²)
Píxeles válidos	2 004 158
Metadatos asociados	ISO 19115-1:2014 / INSPIRE NEM 1.2 (XML)

Tabla 6. Conformidad técnica del ráster ICU 2025 entregado.

7.4. Trazabilidad y reproducibilidad

La cadena de cálculo es reproducible por completo a partir de los insumos del proyecto y los scripts archivados. Se documentan a continuación los componentes principales:

- Software: GDAL 3.x para preprocesado ráster y vectorial; Python 3.10 con bibliotecas rasterio, numpy, geopandas, pandas y scipy para estadística zonal y modelado GAM/kriging; GRASS GIS 8.4.2 para r.sun (sombras); QGIS 3.34 para inspección visual y composición cartográfica.
- Parámetros: definidos íntegramente en los scripts del proyecto; los umbrales binarios (DistRío 500 m, Pendiente 5°, Sombra con/sin), los cuantiles equiprobables (Q16-Q33-Q50-Q66-Q83 para 6 clases; Q25-Q50-Q75 para 4 clases) y los pesos EMC (30/20/18/12/10/5/5) se documentan literalmente en §3.4.

- Trazabilidad de entregables: cada fichero entregado conserva el prefijo y sufijo de nomenclatura del Excel aprobado a tal fin (EsAytMadridOt2025*), con metadatos XML asociados (ISO 19115-1:2014 e INSPIRE NEM 1.2) que documentan procedencia, sistema de referencia, fechas de procesado y responsables.
- Reproducibilidad: todos los scripts (descarga Landsat, máscaras QA, cálculo TST, modelo GAM+RK para TMA, Tasseled Cap, polígonos de Thiessen para compacidad, r.sun para sombras, gdaldem para pendiente, gdal_proximity para distancias, AMC ponderado, reclasificación en 8 clases, generación del informe maquettato) están versionados y almacenados en la estructura del proyecto, permitiendo regenerar el producto con un único comando.
- Salvaguarda metodológica documental: la limitación de comparabilidad píxel a píxel con anualidades anteriores (§1.1 y §3.4.3) forma parte de la trazabilidad documental del producto 2025. La comparativa interanual cuantitativa se aborda en el informe Multitemporal (E 6-3), con las correspondientes salvaguardas.

8. Entregables

A continuación se enumeran los entregables asociados a este producto, indicando su papel en el modelo EMC:

- EsAytMadridOt2025TST.tif / .xml: temperatura superficial terrestre media anual (°C). Variable EMC, peso 30.
- EsAytMadridOt2025TMA.tif / .xml: temperatura media anual del aire (°C). Variable EMC, peso 20.
- EsAytMadridOt2025Ver.tif / .xml: índice de verdor. Variable EMC, peso 18.
- EsAytMadridOt2025CompUrb.tif / .xml: compacidad urbana en 4 clases. Variable EMC, peso 12.
- EsAytMadridOt2025Som.tif / .xml: sombras urbanas (%). Variable EMC, peso 10.
- EsAytMadridOt2025Pen.tif / .xml: pendiente topográfica (°). Variable EMC, peso 5.
- EsAytMadridOt2025DistRio.tif / .xml: distancia a cuerpos de agua (m). Variable EMC, peso 5.
- EsAytMadridOt2025Bri.tif / .xml: índice de brillo. Variable contextual (no EMC).
- EsAytMadridOt2025DistUrb.tif / .xml: distancia al centro urbano (m). Variable contextual (no EMC).
- EsAytMadridOt2025AltMed.tif / .xml: modelo digital de elevaciones (m). Variable contextual (insumo indirecto: deriva la pendiente).
- EsAytMadridOt2025ICU_COG.tif / EsAytMadridOt2025ICU_tif.xml: Isla de Calor Urbana de Madrid en formato ráster COG (UInt8, 8 clases).
- EsAytMadridOt2025ICU.shp / EsAytMadridOt2025ICU_shp.xml: Isla de Calor Urbana de Madrid en formato shapefile.
- EsAytMadridOt2025ICUInf.pdf / .docx: informe metodológico y de resultados (el presente documento).

9. Conclusiones

El Mapa Analítico de Clima Urbano de Madrid 2025 se ha calculado como producto anual de diez meses útiles. El resultado integra información térmica, espectral, morfológica y ambiental, y se presenta en 8 clases de impacto sobre el confort térmico, armonizadas con la serie histórica del Ayuntamiento de Madrid. La exclusión de abril y noviembre por nubosidad queda documentada en la tabla de selección de imágenes.

La metodología EMC ponderada utilizada en 2025 reproduce la misma estructura de variables y pesos documentada en la anualidad 2024, con el siguiente desglose: siete variables entran en la fórmula EMC (TST con peso 30, TMA con peso 20, Verdor con peso 18, Compacidad urbana con peso 12, Sombras con peso 10, Pendiente con peso 5 y Cercanía a ríos con peso 5), mientras que tres variables —Brillo, Distancia al centro urbano y Altitud media— se entregan como productos contractuales del Pliego y como capas analíticas de contexto, pero no participan directamente en la EMC.

Los ajustes morfológicos aplicados (penalización por edificios, infraestructuras viarias y filtro de cultivos del noroeste) permiten mejorar la coherencia visual y temática del resultado sin modificar de forma significativa la distribución global de clases. El producto entregado mantiene resolución de 15 m, sistema EPSG:25830 y cobertura del AOI municipal, con un total de 2 004 158 píxeles válidos correspondientes a 450,94 km².

Como se advierte en la introducción (apartado 1.1), la comparación cuantitativa directa con las anualidades anteriores debe acompañarse de la consideración de que parte de la cadena operativa de cálculo se ha reconstruido por criterios técnicos coherentes con la literatura ante la falta de detalle en la documentación previa. Los productos complementarios —ICUComparativa multitemporal, Variación interanual y Zonas Sensibles— se documentan en los informes específicos de la rama E 6-3.

10. Bibliografía

- Acero, J. A. (2011). Urban climate modeling: development of urban climate evaluation methods for urban planning purposes. Doctoral dissertation, Faculty of Architecture, Urban and Landscape Planning, University of Kassel, Germany.
- Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., y Tong, Q. (2014). Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 5(5), 423–431. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.915434>
- Fernández García, F. (2009). Ciudad y cambio climático: aspectos generales y aplicación al área metropolitana de Madrid. *Investigaciones Geográficas*, 49, 173–195.
- Insaurralde, J. A. (2019). Aplicación de la transformación Tasseled Cap en la generación de información temática a partir de las imágenes satelitales del Landsat 8 (OLI). *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, 24, 19–35.
- Jiménez-Muñoz, J. C., y Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22). <https://doi.org/10.1029/2003JD003480>
- Mirzaei, P. A. (2015). Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 19, 200–206.
- Moreno García, M. C., y Serra Pardo, J. A. (2016). El estudio de la isla de calor urbana en el ámbito mediterráneo: una revisión bibliográfica. *Biblio3W. Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*.
- Nasrallah, H. A., Brazel, A. J., y Balling Jr, R. C. (1990). Analysis of the Kuwait City urban heat island. *International Journal of Climatology*, 10(4), 401–405.
- Ng, E., Ren, C., Katzschner, L., y Yau, R. (2009). Urban climatic studies for the hot and humid tropical coastal city of Hong Kong. 7th International Conference on Urban Climate, Yokohama, Japón.
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y. C., y Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120–128. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4)
- Sarricolea Espinoza, P., y Martín-Vide, J. (2014). El estudio de la isla de calor urbana de superficie del área metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y análisis de componentes principales. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 123–141.
- Villanueva-Solís, J., Ranfla, A., y Quintanilla-Montoya, A. L. (2013). Isla de calor urbana: modelación dinámica y evaluación de medidas de mitigación en ciudades de clima árido extremo. *Información Tecnológica*, 24(1), 15–24.

LISTA DE TABLAS

TABLA 1: Imágenes seleccionadas Landsat 2025.....	10
TABLA 2: Categorización TST 2025 en 6 clases.....	12
TABLA 3: Ponderación de cargas para las variables seleccionadas.....	27
TABLA 4: Impacto en el confort térmico por clase del Mapa ICU.....	29
TABLA 5: Distribución del Mapa ICU Madrid 2025 por clase.....	30
TABLA 6: Conformidad técnica del ráster ICU 2025 entregado.....	35

LISTA DE FIGURAS E IMÁGENES

FIGURA 1: Temperatura superficial terrestre (TST) — media anual 2025.....	11
FIGURA 2: TST 2025 — Factor de impacto en 6 clases.....	12
FIGURA 3: Temperatura media ambiental (TMA) — GAM + RK 2025.....	13
FIGURA 4: TMA 2025 — Factor de impacto en 6 clases.....	14
FIGURA 5: Verdor — transformación Tasseled Cap 2025.....	15
FIGURA 6: Verdor 2025 — Factor de impacto en 4 clases.....	16
FIGURA 7: Compacidad urbana — polígonos de Thiessen.....	17
FIGURA 8: Compacidad urbana 2025 — Factor de impacto.....	18
FIGURA 9: Sombras urbanas — porcentaje continuo.....	19
FIGURA 10: Sombras 2025 — Factor de impacto binario 1/3.....	20
FIGURA 11: Pendiente — gradiente de elevación.....	21
FIGURA 12: Pendiente 2025 — Factor de impacto binario 5°.....	22
FIGURA 13: Distancia a ríos y cuerpos de agua.....	23
FIGURA 14: DistRío 2025 — Factor de impacto binario 500 m.....	24
FIGURA 15: Brillo — transformación Tasseled Cap 2025.....	25
FIGURA 16: Altitud media — modelo digital de elevaciones.....	26
FIGURA 17: Mapa Analítico de Clima Urbano de Madrid 2025.....	28

FIN DEL DOCUMENTO