CONAMA 2026

# Proyecto MOMENTUM de Ciencia de Datos y Gemelos Digitales Urbanos

## para el control de emisiones del transporte y la edificación

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE 2026

**Edita:** Fundación Conama

**Año:** 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

## Personas autoras de la presente comunicación técnica

**Autor Principal de la comunicación:** Alicia Gómez Nieto. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IETCC-CSIC)

**Otros Autores:** Fernando Martín-Consuegra (IETCC-CSIC)

Borja Frutos (IETCC-CSIC)

Fernando de Frutos (IETCC-CSIC)

Dariya Ordanovich (IEGD-CSIC)

Diego Ramiro (IEGD-CSIC)

Minerka Ibarra (UPM)

José Javier Ramasco (IFISC-CSIC)

Gustavo Romanillos (UCM-tGIS)

Jorge Villagrá (UPM-CSIC)

# Índice

1. Introducción ..... 1
2. Objetivos ..... 5
3. Metodología ..... 6
4. Primeros resultados de investigación ..... 10
5. Conclusiones provisionales ..... 18
6. Agradecimientos ..... 19
7. Bibliografía ..... 19

# 1. Introducción

Las ciudades concentran una parte sustancial de las emisiones de gases de efecto invernadero y, al mismo tiempo, son espacios especialmente expuestos a los efectos del cambio climático y a las desigualdades sociales. Según el IPCC (2022), las áreas urbanas representaron entre el 67 % y el 72 % de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero en 2020. Entre los sectores que contribuyen a estas emisiones destacan la edificación y el transporte: en 2019, el transporte representó aproximadamente el 15 % de las emisiones mundiales, mientras que la contribución de los edificios se situó en torno al 6 % en términos directos, alcanzando aproximadamente el 16 % al incorporar las emisiones indirectas asociadas a la producción de electricidad y calor. Estas cifras ponen de manifiesto la importancia de abordar ambos sistemas de forma coordinada en las estrategias de descarbonización urbana (IPCC, 2022).

La ciudad funciona como un sistema complejo en el que interactúan procesos espaciales, sociales, económicos y ambientales (Batty, 2013). Por ello, las emisiones no dependen únicamente de las características de los edificios y de los sistemas de transporte, sino también de la configuración urbana, la distribución de actividades, los usos del suelo y la accesibilidad a servicios y oportunidades. La densidad, la mezcla de usos y la conectividad constituyen dimensiones relevantes para comprender las relaciones entre forma urbana, movilidad y consumo energético (Ewing & Cervero, 2010; IPCC, 2022). Por estas razones, la escala urbana, es la más adecuada para abordar el problema de la contaminación.

La movilidad debe evaluarse tanto desde la eficiencia de los sistemas de transporte como desde la distribución territorial de las oportunidades de acceso al empleo, la educación, los servicios y los equipamientos. Desde la perspectiva de la justicia en el transporte, la accesibilidad constituye una dimensión central de la equidad, ya que los beneficios y las cargas de los sistemas de movilidad no se distribuyen necesariamente de forma homogénea entre la población. Las desigualdades en el acceso al transporte pueden limitar las oportunidades de participación social y económica y reforzar situaciones de vulnerabilidad territorial (Lucas, 2012; Martens, 2016).

Esta relación entre las condiciones urbanas y las oportunidades de la población puede abordarse desde el enfoque de las capacidades (*Capability Approach*), desarrollado por Amartya Sen (1999) y ampliado por Martha C. Nussbaum (2000, 2011). Este enfoque plantea que el bienestar y la justicia social no deben evaluarse únicamente en función de los recursos disponibles, sino también de las oportunidades reales de las personas para desarrollar las actividades y formas de vida que valoran. Desde esta perspectiva, las condiciones del entorno urbano, la calidad de la vivienda, el acceso a los servicios y las posibilidades de movilidad constituyen factores que pueden ampliar o limitar las capacidades individuales. Nussbaum incorpora entre las capacidades humanas centrales aspectos como la salud corporal, la integridad física y el control sobre el propio entorno, dimensiones directamente relacionadas con las condiciones de habitabilidad, el confort térmico y la accesibilidad urbana. Aplicado al análisis territorial, este enfoque permite interpretar la vulnerabilidad no solo como una exposición desigual a riesgos ambientales o como una carencia de recursos económicos, sino también como una limitación de las oportunidades efectivas de las personas para acceder a condiciones adecuadas de vivienda, movilidad, salud y participación social.

De forma complementaria, las características del parque residencial y su comportamiento energético condicionan la capacidad de las viviendas para proporcionar condiciones adecuadas de habitabilidad y confort térmico. La antigüedad de los edificios, la configuración morfológica, las características de la envolvente y las necesidades de calefacción y refrigeración pueden incrementar la sensibilidad de las viviendas frente a episodios climáticos extremos, especialmente durante las olas de calor y los periodos de frío. Estas condiciones adquieren mayor relevancia cuando coinciden con situaciones de vulnerabilidad socioeconómica, ya que los hogares con menores recursos disponen de menos capacidad para afrontar los gastos energéticos y adaptar o rehabilitar sus viviendas. La vulnerabilidad residencial y energética debe entenderse, por tanto, como el resultado de la interacción entre las condiciones físicas y energéticas de la edificación y las características socioeconómicas de la población.

**Cuadro 1. Dimensiones e indicadores para el análisis territorial de la vulnerabilidad**.
Fuente: Elaboración propia

| Dimensión | Indicadores principales | Aspecto analizado |
|---|---|---|
| **Socioeconómica** | Densidad de población y nivel de renta | Desigualdad económica y capacidad de adaptación |
| **Urbana y morfológica** | Compacidad, antigüedad edificatoria, complejidad | Características del tejido urbano |
| **Residencial y energética** | Pérdidas energéticas y demanda de calefacción; orientación de los edificios (MEPEC); | Condiciones de habitabilidad y necesidades energéticas |
| **Movilidad y accesibilidad** | Tiempos de acceso al transporte público y accesibilidad | Acceso a oportunidades y equipamientos |
| **Ambiental** | Contaminación atmosférica y temperaturas extremas | Exposición a riesgos ambientales |
| **Salud urbana** | condiciones residenciales, movilidad, exposición ambiental | Relación entre el entorno urbano, las desigualdades sociales y el bienestar y la salud de la población |

En este contexto, la ciencia de datos y los gemelos digitales urbanos ofrecen nuevas posibilidades para analizar los sistemas urbanos desde una perspectiva integrada. Estos entornos digitales combinan información procedente de distintas fuentes, modelos de los sistemas físicos y herramientas de simulación, permitiendo monitorizar su comportamiento, identificar ineficiencias y explorar escenarios de intervención (Dembski et al., 2020; Ketzler et al., 2020). En el ámbito de la edificación, su aplicación permite relacionar información constructiva, energética y ambiental para mejorar el seguimiento del comportamiento de los edificios y evaluar estrategias de eficiencia y rehabilitación (Cespedes-Cubides & Jradi, 2024). En el transporte, permiten integrar información sobre redes, servicios, desplazamientos y funcionamiento de los sistemas de movilidad para simular diferentes condiciones de operación y analizar alternativas orientadas a su descarbonización (Farsi et al., 2026).

La principal aportación de estos instrumentos reside en su capacidad para superar los análisis sectoriales y evaluar de forma conjunta las interdependencias entre distintos sistemas urbanos. De este modo, es posible explorar escenarios de rehabilitación energética, modificaciones de la oferta de transporte público y cambios en las condiciones de movilidad, considerando sus implicaciones sobre las emisiones, la accesibilidad y la vulnerabilidad territorial. No obstante, los gemelos digitales no reducen las emisiones por sí mismos: proporcionan herramientas de información, diagnóstico y simulación que pueden mejorar la toma de decisiones, cuya eficacia depende de la calidad, actualización e interoperabilidad de los datos y de la aplicación efectiva de las medidas propuestas.

El proyecto «Ciencia de datos y gemelos digitales urbanos para el control de emisiones del transporte y la edificación», desarrollado por el grupo de investigación giSCHE del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), se enmarca en el programa MOMENTUM del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), impulsado por el Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública y financiado por la Unión Europea a través de NextGenerationEU, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR). Con una duración de cuatro años (diciembre de 2024-diciembre de 2028), forma parte de la Plataforma Temática Interdisciplinar PTI Mobility 2030 del CSIC y cuenta con la colaboración de distintos institutos y grupos de investigación, entre ellos el Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos (IFISC-CSIC), el Instituto de Economía, Geografía y Demografía (IEGD-CSIC), el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), el grupo de investigación tGIS de la Universidad Complutense de Madrid y el Departamento de Urbanística de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid (DUyOT-ETSAM-UPM).

La investigación plantea el desarrollo de un marco de análisis territorial que conecta cuatro dimensiones habitualmente estudiadas por separado: el comportamiento energético de la edificación, la accesibilidad al transporte público, la configuración morfológica y funcional de los tejidos urbanos y las condiciones socioeconómicas de la población. El ámbito de aplicación comprende el área urbana consolidada de Madrid y su entorno metropolitano, con una perspectiva extensible al conjunto de la Comunidad de Madrid (Figura 1). La aportación del trabajo consiste en combinar metodologías específicas para cada dimensión dentro de un mismo marco territorial y multiescalar, con el objetivo de comparar diagnósticos sectoriales, reconocer posibles coincidencias espaciales de vulnerabilidad y sentar las bases para el desarrollo de un «gemelo de gemelos digitales urbanos» orientado a apoyar la planificación y la evaluación de políticas públicas.

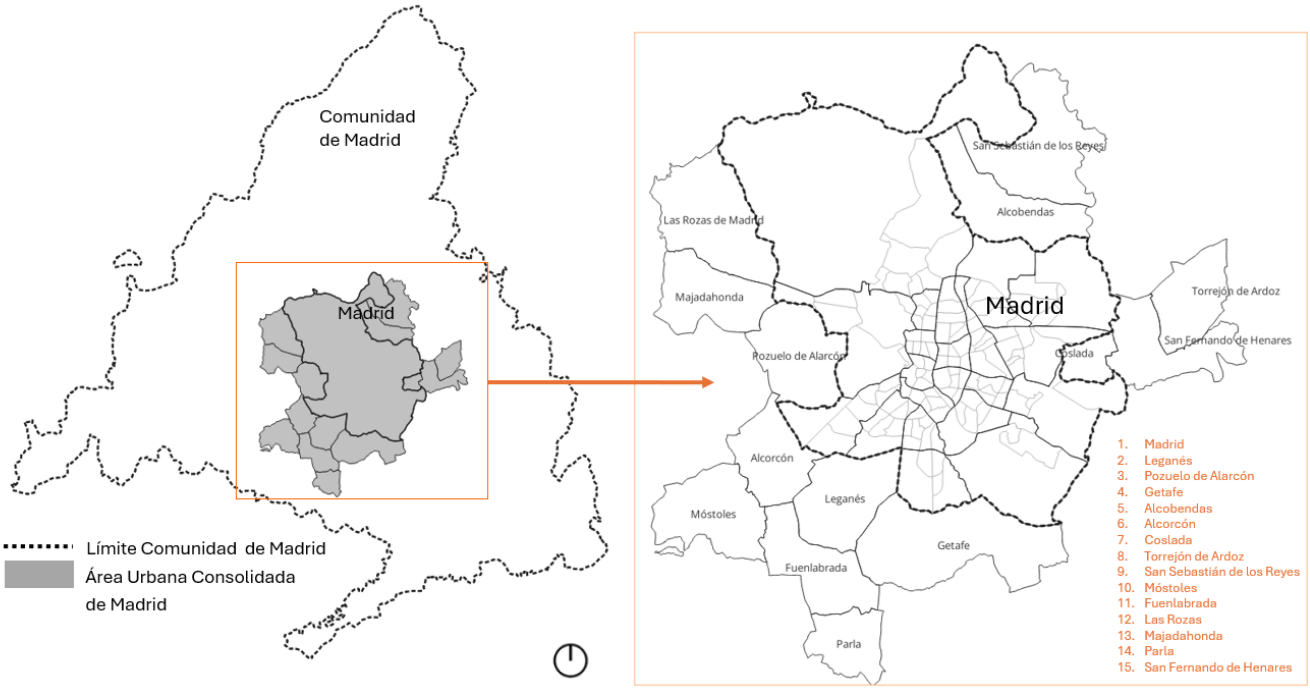



**Figura 1.** Ámbito de la investigación.
Fuente: Elaboración propia.

La singularidad de esta iniciativa también reside en su alcance dentro del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Aunque existen proyectos del CSIC relacionados con el desarrollo de gemelos digitales aplicados a ámbitos específicos, como la movilidad o la calidad ambiental, no se ha identificado, en la revisión de iniciativas institucionales disponibles, otro proyecto que integre conjuntamente y a esta escala territorial las emisiones de la edificación y del transporte, la morfología y diversidad funcional urbana, la accesibilidad y la vulnerabilidad socioeconómica. Su carácter interdisciplinar, la participación de distintos institutos del CSIC y la colaboración con grupos de investigación universitarios permiten abordar estas dimensiones desde una perspectiva metropolitana y regional, constituyendo una iniciativa de especial singularidad en el ámbito de la investigación urbana del organismo.

# 2. Objetivos

El **objetivo general** es el desarrollo de un sistema integrado de datos y gemelos digitales urbanos para **analizar, caracterizar y evaluar las emisiones de $CO_2$ asociadas a la edificación y al transporte**, identificar su distribución territorial y su relación con las desigualdades y vulnerabilidades socioambientales, y explorar escenarios de intervención que contribuyan a reducir las emisiones y orientar estrategias de descarbonización urbana, incorporando criterios ambientales, sociales y de equidad espacial para impulsar una transición ecosocial justa en la Comunidad de Madrid.

Para conseguir este objetivo se plantean una serie de objetivos específicos:

- **Caracterizar las emisiones asociadas a la edificación residencial**, analizando el comportamiento energético de los edificios mediante indicadores de pérdidas energéticas de la envolvente, demanda de calefacción, eficiencia energética y radiación solar, para identificar ámbitos prioritarios de rehabilitación energética y orientar estrategias de mejora del parque edificado y reducción de emisiones de $CO_2$.

- **Analizar las emisiones asociadas al transporte y su relación con la accesibilidad a los servicios y al transporte público**, relacionando los tiempos de viaje, los patrones de movilidad y las condiciones socioeconómicas, con el fin de identificar desigualdades en la distribución territorial de las emisiones, situaciones de pobreza en el transporte y vulnerabilidad espacial.

- **Caracterizar la configuración morfológica y funcional de los tejidos urbanos y su relación con la movilidad sostenible y la salud urbana,** mediante indicadores de compacidad edificatoria y complejidad urbana (diversidad de usos), para analizar cómo el urbanismo de proximidad puede **favorecer** la reducción de los desplazamientos en automóvil, disminuir las emisiones contaminantes y mejorar la calidad del aire, la habitabilidad y la salud urbana, identificando oportunidades de rehabilitación y regeneración urbana.

- **Integrar progresivamente indicadores de emisiones, energéticos, ambientales, urbanos, socioeconómicos y relacionados con la salud urbana en un modelo territorial multiescalar,** que permita identificar ámbitos prioritarios de intervención y explorar escenarios de rehabilitación energética y regeneración urbana, concibiendo la rehabilitación como una herramienta de planificación saludable y de reducción de las desigualdades territoriales, y aportando evidencias para orientar políticas públicas de descarbonización y adaptación climática.

# 3. Metodología

La metodología incorpora información de múltiples fuentes provenientes principalmente de bases de datos públicas robustas que contienen información territorial. Esta información se combina utilizando herramientas de ciencia de datos, sistemas de información geográfica (SIG), Inteligencia Artificial y técnicas de análisis espacial. Se adopta un enfoque multiescalar para estudiar las características energéticas, morfológicas, funcionales y socioeconómicas de los sistemas urbanos y sus posibles interrelaciones.

Los indicadores se calculan a distintas escalas —edificio, sección censal, barrio, municipio, ámbito metropolitano y comunidad autónoma—, utilizando información procedente de la Dirección General del Catastro, el Instituto Nacional de Estadística (INE), el Consorcio Regional de Transportes de Madrid (CRTM), OpenStreetMap y otras fuentes de información territorial y ambiental públicas y/o de acceso libre.

## 3.1. Ámbito residencial

Para analizar el comportamiento energético de la edificación residencial se emplea MEPEC (Metodología de Evaluación de Pérdidas Energéticas en los Edificios), herramienta informática que estima las pérdidas energéticas de la envolvente a partir del procesamiento de información catastral (Martín-Consuegra et al., 2018). Su desarrollo posterior amplía el procedimiento mediante la estimación de la demanda de calefacción de edificios residenciales, la incorporación de las ganancias solares y la evaluación de medidas de mejora de la eficiencia energética a escala urbana (Martín-Consuegra et al., 2022). También incorpora indicadores de compacidad edificatoria y características de la envolvente, que permiten relacionar la configuración del parque construido con su comportamiento energético.

Los resultados se representan a escala de edificio y pueden agregarse por sección censal, barrio, distrito o municipio, facilitando la comparación entre ámbitos urbanos y la identificación de zonas con mayor demanda de calefacción y necesidades de rehabilitación energética. La comparación de esta información con las características socioeconómicas de la población de los barrios identificados como ineficientes permite generar un índice de pobreza energética para identificar las áreas críticas donde este problema está generalizado (Martín-Consuegra et al., 2020).
Como fuentes complementarias de información para ampliar el análisis de la eficiencia energética del parque residencial se plantea incorporar:

- **URBAN3R (Plataforma de Datos Abiertos para la Regeneración Urbana en España).** Plataforma que integra información y datos abiertos de carácter urbano para apoyar el diagnóstico, la planificación y el desarrollo de estrategias de regeneración urbana. https://urban3r.es/.
- **Geoportal de Certificados de Eficiencia Energética de Edificios.** Plataforma de consulta de información sobre la certificación energética de edificios residenciales y terciarios, a partir de los registros de certificados de eficiencia energética de las comunidades autónomas. https://edificioseficientes.gob.es/es.

## 3.2. Movilidad y accesibilidad

El análisis de movilidad aborda la pobreza en el transporte desde una perspectiva de equidad territorial, mediante la combinación de indicadores de accesibilidad al transporte público, condiciones socioeconómicas y emisiones de gases de efecto invernadero. La accesibilidad constituye una dimensión fundamental para evaluar las oportunidades de desplazamiento y las desigualdades en el acceso a actividades y servicios (Geurs & van Wee, 2004; Lucas, 2012). Desde la perspectiva de la justicia en el transporte, estas desigualdades deben analizarse atendiendo a la distribución territorial de las oportunidades de acceso y a las condiciones de los distintos grupos sociales (Martens, 2016).

Para ello, se construyen matrices origen-destino de tiempos mínimos de viaje mediante redes multimodales que integran datos de transporte público en formato GTFS (General Transit Feed Specification) y la red peatonal de OpenStreetMap. El cálculo considera los desplazamientos a pie, los recorridos y los horarios de los servicios de transporte público, con el fin de estimar los tiempos de viaje desde las unidades territoriales de origen hasta los destinos seleccionados. Los datos GTFS permiten representar la oferta programada de transporte y construir redes multimodales para el análisis de accesibilidad (Wessel et al., 2017).

El ámbito de análisis comprende 179 municipios y los 21 distritos de Madrid. Se consideran como destinos universidades y centros sanitarios, con un umbral máximo de viaje de 180 minutos. La comparación de los indicadores de accesibilidad, renta y emisiones permite explorar las relaciones espaciales entre las condiciones de movilidad, la vulnerabilidad socioeconómica y los impactos ambientales. Este planteamiento considera las dimensiones de accesibilidad, asequibilidad y disponibilidad de los servicios recogidas en el marco europeo sobre pobreza en el transporte (European Commission, 2024).

## 3.3. Complejidad urbana

Se parte de la hipótesis de que el aumento del índice de complejidad urbana supone un mejor acceso a servicios de proximidad que permite realizar gestiones sin necesidad de utilizar medios de transporte. La configuración morfológica y funcional de los tejidos urbanos se caracteriza mediante dos indicadores de diversidad funcional y compacidad edificatoria. La primera se evalúa mediante el índice de entropía de Shannon, calculado a partir de la distribución de actividades por sección censal (Shannon, 1948). El indicador de compacidad procede de la herramienta MEPEC (Martín-Consuegra et al., 2018, 2022). La combinación de ambos indicadores permite estudiar la heterogeneidad funcional y las características de la configuración edificatoria, así como explorar su posible relación con la proximidad a los servicios y los patrones de movilidad. La literatura identifica la densidad, la diversidad de usos y la configuración urbana como dimensiones relevantes para comprender las relaciones entre forma urbana y transporte (Ewing & Cervero, 2010; Batty, 2013).

La diversidad funcional urbana se calculará a partir de los usos principales registrados en el Catastro. En primer lugar, los datos alfanuméricos de cada inmueble o unidad construida se vincularán espacialmente con la parcela correspondiente y los usos se reclasificarán en categorías

homogéneas, como residencial, comercial, oficinas, industrial, dotacional, sanitario, educativo, deportivo, cultural, hostelero y almacenamiento. Para cada unidad territorial de análisis, se agregará la superficie construida asociada a cada categoría y se calculará su proporción respecto de la superficie construida total, excluyendo los registros sin uso definido y las superficies comunes para evitar distorsiones. La diversidad se estimará mediante el índice de Shannon,

$$H = -\sum_{i=1}^{S} p_i \ln(p_i)$$

donde $p_i$ es la proporción de superficie construida destinada al uso $i$ y $S$ representa el número de usos presentes. Los valores elevados indican una mayor diversidad y un reparto más equilibrado de los usos, mientras que los valores próximos a cero reflejan el predominio de una única función. Para comparar unidades con diferente número de usos, el resultado se normalizará mediante:

$$H' = \frac{H}{\ln(S)}$$

El índice normalizado adopta valores comprendidos entre 0 y 1. Antes del cálculo se depurarán los registros duplicados, los usos sin clasificar y las superficies comunes, con el fin de evitar distorsiones en los resultados. Como criterio de ponderación se utilizará la superficie construida asociada a cada uso como variable de ponderación, al representar mejor el peso funcional efectivo de cada categoría que el simple recuento de inmuebles o locales.

## 3.4. Aspectos socioeconómicos y de salud urbana

La incorporación de los aspectos socioeconómicos constituye un eje transversal del proyecto, ya que las condiciones de renta, empleo, acceso a la vivienda, movilidad y vulnerabilidad energética, entre otras, influyen tanto en la exposición de la población a los impactos ambientales como en su capacidad para afrontarlos y adaptarse a ellos. Su análisis permite identificar desigualdades territoriales, reconocer qué grupos de población soportan mayores cargas ambientales y evaluar cómo se distribuyen los beneficios y los costes de las medidas de descarbonización. De este modo, la evaluación ambiental incorpora no solo las emisiones, los consumos energéticos y los contaminantes, sino también sus implicaciones sociales y espaciales, incluyendo una información que resulta fundamental para el diseño de políticas públicas equitativas y orientadas a una transición climática justa.

En este marco, la salud urbana permite relacionar las condiciones socioeconómicas de la población con las características ambientales y físicas del entorno en el que desarrolla su vida cotidiana. Las desigualdades sociales pueden condicionar tanto la exposición a factores de riesgo —como la contaminación atmosférica, el ruido o las temperaturas extremas— como la capacidad individual y colectiva para prevenir sus efectos. Por ello, el análisis de la salud urbana requiere integrar los determinantes sociales de la salud con las condiciones ambientales, morfológicas, residenciales y

de movilidad del entorno construido. Esta aproximación permite identificar relaciones espaciales y temporales entre las características del territorio y el bienestar de la población, así como evaluar los posibles beneficios de las intervenciones urbanas desde una perspectiva de salud pública (Barton & Grant, 2006; Nieuwenhuijsen, 2020).

Desde el punto de vista metodológico, esta dimensión se aborda mediante la selección e integración de indicadores socioeconómicos, urbanos y residenciales en una misma base de análisis territorial. Entre los indicadores considerados se incluyen la densidad de población y la distribución de los niveles de renta; las características del parque edificado, como su antigüedad y compacidad; y las condiciones energéticas de los edificios, representadas mediante la demanda de calefacción y la orientación de las fachadas. Para la estimación de la demanda de calefacción y la caracterización energética de la edificación se utiliza MEPEC, descrita en el apartado 3.1.

La integración de estos indicadores permite analizar conjuntamente las condiciones sociales y las características del entorno construido, identificar patrones de distribución espacial y explorar posibles relaciones entre vulnerabilidad socioeconómica, condiciones residenciales y necesidades energéticas. Esta aproximación proporciona una base territorial para incorporar criterios de equidad, salud y bienestar en la evaluación de las estrategias de rehabilitación energética y descarbonización urbana.

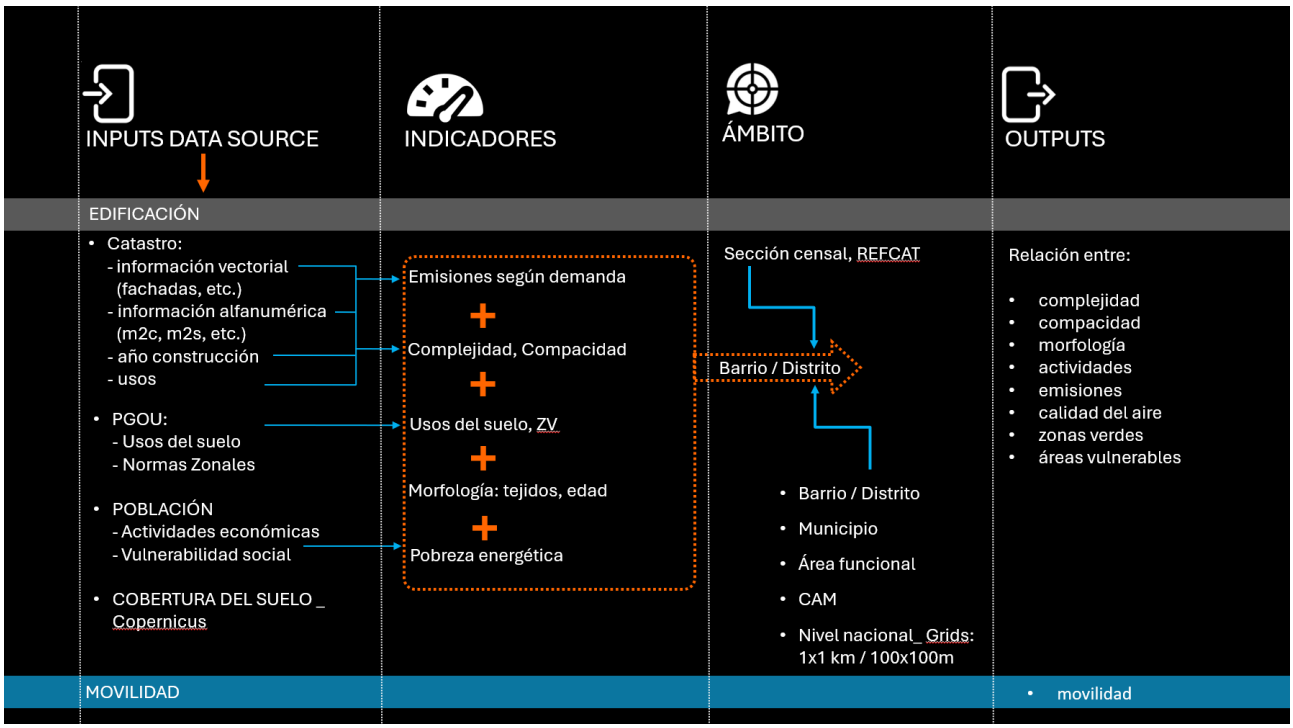



**Figura 2.** Metodología de investigación.
Fuente: Elaboración propia.

# 4. Primeros resultados de investigación

Los análisis realizados abordan cuatro dimensiones complementarias: el comportamiento energético de la edificación residencial, la accesibilidad y las desigualdades en la movilidad, la diversidad funcional y la compacidad urbana, y la vulnerabilidad energética y residencial. Su desarrollo presenta distintos grados de avance, desde diagnósticos territoriales hasta un prototipo de gemelo digital con capacidad de visualización y exploración de escenarios.

## 4.1. Comportamiento energético de la edificación residencial

La aplicación de MEPEC pone de manifiesto una distribución espacial desigual del comportamiento energético del parque residencial, tanto en las pérdidas estimadas a través de la envolvente edificatoria como en la demanda de calefacción. Los resultados evidencian diferencias entre edificios y ámbitos urbanos, mostrando que las necesidades energéticas no se distribuyen de manera homogénea en el territorio. Esta variabilidad refleja la influencia de las características físicas y morfológicas de la edificación en su comportamiento energético y permite identificar áreas con mayores necesidades potenciales de rehabilitación.

La representación cartográfica de las pérdidas energéticas y de la demanda de calefacción, a escala de edificio y sección censal, permite localizar las concentraciones territoriales de mayores necesidades energéticas. Estos resultados adquieren especial relevancia cuando se relacionan con las condiciones socioeconómicas de la población, ya que los hogares con menores recursos económicos pueden tener mayores dificultades para afrontar los gastos de energía y mejorar las condiciones térmicas de sus viviendas. De este modo, la coincidencia espacial entre edificios con mayores necesidades energéticas y población en situación de vulnerabilidad económica puede incrementar el riesgo de pobreza energética y contribuir a reproducir desigualdades territoriales en las condiciones de habitabilidad.

A modo de ejemplo, la aplicación de MEPEC al área de Entrevías Este, integrada por 1.047 edificios residenciales y 2.875 viviendas principales, identifica un comportamiento energético desfavorable y territorialmente heterogéneo. El coeficiente global de transmisión térmica presenta un valor medio de 1,77 W/m²K, mientras que las pérdidas anuales por transmisión ascienden a 27,08 GWh para el conjunto analizado. En los edificios residenciales, el balance energético estima una demanda anual de calefacción de 18,34 GWh, equivalente a 69,51 kWh/m²·año, como resultado de unas pérdidas por transmisión de 24,25 GWh y por ventilación de 5,19 GWh, parcialmente compensadas por 6,09 GWh de ganancias internas y 5,01 GWh de ganancias solares pasivas (Figura xx).

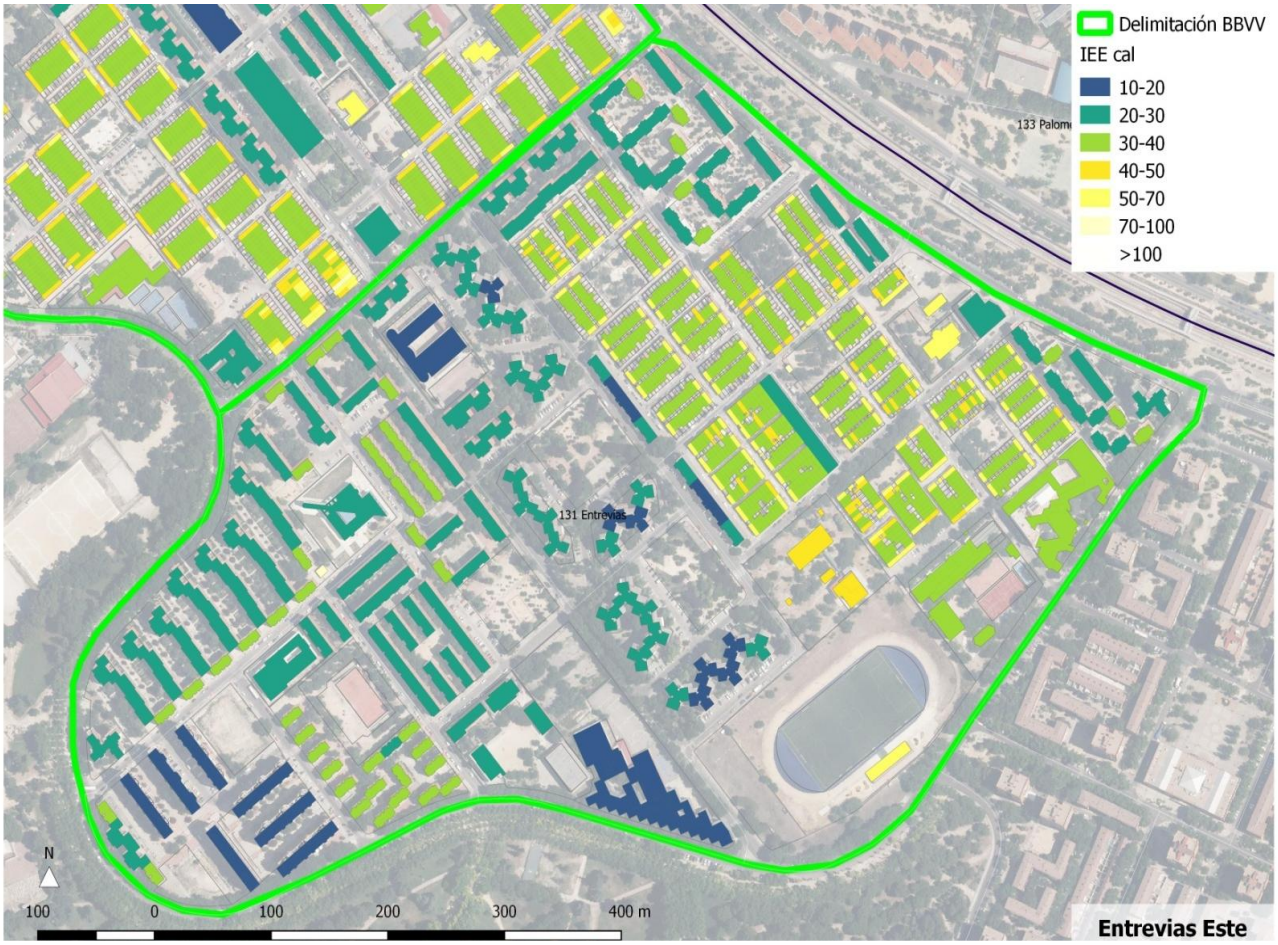



**Figura 3.** Representación de pérdidas energéticas a la escala de la edificación, área de Entrevías Este
Fuente: Elaboración propia.

La integración de los resultados de MEPEC con los indicadores socioeconómicos permite, por tanto, avanzar desde un diagnóstico del comportamiento energético de la edificación hacia una interpretación territorial de la vulnerabilidad energética. Esta lectura conjunta es necesaria para identificar ámbitos en los que las necesidades de rehabilitación del parque residencial coinciden con una menor capacidad económica de los hogares para afrontar sus costes energéticos, aportando criterios para priorizar las intervenciones desde una perspectiva de equidad social y territorial.

# 4.2. Accesibilidad al transporte público y desigualdades territoriales en la movilidad

Se ha desarrollado un prototipo de gemelo digital de movilidad que integra información sobre accesibilidad al transporte público, condiciones socioeconómicas y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al transporte por carretera. La herramienta incorpora un cuadro de mando interactivo desarrollado con Streamlit, que permite visualizar y comparar la distribución territorial de estos indicadores.

El modelo multimodal, implementado mediante r5py, calcula los tiempos mínimos de viaje desde los centroides de las unidades territoriales hasta los destinos seleccionados, principalmente universidades, utilizando los datos GTFS y la red peatonal de OpenStreetMap. Para el análisis de referencia se ha establecido un umbral máximo de viaje de 180 minutos.

Los resultados muestran diferencias territoriales en las condiciones de accesibilidad. El núcleo metropolitano presenta, en general, mayores niveles de conectividad, mientras que diversos municipios periféricos registran condiciones menos favorables. En el modelo se identificaron rutas multimodales válidas para 57 de las 199 unidades territoriales analizadas (28,6 %). En los 142 restantes (71,4 %) no se obtuvo un itinerario que cumpliera los criterios de cálculo establecidos. La ausencia de una ruta válida no implica necesariamente la inexistencia de servicios de transporte público, ya que también puede estar condicionada por el umbral temporal, la cobertura y actualización de los datos GTFS o la conectividad entre las redes utilizadas. Por tanto, este resultado debe interpretarse como una limitación del modelo y de los datos disponibles, además de como un aspecto que requiere revisión antes de establecer conclusiones definitivas sobre la accesibilidad territorial.

La comparación espacial entre accesibilidad y renta apunta a una asociación territorial parcial. Algunos municipios periféricos con menores niveles de renta presentan también condiciones menos favorables de acceso al transporte público y a los servicios seleccionados. No obstante, esta relación no es uniforme y está condicionada por la localización geográfica, la estructura de la red y la distribución de las infraestructuras de transporte.

La relación entre accesibilidad y emisiones muestra otro patrón: el núcleo metropolitano combina mejores condiciones de conectividad con mayores emisiones territoriales del transporte por carretera, mientras que en los municipios periféricos se observan, en términos generales, menores emisiones y peores condiciones de accesibilidad. Por tanto, unas emisiones territoriales más bajas no implican necesariamente una movilidad más sostenible, ya que pueden estar relacionadas con diferencias en la demanda de desplazamientos y en la integración en la red metropolitana. Estas observaciones proceden de una comparación espacial de indicadores y no de un análisis estadístico formal de correlación.

El cuadro de mando permite, además, explorar escenarios de modificación de la red y de los parámetros de cálculo. Se han probado la reducción del umbral máximo de viaje de 180 a 120 minutos y la interrupción hipotética de varias líneas de Metro mediante la modificación de los datos GTFS y el posterior recálculo de los tiempos de acceso. El escenario de 120 minutos muestra una reducción de las posibilidades de acceso a los destinos seleccionados desde distintas unidades territoriales. La simulación de interrupciones permite explorar los cambios en las condiciones de accesibilidad ante alteraciones de la oferta de transporte.

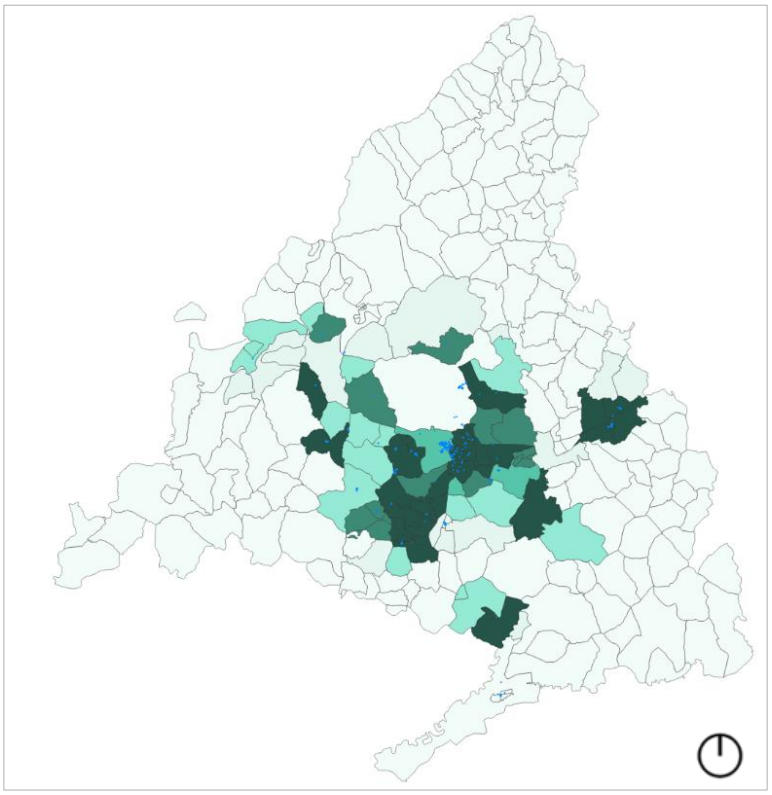


**Figura 4.** Indicador de accesibilidad al transporte público para la Comunidad de Madrid
Fuente: Elaboración propia.

Como línea de trabajo futuro, se plantea ampliar el prototipo mediante el desarrollo de un **visualizador territorial integrado en un gemelo digital urbano**, que permita conectar la información sobre accesibilidad, desigualdades socioeconómicas y emisiones del transporte con otras dimensiones urbanas y ambientales. Esta evolución permitirá avanzar desde el análisis comparativo de indicadores y la simulación de escenarios de movilidad hacia una herramienta de seguimiento y evaluación territorial, orientada a identificar desigualdades en el acceso a oportunidades y servicios y a apoyar la toma de decisiones en materia de planificación de la movilidad y transición hacia modelos urbanos más sostenibles y equitativos.

# 4.3. Complejidad y diversidad funcional urbana

El cálculo del índice de entropía de Shannon a partir de las actividades catastrales agregadas por sección censal permite identificar diferencias en la diversidad funcional de los tejidos urbanos y caracterizar su distribución territorial.

La comparación de este indicador con la compacidad edificatoria procedente de MEPEC ofrece una primera lectura conjunta de la diversidad de actividades y la configuración del parque construido. Este análisis permite explorar posibles relaciones entre ambas características y su vinculación con la proximidad a los servicios y los patrones de movilidad.

Los resultados constituyen una aproximación inicial a la complejidad urbana. La evaluación de la relación entre diversidad funcional, compacidad, dependencia del automóvil y emisiones requiere completar el análisis con resultados cuantitativos específicos, por lo que todavía no es posible establecer relaciones concluyentes entre estas variables.

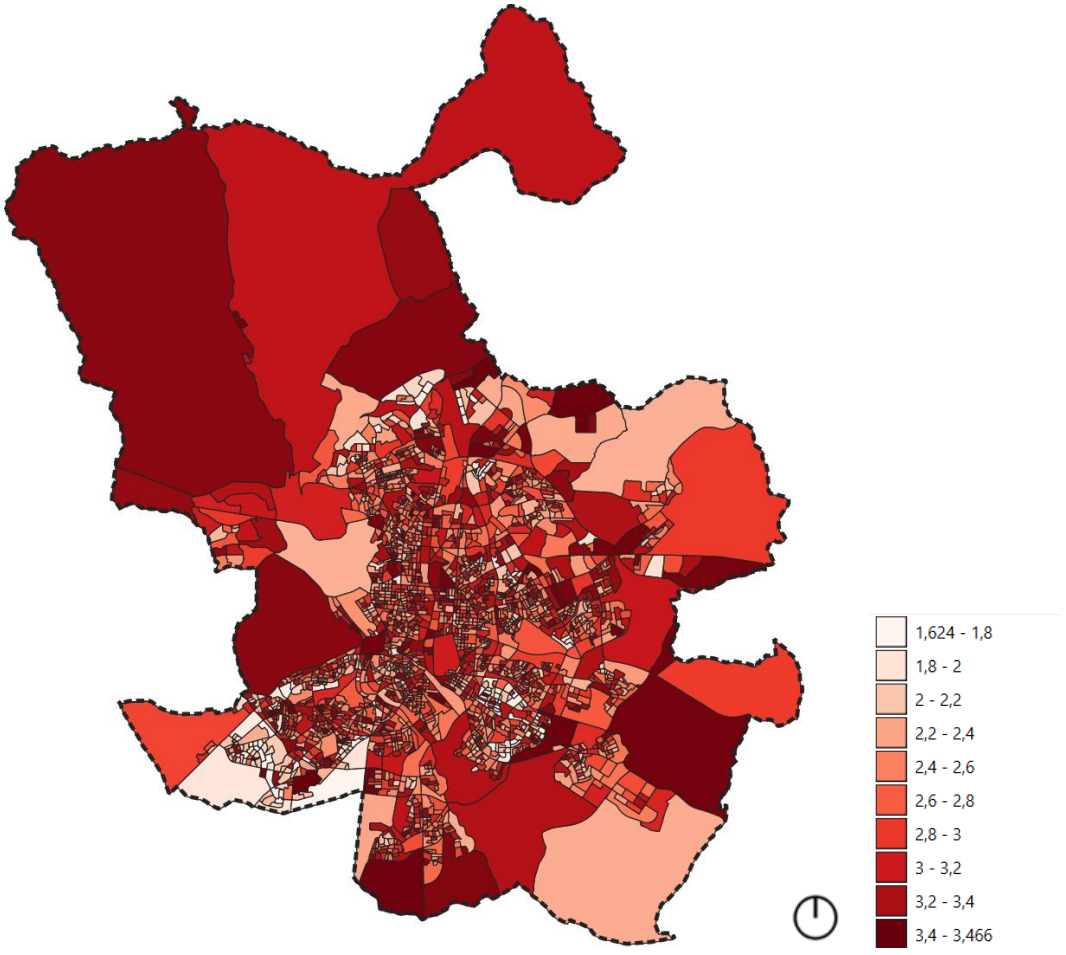



**Figura 4.** Grado de entropía por sección censal (Índice de Shannon) para el municipio de Madrid.
Fuente: Elaboración propia.

# 4.4. Vulnerabilidad energética y residencial: el caso de Entrevías

El análisis de las 29 secciones censales de Entrevías permite identificar diferencias internas en las condiciones socioeconómicas, urbanas y residenciales del barrio. Los resultados muestran una distribución territorial desigual de los indicadores de compacidad edificatoria y demanda de calefacción, junto con la coexistencia de distintas tipologías y periodos de construcción del parque residencial. La consideración conjunta de estas variables permite aproximarse a las diferentes condiciones de vulnerabilidad residencial y energética presentes en el ámbito de estudio.

La dimensión socioeconómica constituye un factor especialmente relevante para interpretar estas diferencias. Según los datos de 2023, el 26,2 % de la población de Entrevías tiene ingresos por unidad de consumo inferiores a 10.000 euros anuales, frente al 14,5 % de media de la ciudad de Madrid. Además, existen diferencias apreciables entre las secciones censales del barrio. Esta situación resulta especialmente significativa cuando se considera junto con las características del parque residencial, ya que una menor disponibilidad de recursos económicos puede limitar la capacidad de los hogares para afrontar los gastos energéticos y realizar mejoras en sus viviendas (Figura xx).

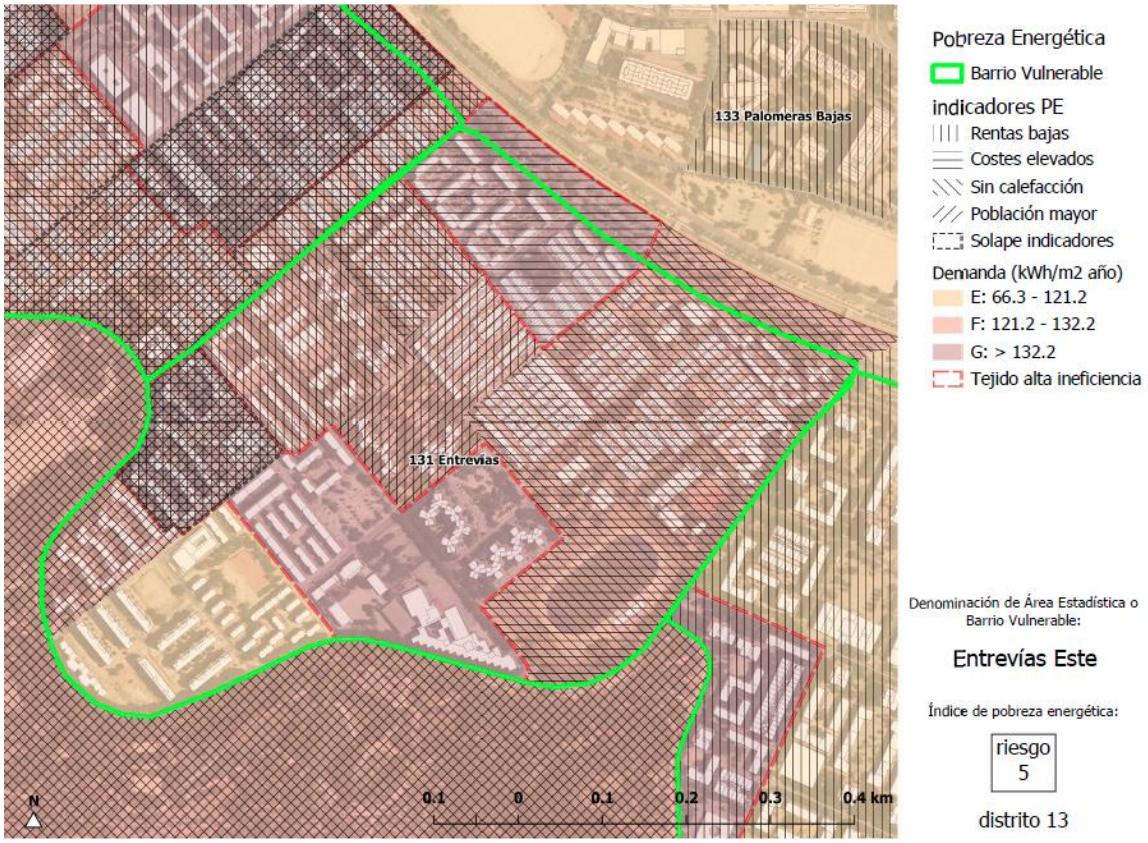



**Figura 6.** Riesgo de pobreza energética en el área Entrevías Este.
Fuente: Martín-Consuegra Ávila, F. (2025)

El análisis se complementa con los resultados del Trabajo Fin de Máster de Minerka Ibarra Tovar (2026), *Adaptación de la Guía para Planificar Ciudades Saludables en barrios urbanos vulnerables*, desarrollado con la tutorización de Alicia Gómez Nieto y Fernando Martín-Consuegra Ávila durante su estancia en el IETcc-CSIC. Este trabajo identifica que en 15 de las 29 secciones censales predomina la edificación anterior a 1980 y, mediante observación directa y entrevistas a residentes, señala problemas relacionados con el envejecimiento de las viviendas, la accesibilidad y las deficiencias de aislamiento térmico.

La lectura conjunta de los indicadores socioeconómicos, urbanos y residenciales permite reconocer ámbitos en los que coinciden varios factores potencialmente asociados a la vulnerabilidad energética. Entre ellos destacan las menores rentas, la antigüedad del parque edificado, las características morfológicas de la edificación y las necesidades de calefacción estimadas. Esta acumulación de factores pone de manifiesto que la vulnerabilidad energética no depende exclusivamente del comportamiento térmico de los edificios, sino también de las condiciones socioeconómicas de los hogares y de su capacidad para mantener unas condiciones adecuadas de confort y habitabilidad.

La escala de sección censal permite identificar diferencias espaciales y concentraciones de factores de vulnerabilidad que podrían quedar ocultas en análisis realizados a escalas territoriales más amplias. Esta aproximación resulta especialmente relevante para orientar estrategias de rehabilitación energética y regeneración urbana, al permitir localizar ámbitos prioritarios de intervención y considerar conjuntamente las condiciones del parque residencial y las características socioeconómicas de la población. La incorporación del análisis cualitativo permite, además, complementar los indicadores estadísticos con aspectos de la experiencia residencial que no quedan recogidos en las fuentes cartográficas y estadísticas.

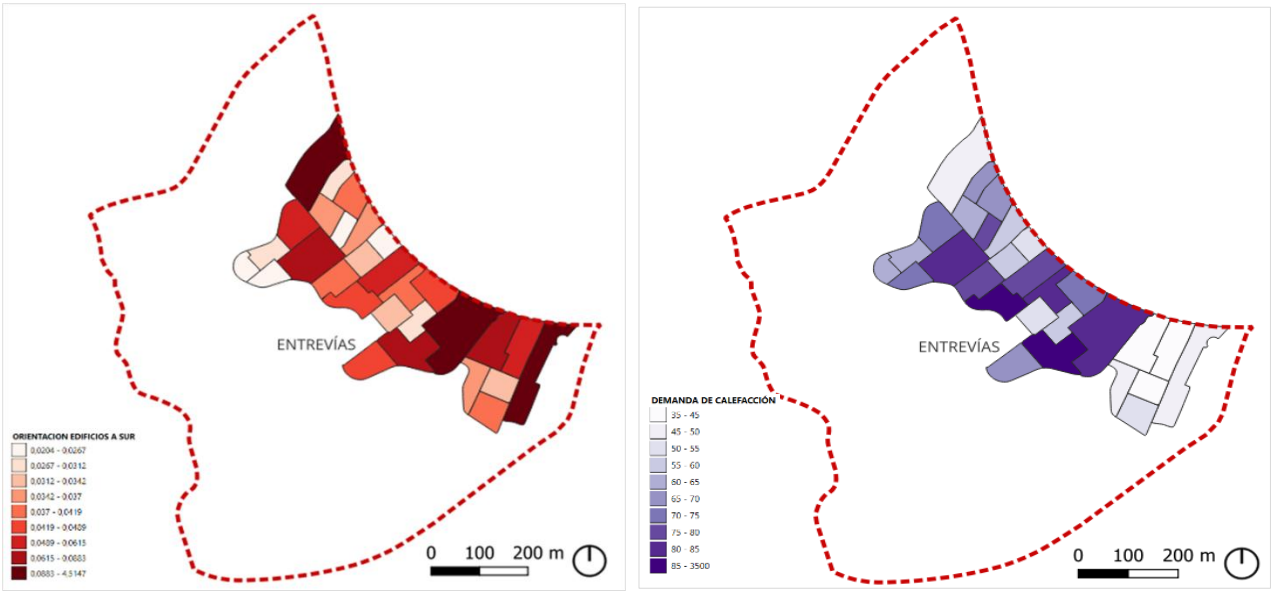



**Figura 7.** Orientación sur de los edificios y demanda de calefacción del barrio de Entrevías, Madrid. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados aportan, por tanto, una base espacial para avanzar hacia una planificación de la rehabilitación residencial desde criterios de equidad, integrando las características físicas de los edificios con las condiciones socioeconómicas y de habitabilidad de la población. No obstante, el análisis se centra en las características del entorno construido y en sus determinantes socioeconómicos, sin incluir mediciones directas de facturas energéticas, gasto energético real de los hogares, costes del alquiler ni resultados sanitarios individuales. Estas limitaciones impiden considerar los indicadores obtenidos como una medición directa de la pobreza energética, aunque permiten identificar condiciones territoriales y residenciales potencialmente asociadas a situaciones de vulnerabilidad.

# 5. Conclusiones provisionales

Los avances realizados muestran el potencial de la ciencia de datos y los gemelos digitales urbanos para analizar conjuntamente distintas dimensiones de los sistemas urbanos y reconocer patrones territoriales relacionados con las emisiones y las desigualdades. La combinación de información energética, de movilidad, morfológica y socioeconómica permite ampliar los diagnósticos sectoriales y avanzar hacia una comprensión más integrada de los procesos urbanos.

En el ámbito residencial, MEPEC permite identificar diferencias en las pérdidas energéticas de los edificios y en la demanda de calefacción, proporcionando información para localizar áreas con necesidades potenciales de rehabilitación. El caso de Entrevías, analizado a través de 29 secciones censales, pone de manifiesto la heterogeneidad interna del barrio y la importancia de relacionar las características del parque edificado con las condiciones socioeconómicas. Esta aproximación permite reconocer la coincidencia espacial de factores asociados a la vulnerabilidad energética y residencial.

En materia de movilidad, la comparación territorial de accesibilidad, renta y emisiones muestra diferencias entre el núcleo metropolitano y los municipios periféricos. Los resultados indican que una mayor conectividad puede coexistir con mayores emisiones territoriales, mientras que algunos ámbitos con menores emisiones presentan también condiciones menos favorables de accesibilidad. Esta relación pone de manifiesto la necesidad de interpretar las emisiones considerando las oportunidades de desplazamiento y la equidad territorial. No obstante, la proporción de unidades con rutas válidas y la ausencia de un análisis estadístico formal de correlación aconsejan profundizar en la validación del modelo y de sus resultados.

El análisis de diversidad funcional y compacidad constituye una primera aproximación a la caracterización conjunta de la configuración urbana y la distribución de actividades. Su relación con la proximidad a los servicios y los patrones de movilidad requiere todavía una mayor profundización mediante resultados cuantitativos específicos. Por otra parte, el estudio de Entrevías muestra la utilidad de incorporar determinantes sociales, morfológicos y residenciales en la planificación saludable, aunque no se han evaluado directamente resultados sanitarios individuales.

En conjunto, el trabajo establece una base metodológica para avanzar hacia un sistema territorial integrado y multiescalar de análisis urbano. El desarrollo futuro deberá completar la validación de los indicadores, mejorar la calidad y cobertura de los datos y reforzar la interoperabilidad de los distintos componentes. Estos avances permitirán consolidar herramientas de apoyo a la planificación y a la evaluación de políticas públicas de descarbonización, rehabilitación energética, movilidad sostenible y regeneración urbana, incorporando criterios de equidad y bienestar

# 6. Agradecimientos

La financiación de este proyecto procede del *Mecanismo de Recuperación y Resiliencia de la Unión Europea-Next Generation*, en el marco de la Invitación General de la entidad pública empresarial *Red.es* para participar en los programas de atracción y retención del talento dentro de la Inversión 4 del Componente 19 del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

# 7. Bibliografía

[1] Barton, H., & Grant, M. (2006). A health map for the local human habitat. *The Journal of the Royal Society for the Promotion of Health, 126*(6), 252–253. https://doi.org/10.1177/1466424006070466

[2] Batty, M. (2013). *The new science of cities*. MIT Press.

[3] Cespedes-Cubides, A. S., & Jradi, M. (2024). A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage. *Energy Informatics, 7*(1), Article 11. https://doi.org/10.1186/s42162-024-00313-7

[4] Dembski, F., Wössner, U., Letzgus, M., Ruddat, M., & Yamu, C. (2020). Urban digital twins for smart cities and citizens: The case study of Herrenberg, Germany. *Sustainability, 12*(6), Article 2307. https://doi.org/10.3390/su12062307

[5] Directorate-General for Employment, Social Affairs and Inclusion. (2024). *Transport poverty: Definitions, indicators, determinants, and mitigation strategies: Final report*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2767/0662480

[6] Ewing, R., & Cervero, R. (2010). Travel and the built environment: A meta-analysis. *Journal of the American Planning Association, 76*(3), 265–294. https://doi.org/10.1080/01944361003766766

[7] Farsi, M., Namoano, B., Latsou, C., Alquraan, M., Utomo, D., Taha, A., Erkoyuncu, J. A., Flynn, D., & Greening, P. (2026). A standardised digital twin design framework for transport system decarbonisation. *Sustainable Cities and Society, 149*, Article 107714. https://doi.org/10.1016/j.scs.2026.107714

[8] Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. *Journal of Transport Geography, 12*(2), 127–140. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005

[9] Ibarra Tovar, M. (2026). *Adaptación de la Guía para Planificar Ciudades Saludables en barrios urbanos vulnerables. Arco Sureste de la Ciudad de Madrid. Caso de estudio: Entrevías* [Trabajo Fin de Máster, Universidad Politécnica de Madrid].

[10] IPCC. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157926

[11] Ketzler, B., Naserentin, V., Latino, F., Zangelidis, C., Thuvander, L., & Logg, A. (2020). Digital twins for cities: A state of the art review. *Built Environment, 46*(4), 547–573.

[12] Lucas, K. (2012). Transport and social exclusion: Where are we now? *Transport Policy, 20*, 105–113. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.01.013

[13] Martens, K. (2016). *Transport justice: Designing fair transportation systems*. Routledge.

[14] Martín-Consuegra Ávila, F. (2025). Atlas of energy poverty risk in vulnerable and inefficient neighbourhoods in Madrid [Dataset]. DIGITAL.CSIC. https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/17861

[15] Martín-Consuegra, F., de Frutos, F., Hernández-Aja, A., Oteiza, I., Alonso, C., & Frutos, B. (2022). Utilización de datos catastrales para la planificación de la rehabilitación energética a escala urbana: Aplicación a un barrio ineficiente y vulnerable de Madrid. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales, 54*(211), 115–136. https://doi.org/10.37230/CyTET.2022.211.7

[16] Martín-Consuegra, F., de Frutos, F., Oteiza, I., & Hernández-Aja, A. (2018). Use of cadastral data to assess urban scale building energy loss: Application to a deprived quarter in Madrid. *Energy and Buildings, 171*, 50–63. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.007

[17] Nieuwenhuijsen, M. J. (2020). Urban and transport planning pathways to carbon neutral, liveable and healthy cities: A review of the current evidence. *Environment International, 140*, Article 105661. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105661

[18] Nussbaum, M. C. (2000). *Women and human development: The capabilities approach*. Cambridge University Press.

[19] Nussbaum, M. C. (2011). *Creating capabilities: The human development approach*. Harvard University Press.

[20] Robeyns, I. (2005). The capability approach: A theoretical survey. *Journal of Human Development, 6*(1), 93–117. https://doi.org/10.1080/146498805200034266

[21] Sen, A. (1999). *Development as freedom*. Oxford University Press.

[22] Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal, 27*(3), 379–423. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

[23] Wessel, N., Allen, J., & Farber, S. (2017). Constructing a routable retrospective transit timetable from a real-time vehicle location feed and GTFS. *Journal of Transport Geography, 62*, 92–97. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.04.012

## Fuentes de datos

[1] Comunidad de Madrid. (2025). *Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de la Comunidad de Madrid. Edición 2025*. Geoportal IDEM. https://www.comunidad.madrid/medio-ambiente/emisiones-atmosfera

[2] Consorcio Regional de Transportes de Madrid. (s. f.). Portal de datos abiertos: Redes y horarios de transporte público en formato GTFS. https://datos.crtm.es/

[3] Dirección General del Catastro. (s. f.). Sede Electrónica del Catastro: Cartografía catastral y datos alfanuméricos. Ministerio de Hacienda. https://www.sedecatastro.gob.es/

[4] Instituto Nacional de Estadística. (2023). Atlas de distribución de renta de los hogares. https://www.ine.es/

[5] OpenStreetMap contributors. (s. f.). OpenStreetMap. https://www.openstreetmap.org/

[6] URBAN3R. (s. f.). Plataforma de datos abiertos para impulsar la regeneración urbana en España. https://urban3r.es/

[7] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). Geoportal de certificados de eficiencia energética de edificios. https://edificioseficientes.gob.es/es

CONAMA 2026