

LA POBLACIÓN ESPAÑOLA EN ALTA RESOLUCIÓN

De la *grid* de 1 km × 1 km a una de
100 m × 100 m. Metodología,
análisis y aplicaciones

Francisco J. Goerlich Gisbert
Silvia Mollá Martínez

Fundación
BBVA



LA POBLACIÓN ESPAÑOLA
EN ALTA RESOLUCIÓN

La población española en alta resolución

De la *grid* de 1 km × 1 km a una de
100 m × 100 m. Metodología, análisis y
aplicaciones

Francisco J. Goerlich Gisbert
Silvia Mollá Martínez

La decisión de la Fundación BBVA de publicar el presente libro no implica responsabilidad alguna sobre su contenido ni sobre la inclusión, dentro de esta obra, de documentos o información complementaria facilitada por los autores.

No se permite la reproducción total o parcial de esta publicación, incluido el diseño de la cubierta, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión por cualquier forma o medio, sea electrónico, mecánico, reprográfico, fotoquímico, óptico, de grabación u otro sin permiso previo y por escrito del titular del *copyright*.

DATOS INTERNACIONALES DE CATALOGACIÓN

La población española en alta resolución: de la *grid* de 1 km × 1 km a una de 100 m × 100 m. Metodología, análisis y aplicaciones / Francisco J. Goerlich Gisbert, Silvia Mollá Martínez.. — 1.^a ed. — Bilbao: Fundación BBVA, 2026.

308 p. ; 24 cm

ISBN: 978-84-19751-12-6

1. Grid de población. 2. Demografía. 3. Geografía. 4. Estadística. 5. España. I. Goerlich Gisbert, Francisco José. II. Mollá Martínez, Silvia. III. Fundación BBVA, ed.

314(460)

314.42(460)

314.42+91(460)

314.42+311(460)

Primera edición, marzo 2026

© los autores, 2026

© Fundación BBVA, 2026

Plaza de San Nicolás, 4. 48005 Bilbao

IMAGEN DE CUBIERTA: © Antón PATIÑO, VEGAP, Madrid, 2026

Dados Azuis II, 2005

Pintura sobre tela

200 × 200 cm

ISBN: 978-84-19751-12-6

DEPÓSITO LEGAL: BI 00544-2026

EDICIÓN Y PRODUCCIÓN: Ibersaf Editores

COMPOSICIÓN Y MAQUETACIÓN: Ibersaf Editores

IMPRESIÓN Y ENCUADERNACIÓN: Ibersaf Editores

Los libros editados por la Fundación BBVA están elaborados sobre papel con un 100% de fibras recicladas, según las más exigentes normas ambientales europeas.

ÍNDICE

Introducción	11
1. La información de base	
1.1. La <i>grid</i> censal 2021: GEOSTAT2021.....	21
1.2. La base de datos SIOSE AR.....	23
1.3. El conjunto de datos de validación.....	33
1.4. Otra información auxiliar utilizada.....	38
1.5. <i>Software</i> utilizado.....	39
1.6. Síntesis de las fuentes de datos utilizadas.....	39
2. La distribución de la población a partir de la <i>grid</i> censal 2021	
2.1. Características básicas de GEOSTAT2021.....	44
2.2. La distribución espacial de la población a la luz de GEOSTAT2021.....	51
2.3. Concentración de la población a la luz de GEOSTAT2021...	58
2.4. Densidad desde un punto de vista económico.....	63
2.5. Conclusiones.....	69
3. Ejemplo de uso de la <i>grid</i> de población con resolución 1 km × 1 km: el grado de urbanización del territorio	
3.1. Aspectos metodológicos.....	73
3.2. Grado de urbanización de las celdas de la <i>grid</i> censal 2021 ..	82
3.3. Grado de urbanización a nivel municipal.....	88
3.4. Densidad experimentada por grado de urbanización	96
3.5. Conclusiones.....	104

4. Ejemplo de uso de la <i>grid</i> de población con resolución 1 km × 1 km: el desempeño de la red de transporte por carretera	
4.1. Aspectos metodológicos.....	109
4.2. Resultados a nivel de <i>grid</i>	116
4.3. Resultados a nivel regional y por grado de urbanización.....	121
4.4. Conclusiones.....	130
5. Cómo mejorar la resolución espacial: de la <i>grid</i> de referencia de 1 km × 1 km a una <i>grid</i> de alta precisión de 100 m × 100 m	
5.1. Desagregación espacial de la población: una revisión de la literatura.....	135
5.2. Procesado inicial de la información.....	145
5.3. Métodos de desagregación.....	169
6. Ejemplo de uso de la <i>grid</i> de población con resolución 100 m × 100 m: accesibilidad de la población a áreas verdes en ciudades seleccionadas	
6.1. Ciudades seleccionadas.....	189
6.2. Flujo de trabajo: cómo medir la accesibilidad a los espacios verdes urbanos.....	193
6.3. Resultados.....	196
6.4. Conclusiones.....	206
7. Ejemplo de uso de la <i>grid</i> de población con resolución 100 m × 100 m: indicadores de accesibilidad saludable en ciudades seleccionadas	
7.1. Aspectos metodológicos.....	209
7.2. Ciudades seleccionadas.....	212
7.3. Movilidad activa: accesibilidad y rendimiento de los desplazamientos a pie y en bicicleta.....	226
7.4. Conclusiones.....	230

8. Resumen y conclusiones: usos potenciales.....	231
Apéndices.....	239
A.1. El modelo de datos de SIOSE AR.....	241
A.2. El conjunto de datos de validación.....	246
A.3. Cuadros del capítulo 2 a nivel provincial.....	256
A.4. Cuadros del capítulo 3 a nivel provincial.....	261
A.5. Análisis de sensibilidad de los cálculos de accesibilidad de la población a las zonas verdes del capítulo 6.....	274
Bibliografía.....	277
Índice de cuadros.....	289
Índice de gráficos, esquemas y figuras.....	291
Índice de mapas.....	295
Índice alfabético.....	297
Nota sobre los autores.....	307

Introducción

Para conocer un territorio, es necesario contar con instrumentos que nos permitan un acercamiento a la realidad, y, en este sentido, el primero de los instrumentos necesarios para el análisis y comprensión de una realidad cambiante y compleja es una base cartográfica.

INE (1994)

EL interés por representar sobre un mapa la distribución espacial de la población se remonta al propio desarrollo de la cartografía (Reher 2006). Esta monografía simboliza un modesto paso más en esa dirección. En concreto, en un aumento notable de la resolución con la que dicha distribución espacial de la población residente en España puede ser representada sobre un mapa.

Tradicionalmente la distribución de la población es dibujada en términos de un mapa de coropletas, en el que cada unidad administrativa representa, mediante un código o escala de colores, el valor de la densidad de población de dicha área. Es decir, el valor representado está escalado por la superficie de la unidad administrativa en cuestión, ya se trate, por ejemplo, de provincias o municipios. Este cálculo, aparentemente inocuo, es equivalente a suponer una distribución espacial uniforme de la población sobre el área representada, o lo que es lo mismo, a repartir la población de forma homogénea sobre la unidad administrativa a la que hace referencia la cifra de población puesta sobre el mapa.

La razón es sencilla. Las estadísticas demográficas, y socioeconómicas en general, se recogen a partir de la estructura administrativa del Estado, por ejemplo, los municipios o las secciones censales, y estas son las unidades básicas de recogida y clasificación de la información estadística de carácter demográfico y socioeconómico.

Sin embargo, desde el punto de vista geográfico-estadístico, es bien conocido que la división del territorio es relevante para un tema particular si las áreas que constituyen la partición son homogéneas, o cumplen una determinada función, para el problema que deseamos investigar (Vidal, Gallego y Kayadjanian 2001). No hay una partición geográfica uniformemente mejor para todas las situaciones. Sin embargo, la captación de estadísticas demográficas y socioeconómicas parte de áreas administrativas predefinidas, organizadas según una estructura jerárquica, y no relacionadas directamente con los problemas que se pretenden analizar, sino más bien con la estructura de toma de decisiones política.

Este problema es más evidente cuando analizamos variables climáticas o medioambientales, en las que las zonas homogéneas o funcionales de análisis tienen claramente que ver con características geográficas o relacionadas con el paisaje: cortes altimétricos, coberturas del suelo, zonas climáticas homogéneas o cuencas hidrográficas, por ejemplo; pero subsiste igualmente en el caso de variables demográficas o socioeconómicas. Así pues, si deseamos analizar la distribución de la población a partir de datos municipales deberíamos preguntarnos sobre la homogeneidad de los municipios para este fin. Sabemos, sin embargo, que los municipios españoles tienen un grado considerable de heterogeneidad, pues su estructura ha sido determinada por razones históricas y sus delimitaciones no responden necesariamente a criterios relacionados con la distribución de la población sobre el territorio, sino más bien a criterios de conveniencia administrativa y voluntad política (Rodríguez, Astudillo y Martín-Asín 1997; Capdevila i Subirana 2009). Uno de los problemas más graves en este sentido es la presencia de algunos términos municipales muy grandes, que conviven con algunos de tamaño ridículo.

Por otra parte, la población no es una variable espacialmente continua. No observamos población residente en todos los puntos del espacio, al contrario de lo que sucede con la temperatura o la presión atmosférica, y esta característica, esencial en el análisis de la distribución espacial de la población, no es en absoluto evidente a partir de los mapas de coropletas de las densidades de población sobre áreas administrativas (Schmid y MacCannell 1955).

Así pues, un examen detallado de la distribución de la población sobre el territorio exige, entre otras cosas, superar de alguna forma el rígido marco de los lindes administrativos (Muguruza y Santos 1989). La superación de estos lindes se hace todavía más necesaria cuando se desea integrar datos demográficos y socioeconómicos con datos geográficos o medioambientales, recogidos en muchas ocasiones en formato de rejilla —*grid*—, o ráster utilizando la terminología de los Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés¹, Geographic Information System).

Conscientes de esta problemática, Eurostat puso en marcha hace tiempo el proyecto de obtener cifras de población, a nivel europeo, sobre la base de una *grid* con resolución de celdas de 1 km × 1 km y un sistema de referencia geodésico común (INSPIRE 2023a), en lugar de sobre la base territorial tradicional basada en las regiones (NUTS, Nomenclature of Territorial Units for Statistics) y los municipios (LAU, Local Administrative Units). Las *grids* tienen la enorme ventaja de, una vez normalizadas (INSPIRE 2023a), ser invariantes en el tiempo, al contrario que las unidades administrativas, que pueden desaparecer, crearse o modificar sus límites. Después de algunas pruebas a partir del censo de 2001 (Gallego y Peedell 2001; Gallego 2010), en el contexto de la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA), Eurostat logró publicar la primera *grid* de población europea con resolución de celdas de 1 km × 1 km con fecha de referencia 2006, conocida como GEOSTAT2006 (Eurostat 2024a). Naturalmente dicha *grid* incluía los datos para España. Para nuestro país, se trataba de una *grid* estimada a partir de los datos de población de las secciones censales combinando criterios estadísticos con operaciones relacionadas con los Sistemas de Información Geográfica y utilizando el Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España (SIOSE) como información auxiliar (Goerlich y Cantarino 2012, 2013a)². Es lo que se llama una *grid* de arriba a abajo —*top-down*—.

¹ Por lo general, los acrónimos utilizados en el texto se corresponden a su original en inglés, por la internacionalización de su uso y para evitar equívocos.

² Esta *grid* no fue producida por el Instituto Nacional de Estadística (INE), sino por la Universidad de Valencia y la Universidad Politécnica de Valencia, aunque los datos estadísticos son propiedad del INE (Eurostat 2024c) y solo está disponible en el GISCO de Eurostat.

No era una *grid* perfecta, pero representaba una contribución importante en lo que hace referencia a la localización espacial de la población en nuestro país.

A partir de entonces el compromiso de Eurostat fue publicar dicha información al menos en los años censales e ir aumentando el número de variables a ofrecer en dicho formato. Se trataba de un paso importante en el movimiento hacia lo que podríamos denominar una estadística de puntos. Si logramos georreferenciar las unidades básicas de información estadística —personas y edificios con sus correspondientes atributos— entonces sería posible una agregación espacial flexible a áreas de interés definidas por el usuario, o por la oficina de estadística en la difusión de estas. A estas alturas del siglo XXI Google Maps debe habernos convencido ya de las múltiples ventajas de la geolocalización, no solo en la vida diaria, sino también en la vida estadística. La directiva comunitaria *Infrastructure for Spatial Information in Europe*, INSPIRE, (Comisión Europea 2024) está inspirada en esta filosofía.

En consecuencia, a GEOSTAT2006 le siguió GEOSTAT2011 producida ya, para España, por el INE a partir del censo de 2011, y disponible tanto en el sitio web del INE como en el de Eurostat, aunque con algunas diferencias entre ambos productos finales. En teoría se trata de una *grid* construida de abajo a arriba —*bottom-up*—, a partir de la geocodificación de los edificios residenciales y la localización en los mismos de la población. Sin embargo, esto no es exactamente cierto (Goerlich 2024b). Las peculiares características del censo de 2011 en España (Goerlich *et al.* 2015), un censo de transición entre los métodos clásicos y los basados en registros administrativos, combinando un registro de población —el padrón— con una muestra de amplio espectro y cobertura, tuvo sus efectos sobre la metodología de esta *grid*, lo que sin duda afectó a la calidad del producto final (Goerlich y Cantarino 2014, 2015, 2017).

Como el tiempo entre dos censos era excesivo para la velocidad de los cambios del mundo real, la DG-REGIO decidió actualizar GEOSTAT2011 a fecha de referencia 2018 por métodos dasimétricos (Eicher y Brewer 2001), partiendo de la propia GEOSTAT2011 y cualquier otra información relevante que pudiera existir (Batista e Silva 2021). Este es el origen de GEOSTAT2018, producida por el Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea

a petición de la DG-REGIO y con la colaboración de Eurostat. Para España esta *grid* hereda, en gran parte, las características metodológicas de GEOSTAT2011³.

Con ocasión del censo de 2021 el INE publicó en su sitio web la *grid* censal con resolución de celdas de 1 km × 1 km y fecha de referencia la del censo, 1 de enero de 2021. Una vez completada la transición por parte del INE a un censo de registros administrativos, así como la geocodificación de los edificios residenciales en base a la información catastral, podemos considerar que esta *grid* es realmente *bottom-up*. Esta es la estadística básica de partida en este trabajo, procedente de la descarga del sitio web del INE.

Así pues, una vez completados los censos europeos de 2021 Eurostat ha publicado GEOSTAT2021, en realidad con el nuevo nombre de *Eurostat Census Grid 2021*⁴. Para España esta *grid* está producida por el INE, de forma que GEOSTAT2021 está disponible tanto en el sitio web del INE como en el GISCO de Eurostat. Al igual que sucedió con GEOSTAT2011 hay algunas diferencias entre ambos productos finales según descarguemos los datos del INE o de Eurostat⁵.

GEOSTAT2021 incluye, como novedad importante, variables adicionales más allá del total de población por celda, en concreto la clasificación por sexo, grandes grupos de edad, personas

³ Aunque para Andalucía se mejora sustancialmente la calidad gracias a la colaboración del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (IECA). Al igual que sucede con GEOSTAT2006, esta *grid* no fue producida por el INE y solo está disponible en el GISCO de Eurostat.

⁴ En el momento de escribir estas líneas (septiembre 2024), en Eurostat existen dos versiones de la *grid* para 2021, una primera versión, provisional (publicada el 13 de marzo de 2023), y una segunda versión, definitiva (publicada el 16 de junio de 2024). Para el caso de España, ambas *grids*, provisional y definitiva, difieren de forma relevante en el número de celdas habitadas (Goerlich 2024b, nota al pie 18). El INE solo ha hecho pública una *grid*, con carácter definitivo, a finales de enero de 2024.

⁵ En concreto, la *grid* disponible en el sitio web del INE para 2021 es exacta, en el sentido de que las cifras de población por celda no están perturbadas y suman exactamente la población del censo 2021, mientras que la versión definitiva de GEOSTAT2021 disponible en Eurostat está perturbada aleatoriamente en una pequeña cantidad —entre 1 y 3 habitantes— para preservar la confidencialidad, aunque el proceso conserva la característica de celda poblada/no poblada con la ayuda de una variable auxiliar. Para GEOSTAT2011 la situación era exactamente la contraria. Los datos de este trabajo proceden de la descarga de la información del sitio web del INE.

empleadas⁶, país de nacimiento a tres niveles y variables relacionadas con la movilidad, también a tres niveles. Esta información adicional solo está disponible en Eurostat⁷, mientras que el INE únicamente ofrece en el momento de escribir estas líneas, con esta resolución, el total de población por celda.

Puesto que con el censo 2021 el INE ha dado paso a los llamados censos anuales quizá dispongamos en el futuro cercano, para España, de una *grid* de población con carácter anual, pero de momento esta operación estadística no está entre las ofrecidas por el INE.

Sin duda, ampliar el espectro de variables en este formato supone un logro considerable por parte de Eurostat y una mejora notable en la información disponible para los usuarios. Representa, además, un paso importante en la georeferenciación de las estadísticas. Sin embargo, entre los objetivos de Eurostat no figuraba, al menos de forma explícita, el aumento en la resolución espacial de la información, y ello es necesario en estudios urbanos o de carácter local⁸. El sistema de información en formato *grid* de Eurostat (2024b) ofrece otras resoluciones diferentes a las de la *grid* de referencia europea, con tamaño de celdas de 1 km × 1 km, pero en todos los casos la resolución ofrecida es menor⁹.

El objetivo fundamental de esta monografía es precisamente mejorar la resolución de GEOSTAT2021 para el caso español y aumentar notablemente la escala, pasando de las celdas originales de 1 km × 1 km a celdas de 100 m × 100 m. Naturalmente la nueva *grid* deberá ser consistente con los estándares europeos (INSPIRE 2023a) y la *grid* de partida, de forma que agregará, de forma natural, a los datos publicados por el INE, tanto desde el punto de vista espacial como desde el punto de vista de las cifras de población.

⁶ El suministro a Eurostat de esta variable por parte de los institutos oficiales de estadística es voluntario, pero para España esta variable está completada.

⁷ Cada variable está sujeta a la perturbación aleatoria que hemos indicado anteriormente.

⁸ De hecho, GEOSTAT2018, producida por el JRC existe con una resolución de celdas de 100 m × 100 m, aunque no es pública (Batista e Silva, Poelman y Dijkstra 2021). No es este el único intento por parte de las instituciones europeas de disponer de una *grid* de población de alta resolución —celdas de 100 m × 100 m— con el fin de llevar a cabo estudios urbanos (Freire *et al.* 2015; Freire y Halkia 2015).

⁹ En concreto, partiendo de las celdas de 1 km × 1 km se ofrecen agregaciones a celdas cuadradas de 2 km, 5 km, 10 km, 20 km, 50 km y 100 km de lado.

Adicionalmente, la monografía ofrece una serie de aplicaciones, tanto de la *grid* original, con celdas de 1 km × 1 km, como de la *grid* estimada, con celdas de 100 m × 100 m, que ilustran la potencialidad de este formato de información. La monografía va acompañada de la base de datos¹⁰ de la *grid* de población estimada con resolución 100 m × 100 m, que incluye dos ficheros: uno con el identificador de cada una de las celdas de 100 m × 100 m habitadas de acuerdo con la normativa INSPIRE y la población que en ella habita, y otro con la geometría espacial de cada celda con población. A continuación, ofrecemos el avance de contenidos de la monografía.

Plan del estudio

El capítulo 1 tiene un enfoque metodológico y describe con detalle la información de base utilizada. Además de la *grid* censal 2021, proporcionada por el INE, la monografía manipula abundante información auxiliar tanto para la estimación de la desagregación de la *grid* censal como en las distintas aplicaciones prácticas desarrolladas.

El capítulo 2 describe en detalle la distribución espacial de la población a nivel nacional a partir de GEOSTAT2021, la *grid* censal 2021 de 1 km × 1 km, que constituye la base sobre la que se realiza la estimación. Aunque la distribución de la población es bien conocida a partir de datos municipales (Goerlich y Mollá 2021), no lo es tanto a partir de datos en *grid*, por lo que resulta natural empezar la monografía con esta aplicación. La disponibilidad de información demográfica independiente de los lindes administrativos, y el hecho de disponer de una variable que carece de continuidad desde el punto de vista espacial, provoca que el concepto tradicional de densidad deba ser revisado, y su medición, en este nuevo contexto, resulta desafiante.

Los dos capítulos siguientes, 3 y 4, ofrecen dos aplicaciones de la *grid* original con resolución de celdas de 1 km × 1 km. En primer lugar, el capítulo 3 ofrece una clasificación del grado de urbanización (DEGURBA), tanto a nivel de celda como a nivel municipal,

¹⁰ Puede acceder a la base de datos en <https://www.fbbva.es/bd/grid-de-la-poblacion-espanola-100m-x-100m>

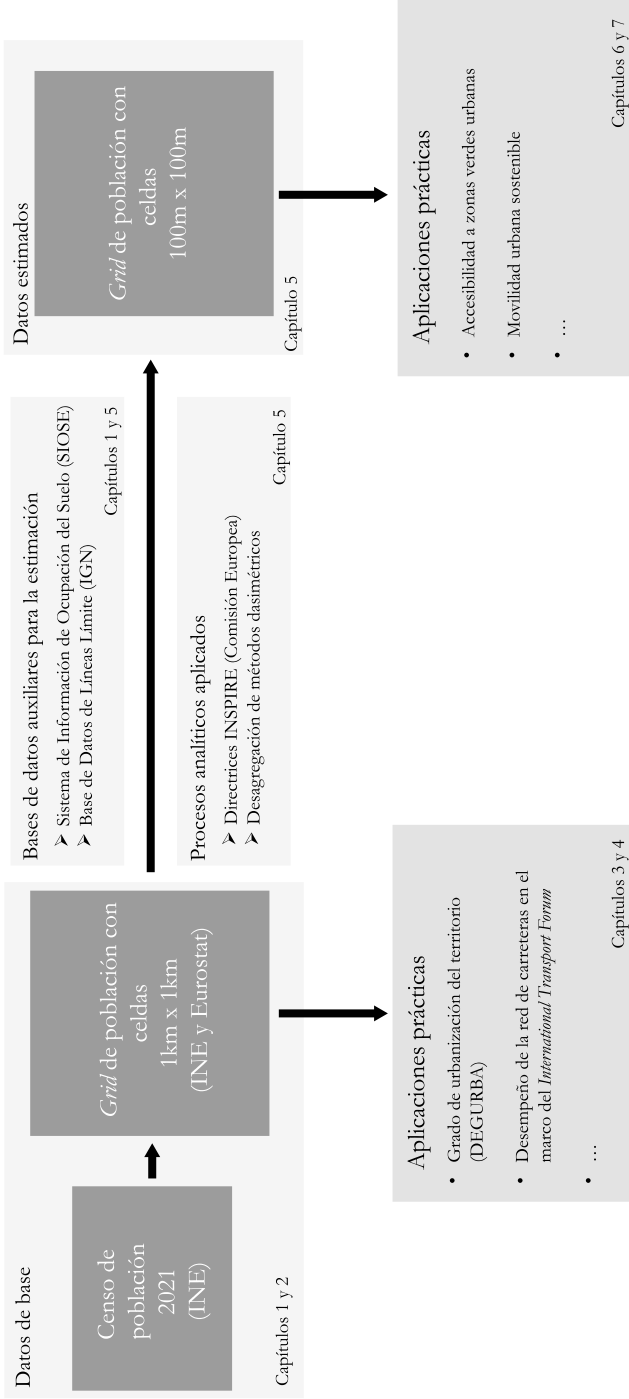
utilizando criterios Eurostat (2021), que partiendo de una *grid* de población con esta resolución se ha convertido en el estándar de comparación internacional. En segundo lugar, el capítulo 4 elabora indicadores de accesibilidad por carretera en el marco conceptual del International Transport Forum (ITF 2019a, 2019b). Se trata de indicadores novedosos, construidos para el conjunto nacional a nivel de *grid* de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, y que requieren de un importante volumen de computación.

El capítulo 5 constituye el núcleo central de la monografía, la desagregación de la *grid* original, con resolución de celdas de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, a una *grid* con resolución de celdas de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$. Desde el punto de vista espacial ello implica aumentar la resolución de la información por 100 y el número de celdas habitadas por un factor algo superior a 11. El capítulo describe en detalle la metodología, realiza una validación de los resultados finalmente obtenidos y muestra el detalle espacial de la información resultante.

Los dos capítulos siguientes, 6 y 7, presentan dos aplicaciones en el mundo urbano de la *grid* estimada, con resolución de celdas de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, para determinadas ciudades seleccionadas. La resolución de esta información hace inviables ejercicios nacionales, siendo necesario acotar el espacio sobre el que realizar el análisis. El capítulo 6 presenta un ejercicio de accesibilidad de la población a zonas verdes urbanas, mientras que el capítulo 7 adapta el marco conceptual del ITF (2019a, 2019b) a modos urbanos de movilidad activa —bajos en emisiones de carbono—, como son los desplazamientos de corta distancia andando o en bicicleta. Estas medidas de accesibilidad intraurbana nos hablan, al mismo tiempo, de la densidad económica y las diferentes oportunidades dentro de las ciudades. En ambos casos, una característica de estas aplicaciones, y también las de la *grid* original, es que los cálculos se efectúan a nivel de celda, de forma que admiten una agregación flexible por áreas de interés.

Un capítulo final resume la monografía y ofrece unas breves conclusiones, cuya principal aportación es la disponibilidad de una *grid* de población de alta resolución —celdas de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ — plenamente consistente con GEOSTAT2021. La metodología desarrollada es plenamente aplicable siempre que se actualice la información auxiliar, y los procesos de cálculos son fácilmente replicables. El esquema 1 resume el plan del estudio.

ESQUEMA 1: Estructura y contenido de la monografía



Fuente: Elaboración propia.

1. La información de base

Este capítulo tiene un enfoque metodológico y describe, con cierto detalle, toda la información utilizada en el trabajo. Tanto las bases de datos esenciales —apartados 1.1 a 1.3—, como otra información secundaria utilizada en algún momento —apartados 1.4 y 1.5—. La *grid* de población de partida utilizada en el proceso de desagregación, con resolución de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, es analizada exhaustivamente en el capítulo siguiente, dada su importancia desde el punto de vista de la distribución de la población, además de constituir el *input* básico sobre el que descansa el proceso de desagregación a la *grid* de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$.

1.1. La *grid* censal 2021: GEOSTAT2021

Con ocasión del censo 2021, y por mandato de Eurostat (Unión Europea 2018), el Instituto Nacional de Estadística (INE) publicó, a finales de enero de 2024 (INE 2024), la población por celda sobre una *grid* regular de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ de acuerdo con las especificaciones de la Directiva Comunitaria INSPIRE (2023a). De esta forma se dispone de una distribución de la población independiente de los límites administrativos, lo que constituye una forma mucho más realista de examinar el asentamiento de la población sobre el territorio.

La información publicada es un simple fichero Excel —o alternativamente de texto— con solo dos variables, el código estandarizado de celda y la población asociada. La población suma el total de la población del censo —47.400.798 residentes— y es la única variable ofrecida por el INE en este formato¹¹. Esta es la

¹¹ Eurostat distribuye, sin embargo, otras variables demográficas en este formato: sexo, grandes grupos de edad, lugar de nacimiento, lugar de residencia un año antes del censo 2021 y empleo. Esta información no será utilizada en el presente trabajo, pero podría ser desagregada a una *grid* de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ utilizando métodos similares a los propuestos en esta monografía.

información esencial del trabajo. Si Goerlich y Cantarino (2012, 2013a) desagregaron la población de las Secciones Censales a la *grid* estándar europea, este trabajo desagrega espacialmente la *grid* censal 2021 del INE a una *grid* con resolución de 100 m × 100 m de acuerdo con las directrices de INSPIRE (2023a). Una mayor resolución es esencial para trabajos de ámbito local y/o urbanos.

Adicionalmente, el INE incluye un fichero vectorial con la cartografía de las celdas habitadas¹². Dicha cartografía no fue utilizada en el trabajo, la empleada procede de Goerlich (2024a), que cubre todo el territorio nacional, 511.294 celdas.

La *grid* censal 2021 publicada por el INE, a la que nos referiremos a lo largo del trabajo como GEOSTAT2021¹³, tiene 115.410 celdas habitadas, lo que significa que solo el 22,6 % del territorio está ocupado por población residente a esta escala¹⁴.

Las características de GEOSTAT2021 y la distribución actual de la población en este formato serán objeto de un análisis exhaustivo en el capítulo siguiente.

¹² La cartografía se ofrece en el sistema de referencia de coordenadas (CRS) ETRS89-UTM30N, que no se ajusta a las especificaciones INSPIRE (2023a), ya que la *grid* de referencia europea debe estar en el sistema de referencia de coordenadas (CRS) ETRS89-LAEA.

¹³ Esta ha sido la terminología utilizada por Eurostat para referirse a esta estadística. Así, disponemos de GEOSTAT2006, GEOSTAT2011 y GEOSTAT2018, si bien con ocasión del censo 2021 parece haber cambiado la denominación a *Census grid 2021*.

¹⁴ Es cierto que, con anterioridad a que el INE publicara la población censal en formato de *grid* en su sitio web, dicho organismo suministró al GISCO de Eurostat una versión provisional de la *grid* con la que el instituto europeo compiló una *grid* provisional, versión V1-0, para todos los países de la Unión Europea (UE), y que hizo pública con fecha 13/03/2023. En la *grid* provisional ofrecida por Eurostat no hay posibilidad de conocer —en la tabla de datos— las celdas de cada país. La información difundida solo incluye el identificador de celda y el total de población por celda, no hay identificador de unidad administrativa, por lo que no es posible saber a qué país o región pertenece cada celda. Sin embargo, dichas celdas pueden ser extraídas, de forma aproximada, mediante una consulta espacial sobre el total de celdas del territorio nacional (Goerlich 2024a). Dicha consulta espacial arrojó 95.734 celdas habitadas con una población de 47.428.082 habitantes, ligeramente superior a la ofrecida por el censo 2021 —47.400.798 personas—. Algo de experimentación inicial con la versión provisional de la *grid* suministrada por el INE al GISCO de Eurostat muestra que ambas *grids*, la provisional —no disponible en el sitio web del INE— y la definitiva —utilizada en este trabajo— son sustancialmente diferentes en algunos aspectos. Las razones son un misterio, pero probablemente tienen que ver con el proceso de geocodificación de las viviendas principales.

1.2. La base de datos SIOSE AR

La *grid* censal 2021, GEOSTAT2021, constituye el *input* básico en el proceso de desagregación de la población descrito en el capítulo 5. Pero si queremos ganar precisión en la localización de la población, dentro de cada celda de 1 km × 1 km, debemos utilizar información auxiliar que nos permita acotar dónde reside la población y transferir la información entre diferentes sistemas zonales (Goerlich 2023a).

Al igual que en Goerlich y Cantarino (2012, 2013) la información auxiliar procede del Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España (SIOSE), una potente fuente de información sobre coberturas y usos del suelo con una resolución extremadamente elevada.

El SIOSE es un proyecto cooperativo entre el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y las comunidades autónomas (CC. AA.), que se enmarca en el Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT) del IGN. Se trata, en última instancia, de una base de datos geográfica, que divide el territorio en polígonos —geometrías— sobre los que se ofrece información individualizada sobre sus coberturas y usos —información temática sobre cada polígono—.

La mayoría de los sistemas de información sobre ocupación del suelo utilizados en el análisis territorial se basan en clasificaciones fijas y asignación de cada polígono en que se divide el territorio, según unos determinados criterios de homogeneidad, a una sola clase a partir de una serie de reglas. Esta es la filosofía seguida por Corine Land Cover (CLC), la fuente de información de referencia sobre ocupación del suelo en el ámbito europeo: dadas 44 clases, al máximo nivel de desagregación, cada polígono pertenece a una, y solo a una, clase. Se trata de esta forma de un modelo jerárquico de asignación unívoca. Por el contrario, en SIOSE subyace un modelo de datos con filosofía de orientación a objetos. Ello permite, a partir de dos entidades fundamentales: el polígono y un listado inicial de coberturas y usos, describir las coberturas y usos presentes dentro de cada polígono. El objetivo final de la base de datos no es clasificar los polígonos, sino describirlos de acuerdo con una serie de relaciones, reglas de consistencia

y atributos. SIOSE, por tanto, no clasifica los polígonos en función de una nomenclatura, sino que posibilita la asignación de una o varias coberturas y usos del suelo a un único polígono, mediante porcentajes de ocupación y atributos. Se trata de una información mucho más compleja que las clasificaciones temáticas tradicionales, pero al mismo tiempo mucho más versátil y abierta, ya que es el investigador, en función de sus propias necesidades el que debe diseñar la nomenclatura que necesita en cada caso concreto.

Las bases de datos SIOSE producidas entre 2005 y 2014 adoptaban una escala cartográfica 1:25.000 y una unidad mínima cartografiable (MMU) que oscilaba entre las 0,5 y las 2 hectáreas (ha), según la cobertura¹⁵. En la práctica, el territorio nacional se dividía en unos 2,5 millones de polígonos, cada uno con su descripción en términos de porcentajes de ocupación de una determinada cobertura a partir de un listado de 40 coberturas simples, algunas de las cuales podían incluir atributos. Este descriptor es lo que se denomina el rótulo SIOSE. El modelo de datos inicial también incluía coberturas compuestas predefinidas. Se trataba de un tipo especial de coberturas a las que se les asignaba un nombre identificativo por su representatividad en el territorio y que, en cierta forma, pretendía ser una aproximación a los usos del territorio.

La última versión disponible de la base de datos SIOSE, fechada en 2017 y conocida como Sistema de Información del Suelo de España de Alta Resolución (a la que nos referiremos a lo largo del trabajo como SIOSEAR2017), supone dos cambios sustanciales respecto a las bases de datos anteriores¹⁶. En primer lugar, se produce un incremento sustancial en la resolución espacial. La unidad básica de partida del SIOSE AR, sobre la que se elabora la información del rótulo SIOSE, es la parcela catastral. De esta forma se abandona el concepto de unidad mínima cartografiable. En cierta forma podríamos decir que SIOSE AR es un catastro

¹⁵ El SIOSE original está bien descrito en la información técnica del proyecto, SIOSE (2011a, 2011b, 2011c, 2015). Una versión resumida de las principales características técnicas puede consultarse en Goerlich y Cantarino (2012, cap. 5 y apéndice A.2).

¹⁶ Estas son las diferencias perceptibles por el usuario. Desde el punto de vista de la producción también hay diferencias importantes, en la medida en que trata de producirse mediante la integración automática de procesos a partir de diferentes fuentes oficiales, con una menor carga de trabajo manual.

temático. La versión de 2017 contiene unos 110 millones de polígonos sobre los que se describe con detalle su cobertura, lo que da idea de la resolución espacial de la base de datos. El cuadro 1.1 ofrece el número de polígonos de cada una de las tablas básicas de SIOSEAR2017 que se describen más adelante, lo que permite tomar conciencia del detalle de la información ofrecida: el número de registros, a nivel nacional, por tabla oscila entre algo más de los 50 millones y los más de 150 millones.

CUADRO 1.1: Número de polígonos en las tablas básicas de SIOSEAR2017

Comunidad autónoma		Tabla			
Código	Nombre	T_POLIGONOS	T_USOS	T_COMBINADA	T_VALORES
01	Andalucía	13.613.476	5.355.304	7.345.851	17.357.303
02	Aragón	7.230.408	2.990.281	4.147.365	9.182.578
03	P. de Asturias	2.969.676	1.857.824	1.412.620	4.778.933
04	Illes Balears	1.846.115	583.008	1.214.923	2.104.613
05	Canarias	2.694.144	1.337.578	1.443.688	3.462.296
06	Cantabria	1.866.498	806.338	1.073.966	2.483.434
07	Castilla y León	16.750.066	10.878.473	6.773.906	22.451.798
08	Castilla-La Mancha	11.063.657	5.645.326	5.089.012	15.013.817
09	Cataluña	8.445.852	3.041.369	5.090.047	12.248.719
10	C. Valenciana	10.388.993	3.685.901	6.668.244	12.796.147
11	Extremadura	4.255.679	1.838.938	2.290.470	5.662.299
12	Galicia	18.162.498	13.033.204	6.392.780	30.796.876
13	C. de Madrid	2.648.612	1.147.901	1.328.842	3.921.449
14	Región de Murcia	2.412.882	937.617	1.508.694	2.908.436
15	C.F. de Navarra	2.050.361	1.082.185	1.190.452	2.586.865
16	País Vasco	2.295.916	823.627	1.418.097	2.580.687
17	La Rioja	1.347.771	837.489	586.654	1.711.490
18	C. a. de Ceuta	15.629	8.563	8.510	21.564
19	C. a. de Melilla	19.194	10.961	9.337	28.555
20	Posesiones Africanas	139	51	139	160
Total		110.077.566	55.901.938	54.993.597	152.098.019

Fuente: SIOSE (2022a) y elaboración propia.

En segundo lugar, se produce una modificación importante en el modelo de datos. Desaparecen las coberturas compuestas predefinidas, y se adopta un modelo de datos más detallado,

que diferencia entre coberturas y usos, derivado de las recomendaciones de la Directiva Comunitaria INSPIRE sobre la cubierta terrestre (INSPIRE 2013) y los usos del suelo (INSPIRE 2023b). El rótulo SIOSE, ya sea para coberturas o para usos, se elabora a partir de un listado normalizado a nivel europeo sobre coberturas y usos en función de los porcentajes de ocupación.

La base de datos SIOSE AR se distribuye por provincias¹⁷, más un fichero de posesiones africanas¹⁸, con lo que en total disponemos de 53 ficheros. Su estructura consta de 4 tablas básicas: T_POLIGONOS, T_USOS, T_COMBINADA y T_VALORES¹⁹, que describimos brevemente a continuación.

- T_POLIGONOS es la tabla de geometrías de coberturas²⁰. Existen un total de 65 coberturas²¹ descritas en la tabla A.1.1 del apéndice A.1, junto con la superficie de cada una de ellas a nivel nacional, tanto en km² como en porcentaje respecto al total nacional. Algunas de estas coberturas pueden llevar atributos, descritos en la tabla A.1.2 del apéndice A.1. Por ejemplo, si EDF es una cobertura de edificación, EDFec es una edificación en construcción.

La geometría de esta tabla lleva asociado un gran número de atributos (SIOSE 2022a), tanto de identificación geográfica —provincia, municipio²² o referencia catastral— como de las coberturas presentes en cada polígono e información asociada a dichas coberturas. El campo básico de esta tabla es el ROTULO que describe la cobertura del polígono mediante una combinación

¹⁷ En dos formatos: GeoPackage y Geodatabase de ESRI.

¹⁸ El fichero de posesiones africanas incluye también la Isla de Alborán, que pertenece a la provincia de Almería.

¹⁹ Además de estas 4 tablas existe la denominada TABLA_PLANA, una tabla alfanumérica, que contiene todos los rótulos SIOSE diferentes de coberturas existentes con el porcentaje de ocupación correspondiente a cada una de ellas.

²⁰ Se mantiene este nombre, probablemente, por consistencia con las bases de datos SIOSE anteriores, puesto que un nombre más apropiado, dentro del modelo de datos de SIOSE AR, sería T_COBERTURAS.

²¹ En la práctica 64, puesto que la cobertura de Mares y océanos —AMO— existe porque los polígonos que lindan con el mar tienen un buffer marino con esta cobertura, pero naturalmente no forman parte de las coberturas del territorio nacional terrestre.

²² La codificación de municipios procede del SIGPAC, y no de la codificación oficial del INE.

de las etiquetas de coberturas —tabla A.1.1—, sus atributos —tabla A.1.2— y porcentajes de ocupación.

Si el polígono solo tiene una cobertura el rótulo coincide con la etiqueta. Así, por ejemplo, si el rótulo es CHE ello significa que dicho polígono tiene una cobertura del 100 % de Cultivos herbáceos (CHE). Naturalmente, disponemos de la superficie del polígono, en m², en el campo SUPERF_M2²³.

Si el polígono tiene varias coberturas entonces encontraremos una combinación de etiquetas de coberturas —tabla A.1.1—, quizá con atributos —tabla A.1.2— y porcentajes de ocupación delante de cada etiqueta de cobertura. Las coberturas se describen de mayor a menor porcentaje de ocupación. Así, por ejemplo, 66PAV_34EDF significa que la cobertura de dicho polígono es del 66 % de Zonas pavimentadas o selladas (PAV) y del 34 % de Edificación (EDF). Es posible incluir atributos, por ejemplo, 70FDPpl_30CNFpl significa una cobertura del 70 % de Frondosas perennifolias (FDP) con atributo *en plantación* (pl) y un 30 % de Coníferas (CNF) con atributo *en plantación* (pl).

Los atributos no tienen por qué ser únicos, por ejemplo, ARBfrpl significa un polígono con el 100 % de *Arbolado* (ARB) con atributos *formación en ribera* (fr) y *en plantación* (pl)²⁴. Las etiquetas de coberturas siempre constan de 3 caracteres²⁵, los atributos de 2 y los porcentajes de ocupación de 2 dígitos. Naturalmente dichos porcentajes deben sumar 100.

Muchos campos ofrecen información adicional sobre las coberturas. Por ejemplo, TIPO nos indica el tipo de parcela en Catastro —rústica, urbana, diseminada o dominio público— o LIDAR_HMEAN_EDF la altura media de las edificaciones dentro del polígono según LIDAR (Goerlich 2023b).

La figura 1.1 visualiza la capa T_POLIGONOS en un contexto urbano, la zona del Parque del Retiro y el Paseo del Prado de Madrid. La figura 1.2 visualiza la misma capa, T_POLIGONOS, en un contexto rural, la zona norte de la provincia de Madrid,

²³ Las superficies vienen calculadas en las tablas de atributos de las capas de geometría, y están calculadas en la proyección de distribución del fichero.

²⁴ La existencia de un ROTULO determinado puede comprobarse en la TABLA_PLANA.

²⁵ Las etiquetas de coberturas tienen, además, un identificador numérico de 3 dígitos.

entre los municipios de Navarredonda y San Mamés (con código de municipio del INE 28097) y Villavieja del Lozoya (28182). En ambos casos se aprecia el elevado detalle geográfico de la información, tanto en el contexto urbano, donde el tamaño de los polígonos es muy reducido, como en el ámbito rural, en el que es posible identificar las construcciones aisladas.

- T_USOS es la tabla de geometrías de usos. Existen un total de 86 usos descritos en la tabla A.1.3 del apéndice A.1. Los usos proporcionan cierta información económica, y complementan la información sobre coberturas de forma muy relevante. Un edificio puede tener uso residencial, agrícola o industrial.

En principio, la geometría de los polígonos de T_USOS coincide con la parcela catastral y esta capa dispone de un identificador único, ID_PARCELA, que permite relacionarla con T_POLIGONOS, de forma que no son capas independientes. El uso de un polígono se corresponde a una parcela catastral, y este uso debe estar cubierto en su totalidad por coberturas en una relación 1 a muchos a partir del identificador ID_PARCELA. No existen solapes entre geometrías de coberturas ni entre geometrías de usos. Además, un polígono de cobertura no puede estar en dos usos. Esta es básicamente la razón por la que existen muchos menos polígonos de usos que de coberturas —cuadro 1.1—.

Al igual que sucede con la capa de coberturas, la geometría de esta figura lleva asociada ciertos atributos (SIOSE 2022a), tanto de identificación geográfica —provincia, municipio o referencia catastral— como de los usos presentes en cada polígono. Al igual que antes, el campo básico de esta tabla es el ROTULO que describe el uso del polígono mediante una combinación de las etiquetas de usos —tabla A.1.3— y porcentajes de ocupación.

Las reglas que definen el ROTULO de uso son similares a las que definen el rótulo de coberturas, si bien hay algunas diferencias importantes que conviene tener presentes. Básicamente los porcentajes no tienen por qué sumar 100, pero al mismo tiempo no están limitados por esta cuantía. Si el polígono solo tiene un uso el rótulo coincide con la etiqueta. Si dicha etiqueta va precedida

FIGURA 1.1: Representación espacial de la capa de coberturas del suelo en un contexto urbano. Municipio de Madrid



Fuente: SIOSE (2022a) y elaboración propia.

FIGURA 1.2: Representación espacial de la capa de coberturas del suelo en un contexto rural. Municipio de Villavieja del Lozoya (Madrid)



Fuente: SIOSE (2022a) y elaboración propia.

de un número representa el porcentaje de uso, y si no va precedida de ningún número se entiende que el porcentaje de uso es del 100 %. Así, por ejemplo, si el rótulo es 28RESID ello significa que el 28 % de la superficie ocupada es de *Uso residencial* (RESID),

pero si el rótulo es PAGRI, ello significa que el 100 % de uso es de *Producción agrícola comercial* (PAGRI). Naturalmente disponemos de la superficie del polígono, en m², en el campo SUPERF_M2.

Si el polígono tiene varios usos entonces encontraremos una combinación de etiquetas de usos —tabla A.1.3— y porcentajes de ocupación en el polígono. Los usos se describen de mayor a menor porcentaje de ocupación, al igual que las coberturas. Así, por ejemplo, 59RESID_41AUSDE indica que el 59 % de la ocupación del polígono es de Uso residencial (RESID) y el 41 % es de Uso desconocido (AUSDE). Sin embargo, en este caso los porcentajes pueden sumar más de 100²⁶. Esto sucede normalmente en entornos urbanos, donde el porcentaje de ocupación de cada uso se determina mediante la superficie construida según Catastro, que no está limitada a la superficie de las parcelas catastrales. Por ejemplo, un edificio de 3 plantas podrá tener una superficie construida, en principio, hasta 3 veces más que la superficie de su parcela. Así, 83RESID_32LOGAL indica que el 83 % del polígono se dedica a Uso residencial (RESID) y el 32 % a usos de Servicios logísticos y de almacenamiento (LOGAL). En este caso, el uso representa, pues, el 115 % de la ocupación del polígono²⁷. Las etiquetas de usos siempre constan de 5 caracteres y los porcentajes de ocupación hasta de 3 dígitos.

La figura 1.3 visualiza la capa T_USOS para la misma zona urbana que el mapa 1.1 y permite apreciar visualmente la diferencia entre usos y coberturas, así como el mayor detalle espacial de las coberturas. La figura 1.4 visualiza la capa T_USOS para la misma zona rural que la figura 1.2 y, de nuevo, nos permite apreciar visualmente la diferencia entre usos y coberturas y la complementariedad que ofrecen ambas capas geográficas.

²⁶ En teoría los porcentajes de uso deben sumar al menos 100, ya que cuando los usos conocidos de un polígono no alcanzan este valor se rellenan con uso desconocido —AUSDE— hasta completar el 100. Sin embargo, en la práctica existen varios registros que no cumplen esta regla.

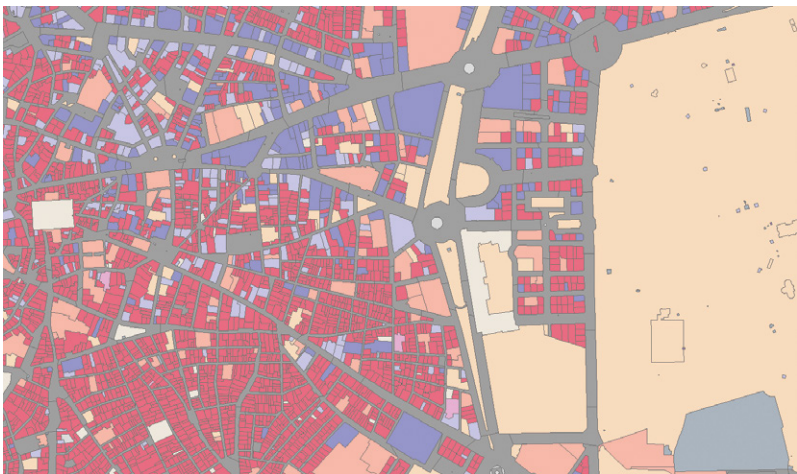
²⁷ Porcentajes que suman más de 100 son poco intuitivos y pueden llevar a confusión, por lo que creemos que este aspecto del modelo de datos no está bien resuelto. En lugar de centrarse en la superficie 2D, quizá se debería incluir un campo de superficie 3D de cada polígono, generado a partir de la información catastral, que incluyera la superficie construida, de forma que los porcentajes de uso fueran referidos a esa superficie 3D y sumaran 100. Lo que no quita para que, en muchos casos, donde no hay construcciones, la superficie 3D coincidiera con la superficie 2D.

- T_COMBINADA es la tabla de geometrías de la ocupación del suelo por cobertura y uso mayoritario o más representativo combinando las tablas T_POLIGONOS y T_USOS.

La estructura de las tablas T_POLIGONOS y T_USOS es complicada de manejar debido a la filosofía de orientación a objetos de SIOSE. La tabla T_COMBINADA trata de simplificar ambas tablas en base a la cobertura o uso mayoritario en el polígono correspondiente. Técnicamente, T_COMBINADA es la disolución de aquellos polígonos que tienen el mismo identificador de cobertura máxima —ID_COBERTURA_MAX— e identificador de uso máximo —ID_USO_MAX—. De esta forma tenemos, en una misma geometría la cobertura y su uso, mayoritario en ambos casos. Se trata de una tabla más sencilla y manejable que la información original, a costa, naturalmente, de perder información, como en cualquier proceso de disolución.

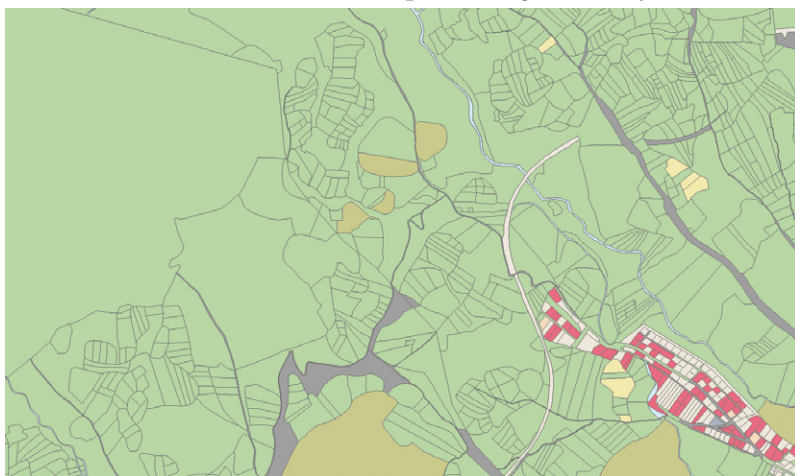
Esta tabla no será utilizada como información auxiliar en el proceso de desagregación de la población que describiremos en el capítulo 5, donde utilizaremos SIOSEAR2017 con el mayor nivel de detalle posible.

FIGURA 1.3: Representación espacial de la capa de usos del suelo en un contexto urbano. Municipio de Madrid



Fuente: SIOSE (2022a) y elaboración propia.

FIGURA 1.4: Representación espacial de la capa de usos del suelo en un contexto rural. Municipio Villavieja del Lozoya (Madrid)



Fuente: SIOSE (2022a) y elaboración propia.

- **T_VALORES** es una tabla alfanumérica con información temática detallada de cada cobertura con su valor de porcentaje y superficie de ocupación dentro de cada polígono. Es, pues, una tabla relacionada con **T_POLIGONOS** con una relación de 1 a muchos mediante un campo único en **T_POLIGONOS** que identifica a cada polígono —**ID_POLYGON**—. De esta forma, **T_VALORES** ofrece información adicional sobre la tabla **T_POLIGONOS**. Por ejemplo, un registro en **T_POLIGONOS** que incluya la cobertura Edificación (EDF) puede expandirse en varios registros de cobertura Edificación (EDF) en **T_VALORES**, y para cada uno de estos registros disponemos de su superficie en m² de cada edificio —**SUPERF_M2**—, su porcentaje de ocupación en el polígono —**SUPERF_POR**— y, en el caso de los edificios, el número de plantas sobre rasante —**CONSTRU_SR**— y bajo rasante —**CONSTRU_BR**— de las construcciones de Catastro.

Se trata de una tabla extremadamente detallada, que para el conjunto de España supera los 150 millones de registros —cuadro 1.1—. De hecho, hay coberturas que aparecen como registros en **T_VALORES** que no son incluidos en el correspondiente

rótulo SIOSE de T_POLIGONOS. Esto sucede cuando el porcentaje de superficie que ocupa dicha cobertura es inferior al 0,5 %, ya que en este caso esa cobertura se pierde por redondeo al ser incorporada al rótulo SIOSE, que solo acepta porcentajes en enteros dentro del rótulo. T_VALORES proporciona, de esta forma, el mayor nivel de detalle posible sobre las coberturas²⁸.

No existe, de forma pública, una tabla del mismo tipo a T_VALORES, pero para los usos²⁹.

El proceso de desagregación de GEOSTAT2021 a una *grid* de 100 m × 100 m, que se describe en el capítulo 5, utiliza simultáneamente las tablas T_POLIGONOS, T_USOS y T_VALORES.

1.3. El conjunto de datos de validación

El proceso de desagregación a la *grid* de 100 m × 100 m requiere, en varios puntos, de un conjunto de datos de entrenamiento y validación de los métodos estadísticos utilizados que nos permitan cuantificar, al menos de forma aproximada, la magnitud del error cometido. Ello requiere conocer la verdadera distribución de la población a la escala de trabajo, es decir, celdas cuadradas de 1 hectárea.

Afortunadamente disponemos para ello del padrón georreferenciado de la Comunidad de Madrid a fecha 1 de enero de 2021³⁰. Dicha geocodificación está realizada a nivel de coordenada puntual a partir de la dirección postal, es decir, la vía y el número de esta, lo que permite cualquier nivel de agregación³¹.

Aunque en principio disponemos de coordenadas para los 6.751.251 residentes en Madrid a fecha 1 de enero de 2021, para 68.384 de estos residentes no se dispone de coordenada a partir de su dirección postal, por lo que se les asigna la coordenada

²⁸ Las superficies de la tabla A.1.1 han sido obtenidas a partir de T_VALORES.

²⁹ Esta tabla sí fue objeto de producción, pero el Equipo Técnico Nacional del Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España decidió no publicarla ya que su manejo resultaba demasiado complejo para un usuario medio.

³⁰ Dicha información fue amablemente facilitada por el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid (en adelante nos referiremos a esta fuente como IEM) para la realización de este ejercicio.

³¹ El fichero dispone de un registro por individuo, puesto que disponemos, además, del sexo, la nacionalidad —español/extranjero— y la edad en grandes grupos —menor de 16 años, de 16 a 64 años y de 65 y más años—. Dicha información no fue utilizada, pero permitiría la generación de *grids* para estas características demográficas.

del centroide de la sección censal a la que pertenecen. Puesto que estos registros pueden distorsionar la verdadera distribución de la población simplemente fueron eliminados del conjunto de datos de validación, lo que proporciona una población de referencia de 6.682.867 residentes. Así pues, el 99,0 % de la población de padrón está perfectamente georreferenciada a partir del callejero.

Finalmente disponemos de un total de 453.003 coordenadas diferentes con población que oscila entre 1 y 1 395 habitantes, con un promedio de 15 residentes por coordenada, aunque la mediana es de solo 4 residentes, y el tercer cuartil es ligeramente inferior a la media, 14 residentes. La distribución de la población por coordenada

CUADRO 1.2: Distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las coordenadas del IEM. Madrid

Intervalos	Coordenadas			Población		
	Número	Porcentaje	Porcentaje acumulado	Población	Porcentaje	Porcentaje acumulado
1 persona	47.652	10,52	10,52	47.652	0,71	0,71
2 personas	73.064	16,13	26,65	146.128	2,19	2,90
3 personas	66.791	14,74	41,39	200.373	3,00	5,90
4 personas	75.034	16,56	57,96	300.136	4,49	10,39
5 personas	29.616	6,54	64,49	148.080	2,22	12,60
6 y 7 personas	21.316	4,71	69,20	135.906	2,03	14,64
8 a 10 personas	14.047	3,10	72,30	124.535	1,86	16,50
11 a 15 personas	17.106	3,78	76,08	221.385	3,31	19,81
16 a 20 personas	16.420	3,62	79,70	295.385	4,42	24,23
21 a 25 personas	14.522	3,21	82,91	332.901	4,98	29,22
26 a 30 personas	11.758	2,60	85,50	328.214	4,91	34,13
31 a 40 personas	18.839	4,16	89,66	664.729	9,95	44,07
41 a 50 personas	14.595	3,22	92,88	659.676	9,87	53,95
51 a 75 personas	17.126	3,78	96,66	1.037.723	15,53	69,47
76 a 100 personas	6.784	1,50	98,16	586.576	8,78	78,25
101 a 200 personas	6.317	1,39	99,55	831.001	12,43	90,69
201 a 500 personas	1.872	0,41	99,97	531.101	7,95	98,63
501 a 1.000 personas	142	0,03	100,00	88.792	1,33	99,96
Más de 1.000 personas	2	0,00	100,00	2.574	0,04	100,00
Total	453.003	100,00		6.682.867	100,00	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM.

es tremendamente asimétrica, tal y como muestra el cuadro 1.2. Un 72 % de las coordenadas tienen asignadas 10 o menos residentes, y solo disponemos de 2 coordenadas con más de 1 000 personas.

Cuando las coordenadas de estos individuos se dejan caer sobre la *grid* de 1 km × 1 km ocupan 2 536 celdas, un 29,9 % de superficie a esta escala, puesto que Madrid comprende un total de 8 476 celdas. La Comunidad de Madrid está, pues, mucho más poblada, en términos de superficie ocupada, que el conjunto nacional, donde solo el 22,6 % de las celdas con esta resolución tienen población según la *grid* censal del INE para el censo 2021 descrita en el primer apartado de este capítulo (Goerlich 2024b).

Si dejamos caer las coordenadas sobre la *grid* de 100 m × 100 m entonces obtenemos un total de 59.263 celdas habitadas. A esta escala el territorio parece prácticamente vacío, ya que solo un 7,0 % del total celdas tienen población. Podemos darnos cuenta de esta afirmación observando que las 2 536 celdas habitadas con resolución de 1 km × 1 km se expanden en 253.600 celdas de 100 m × 100 m, pero solo 59.263 de estas celdas albergan población, lo que representa el 23,3 % del territorio potencialmente habitable. Es decir, si aumentamos la escala en un factor de 10 —lo que equivale a multiplicar el número de celdas por 100— nos encontramos con que aproximadamente el 75 % del territorio que está habitado a una escala de 1 km × 1 km, está vacío a una escala de 100 m × 100 m. Lógicamente, como contrapartida, la distribución de las celdas habitadas a esta escala es más uniforme. Las celdas oscilan entre 1 habitante —1 913 celdas— y algo más de 1 000 residentes —26 celdas superan esta cifra, teniendo la más poblada 1 395 habitantes—. El volumen de población en estas celdas es, sin embargo, escaso —algo más de 29 mil residentes, lo que representa un 0,44 % del total—³².

Observamos la impresión visual de vacío demográfico si comparamos los mapas con la distribución espacial de la población a escala 1 km × 1 km con la de 100 m × 100 m (véase mapas A.2.1 y A.2.2 del apéndice A.2). Tomamos estas dos *grids* como la verdadera

³² Los estadísticos básicos tanto de la *grid* 1 km × 1 km como de la *grid* 100 m × 100 m están en el apéndice A.2.

distribución de la población a la escala correspondiente. Los métodos de desagregación de la *grid* censal 2021 serán evaluados frente a la *grid* de población para Madrid con resolución de $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ como proceso de validación de la metodología aplicada.

Además de estas dos *grids*, generadas a partir de coordenadas de direcciones postales con población residente —*bottom-up*—, también generamos *grids* con resoluciones de $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ y de $200\text{ m} \times 200\text{ m}$. Los estadísticos básicos de estas *grids* están en el apéndice A.2. El objeto de estas *grids* es evaluar los errores a estas resoluciones, para tener una idea de la imprecisión que cometemos en función de la escala a la que efectuemos el análisis. Naturalmente a la resolución de $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ el error es nulo, puesto que los métodos de desagregación empleados —capítulo 5— cumplen la restricción de volumen o picnofiláctica (Tobler 1979) para la población de partida, es decir, la suma de la población de las celdas de $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ que forman parte de una celda de $1\text{ km} \times 1\text{ km}$, sumará la población de dicha celda. Una restricción esencial en este contexto que no es siempre satisfecha por algunos métodos de desagregación espacial.

El conjunto de datos de validación procede del padrón, mientras que el ejercicio objeto de este trabajo desagrega la *grid* de $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ procedente del censo 2021. Sabemos que ambas poblaciones no coinciden (Goerlich 2024b), lo que merece unos breves comentarios.

El censo 2021 arroja, para la Comunidad de Madrid, 24.611 residentes menos que el padrón en la misma fecha de referencia. De hecho, Madrid es la comunidad que presenta mayor discrepancia negativa³³, tanto en términos absolutos como relativos, entre censo y padrón (Goerlich 2024b, tabla 1). Es una discrepancia mayor que la observada para el conjunto nacional, que es de solo 15.691 residentes, pero de signo contrario, es decir, a nivel nacional el censo ofrece una cifra de población ligeramente superior a la de padrón.

³³ Tomando el censo 2021 como referencia; es decir, restando del censo las poblaciones de padrón.

Obviamente, una vez desechamos la población para la que las coordenadas proceden del centroide de la sección censal a la que pertenecen, tenemos en nuestro conjunto de datos de validación una cifra de población inferior a la censal, 6.726.640 residentes en el censo 2021 frente a 6.682.867 residentes en el conjunto de datos de validación procedente del padrón 2021 para Madrid.

Comparar la *grid* del INE, GEOSTAT2021 —apartado 1.1—, generada a partir del censo 2021, con la de nuestro conjunto de validación, generada a partir de las coordenadas de padrón del IEM, ambas con resolución de 1 km × 1 km, no es directo. Sin embargo, es conveniente tener una idea de lo similares o diferentes que son ambos conjuntos de datos, puesto que lo que desagregamos es GEOSTAT2021, mientras que la validación se hace frente a *grids* generadas a partir de las coordenadas del padrón 2021 del IEM.

No solo las poblaciones de ambas *grids* no son idénticas, como acabamos de observar³⁴, sino que en GEOSTAT2021, publicada por el INE, no es posible identificar con nitidez las celdas con población que pertenecen a la Comunidad de Madrid, puesto que la información ofrecida es una simple tabla con el identificador normalizado de celda (INSPIRE 2023a) y la cifra de población asociada. Idealmente para hacer agregaciones de la *grid* a un ámbito administrativo dado, deberíamos disponer de una cifra de población por el producto cartesiano resultante de la intersección de la capa de contornos administrativos y la *grid*, puesto que los contornos administrativos siempre intersectan algunas celdas de la *grid* de forma caprichosa³⁵. Sin esta información solo es posible extraer las celdas de GEOSTAT2021 correspondientes a la Comunidad de Madrid mediante intersección espacial lo que incluirá necesariamente algunas celdas pobladas compartidas entre la Comunidad de Madrid y las comunidades vecinas, Castilla y León y Castilla-La Mancha (Goerlich 2024a), con lo que la población de esta

³⁴ Tanto por la diferencia de fuente para la población, censo *versus* padrón, como por el hecho de que no todas las coordenadas del padrón 2021 del IEM corresponden a una dirección postal, y han sido eliminadas para no distorsionar la verdadera distribución de la población. En términos absolutos la diferencia es solo de 43.773 residentes, lo que representa un 0,7% del total de población.

³⁵ Eurostat, en su compilación de las *grids* para toda Europa sí suele ofrecer esta información, al objeto de extraer las celdas de un determinado país o región, con su correspondiente población.

extracción tampoco coincidirá de forma exacta con la del censo 2021 para la Comunidad de Madrid. El apéndice A.2 detalla el resultado de la intersección de la *grid* censal del INE, GEOSTAT2021, con los lindes de la Comunidad de Madrid.

1.4. Otra información auxiliar utilizada

Además de las bases de datos señaladas anteriormente el trabajo utiliza mucha otra información. Los contornos administrativos proceden de la Base de Datos de Líneas Límite del IGN, convenientemente tratados por Goerlich y Pérez (2021). Los datos de población a nivel municipal, y el resto de las variables sociodemográficas proceden del censo 2021 del INE, y por tanto toman este año como referencia, al igual que GEOSTAT2021. La información sobre altitud y rugosidad a nivel municipal procede de Goerlich (2022) y Goerlich y Cantarino (2022), también las superficies utilizadas a lo largo del trabajo, mientras que la información a nivel de *grid* procede de Goerlich (2024a), alguna de ella reconvertida de bases de datos más generales (Goerlich 2023b). En algunos casos, en los que es necesario completar la información sobre edificios de SIOSE AR, se ha utilizado el *Modelo Digital de Superficies de Edificación* (MDSnE2,5) del IGN convenientemente tratado por Goerlich (2023b).

Los capítulos 4 y 7 realizan cálculos sobre la red viaria de OpenStreetMaps (OSM Foundation 2024a) (Luxen y Vetter 2011), a la que accedemos a través del proyecto Open Source Routing Machine (OSRM) (OSM Foundation 2024c, 2024d). En el primer caso a partir de la *grid* de 1 km × 1 km y en el segundo a partir de la *grid* generada de 100 m × 100 m. Dado lo intensivo de los cálculos fue necesaria la instalación de un servidor de rutas en local, sobre el que se instaló la red viaria de OpenStreetMaps (OSM Foundation y Geofabrik 2024) para toda España, y al que accedemos a partir de la interfaz de programación de aplicaciones (API) de OSRM (OSM Foundation 2024b) mediante funciones propias en R (R Core Team 2023). El rendimiento del servidor es de alrededor de unos 5 millones de rutas al día, lo que permite resolver problemas de tamaño medio en un ordenador doméstico.

1.5. *Software* utilizado

La mayor parte de los cálculos han sido realizados a partir del sistema de computación estadística *R* (R Core Team 2023), utilizando múltiples librerías, pero fundamentalmente *tidyverse* (Wickham *et al.* 2019) para la manipulación de datos estadísticos y tablas, *sf* (Pebesma 2018) para el manejo de información vectorial y *terra* (Hijmans *et al.* 2023) y *stars* (Pebesma y Bivand 2023) para la manipulación de información ráster.

Además, también se ha utilizado ArcGIS 10.8.2 a efectos de visualización, puesto que los cálculos de Sistemas de Información Geográfica (GIS) se han realizado siempre en el entorno de *R* (R Core Team 2023), y las herramientas, proporcionadas por la Comisión Europea, Degree of Urbanisation Grid (GHS-DUG) (Maffenini *et al.* 2023a) y Degree of Urbanisation Territorial Units Classifier (GHS-DU-TUC) (Maffenini *et al.* 2023b) para los cálculos del grado de urbanización del capítulo 3. Las *grids* vectoriales se generaron con la utilidad GridMaker de Eurostat (2021a), si bien la generación de la *grid* con resolución de 100 m × 100 m requirió el desarrollo de una función específica en *R* (R Core Team 2023) que genera idénticos resultados que *GridMaker*.

1.6. Síntesis de las fuentes de datos utilizadas

A modo resumen, el cuadro 1.3 presenta una síntesis de las fuentes de datos utilizadas en la monografía y descritas en los apartados anteriores.

CUADRO 1.3: Resumen sintético de las fuentes de datos utilizadas

Fuente de datos	Procedencia	Descripción	Tipo de fuente	Proceso en el que se utiliza
GEOSTAT2021	INE	Grid 1 km × 1 km con datos de población	Input básico en el proceso de elaboración de la grid de población 100 m × 100 m	Se utiliza en el proceso de desagregación de la población en celdas 100 m × 100 m (capítulo 5). También es la fuente utilizada en los ejemplos de aplicaciones prácticas de la grid de población 1 km × 1 km sobre el grado de urbanización del territorio (capítulo 3) y el desempeño de la red de carreteras (capítulo 4).
SIOSEAR2017	IGN	Base de datos cartográfica con información sobre coberturas y usos del suelo para cada uno de los polígonos en los que divide el territorio.	Base de datos fundamental en el proceso de elaboración de la grid de población 100 m × 100 m	Se utiliza en el proceso de desagregación de la población en celdas 100 m × 100 m (capítulo 5) para acotar dónde reside la población y transferir la información entre diferentes sistemas zonales.
MDSn2.5	IGN y Goerlich (2023b)	Modelo Digital de Superficies de Edificación con paso de malla de 2,5m	Base de datos auxiliar en el proceso de desagregación	Se utiliza en el proceso de desagregación de la población en celdas 100 m × 100 m (capítulo 5) cuando en SIOSEAR2017 no se encuentra soporte para la población residente.
Catastro	Uhl <i>et.al.</i> (2023)	Superficie interior edificada de los edificios residenciales de Catastro	Base de datos auxiliar en el proceso de desagregación	Se utiliza en el proceso de desagregación de la población en celdas 100 m × 100 m (capítulo 5) cuando en SIOSEAR2017 no se encuentra soporte para la población residente.
Padrón georreferenciado de la Comunidad de Madrid	IEM	Padrón georreferenciado de la Comunidad de Madrid a 1 de enero de 2021 a nivel de coordenada puntual a partir de la dirección postal.	Base de datos de validación	Se utiliza para el proceso de validación de los métodos estadísticos utilizados en la desagregación de la población en celdas de 100 m × 100 m (capítulo 5).

CUADRO 1.3 (cont.): Resumen sintético de las fuentes de datos utilizadas

Fuente de datos	Procedencia	Descripción	Tipo de fuente	Proceso en el que se utiliza
Base de Datos de Líneas Límite	IGN y Goerlich y Pérez (2021)	Datos sobre contornos administrativos	Base de datos auxiliar utilizada en las aplicaciones	Se en la descripción de la <i>grid</i> de población $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ y sus aplicaciones prácticas (Capítulos 2 a 4), como en las aplicaciones prácticas de la <i>grid</i> de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ (capítulos 5 a 7).
Datos de altitud, rugosidad y superficie	Goerlich (2022, 2023b) y Goerlich y Cantarino (2022)	Información de altitud y rugosidad a nivel municipal	Base de datos auxiliar utilizada en las aplicaciones	Se utiliza en el análisis de la distribución de la población a partir de la <i>grid</i> de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ (Capítulo 2)
OpenStreetMaps	OSM Foundation (2024c, 2024d)	Proyecto colaborativo que ofrece información en abierto de redes viarias, transporte, infraestructuras urbanas, entre otros.	Base de datos auxiliar	Se utiliza para los cálculos sobre la red viaria en la evaluación del desempeño de la red de carreteras a partir de la <i>grid</i> de población $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ (capítulo 4) y en la evaluación de la movilidad urbana sostenible a partir de la <i>grid</i> de población $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ (capítulo 7).

Fuente: Elaboración propia.

2. La distribución de la población a partir de la *grid* censal 2021

Este capítulo examina con un mayor detalle que en el capítulo anterior la distribución de la población a partir de la *grid* censal 2021, GEOSTAT2021, que constituye la base sobre la que se realiza la estimación de la *grid* censal con una resolución 100 m × 100 m. La evolución de la distribución de la población española sobre el territorio es bien conocida, tanto a nivel provincial (Bandrés y Azón 2021), como a nivel municipal (Goerlich *et al.* 2015; Goerlich y Mollá 2021; González, Newsham y Rowe 2023). Sin embargo, los análisis a nivel de *grid* son mucho más escasos (Gutiérrez *et al.* 2023), ya que este formato estadístico es relativamente reciente. La primera *grid* de población publicada por el INE es de 2011, con ocasión del censo de dicho año, aunque en Eurostat es posible encontrar, para España, una *grid* que se remonta a 2006 (Goerlich y Cantarino 2012, 2013a)³⁶.

Aunque sería deseable hacer una comparativa sobre la evolución en la distribución espacial de la población a esta escala entre 2011 y 2021, las diferencias metodológicas en la construcción de ambas *grids* aconsejan no efectuar dicha comparación (Goerlich y Cantarino 2015, 2017; Goerlich 2024b)³⁷, por lo que este capítulo se limita exclusivamente al análisis de GEOSTAT2021.

³⁶ Al margen de estas publicaciones oficiales, existen algunas otras estimaciones con cobertura mundial de donde es posible extraer una *grid* para España. Destaca, en este sentido, el esfuerzo de la Global Human Settlement Layer (GHSL) que ofrece *grids* de población desde 1975 con una periodicidad de 5 años. Goerlich (2024c) constituye un primer intento de elaborar *grids* de población para todos los años censales del siglo xx y primeros del XXI a partir de información histórica catastral y Díez, Goerlich y Tirado (2024) exploran la posibilidad de estimar una *grid* de población a partir de la geocodificación de las entidades de población del nomenclátor de 1888.

³⁷ Básicamente GEOSTAT2011 no es realmente una *grid bottom-up*, ya que el proceso de georreferenciación de la población procede de la muestra del censo, y no del fichero

El apartado 2.1 del capítulo ofrece la representación gráfica y estadísticos básicos de la distribución de la población a partir de GEOSTAT2021. Los apartados 2.2 y 2.3 ofrecen información más precisa de la localización de la población española en el territorio (costa vs. interior, altitud y rugosidad del terreno, indicadores de concentración y desigualdad de la población). El apartado 2.4 presenta un ejercicio para aproximar la densidad económica a través de indicadores como la densidad de población personal y la densidad de población experimentada. Finalmente, el apartado 2.5 ofrece el resumen y conclusiones del capítulo.

ESQUEMA 2.1: Objetivo y contenido del capítulo 2

Objetivo	Datos	Procesos	Resultados
<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de la distribución de la población a partir de la <i>grid</i> de población 1 km × 1 km, datos de base para el resto de capítulos de la monografía. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Grid</i> de población 1 km × 1 km, GEOSTAT2021. • Datos auxiliares: datos de rugosidad y altitud del terreno (IDEE). 	<ul style="list-style-type: none"> • Obtención de indicadores descriptivos sobre la localización y concentración de la población. • Definición de los umbrales de tiempo y distancia para el cálculo de la densidad económica a partir de la <i>grid</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> • Características básicas de la <i>grid</i>. • Distribución espacial de la población: interior vs. costa, altitud rugosidad. • Indicadores de concentración y desigualdad. • Indicador de densidad económica.

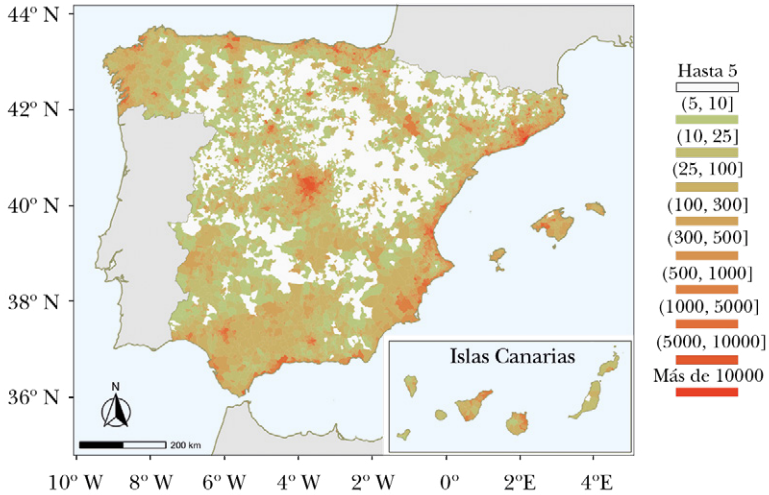
Fuente: Elaboración propia.

2.1. Características básicas de GEOSTAT2021

El mapa 2.1 muestra la densidad de población, habitantes/km², calculada a nivel municipal por el procedimiento estándar de dividir la población del ámbito territorial correspondiente por su superficie total. Implícitamente, este cálculo distribuye la población de forma uniforme sobre todo el término municipal, dando la impresión de que la población es una variable continua sobre

censal final ponderado. La conclusión lógica es que GEOSTAT2011 concentra en exceso la población, de forma artificial, respecto a los resultados de GEOSTAT2021.

MAPA 2.1: Densidad de población a nivel municipal. Censo 2021
(habitantes por km²)



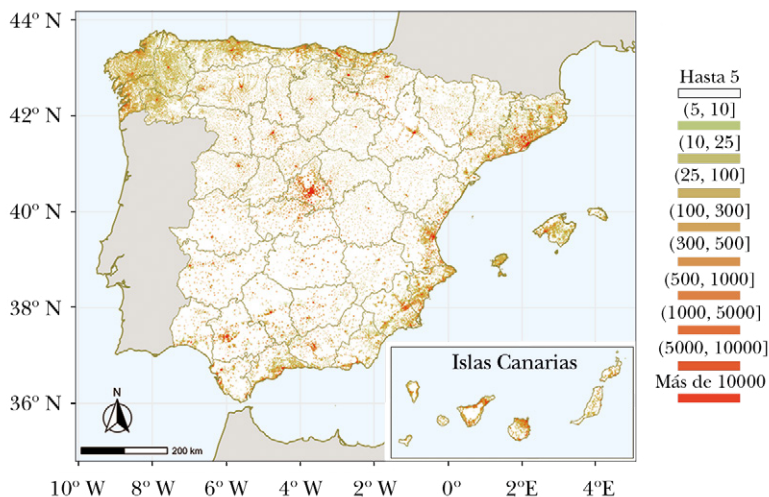
Fuente: INE (2024) y elaboración propia.

el espacio, lo cual, evidentemente, no se ajusta a la realidad. Además de este inconveniente, el cálculo de densidades a partir de unidades administrativas depende en exceso del tamaño de estas, y la distribución de tamaños de los municipios españoles es tremendamente heterogénea (Rodríguez, Astudillo y Martín-Asín 1997). De esta forma, la impresión visual que obtenemos del mapa 2.1 está distorsionada por el tamaño físico de las unidades de referencia.

La *grid* censal 2021 del INE, GEOSTAT2021, presenta 115.410 celdas habitadas, lo que supone que un 22,6% del territorio está habitado a esta escala —celdas de 1 km × 1 km—. Mirado desde el punto de vista complementario, el 87,4% del territorio está vacío en términos demográficos. Esta percepción no es posible visualizarla a partir del mapa 2.1, que muestra densidades de población municipales, pero sí a partir del mapa 2.2, que representa las celdas de GEOSTAT2021. La impresión visual que observamos en este mapa es muy diferente. La población deja de ser un continuo en el espacio, y podemos observar dónde se localizan los núcleos de población, grandes o pequeños, de forma independiente a los lindes administrativos. Los polígonos —celdas o píxeles— dibujados en el mapa 2.2 son de tamaño uniforme, lo que libera la distribución de la población de los tamaños municipales. Es fácil

observar dónde se sitúan las capitales de provincia o ciudades principales, dónde la población aparece como más dispersa —Galicia y Asturias— y las zonas del país con mayor territorio despoblado.

MAPA 2.2: Grid de población de 1 km × 1 km. Censo 2021



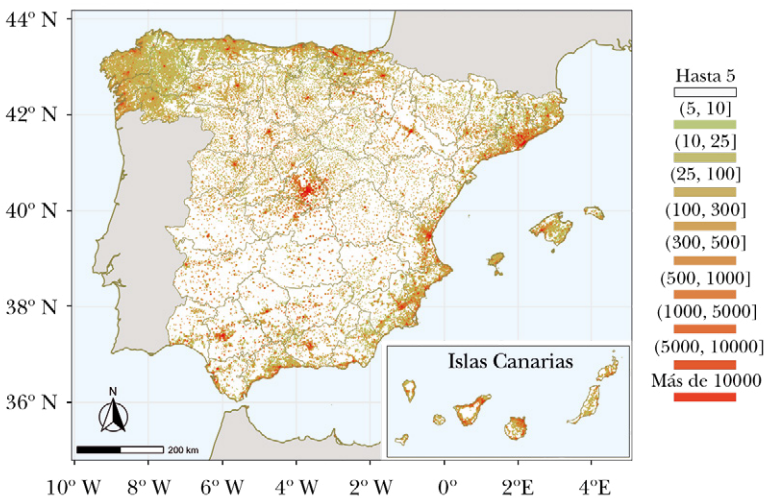
Fuente: INE (2024) y elaboración propia.

Aun liberando la distribución de la población de los artificiales lindes administrativos es importante recordar que nuestro análisis es cautivo de la escala de trabajo, y que la elección de la escala apropiada es específica del problema particular que estemos tratando. A efectos ilustrativos, el mapa 2.3 muestra la densidad, habitantes/km², resultante de agregar GEOSTAT2021 a celdas de 2 km × 2 km. A esta escala, el 40,8 % del territorio está habitado, y nuestra percepción de la distribución de la población sobre el territorio es algo diferente de la mostrada en el mapa 2.2. Si la agregación la hubiéramos efectuado a celdas de 5 km × 5 km el territorio habitado ascendería al 76,6 %, y nuestra percepción a partir del mapa correspondiente sería muy diferente.

Los efectos de escala y de zona son conocidos conjuntamente en el análisis espacial de datos como el problema de la unidad espacial modificable (Modifiable Areal Unit Problem, MAUP). Es imposible escapar totalmente a dicho problema, y solo podemos aspirar a minimizar sus efectos mediante procedimientos de agregación

o desagregación de las unidades territoriales que tengan en cuenta el nivel de dependencia espacial local (Openshaw 1983; Rase 2001; Wong 2004; ESPON 2006). En definitiva, el MAUP indica que la correlación, o la percepción, entre dos fenómenos distribuidos en el espacio puede cambiar de forma dramática de acuerdo con el tamaño y la forma de las unidades espaciales sobre las que el fenómeno es medido.

MAPA 2.3: Densidad de población en celdas de 2 km × 2 km. Censo 2021
(habitantes por km²)



Fuente: INE (2024) y elaboración propia.

De hecho, la principal motivación de este trabajo es señalar que la resolución de la *grid* de referencia, celdas de 1 km × 1 km, no es adecuada en muchos contextos, fundamentalmente locales o urbanos, donde es necesario un mayor nivel de detalle geográfico. Por esta razón es conveniente disponer de una *grid* con mayor resolución que permita acometer otro tipo de análisis. Volveremos sobre esta cuestión en la segunda parte de la monografía.

La distribución por tamaños de las celdas de GEOSTAT2021 es terriblemente asimétrica. El tamaño medio de celda es de 411 habitantes, pero la mediana es de solo 19 personas, por tanto, más de la mitad de las celdas no alcanzan los 20 residentes. Existen

8 486 celdas con 1 solo habitante, 7 776 con 2 y 6 339 con 3 personas. El 28 % de las celdas —32.309— no sobrepasan los 5 residentes, aunque, naturalmente, solo albergan una cuantía muy pequeña de población —86.008 habitantes—.

En el otro extremo, solo 294 celdas superan los 20.000 residentes, aunque suponen el 17 % de la población, 87 celdas superan los 30.000 residentes, 22 los 40.000 y solo 3 celdas superan los 50.000 habitantes. La celda con mayor población alberga a 56.034 residentes, y se sitúa en L'Hospitalet de Llobregat (08101). Las 13 celdas con mayor población, todas ellas por encima de los 43.000 residentes, se localizan en el área metropolitana de Barcelona y solo en el puesto número 14 aparece una celda en el municipio de Madrid (28079).

La distribución de tamaños de celda se ofrece en el cuadro 2.1. Con esta partición de intervalos, la mayor parte de la población se concentra en tamaños de celda entre los 1 000 y los 5 000 habitantes, que representan un 5 % del total —5 692—, pero albergan más de la cuarta parte de la población —27 %—.

Si una gran parte del territorio está vacío desde el punto de vista demográfico dos cuestiones de interés surgen inmediatamente. Por una parte, conocer si existen diferencias importantes, a nivel regional, en el espacio ocupado por la población sobre el territorio. El porcentaje de celdas habitadas respecto a las celdas totales de una región es un indicador, aunque sea imperfecto, de la expansión de la población sobre el territorio³⁸. Por otra parte, ajustar las densidades de población, en diversos ámbitos, al espacio realmente ocupado por la misma, es decir, a la superficie habitada dada la escala de trabajo, que en este caso se traduce en celdas de 1 km × 1 km. Este es un mejor indicador de concentración de la población que el calculado a partir de la superficie total de un área administrativa.

El cuadro 2.2 da respuesta a estas dos cuestiones. Ya hemos mencionado que, a nivel nacional, solo el 22,6 % de las celdas de España albergan población. La primera columna del cuadro 2.2 muestra que este porcentaje varía ampliamente por comunidad autónoma

³⁸ Es un indicador imperfecto porque no tiene en cuenta ni la población de cada celda, ni la distancia que existe entre las diferentes celdas pobladas, pero sin duda es un indicador intuitivo de la ocupación humana del espacio físico que le rodea.

CUADRO 2.1: Distribución por tamaños de celda. España, 2021

Intervalos	Celdas			Población		
	Número	Porcentaje	Porcentaje acumulado	Personas	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Hasta 10	45.417	39,4	39,35	187.784	0,4	0,40
(10, 25]	18.333	15,9	55,24	310.169	0,7	1,05
(25, 50]	13.182	11,4	66,66	478.875	1,0	2,06
(50, 100]	10.838	9,4	76,05	773.309	1,6	3,69
(100, 200]	7.936	6,9	82,93	1.134.224	2,4	6,09
(200, 300]	3.819	3,3	86,24	937.803	2,0	8,06
(300, 500]	3.904	3,4	89,62	1.519.362	3,2	11,27
(500, 1.000]	4.077	3,5	93,15	2.882.518	6,1	17,35
(1.000, 5.000]	5.692	4,9	98,08	12.684.161	26,8	44,11
(5.000, 10.000]	1.201	1,0	99,12	8.295.926	17,5	61,61
(10.000, 20.000]	717	0,6	99,75	10.006.389	21,1	82,72
Más de 20.000	294	0,3	100,00	8.190.278	17,3	100,00
Total	115.410	100,0		47.400.798	100,0	

Fuente: INE (2024) y elaboración propia.

(CC. AA.)³⁹. Exceptuando las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla, por sus peculiares características, podemos observar cómo en algunas comunidades (Castilla-La Mancha, Aragón y Extremadura) las celdas habitadas no alcanzan al 10 % del total, un valor inferior a la mitad del promedio nacional. En el otro extremo, en las comunidades de País Vasco, Galicia e Illes Balears el porcentaje de celdas habitadas supera el 50 %, más del doble del valor nacional. A nivel de provincia —tabla A.3.1— las diferencias son todavía más llamativas. Cuenca o Teruel apenas superan el 5 % de celdas habitadas, mientras que Pontevedra y A Coruña superan el 70 %.

³⁹ Los lindes administrativos, CC. AA., provincias o municipios, no se ajustan exactamente a la *grid* de referencia, de forma que siempre hay celdas frontera que tienen intersección no nula con dos o más áreas administrativas. A nivel de CC. AA. esto sucede con 7887 celdas y a nivel de provincia con 16.780 celdas (Goerlich 2024a). Cómo contar estas celdas cuando intersecamos la *grid* con lindes administrativos es un problema que no admite solución única. Esencialmente es el mismo problema que surge en la interacción entre la información ráster y la vectorial (Lovell, Nowosad y Muenchow 2019, capítulo 6), aunque nosotros manejamos normalmente la *grid* en formato vectorial. La solución adoptada en este caso es contar las celdas frontera, de forma entera, en todas las áreas administrativas con las que tiene intersección no nula. De esta forma, si una celda cae entre dos CC. AA. contará, en los cálculos generados a nivel de CC. AA., dos veces, una vez en cada una de las CC. AA. con las que tiene intersección no nula.

CUADRO 2.2: Celdas habitadas y densidad. Comunidades autónomas, 2021

Comunidad autónoma		Celdas habitadas (%)	Densidad: Superficie	
Código	Nombre		Total	Terrestre habitada
01	Andalucía	21,6	97	452
02	Aragón	7,9	28	351
03	Principado de Asturias	48,9	95	191
04	Illes Balears	64,9	236	345
05	Canarias	46,5	293	606
06	Cantabria	41,1	110	258
07	Castilla y León	13,0	25	192
08	Castilla-La Mancha	7,8	26	329
09	Cataluña	40,2	241	596
10	Comunitat Valenciana	36,2	218	600
11	Extremadura	9,6	25	264
12	Galicia	62,5	91	144
13	Comunidad de Madrid	35,3	838	2.269
14	Región de Murcia	35,9	134	371
15	Comunidad Foral de Navarra	18,8	64	329
16	País Vasco	50,1	306	583
17	La Rioja	13,1	63	470
18	C. a. de Ceuta	69,2	4.197	5.353
19	C. a. de Melilla	50,0	6.352	7.088
00	España	22,6	94	419

Fuente: INE (2024) y elaboración propia.

Las últimas dos columnas del cuadro 2.2 comparan la densidad estándar, dividiendo la población por los km² totales de la CC. AA. correspondiente, con la que obtenemos cuando consideramos como soporte solo la superficie terrestre habitada. A efectos de la *grid* la superficie habitada viene determinada por las celdas con población, pero parte de estas celdas tienen coberturas de agua, que no son susceptibles de ser habitadas (Eurostat 1999), por ello la superficie terrestre descuenta la superficie correspondiente a estas coberturas y constituye una mejor medida del soporte de la población sobre la que calcular las densidades⁴⁰.

⁴⁰ La *grid* de referencia cubre el contorno de España. Las celdas exteriores que lindan con el mar tienen una parte de cobertura de agua que no forma parte de la superficie terrestre sobre la que calcular, de forma apropiada, densidades de población. Las celdas exteriores que lindan con otros países, como Francia o Portugal, también

La densidad estándar a nivel nacional es de 94 habitantes por km². Esta es la densidad mostrada en el mapa 2.1 a nivel municipal. Pero si ajustamos el soporte sobre el que se asienta la población a la superficie terrestre habitada a nuestra escala de trabajo, la densidad es considerablemente más elevada, 419 habitantes por km² terrestre habitado. En cualquiera de los casos las diferencias regionales son considerables. La Comunidad de Madrid supera los 2000 habitantes por km² terrestre habitado, mientras que otras comunidades, como Galicia, el Principado de Asturias o Castilla y León no llegan a los 200. La correlación entre ambas medidas de densidad es, sin embargo, notablemente elevada: 0,9880.

Si descendemos a nivel provincial —tabla A.3.1— las diferencias se amplían. Barcelona supera los 1000 habitantes por km² terrestre habitado, mientras que las provincias de Lugo u Orense no alcanzan los 50. A rasgos generales estas cifras son indicativas de una elevada polarización en la distribución de la población.

2.2. La distribución espacial de la población a la luz de GEOSTAT2021

A nivel municipal es bien conocido que la población se ha desplazado históricamente del interior a la costa, de la montaña al valle, a las capitales de provincia y los centros urbanos, y a Madrid, cuya área urbana funcional desborda actualmente los límites administrativos de su provincia (Goerlich y Mollá 2021). La distribución de la población a partir del grado de urbanización será objeto de atención detallada en el próximo capítulo utilizando

deben descontar la superficie de la celda que corresponde a estos países para determinar la superficie de referencia de forma correcta. Por otra parte, algunas celdas interiores también tienen coberturas de agua —lagos, pantanos, ríos, humedales, ...— que no forman parte de la superficie terrestre (Eurostat 1999) a partir de la cual determinar correctamente densidades de población. Esta información está disponible en Goerlich (2024a), y permite ajustar la superficie de forma apropiada, teniendo en cuenta las celdas que lindan con el mar, las que lindan con fronteras exteriores y realizar un ajuste por coberturas de agua en las celdas interiores. La superficie terrestre habitada, ajustada de esta forma, es siempre menor que el número de celdas con población. Así, si las celdas habitadas en GEOSTAT2021 son 115.410, que corresponde a esos mismos km², la superficie habitada terrestre, una vez hechos los ajustes anteriores, es de 113.020 km².

los criterios de Comisión Europea *et al.* (2021). Este apartado examina brevemente la distribución espacial a partir de aspectos geográficos. La disponibilidad de la población en formato de *grid* es mucho más flexible a este respecto que partir de datos municipales, ya que permite un tratamiento más uniforme en relación con la geografía.

España es, eminentemente, un país costero, pues dos de sus CC. AA. son insulares y tiene casi 8000 km de costa. Ello se refleja en la localización de la población y, en consecuencia, de la actividad económica. El cuadro 2.3 muestra la distribución de la población por su cercanía a la línea de costa más cercana⁴¹. Para poner en contexto estos números, dada la distribución de la población que se muestra en el mapa 2.2, la distancia promedio de la población a la costa más cercana es de 89 km⁴². Casi una tercera parte de la población, algo más de 15 millones de residentes, vive a menos de 5 km de la costa, ocupando el 15 % de las celdas habitadas. Es el mar Mediterráneo el que concentra mayor población en esta franja de distancia, el 20 % del total. La importancia de la población lejos de la costa, la quinta parte del total se localiza a más de 200 km, se debe en su totalidad al área urbana funcional de Madrid. Todas sus celdas habitadas caen en esta franja, de forma que si excluimos a la Comunidad de Madrid de los cálculos solo el 6 % de la población se sitúa en este intervalo de distancia.

La orografía de nuestro país presenta algunos rasgos peculiares. Además de ser un país costero, España es un país montañoso. La altitud media de nuestro territorio supera los 600 m, aunque la altitud media a la que vive la población no alcanza los 300 m. El cuadro 2.3 muestra esta altitud —297 m a nuestra escala—, así como el hecho de que dicha altitud media crece de forma monótona conforme nos alejamos de la costa. Pero la altitud, por sí sola, no es indicativa de lo abrupto del paisaje. Un mejor indicador para ello sería un índice de rugosidad del terreno. Índices

⁴¹ Estas distancias son medidas en línea recta y en la proyección de la *grid* —ETRS89-LAEA—.

⁴² Se trata del promedio de las distancias de las celdas a la línea de costa ponderada por la población de cada celda. Todos los promedios de este apartado están calculados de esta forma. Las celdas que intersectan con la línea de costa tiene distancia cero.

de rugosidad hay muchos en la literatura, pero uno tremendamente intuitivo es simplemente la ratio entre la superficie del paisaje, la que tiene en cuenta la orografía del terreno —y que podemos denominar superficie $3D$ — (Jeness 2004; Goerlich 2022), y la superficie plana —superficie $2D$ — (Goerlich y Cantarino 2022).

$$Rugosidad = \frac{Superficie\ 3D}{Superficie\ 2D} \quad (2.1)$$

Puesto que $Superficie\ 3D \geq Superficie\ 2D$, este índice toma el valor 1 si el terreno es plano, $Superficie\ 3D = Superficie\ 2D$, y, en principio, no está acotado superiormente, de forma que su rango de variación es $[1, +\infty)$ ⁴³.

Obsérvese que *Rugosidad* no es más que el crecimiento en la superficie al tomar en cuenta la orografía del terreno. Así, por ejemplo, un valor de 1,1 del índice es equivalente a un crecimiento del 10 % al pasar de la superficie plana a la superficie que tiene en cuenta las ondulaciones del terreno. Este índice tiene la ventaja de presentar una agregación consistente a partir de la estimación de ambas superficies, $2D$ y $3D$, para los ámbitos en los que estemos interesados. Presenta, además, una relación directa con la pendiente media del área considerada, que puede ser expresada tanto en términos porcentuales como en grados sexagesimales, lo que puede resultar todavía más intuitivo⁴⁴. Así, un índice de *Rugosidad* de 1,1 representa una pendiente media del 46 % —notablemente elevada— o, de forma equivalente, un ángulo de 25 ° sexagesimales.

Las dos últimas columnas del cuadro 2.3 muestran la pendiente para los intervalos de distancia a la costa considerados. Al contrario de lo que sucede con la altitud, la evolución de la rugosidad

⁴³ Naturalmente siempre es posible derivar un índice, ordinalmente equivalente a *Rugosidad*, que esté acotado entre 0 y 1, donde 0 represente terreno plano y 1 el máximo alcanzable de rugosidad (Goerlich y Cantarino 2022).

⁴⁴ A partir de *Superficie 2D* y *Superficie 3D* es posible calcular la pendiente media del área de referencia, en grados sexagesimales, como el arco coseno de la ratio $\frac{Superficie\ 2D}{Superficie\ 3D} = \frac{1}{Rugosidad}$. Si queremos la pendiente en términos porcentuales basta con calcular la tangente del cálculo anterior y multiplicarla por 100.

del terreno no es monótona conforme nos alejamos de la costa. Primero crece, para luego disminuir hasta valores inferiores a los de la franja costera. Así, pues todo indica que hay zonas muy elevadas con poca rugosidad, y zonas relativamente bajas, y cercanas a la costa, como mucha mayor rugosidad del paisaje.

CUADRO 2.3: Celdas habitadas, población, altitud y pendiente por intervalos de distancia a la costa más cercana. España, 2021

Distancia	Celdas		Población		Altitud (m)	Pendiente	
	Número	Porcentaje	Personas	Porcentaje		Porcentual	Grados (°)
Hasta 5 km	16.858	14,6	15.244.109	32,2	54	16,9	9,5
Más de 5 km y hasta 10 km	8.858	7,7	3.431.301	7,2	100	16,8	9,4
Más de 10 km y hasta 20 km	12.862	11,1	3.648.861	7,7	134	17,6	9,8
Más de 20 km y hasta 50 km	23.762	20,6	5.198.998	11,0	313	19,3	10,8
Más de 50 km y hasta 100 km	21.544	18,7	5.081.707	10,7	350	14,7	8,3
Más de 100 km y hasta 200 km	17.087	14,8	5.100.843	10,8	506	13,9	7,8
Más de 200 km	14.439	12,5	9.694.979	20,5	663	12,2	7,0
Total	115.410	100,0	47.400.798	100,0	297	15,7	8,8

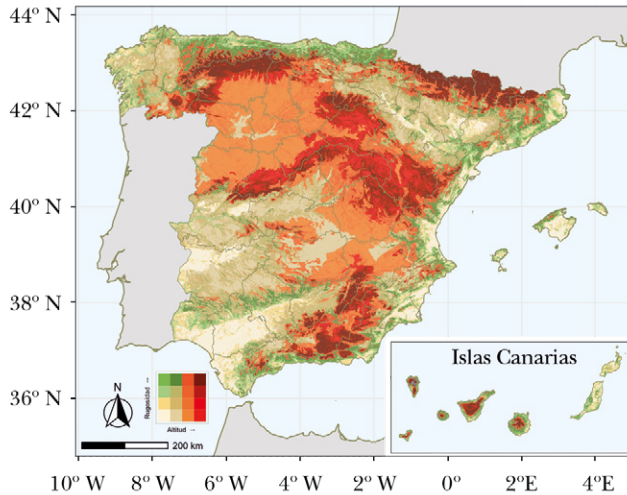
Fuente: INE (2024), IDEE (MDT05) y elaboración propia.

La visión espacial del paisaje de nuestro país en estas dos dimensiones, altitud y rugosidad, se muestra en el mapa 2.4, y confirma visualmente la intuición del párrafo anterior. La correlación entre altitud y rugosidad a nivel de celda de 1 km × 1 km es notablemente baja, 0,16, de forma que ambas variables tienen contenido informativo diferente sobre nuestra geografía, existen zonas de baja altitud con elevada rugosidad y amplias zonas elevadas relativamente planas. La orografía que se observa en el mapa 2.4 condiciona la distribución de la población, la actividad económica, las comunicaciones y la accesibilidad a los servicios, ya sean públicos o privados (Goerlich, Maudos y Mollá 2021).

Para poner en contexto la distribución de la población en relación a estas variables es conveniente conocer algunos estadísticos generales (Goerlich 2022; Goerlich y Cantarino 2022). A nivel nacional el índice de rugosidad (2.1) toma un valor de 1,041,

de forma que nuestra superficie $3D$ es un 4,1 % mayor que la superficie $2D$. Aunque esto pudiera parecer poco, ello se traduce en una pendiente media del 28,8 % o de 16,1 ° grados sexagesimales, lo que en absoluto resulta despreciable y confirma que España es un país montañoso.

MAPA 2.4: **Altitud versus Rugosidad: Celdas de 1 km × 1 km**



Fuente: IDEE (MDT05) y elaboración propia.

La población, sin embargo, reside en un entorno menos hostil. Ya hemos señalado que la altitud media a la que reside la población no alcanza los 300 m, mientras que la altitud media del país supera los 600 m. Algo similar sucede con la rugosidad. Para las celdas pobladas de GEOSTAT2021 el índice de rugosidad (2.1) toma un valor de 1,017, lo que equivale a una pendiente media del 15,7 % o de 8,8 ° grados, alrededor de la mitad del promedio para el territorio nacional.

El cuadro 2.4 muestra la distribución de la población por cortes altimétricos. Casi un tercio de la población reside por debajo de los 50 m de altitud sobre el nivel del mar, aunque las celdas habitadas no lleguen al 10 %, y algo más de la mitad de la población —el 53,3 %— reside por debajo de los 200 m de altitud. El 20 % de población que se localiza entre los 500 y los 700 m de altitud se debe, de nuevo, a la aglomeración urbana de Madrid —la altitud

media de las celdas pobladas del municipio de Madrid (28079) es de 654 m—. Madrid en estas cuestiones siempre aparece como un *outlier*. En el extremo opuesto, solo el 1,2 % de la población reside en celdas por encima de los 1 000 m de altitud promedio. Resulta interesante observar cómo estas celdas son las más rugosas, pero no las más alejadas de la costa. Por el contrario, las más alejadas, las situadas entre los 500 m y los 700 m de altitud presentan una rugosidad algo inferior al promedio de celdas habitadas.

CUADRO 2.4: Celdas habitadas, población, distancia a la costa y pendiente por intervalos de altitud. España, 2021

Altitud	Celdas		Población		Distancia a la costa (km)	Pendiente	
	Número	Porcentaje	Personas	Porcentaje		Porcentual	Grados (°)
Hasta 50 m	10.815	9,4	14.962.964	31,6	8	12,4	7,0
Más de 50 m y hasta 100 m	8.283	7,2	5.233.358	11,0	14	18,6	10,4
Más de 100 m y hasta 200 m	13.822	12,0	5.068.849	10,7	40	19,4	10,8
Más de 200 m y hasta 300 m	11.834	10,3	3.464.772	7,3	72	19,6	10,9
Más de 300 m y hasta 500 m	21.162	18,3	4.264.702	9,0	94	19,2	10,7
Más de 500 m y hasta 700 m	20.995	18,2	9.540.501	20,1	235	13,5	7,6
Más de 700 m y hasta 1.000 m	20.977	18,2	4.283.075	9,0	192	16,4	9,2
Más de 1.000 m	7.522	6,5	582.577	1,2	194	23,5	13,0
Total	115.410	100,0	47.400.798	100,0	89	15,7	8,8

Fuente: INE (2024), IDEE (MDT05) y elaboración propia.

El cuadro 2.5 muestra la distribución de la población por intervalos de rugosidad, medida en términos de pendiente porcentual. Más de la mitad de la población —el 56,6 %— reside en intervalos de pendiente que oscilan entre el 5 % y el 15 %. Resulta curioso observar cómo en los extremos de la distribución, terrenos muy planos —con pendientes inferiores al 5 %— o muy rugosos —con pendientes superiores al 35 %— el porcentaje de población residente es muy reducido —el 4 % en el primer caso y el 6 % en el segundo— y en ambos casos la distancia a la costa está por debajo del promedio nacional. De hecho, en el intervalo de mayor rugosidad

la distancia promedio a la costa de las celdas habitadas es de solo 29 km, lo que se debe en gran parte a las celdas de las comunidades de Illes Balears, Canarias, Cantabria, País Vasco, Comunitat Valenciana, Principado de Asturias y Cataluña, con mucha población cercana a la línea de costa, pero también con una orografía complicada en algunas zonas cercanas al mar.

CUADRO 2.5: Celdas habitadas, población, altitud y distancia a la costa por intervalos de pendiente (rugosidad) del terreno. España, 2021

Pendiente Porcentual	Celdas		Población		Altitud (m)	Distancia (km)	Índice de Rugosidad	Pendiente en Grados (°)
	Número	Porcentaje	Personas	Porcentaje				
Hasta el 5 %	5.837	5,1	1.905.912	4,0	152	57	1,001	2,4
Más del 5 % y hasta 10 %	20.008	17,3	13.576.861	28,6	283	105	1,003	4,3
Más del 10 % y hasta 15 %	18.832	16,3	13.242.322	27,9	330	117	1,008	7,0
Más del 15 % y hasta 20 %	14.680	12,7	7.627.044	16,1	305	90	1,015	9,8
Más del 20 % y hasta 35 %	30.829	26,7	8.200.072	17,3	276	45	1,034	14,5
Más del 35 %	25.224	21,9	2.848.587	6,0	338	29	1,095	23,6
Total	115.410	100,0	47.400.798	100,0	297	89	1,017	8,8

Fuente: INE (2024), IDEE (MDT05) y elaboración propia.

Finalmente, el cuadro 2.6 ofrece la distribución bivalente de la población por intervalos de altitud y rugosidad, medida esta en términos de pendiente porcentual. El mayor volumen de población —un 12 % del total— reside en el intervalo de menor altitud —hasta los 50 m— y una pendiente moderada —entre el 5 % y el 10 %—, bastante por debajo del promedio donde reside la población. Los otros volúmenes de población importantes los encontramos en el mismo intervalo de altitud y el siguiente en pendiente —un 8 % del total de población—, y en el intervalo de altitud entre los 500 m y los 700 m y pendiente entre el 5 % y el 15 % —un 7 % del total de población en cada tramo de rugosidad—, asociados de nuevo a la aglomeración urbana de Madrid.

CUADRO 2.6: Distribución bivalente de la población por intervalos de altitud y pendiente (rugosidad) del terreno. España, 2021

Altitud	Pendiente porcentual						España
	Hasta el 5 %	Más del 5 % y hasta 10 %	Más del 10 % y hasta 15 %	Más del 15 % y hasta 20 %	Más del 20 % y hasta 35 %	Más del 35 %	
Hasta 50 m	2,7	11,8	8,3	4,4	3,9	0,4	31,6
Más de 50 m y hasta 100 m	0,2	1,9	2,8	2,3	2,9	0,9	11,0
Más de 100 m y hasta 200 m	0,2	2,2	2,5	1,5	2,9	1,3	10,7
Más de 200 m y hasta 300 m	0,1	1,4	1,8	1,3	1,6	1,0	7,3
Más de 300 m y hasta 500 m	0,1	1,9	2,1	1,7	2,1	1,0	9,0
Más de 500 m y hasta 700 m	0,4	7,1	7,3	2,8	1,9	0,7	20,1
Más de 700 m y hasta 1.000 m	0,2	2,1	2,8	1,8	1,5	0,5	9,0
Más de 1.000 m	0,0	0,1	0,3	0,2	0,4	0,2	1,2
España	4,0	28,6	27,9	16,1	17,3	6,0	100,0

Fuente: INE (2024), IDEE (MDT05) y elaboración propia.

2.3. Concentración de la población a la luz de GEOSTAT2021

Las características básicas de GEOSTAT2021 expuestas en el apartado 2.1, y en especial la información del cuadro 2.1, hacen intuir un elevado grado de concentración de la población a esta escala. Este apartado ofrece información adicional sobre este fenómeno, con especial énfasis en las diferencias regionales y a partir del instrumental de medición de la desigualdad.

La concentración de la población española a partir de la estructura municipal es bien conocida, (Goerlich *et al.* 2015), y ha sido ilustrada para GEOSTAT2011 por Gutiérrez *et al.* (2023) en términos nacionales y a efectos comparativos con otros países de Europa. Estos autores muestran el elevado grado de concentración de nuestra población en relación a la de nuestros vecinos, y cómo dicha concentración no es explicable por factores geográficos o climáticos, proponiendo una explicación de carácter histórico.

Utilizando el índice de Gini —un índice sintético de desigualdad acotado entre 0 y 1, siendo 0 el valor correspondiente a una distribución uniforme y 1 el correspondiente a la máxima desigualdad— Goerlich *et al.* (2015, gráfico 4.7) muestra, para la distribución de la población a nivel municipal, un valor del índice creciente de forma monótona a lo largo del siglo xx. En 1900 el índice de Gini toma un valor de 0,637, mientras que en 2011 dicho valor era de 0,866. Utilizando los datos de población municipal del censo 2021 dicho valor asciende a 0,872. Son valores tremendamente elevados si los comparamos con los que obtenemos para la distribución de la renta, que se sitúan en el entorno de 0,3 para la renta disponible, y donde pequeñas variaciones se asocian con incrementos importantes de la desigualdad (Goerlich 2016a). A nivel municipal, en 2021, el 10 % de los municipios más poblados albergan al 81 % de la población y el 1 % de los municipios más poblados al 43 % de la población.

Si agregamos nuestra *grid* original, con resolución de 1 km × 1 km, a celdas cuadradas de 10 km × 10 km⁴⁵ —es decir, con una superficie de 100 km²— entonces solo tenemos 300 celdas vacías. A esta escala el 95 % del territorio está ocupado. En este caso, obtenemos 43 celdas con 1 solo habitante, y 196 que no sobrepasan los 5 residentes. En el otro extremo, 419 celdas tienen más de 20.000 habitantes, albergando al 76 % de la población. Hay 86 celdas con más de 100.000 residentes, 21 con más de 250.000, 9 con más de 500.000 y solo 3 con más de 1 millón de habitantes. Los estadísticos de concentración, sin embargo, son similares a los que obtenemos para la distribución de la población municipal. El índice de Gini toma un valor de 0,864, el porcentaje de población residente en el 10 % del territorio habitado más poblado es del 80 % y en el 1 % del territorio habitado más poblado es del 38 %.

La concentración de la población aumenta si la medimos a partir de la *grid* de 1 km × 1 km. El cuadro 2.7 ofrece índices de desigualdad y porcentajes de población residente para determinados porcentajes de celdas más pobladas —el complementario

⁴⁵ Utilizando el sistema de *grids* europeo normalizado (INSPIRE 2023a).

de la curva de Lorenz—. A nivel nacional el índice de Gini es de 0,910, y la CC. AA. con mayor desigualdad es Cataluña, con un valor de 0,921. El hecho de que el índice de Gini esté acotado superiormente hace que sea poco sensible a cambios importantes en la distribución una vez nos acercamos al límite superior. Un índice alternativo, no acotado superiormente, es el índice de Theil (1967), que también se muestra en el cuadro 2.7 y que muestra una mayor dispersión entre las diversas CC. AA. Para la distribución de la renta dicho índice nunca alcanza el valor unitario y se sitúa, normalmente, muy por debajo de la unidad (Aldás, Goerlich y Mas 2006), sin embargo, el valor del índice de Theil (1967) a nivel nacional para la distribución de la población a nivel de *grid* de 1 km × 1 km es de 2,798, y la comunidad autónoma que muestra una mayor desigualdad es, de nuevo, Cataluña con un valor de 3,202. Obsérvese que ambos índices de desigualdad ofrecen ordenaciones diferentes, ya que se centran en diferentes partes de la distribución, a pesar de lo cual su correlación es razonablemente elevada, 0,60 a nivel de CC. AA. y 0,80 a nivel provincial, exceptuando Ceuta y Melilla en ambos casos. A nivel provincial —tabla A.3.2— se observa una mayor dispersión y heterogeneidad de resultados.

Resulta intuitivo examinar los porcentajes de población residente en determinados porcentajes de las celdas más pobladas. Así, es llamativo que en solo el 10 % de las celdas más pobladas —algo más de 11.000 celdas— resida el 88 % de la población y en el 2 % de las celdas más pobladas más de la mitad de la población, el 57 %. En el 1 % de las celdas más pobladas —algo más de 1 000 celdas— reside el 41 % de la población, en el 0,5 % más de la cuarta parte —el 27 %— y en el 0,1 % el 8,5 %. Estas cifras muestran el elevado grado de concentración de la población sobre el territorio a esta escala.

Centrándonos en el 1 % de las celdas más pobladas, a nivel de CC. AA., y exceptuando las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla, las diferencias son sustanciales. El porcentaje más bajo corresponde a Madrid, con el 15 %, debido al elevado número de celdas densamente pobladas en esta comunidad, mientras que el más alto se debe al Principado de Asturias, con el 57 %, de forma que más de la mitad de la población de esta comunidad reside en el 1 % de las celdas.

CUADRO 2.7: Indicadores de desigualdad y concentración de la población. Comunidades autónomas, 2021

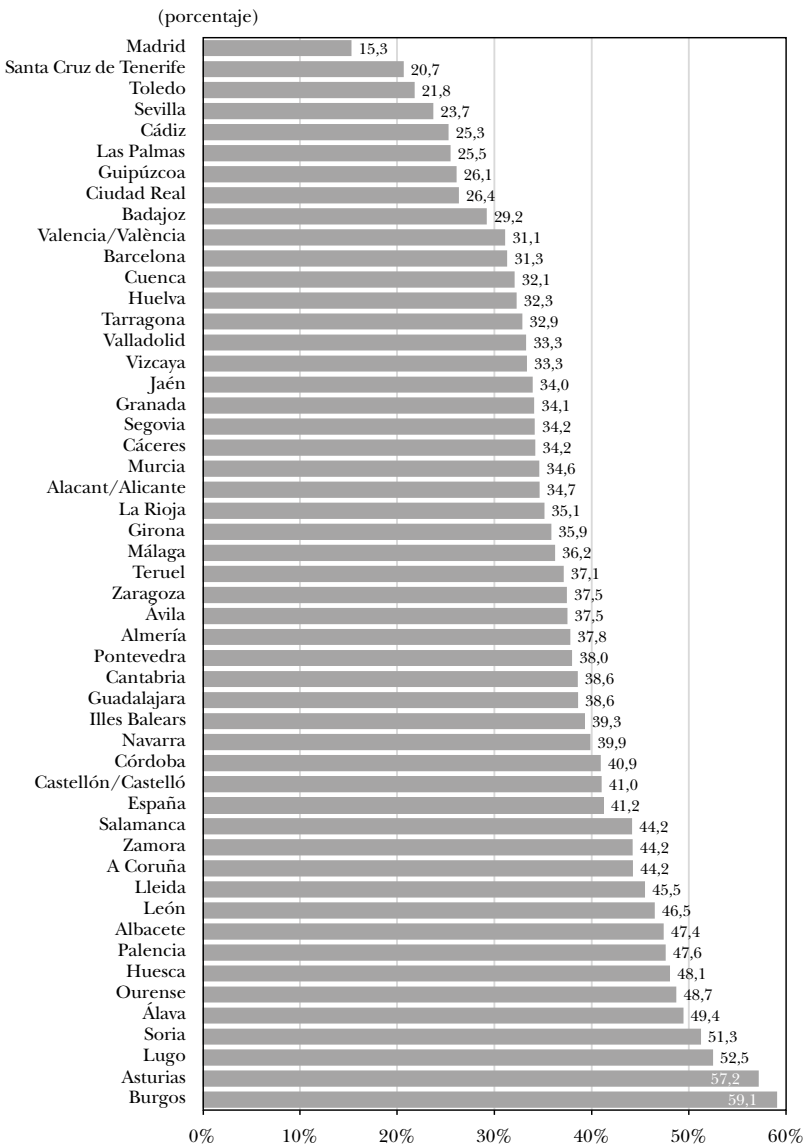
Código	CC. AA.	Desigualdad		Porcentajes de población en determinados porcentajes de las celdas más pobladas				
		Gini	Theil	10 %	5 %	3 %	2 %	1 %
01	Andalucía	0,908	3,150	87,6	72,4	59,4	49,1	33,3
02	Aragón	0,910	2,711	87,2	78,8	71,5	63,9	49,1
03	P. de Asturias	0,897	2,196	86,9	81,7	76,3	70,1	57,2
04	Illes Balears	0,895	2,481	86,3	73,5	62,2	53,5	39,3
05	Canarias	0,832	2,222	73,4	56,1	44,1	35,5	23,2
06	Cantabria	0,863	2,089	80,5	68,8	59,7	52,1	38,6
07	Castilla y León	0,875	2,126	82,4	73,6	66,3	59,7	47,0
08	Castilla-La Mancha	0,876	2,629	80,9	65,1	52,9	44,1	31,5
09	Cataluña	0,921	3,202	89,3	78,4	67,7	58,4	42,2
10	C. Valenciana	0,902	2,936	86,4	73,1	60,8	50,7	34,7
11	Extremadura	0,887	2,920	82,1	65,9	54,2	45,3	31,3
12	Galicia	0,842	1,726	78,6	69,8	63,1	57,4	46,8
13	C. de Madrid	0,842	3,013	73,4	51,2	36,6	27,1	15,3
14	Región de Murcia	0,909	2,917	88,6	74,5	61,3	50,4	34,6
15	C.F. de Navarra	0,903	2,647	87,7	75,5	64,7	56,0	39,9
16	País Vasco	0,914	2,870	90,9	77,6	64,0	52,3	34,4
17	La Rioja	0,900	2,741	87,2	73,3	60,1	49,7	35,1
18	C. a. de Ceuta	0,728	2,330	45,3	25,6	16,4	10,9	5,5
19	C. a. de Melilla	0,642	1,959	34,5	17,7	10,6	7,1	3,5
00	España	0,910	2,798	88,3	77,0	66,2	56,9	41,2

Nota: El índice de Theil se corresponde con el segundo índice propuesto en Theil (1967), es decir, el correspondiente al parámetro $\theta = 0$ en la familia de índices de entropía generalizados (Goerlich y Villar 2009).

Fuente: INE (2024) y elaboración propia.

El gráfico 2.1 ilustra esta información por provincias y muestra una enorme heterogeneidad a nivel territorial. El porcentaje más bajo sigue correspondiendo a Madrid, pero en el extremo superior encontramos 4 provincias en las que más del 50 % de la población reside en el 1 % de las celdas más pobladas, Soria, Lugo, Asturias y Burgos. Se trata de provincias con estructuras de asentamientos diferentes, una población mucho más dispersa en el caso de Lugo o Asturias o más concentrada en el caso de Soria o Burgos. La información que proporcionan estos indicadores de lo que pasa en las colas de la distribución es diferente de la que proporcionan los índices de desigualdad en estos casos extremos. Así, a nivel provincial la correlación entre el índice de Gini

GRÁFICO 2.1: Población en el 1 % de las celdas más pobladas. Provincias, 2021



Fuente: INE (2024) y elaboración propia.

y el porcentaje de población en el 10 % de las celdas más pobladas es de 0,965, pero para el 1 % de las celdas más pobladas es prácticamente nula, 0,069. Para el índice de Theil (1967) estas correlaciones son de 0,671 y de $-0,457$ respectivamente.

2.4. Densidad desde un punto de vista económico

Una vez hemos desacoplado los datos de población de las unidades administrativas que cubren todo el territorio, como es el caso de las poblaciones municipales, el cálculo de densidades deja de ser una cuestión trivial, sobre todo desde un enfoque económico. Como acertadamente señalan Duranton y Puga (2020) la disponibilidad de información con un nivel creciente de detalle geográfico está provocando rápidos cambios en cómo los investigadores miden la densidad a efectos de la investigación aplicada (Henderson, Nigmatulina y Kriticos 2021). Aunque la densidad por celda habitada —cuadro 2.2— constituye una clara mejora respecto al cálculo ingenuo que utiliza las superficies de las unidades administrativas a partir de las cuales se recoge tradicionalmente la información demográfica y socioeconómica, no es tampoco la mejor medida de densidad que, desde el punto de vista económico, podemos calcular.

Cualquier medida de densidad trata de resumir una realidad bidimensional —individuos o empleos en un área o superficie dada— en un indicador único, si bien otras características de la densidad pueden ser importantes para el problema en cuestión. Desde un punto de vista económico debemos aproximarnos al concepto de densidad como algo relacionado con la proximidad de los individuos, y en consecuencia con las oportunidades que brinda la interacción entre los mismos. El mundo urbano es más denso que el mundo rural y, en consecuencia, presenta más oportunidades derivadas de una mayor probabilidad de contacto entre individuos, instituciones, empresas o empleos.

Desde este punto de vista, el cociente entre población y celdas o superficie habitada que se muestra en el cuadro 2.2 representa una mejora limitada respecto a la medición tradicional de la densidad ya que, aunque libera el cálculo de los artificiales lindes administrativos, no muestra una estimación de la población próxima o vecina del individuo representativo de una región determinada, es decir, una medida de sus interacciones potenciales con otros individuos dentro de un radio dado (Ciccone y Hall 1996; de la Roca y Puga 2007).

Visto desde esta óptica, el primer problema al que debemos hacer frente para el cálculo de densidades es la elección de una escala adecuada. Los desplazamientos urbanos diarios pueden

requerir medir la densidad dentro de un radio de 5 o 10 km para captar la mayor parte de los desplazamientos por motivos de trabajo o estudio (Duranton y Turner 2018). Por el contrario, el estudio del desempeño del transporte por carretera puede requerir radios mucho más grandes, del orden de 90 o 120 km.

El último apartado de este capítulo introduce el cálculo de densidades en esta dirección, una medida de proximidad a otros individuos como indicador de densidad económica y que podemos hacer efectiva gracias a la *grid* de población. Este tipo de cálculo aparecerá en capítulos posteriores, en otros contextos y utilizando otras escalas. El apartado tiene, en parte, un contenido metodológico, ilustrando algunos de los problemas técnicos de cálculo, además de introducir una medida de densidad novedosa en el análisis regional y urbano español.

Si nos concentramos en los viajes de corta distancia, podemos preguntarnos cuál es la población próxima de un residente español promedio en un radio de 10 km. Dada la distribución de la población observada en el mapa 2.2 podemos implementar este cálculo de la siguiente forma:

- 1) Para cada celda de la *grid* con población trazamos un círculo de 10 km. En la práctica el círculo lo trazamos a partir del centroide de dicha celda. Ello representa un área de 314 km².
- 2) Examinamos qué celdas pobladas de la *grid* caen dentro de dicho círculo. Como las celdas son cuadradas, pero el círculo no, la regla utilizada es considerar como pertenecientes a dicho círculo aquellas celdas cuyo centroide cae dentro del mismo⁴⁶.
- 3) Sumamos, para cada celda, la población de las celdas que caen dentro del círculo. Esta es la población próxima a la de la celda en cuestión, y que también incluye la población de la

⁴⁶ Conceptualmente el problema es el mismo que el de la intersección de la *grid* y los lindes administrativos, que ya nos ha aparecido anteriormente, o la interacción entre la información ráster y la vectorial (Lovelace, Nowosad y Muenchow 2024, capítulo 6), aunque los cálculos están hechos enteramente en formato vectorial. La solución adoptada ahora es distinta, por una parte, el problema ahora es diferente, y por otra ello permite reducir la carga computacional, tanto en este ejercicio como en algunos posteriores que utilizan el mismo enfoque.

- propia celda. Así pues, para cada celda obtenemos un valor de la población próxima dentro de un radio determinado, por lo que disponemos de una *grid* para España de población próxima, con tantas celdas como celdas con población en la *grid* original, es decir, 115.410. Esta la podemos denominar *grid* de proximidad de un radio dado, en nuestro ejemplo 10 km.
- 4) La población próxima de un residente español promedio se obtiene como media ponderada por la población de la *grid* de proximidad⁴⁷. Este cálculo es lo que Duranton y Puga (2020) denominan densidad experimentada.

Algunos detalles de implementación son relevantes. Los cálculos, relativamente intensivos en computación, se realizan en el sistema de referencia de coordenadas (CRS) de la *grid*, ETRS89-LAEA, y las distancias son euclídeas, es decir, nos movemos en línea recta y no a través de la red viaria o urbana.

Los cálculos de este apartado no toman en cuenta las discontinuidades espaciales debidas a la superficie terrestre, es decir, en el caso de las islas, o de las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla, no se acotan sus cálculos a sus respectivos territorios, aunque la *grid* solo cubre, naturalmente, la población de España. Esto no tiene consecuencias si el radio es reducido, como el considerado en este ejemplo, pero podría tenerlas si la vecindad fuera mucho más grande. El concepto de población próxima es algo más difuso si debemos atravesar el mar.

Sería posible incorporar en el cálculo un factor de descuento que otorgara más peso a la población de celdas más cercanas (Henderson, Nigmatulina y Kriticos 2021), aunque nosotros no incluiremos este factor en los cálculos.

Cuando el radio de proximidad es 0, de forma que la *grid* de proximidad coincide con la *grid* de población, el algoritmo anterior implica simplemente calcular, como población próxima de un residente promedio de un área dada, la media ponderada por la población de las celdas correspondientes. Henderson,

⁴⁷ La *grid* de proximidad para GEOSTAT2021 y un radio de 10 km está disponible en Goerlich (2024a).

Nigmatulina y Kriticos (2021) llaman a este indicador densidad de población personal, e intuitivamente es una medida de las interacciones potenciales entre los individuos considerando como vecindad solo a la población de cada celda en cuestión.

Naturalmente, el cálculo puede implementarse para cualquier área a partir de la *grid* de proximidad, utilizando medias ponderadas por la población de las celdas en el proceso de agregación. La ponderación por la población es importante, ya que de otra forma estaríamos calculando la población en un radio de 10 km de la celda o el lugar promedio, en lugar de en un radio de 10 km del residente promedio.

A nivel agregado, el residente español promedio tiene próximas a algo más de medio millón de personas en un radio de 10 km, un valor muy elevado que deriva de la elevada concentración de la población.

La densidad de población personal y la densidad experimentada, o población próxima de un residente promedio, en un radio de 10 km se ofrece en el cuadro 2.8 a nivel de CC. AA. y en el cuadro A.3.3 del apéndice a nivel de provincia. La densidad de población personal, que no es más que la media de la distribución de los tamaños de celdas ponderada por la población de cada celda, ya muestra diferencias importantes a nivel regional, pero donde estas diferencias son tremendamente llamativas es cuando consideramos un radio de vecindad de 10 km. En este caso, solo Madrid y Cataluña están por encima de la media nacional. Destaca el caso de Madrid, que triplica la media nacional, lo que resalta su característica de aglomeración urbana muy por encima del resto de España. La columna *Celdas* del cuadro 2.8 muestra la media de celdas implicadas en el cálculo de la población próxima y ofrece cierta información sobre la dispersión de la población. Por ejemplo, el número medio de celdas implicadas en el cálculo en el caso de Galicia es muy superior a las implicadas en el caso de Madrid, pero la densidad experimentada de Galicia es muy inferior a la de Madrid, y solo un 25 % de la del agregado nacional. Ello es indicativo de una mayor dispersión de la población en Galicia con celdas poco pobladas. En realidad, esta es una situación bastante general en muchas CC. AA., como Illes Balears, Principado de Asturias o País Vasco.

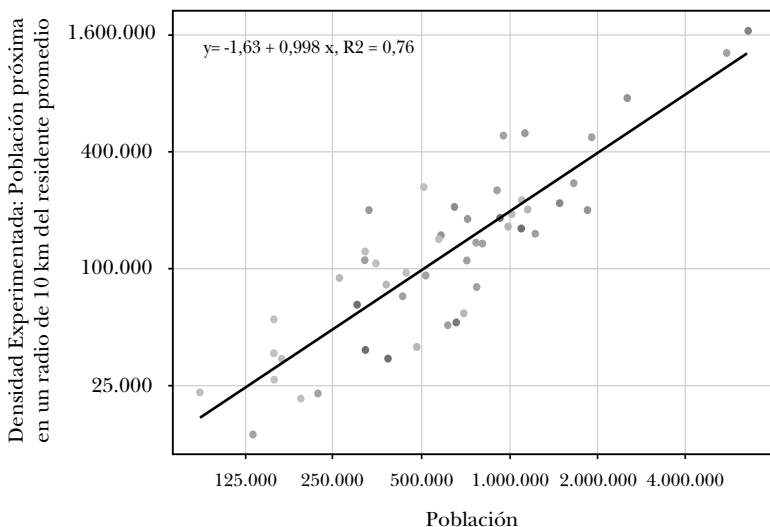
CUADRO 2.8: Densidad de población personal y densidad experimentada. Comunidades autónomas, 2021

Código	CC. AA.	Densidad de población personal		Densidad experimentada: población próxima en un radio de 10 km del residente promedio		
		Personas	España = 100	Celdas	Personas	España = 100
01	Andalucía	7.731	75,4	110	247.598	43,3
02	Aragón	11.778	115,0	47	359.225	62,9
03	P. de Asturias	10.139	99,0	183	164.969	28,9
04	Illes Balears	8.042	78,5	189	202.669	35,5
05	Canarias	5.695	55,6	130	209.082	36,6
06	Cantabria	5.961	58,2	155	142.176	24,9
07	Castilla y León	6.246	61,0	59	119.588	20,9
08	Castilla-La Mancha	5.561	54,3	43	59.255	10,4
09	Cataluña	14.962	146,0	164	979.110	171,4
10	C. Valenciana	10.570	103,2	163	478.962	83,8
11	Extremadura	4.069	39,7	51	46.112	8,1
12	Galicia	5.620	54,8	207	143.319	25,1
13	C. de Madrid	16.144	157,6	138	1.686.299	295,1
14	Región de Murcia	6.733	65,7	152	217.433	38,1
15	C. F. de Navarra	7.138	69,7	87	208.381	36,5
16	País Vasco	10.897	106,4	176	351.610	61,5
17	La Rioja	9.275	90,5	60	110.590	19,4
18	C. a. de Ceuta	10.701	104,4	27	84.071	14,7
19	C. a. de Melilla	12.148	118,6	18	86.450	15,1
00	España	10.246	100,0	134	571.344	100,0

Fuente: INE (2024) y elaboración propia.

A nivel provincial —tabla A.3.3— las diferencias son todavía más extremas. Solo 3 provincias superan la media nacional, Madrid, Barcelona y Valencia, y solo otras 3 superan el 50 % de dicha media, Vizcaya, Zaragoza y Sevilla. En realidad, estas 3 provincias se sitúan en el entorno del 85 % del promedio nacional, y el resto de las provincias se sitúan por debajo del 50 %. Sin embargo, lo más llamativo es que en algunas provincias la población próxima en un radio de 10 km del residente promedio es tremendamente reducida. Destaca Teruel, que no llega a los 14.000 habitantes de población próxima, seguida de Cuenca, Huesca y Soria, que no alcanzan los 25.000 habitantes. Estos contrastes nos hablan de las oportunidades económicas y de relación entre los distintos territorios, en la medida en que una mayor densidad facilita las interacciones entre los individuos.

GRÁFICO 2.2: Densidad experimentada versus población. Provincias, 2021



Nota: Escala logarítmica.

Fuente: INE (2024) y elaboración propia.

Esta es otra forma de ilustrar la concentración extrema de la población en nuestro país, una forma relativamente flexible, porque admite cualquier tipo de agregación que no sea por áreas administrativas.

Los datos de los cuadros 2.8 y A.3.3 muestran una clara relación positiva entre el tamaño demográfico y la densidad experimentada. La economía urbana ha estudiado profusamente esta relación a nivel de ciudad (Duranton y Puga 2020), y que nosotros también observamos a nivel de área administrativa más amplia. El gráfico 2.2 muestra —en escala logarítmica— la relación entre la densidad experimentada y la población a nivel provincial —excluyendo Ceuta y Melilla—. A esta escala, la elasticidad implícita en dicho gráfico es unitaria con un R^2 de 0,76. Dicha elasticidad se mostró, sin embargo, muy sensible a la escala geográfica, ya que a nivel de CC. AA. es solo de 0,58, con un ajuste notablemente menor, R^2 de 0,36.

2.5. Conclusiones

El análisis descriptivo de GEOSTAT2021 realizado en este capítulo refuerza, en gran medida, lo que ya sabemos de la distribución de la población a escala municipal, y muestra el elevado grado de concentración de esta cuando aumentamos la granularidad de la información. La población española tiende a concentrarse en la franja costera —casi un tercio se sitúa a menos de 5 km de la costa— y en zonas de baja altitud —casi un tercio se sitúa a una altitud que no supera los 50 m sobre el nivel del mar—. Aunque nuestra complicada orografía condiciona grandemente esta distribución y la gran aglomeración urbana de Madrid siempre aparece como una observación atípica.

Desde el punto de vista demográfico una gran parte del territorio está vacío, alrededor del 80 % medido a la escala de una *grid* con resolución de celdas de 1 km × 1 km. Pero incluso el territorio habitado muestra una distribución tremendamente asimétrica, con la mayoría de la población concentrada en un espacio muy reducido. Más de la mitad de la población —el 57 %— se sitúa en el 2 % de las celdas más pobladas.

Esta concentración de la población tiene su reflejo en la concentración de la actividad económica, la prestación de servicios, públicos y privados, y las infraestructuras de transporte. La concentración presenta un claro *trade-off* entre costes y beneficios. Por ejemplo, hasta un determinado umbral la prestación de servicios públicos a la población se ve facilitada por la concentración de esta (Goerlich, Maudos y Mollá 2021), pero también es cierto que estos costes y beneficios no parece que sean tenidos en cuenta adecuadamente por los poderes públicos, los agentes políticos o las fuerzas del mercado.

Por otra parte, las diferencias regionales son enormes, y aumentan de forma considerable conforme consideramos áreas más pequeñas, de forma que a nivel provincial la heterogeneidad es mucho mayor que a nivel de CC. AA.

Liberar las estadísticas demográficas de los lindes administrativos nos permite adoptar enfoques alternativos de análisis y contestar preguntas de forma precisa cuando antes solo podíamos intuir las respuestas correctas de forma burda. El cálculo de la densidad

experimentada, o población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio, es un ejemplo de ello, y arroja resultados interesantes cuando los datos, generados a nivel de celda, son agregados a CC. AA. o provincias, pero podrían ser agregados con arreglo a cualquier otro criterio. Así, la densidad experimentada muestra el claro contraste de oportunidades de contactos bilaterales entre provincias como Madrid y Teruel o Soria.

Veremos otros ejemplos de aplicación de las estadísticas en formato de *grid* a lo largo de los capítulos siguientes de la monografía⁴⁸.

⁴⁸ Para un ejemplo de aplicación de las estadísticas en formato de *grid* en el campo de la accesibilidad de la población a los servicios, públicos y privados, puede verse Goerlich (2023c).

3. Ejemplo de uso de la *grid* de población con resolución 1 km × 1 km: el grado de urbanización del territorio

Hasta hace unos años la práctica totalidad de clasificaciones rural/urbano partía de los municipios, ya que son estos los que constituyen las unidades estadísticas básicas de nuestro sistema político administrativo. Los criterios habitualmente utilizados en la estadística oficial consistían en clasificar como rural todo aquel municipio con una población o una densidad inferior a un determinado umbral, estando condicionados por la estructura administrativa en la que se divide el territorio. Sin embargo, dentro de un mismo municipio pueden existir diferentes tipos de asentamientos o núcleos de diferente magnitud, no existir ninguno o incluso que existan núcleos que por proximidad estén unidos a otro término municipal.

La disponibilidad de información estadística demográfica más allá de los límites administrativos, como la existencia de una *grid* de población con resolución 1 km × 1 km, constituye un avance en este sentido y permite, entre otras aplicaciones, obtener una clasificación del territorio según su grado de urbanización más allá de la estructura administrativa del Estado. Esto resulta fundamental para el diseño de políticas territoriales como las orientadas al desarrollo de las áreas rurales, a las relaciones entre las áreas urbanas y rurales y a las directrices de la agenda urbana que exigen una conceptualización y delimitación clara de estas zonas (Reig, Goerlich y Cantarino 2016).

Tras analizar la distribución de la población a partir de la *grid* con resolución de 1 km × 1 km derivada del censo 2021, este capítulo implementa una de las posibles aplicaciones de esta: obtener

el grado de urbanización (DEGURBA) de los municipios a partir de los asentamientos de la población sobre el territorio, y donde dichos asentamientos se determinan a partir de las celdas pobladas de dicha *grid* (esquema 3.1). Estudios anteriores que han realizado ejercicios similares para España (Goerlich y Cantarino 2013a, 2013b, 2014, 2015; Reig, Goerlich y Cantarino 2016) se basaban en información de censos anteriores, mientras que el ejercicio de este capítulo parte de la *grid* censal 2021, GEOSTAT2021, y toma como referencia, además, la metodología estandarizada de Comisión Europea *et al.* (2021).

Esta metodología se divide en dos fases, como se describe en el apartado 3.1. En la primera fase se clasifica cada celda de la *grid* en una tipología rural/urbana y en la segunda fase se establece una correspondencia entre el resultado de la clasificación a nivel de celda con las unidades territoriales administrativas. En nuestro caso se considera como unidad territorial el municipio, para una mejor identificación de las áreas rurales y urbanas con los centros de decisión política a nivel local. El cómputo se realiza a partir de las herramientas GHS-DUG —para la primera fase— y GHS-DU-TUC —para la segunda— diseñadas en el marco del proyecto Global Human Settlement Layer (GHSL) del Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea, que implementa fielmente la metodología de Comisión Europea *et al.* (2021).

El apartado 3.2 muestra los resultados de aplicar la metodología de Comisión Europea *et al.* (2021) a partir de la *grid* del censo 2021 para obtener la clasificación de la tipología de urbanización a nivel de celda. El apartado 3.3 da un paso más y muestra el resultado de la segunda fase de la metodología obteniendo la clasificación del grado de urbanización de los municipios españoles, ofreciendo también los resultados agregados a nivel provincial y por comunidades autónomas, así como el perfil sociodemográfico de cada tipo de municipio. El apartado 3.4 ofrece un análisis del indicador de densidad experimentada introducido en el capítulo anterior por grado de urbanización y, finalmente, el apartado 3.5 ofrece el resumen y las conclusiones del capítulo.

ESQUEMA 3.1: Objetivo y contenido del capítulo 3

Objetivo	Datos	Procesos	Resultados
<ul style="list-style-type: none"> • Obtener el grado de urbanización a partir de la <i>grid</i> censal 1 km × 1 km de 2021. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Grid</i> de población 1 km × 1 km, GEOSTAT2021. • Datos auxiliares: LiDAR, SIOSE AR y Base de Datos de Líneas Límite (IGN). 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación de la metodología de la Comisión Europea <i>et al.</i> (2021) con las herramientas del JRC. • Fase 1: clasificación de las celdas de la <i>grid</i> según su grado de urbanización. • Fase 2: clasificación de los municipios según su grado de urbanización a partir de la clasificación rural/urbana de las celdas de la <i>grid</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Grado de urbanización de las celdas de la <i>grid</i>, a nivel municipal, por provincias y CC. AA. • Indicadores sociodemográficos por grado de urbanización. • Densidad experimentada por grado de urbanización.

Fuente: Elaboración propia.

3.1. Aspectos metodológicos

El interés por disponer de una definición armonizada que facilite las comparaciones internacionales y mejore la calidad de las estadísticas urbanas y rurales del grado de urbanización a nivel internacional llevó a la Comisión Europea a desarrollar una metodología armonizada, junto con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat), la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) y el Banco Mundial (Comisión Europea *et al.* 2021).

Al igual que muchas de las propuestas anteriores sobre una metodología para clasificar las áreas rurales y urbanas (Dijkstra y Poelman 2014; Dijkstra, Poelman y Ackermans 2019; Eurostat 2019, Comisión Europea *et al.* 2021), esta metodología se basa en la clasificación del grado de urbanización a partir de criterios exclusivamente demográficos, tomando como base la distribución de la población sobre una *grid* con resolución de 1 km × 1 km. Si bien pretende superar las deficiencias respecto a los criterios

tradicionales sencillos basados en densidades de población o umbrales mínimos, no considera información sobre las coberturas o usos del suelo, o cuestiones relacionadas con la accesibilidad como sí hacen otros estudios (Reig, Goerlich y Cantarino 2016), cuestiones que dificultan la comparabilidad internacional ante la falta de homogeneidad de dicha información.

Clasificación del grado de urbanización a nivel de celda

La metodología de la Comisión Europea (Comisión Europea *et al.* 2021) toma como información de partida la *grid* de población y define unos criterios para clasificar, en una primera fase, cada una de las celdas de la *grid* de acuerdo con su grado de urbanización atendiendo a factores como la densidad de población, el tamaño demográfico y la contigüidad (celdas vecinas), pudiendo clasificarse cada celda exclusivamente en una sola categoría⁴⁹.

Esta metodología define dos niveles de clasificación: un primer nivel formado por tres categorías y un segundo nivel, más amplio, de siete categorías. El cuadro 3.1 muestra las categorías en las que se pueden clasificar las celdas de la *grid* de población en la primera fase. En el nivel 1, compuesto por tres categorías, las celdas se pueden clasificar como *centro urbano*, *agrupación urbana* o *celda rural*. En tanto que las celdas clasificadas como agrupaciones urbanas o celdas rurales pueden resultar altamente heterogéneas, la Comisión Europea (Comisión Europea *et al.* 2021) introduce una clasificación de nivel 2 donde se desglosan estas dos categorías en tres clases cada una, sumando junto con la categoría de centro urbano, un total de siete tipos de celdas: *centro urbano*, *agrupación urbana densa*, *agrupación urbana semidensa*, *celda suburbana o periurbana*, *agrupación rural*, *celda rural de baja densidad* y *celda rural de muy baja densidad*.

Los criterios considerados en la metodología de Comisión Europea *et al.* (2021) para clasificar las celdas en cada una de las categorías del nivel 1 de la clasificación urbano/rural se describen a continuación.

⁴⁹ Esto representa un pequeño cambio metodológico respecto a lo dispuesto en Eurostat (2019) donde una celda podía pertenecer simultáneamente a un centro urbano y una agrupación urbana.

CUADRO 3.1: Categorías de la clasificación del grado de urbanización de las celdas del nivel 1 y 2

Nivel 1	Nivel 2
Centro urbano	Centro urbano
Agrupación urbana	Agrupación urbana densa
	Agrupación urbana semidensa
	Celda suburbana o periurbana
Celda rural	Agrupación rural
	Celda rural de baja densidad
	Celda rural de muy baja densidad

Fuente: Comisión Europea *et al.* (2021)

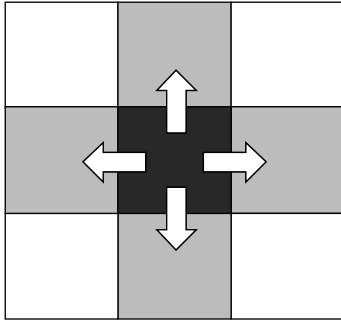
- *Centro urbano.* Es una agrupación de celdas contiguas, excluyendo diagonales (figura 3.1, panel *a*), con una densidad de población de al menos 1 500 habitantes por km² y que tiene, en su conjunto, al menos 50.000 habitantes. Para evitar lagunas entre las celdas y alisar los bordes se aplica, además, la regla iterativa de la mayoría que consiste en incluir en el centro urbano aquellas celdas que, pese a no clasificarse como centro urbano inicialmente, están rodeadas de 5 o más celdas que sí son centro urbano, repitiéndose este proceso de manera iterativa hasta que no se puedan añadir más celdas, de forma que el resultado son centros urbanos compactos, sin huecos y con bordes relativamente suaves. En la definición de centro urbano, se pueden incluir también las celdas contiguas que estén edificadas al menos un 50 %⁵⁰.
- *Agrupación urbana.* Es una agrupación de celdas contiguas, incluyendo diagonales (figura 3.1, panel *b*), con una densidad de población de al menos 300 habitantes por km² y que tienen, en su conjunto, como mínimo 5 000 habitantes, eliminando las celdas que ya hayan sido clasificadas como centro urbano.

⁵⁰ Este criterio se utiliza para evitar generar múltiples centros urbanos en una misma ciudad. En algunas ciudades grandes las zonas con parques de oficinas, centros comerciales, fábricas o carreteras suelen ocupar celdas enteras dividiendo los centros urbanos. Sin embargo, aunque son zonas donde no habita población, sí son utilizadas de manera intensiva por los habitantes de las ciudades, por lo que considerar las celdas que estén al menos un 50 % edificadas en la definición anterior soluciona este problema e incluye estas áreas en los núcleos urbanos (Comisión Europea *et al.* 2021)

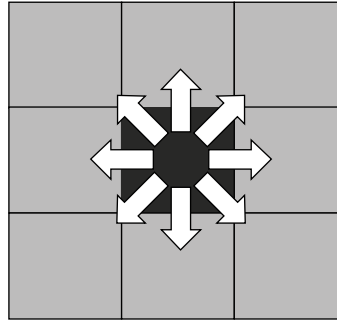
- *Celdas rurales*. Son aquellas celdas que no se han clasificado en ninguna de las dos categorías anteriores.

FIGURA 3.1: **Comprensión de celdas contiguas**

a) Excluyendo diagonales



b) Incluyendo diagonales



Fuente: Comisión Europea *et al.* (2021) y elaboración propia

Los criterios para clasificar cada celda de la *grid* en función del grado de urbanización en siete categorías se describen a continuación.

- *Centro urbano*. Misma definición que en la clasificación de nivel 1.
- *Agrupación urbana densa*. Es una agrupación de celdas contiguas, excluyendo diagonales, con una densidad de, al menos, 1 500 habitantes por km², con una población en su conjunto de al menos 5 000 habitantes, pero inferior a 50.000.
- *Agrupación urbana semidensa*. Es una agrupación de celdas contiguas, incluyendo diagonales, con una densidad de, al menos, 300 habitantes por km², con una población en su conjunto de al menos 5 000 habitantes y no es contigua ni se sitúa a menos de 2 km de una agrupación urbana densa o de un centro urbano.
- *Celdas suburbanas o periurbanas*. Son celdas clasificadas como agrupaciones urbanas en el nivel 1, pero que no se han clasificado en ninguna de las categorías anteriores, situándose, por tanto, de forma contigua o a menos de 2 km de una agrupación urbana densa o de un centro urbano.

- *Agrupación rural*. Es una agrupación de celdas contiguas, incluyendo diagonales, con una densidad de, al menos, 300 habitantes por km² y que suman, en su conjunto, una población inferior a 5 000 habitantes, pero igual o superior a 500.
- *Celdas rurales de densidad baja*. Celdas rurales con una densidad de, al menos, 50 habitantes por km² y que no se han clasificado como agrupación rural.
- *Celdas rurales de muy baja densidad*. Celdas rurales con una densidad inferior a 50 habitantes por km².

Obsérvese que la metodología define las celdas que no tienen población como celdas rurales de muy baja densidad⁵¹.

Clasificación del grado de urbanización a nivel municipal

A partir de la clasificación rural/urbana de las celdas de la *grid*, tanto de nivel 1 como de nivel 2, la metodología de Comisión Europea *et al.* (2021) procede, en una segunda fase, a clasificar el grado de urbanización de los municipios, en tanto que resulta razonable que esta delimitación de las áreas rurales y urbanas vaya asociada a las unidades territoriales de carácter administrativo o político en las que se divide el Estado.

Si se considera la clasificación de las celdas según el grado de urbanización de nivel 1, los municipios se pueden clasificar en tres categorías mutuamente excluyentes (cuadro 3.2) en función de los porcentajes de población municipal que habitan en los diferentes tipos de celdas clasificadas en la primera fase. Los criterios considerados por la Comisión Europea *et al.* (2021) son los descritos a continuación.

⁵¹ En la práctica, en el nivel 1, la herramienta GHS-DUG clasifica como rurales las celdas de forma residual, de forma que son clasificadas como rurales todas las celdas de la extensión de la *grid* que no son clasificadas como pertenecientes a un centro urbano o agrupación urbana. Esto incluye tanto las celdas de agua como las celdas sin población dentro del territorio de referencia de la *grid*. En el nivel 2, la herramienta GHS-DUG es algo más fina e incluye una clasificación para las celdas de agua, de forma que en la práctica tenemos 8 categorías de celdas, y no 7, en el nivel 2. En cualquier caso, las celdas terrestres que no tienen población son clasificadas como celdas rurales de muy baja densidad. Sin embargo, algunas pocas celdas de los centros urbanos tampoco tienen población, como consecuencia de la aplicación de la regla de la mayoría y el rellenado de huecos.

CUADRO 3.2: Categorías de la clasificación del grado de urbanización de las unidades territoriales de los niveles 1 y 2

Nivel 1	Nivel 2
Ciudad o área densamente poblada	Ciudad
Localidad y área semidensa o área de densidad intermedia	Localidad densa
	Localidad semidensa
	Área suburbana o periurbana
Área rural o escasamente poblada	Aldea
	Área rural dispersa
	Área rural mayoritariamente deshabitada

Fuente: Comisión Europea *et al.* (2021).

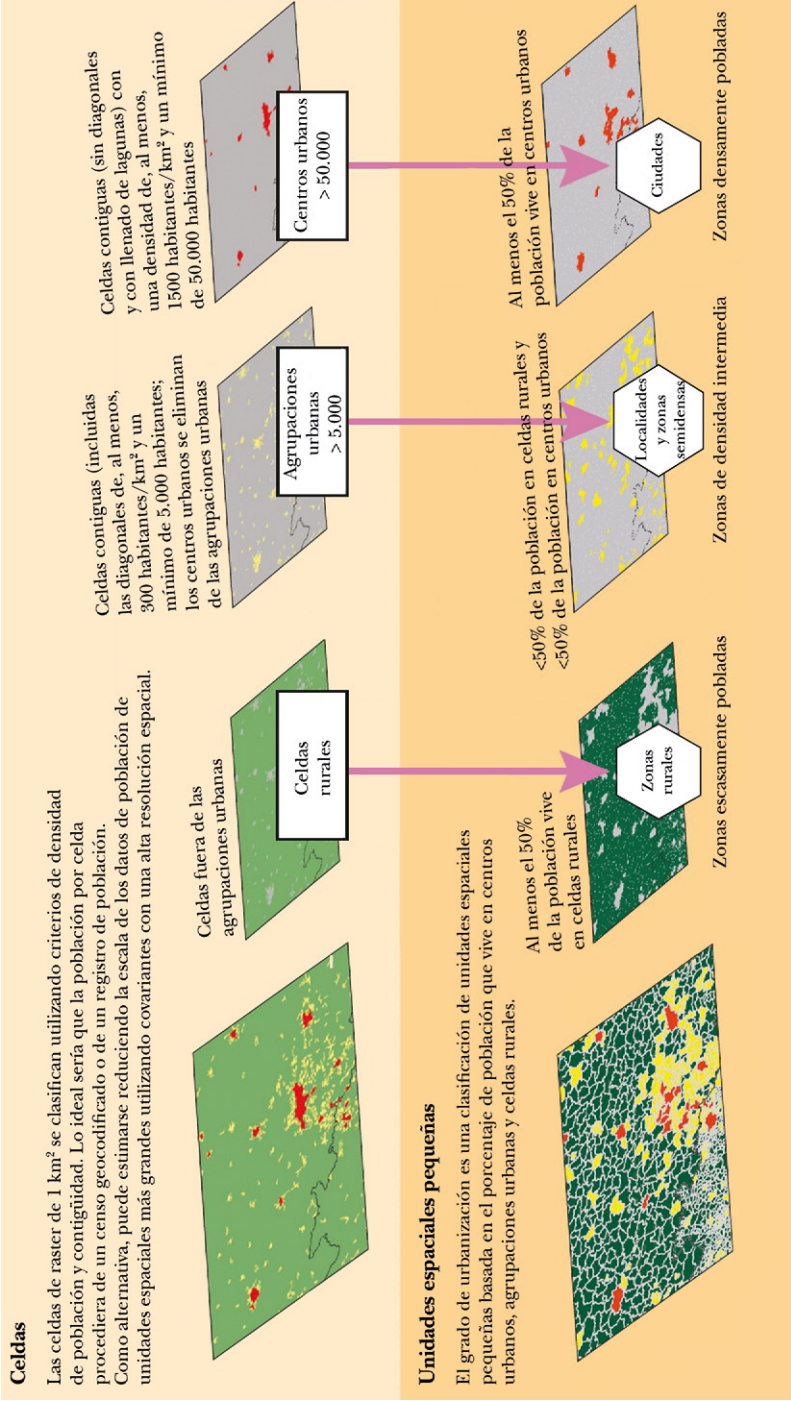
- *Ciudades o áreas densamente pobladas.* Municipios que tienen al menos el 50 % de su población en centros urbanos.
- *Localidades y áreas semidensas o áreas de densidad intermedia.* Municipios que tienen menos del 50 % de su población en centros urbanos, pero no más del 50 % de su población en celdas rurales.
- *Áreas rurales o escasamente pobladas.* Municipios con más de la mitad de su población en celdas rurales.

Estas tres categorías se identifican normalmente con los municipios urbanos —*Ciudades o áreas densamente pobladas*—, intermedios —*Localidades y áreas semidensas o áreas de densidad intermedia*— y rurales —*Áreas rurales o escasamente pobladas*—. Si se desea una clasificación binaria rural/urbano la metodología de Comisión Europea *et al.* (2021) agrupa en la categoría urbana los municipios urbanos e intermedios, dejando como rurales las áreas rurales o escasamente pobladas.

La figura 3.2 muestra esquemáticamente el proceso de clasificación de las celdas y de unidades espaciales pequeñas —en nuestro caso, municipios— para el nivel 1 de la clasificación del grado de urbanización en ambas fases del procedimiento.

Atendiendo a la clasificación de nivel 2 de las celdas de la *grid*, los municipios se pueden clasificar en siete categorías siguiendo un proceso similar al del nivel 1 pero con criterios distintos:

FIGURA 3.2: Nivel I de la clasificación del grado de urbanización: primera y segunda fase



Fuente: Comisión Europea *et al.* (2021).

- *Ciudades*. Misma definición que en la clasificación de nivel 1.
- *Localidades densas*. Municipios cuyo porcentaje de población que habita en agrupaciones urbanas densas es superior al que habita en agrupaciones urbanas semidensas y, a su vez, el porcentaje de población que reside en estos dos tipos de agrupaciones es superior al de celdas suburbanas o periurbanas.
- *Localidades semidensas*. Municipios cuyo porcentaje de población en agrupaciones urbanas semidensas es mayor que en agrupaciones urbanas densas y, a su vez, el porcentaje de población que reside en estos dos tipos de agrupaciones es superior al de celdas suburbanas o periurbanas. Esta categoría, junto con la de localidades densas, se puede agrupar en una sola categoría: *localidades*.
- *Áreas suburbanas o periurbanas*. Municipios cuyo porcentaje de población en celdas suburbanas o periurbanas es superior al de agrupaciones urbanas densas y semidensas.
- *Aldeas*. Municipios donde la mayoría de la población de celdas rurales vive en una agrupación rural.
- *Áreas rurales dispersas*. Municipios donde la mayor parte de la población de celdas rurales reside en celdas rurales de baja densidad.
- *Áreas rurales mayoritariamente deshabitadas*. Municipios donde la mayor parte de la población de celdas rurales vive en celdas rurales de muy baja densidad.

Implementación de la metodología a partir de las herramientas GHS-DUG y GHS-DU-TUC

La clasificación del grado de urbanización, en tanto que requiere de datos espaciales, exige, para su cálculo, la utilización de Sistemas de Información Geográfica (GIS). El JRC de la Comisión Europea, en el marco del proyecto Global Human Settlement Layer (GHSL), ha diseñado unas herramientas para facilitar el cómputo del grado de urbanización a partir de la *grid* de población aplicando de forma consistente la metodología de Comisión Europea *et al.* (2021). La herramienta GHS-DUG aplica la metodología de clasificación del grado de urbanización a una *grid* de población mientras que la

herramienta GHS-DU-TUC completa la siguiente fase clasificando las unidades espaciales de acuerdo con su grado de urbanización a partir del resultado obtenido de la GHS-DUG. Estas dos herramientas han sido las utilizadas para obtener los resultados presentados en este capítulo como aplicación de la *grid* de población 2021.

La herramienta GHS-DUG utiliza como *input* la *grid* de población. Para ello hemos considerado la *grid* de población a partir del censo 2021, GEOSTAT2021, descrita en el capítulo 2. Asimismo, como *inputs* adicionales, hemos incorporado la capa de superficie edificada para considerar en la definición de centro urbano las celdas que estén, al menos, un 50 % edificadas, y la capa de tierra. La primera se construye a partir de la primera cobertura LiDAR (Goerlich 2023b) y ofrece para cada celda el porcentaje de esta que está edificada, mientras que la segunda, construida a partir de la información del SIOSE (2024), se utiliza para determinar la densidad de población de cada celda y ofrece el porcentaje de cobertura terrestre en la celda⁵². El *output* que resulta de la herramienta son ficheros en formato ráster y vectorial con la clasificación de las celdas según su grado de urbanización en los dos niveles descritos anteriormente, así como una tabla de estadísticos descriptivos básicos.

La herramienta GHS-DU-TUC, por su parte, utiliza como *input* el resultado obtenido en la herramienta GHS-DUG, esto es, la *grid* con la clasificación del grado de urbanización de las celdas además de la *grid* de población descrita en el capítulo 1 y un fichero con los contornos de las unidades territoriales que queremos clasificar. En nuestro caso, la unidad territorial a considerar es el municipio por lo que cargamos el contorno de municipios de España procedente de la Base de Datos de Líneas Límite disponible en el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica dependiente del IGN (Goerlich y Pérez 2021). El *output* son ficheros en formato vectorial con la clasificación de cada municipio de acuerdo con el grado de urbanización en los dos niveles, así como una tabla de descriptivos.

⁵² La cobertura terrestre se obtiene a partir de considerar las coberturas 111 a 354 de CODIIGE (SIOSE 2024; Goerlich 2024a).

3.2. Grado de urbanización de las celdas de la *grid* censal 2021

Como resultado de aplicar la metodología descrita en el apartado anterior a la *grid* de población derivada del censo 2021 obtenemos la clasificación del grado de urbanización para cada celda de la *grid*. El cuadro 3.3 muestra la distribución en valores absolutos y en porcentaje de las celdas habitadas y la población para cada una de las categorías, tanto las del nivel 1 —tres categorías— como las de nivel 2 —siete categorías—.

CUADRO 3.3: Distribución de las celdas habitadas y población según tipo de celda. España, 2021

Tipo de celda	Celdas habitadas		Población	
	Celdas	Porcentaje	Número	Porcentaje
Centros Urbanos	3.146	2,7	24.763.349	52,2
Agrupaciones urbanas	8.098	7,0	14.579.741	30,8
Agrupaciones urbanas densas	2.456	2,1	9.777.578	20,6
Agrupaciones urbanas semidensas	880	0,8	1.086.167	2,3
Celdas suburbanas o periurbanas	4.762	4,1	3.715.996	7,8
Celdas rurales	104.166	90,3	8.057.708	17,0
Agrupaciones rurales	4.403	3,8	3.966.163	8,4
Celdas rurales de baja densidad	23.886	20,7	3.151.107	6,6
Celdas rurales de muy baja densidad	75.877	65,7	940.438	2,0
Total	115.410	100,0	47.400.798	100,0

Nota: Las celdas habitadas solo incluyen las celdas con población, de forma que se han eliminado del cálculo las celdas rurales de muy baja intensidad que no tienen población y, también, algunas celdas sin población que se incorporan a la definición de centros urbanos y agrupaciones urbanas densas como consecuencia de la aplicación de la regla iterativa de la mayoría.

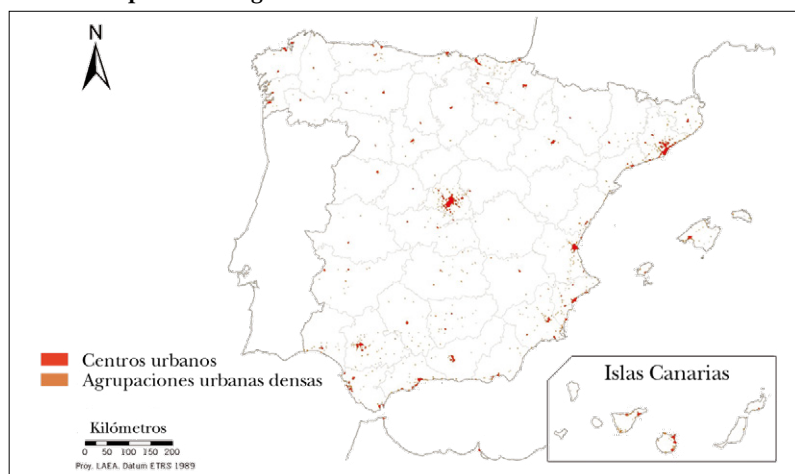
Fuente: INE (2024), SIOSE (2024), Goerlich (2023b, 2024a), Comisión Europea *et al.* (2021), JRC (2024a) y elaboración propia.

La mayor parte de la población en el territorio español reside en centros urbanos —52,2 %—, equivalente a 24.763.349 habitantes, que ocupan solo el 2,7 % de la superficie habitada. Este porcentaje de población supera el 80 % si consideramos además la población que reside en agrupaciones urbanas. Por tanto, la población española, como ya se ha visto en el capítulo anterior, se encuentra muy concentrada sobre el territorio y, a pesar de que las celdas rurales representan el 90,3 % de la superficie habitada en España,

fundamentalmente compuestas por celdas rurales de muy baja densidad, solo residen en ellas un 17% de la población, poco más de 8 millones de habitantes.

A modo visual, el mapa 3.1 muestra la distribución de los centros urbanos y agrupaciones urbanas densas en España. Los polígonos representados no se corresponden con los lindes administrativos de los municipios, sino con los centros urbanos y agrupaciones urbanas densas determinadas a partir de las celdas de población habitadas que constituyen la *grid* de población, que suman un total de 113 centros urbanos y 699 agrupaciones urbanas densas y concentran, conjuntamente, el 72,8% de la población española.

MAPA 3.1: Centros urbanos y agrupaciones urbanas densas en España a partir de la grid censal 2021: GEOSTAT2021



Fuente: INE (2024), SIOSE (2024), Goerlich (2023b, 2024a), Comisión Europea *et al.* (2021), JRC (2024a) y elaboración propia.

Como se observa, los centros urbanos, en rojo, se corresponden con las capitales de provincia, destacando por su tamaño Madrid. Solo hay 4 provincias que no tienen ningún centro urbano —Cuenca, Segovia, Soria y Teruel— y hay dos centros urbanos que traspasan el límite provincial, uno formado por los municipios de Sanlúcar de Barrameda en Cádiz y Almonte en Huelva, y otro formado por 3 municipios de La Rioja —Lardero, Logroño y Villamediana de Iregua— y un municipio de Navarra —Viana—.

CUADRO 3.4: Distribución de los centros urbanos por tamaño de población. España, 2021

	Centros urbanos		Población	
	Número	Porcentaje	Número	Porcentaje
Más de 1 millón de habitantes	3	2,7	8.230.923	33,2
Entre 500.000 y 1 millón de habitantes	4	3,5	2.599.184	10,5
Entre 250.000 y 500.000 habitantes	12	10,6	4.064.031	16,4
Entre 100.000 y 250.000 habitantes	38	33,6	6.004.179	24,2
Menos de 100.000 habitantes	56	49,6	3.865.032	15,6
Total población en centros urbanos	113	100,0	24.763.349	100,0

Fuente: INE (2024), SIOSE (2024), Goerlich (2023b, 2024a), Comisión Europea *et al.* (2021), JRC (2024a) y elaboración propia.

Atendiendo al volumen de población que concentran los centros urbanos —cuadro 3.4—, solo 3 superan el millón de habitantes: son los que se corresponden con Madrid, Barcelona y Valencia, junto con los municipios colindantes. Entre estos tres centros urbanos suman un total de 8.230.923 habitantes, una tercera parte de la población que reside en centros urbanos y un 17,4 % del total de la población residente en España. También en superficie ocupada destacan estos tres sumando un total de 730 km², un 21,3 % de la superficie ocupada por centros urbanos en España.

Por su parte solo son cuatro los centros urbanos que concentran entre 500.000 y el millón de habitantes: son los correspondientes a Bilbao, Sevilla, Zaragoza y Málaga. El resto de los centros urbanos concentran población por debajo de esa cifra y casi la mitad por debajo de los 100.000 habitantes.

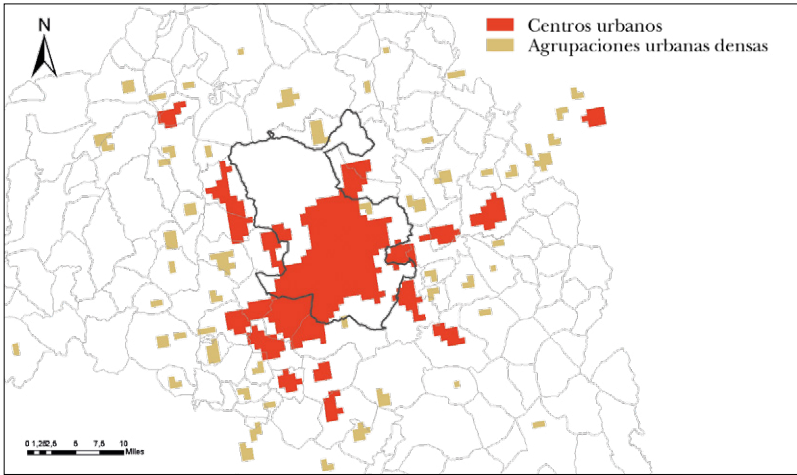
El mapa 3.2 muestra con detalle los cuatro centros urbanos más grandes, que son los que se localizan alrededor de los municipios de Madrid, Barcelona, Valencia y Bilbao. Los dos primeros superan los 4 millones de habitantes, el correspondiente al municipio de Valencia se sitúa en tercera posición ya muy alejado de esos dos con una población cercana al millón, y el de Bilbao, en cuarta posición, con una población inferior a los 800.000 habitantes.

El municipio de Madrid agrupa tres centros urbanos que comparte con otros municipios, como se observa en el panel *a* del mapa 3.2. El mayor de ellos ocupa 368 km² de superficie donde residen 4.224.742 habitantes y, además de Madrid, ocupa parte del territorio de otros 9 municipios —Alcobendas, Alcorcón, Coslada,

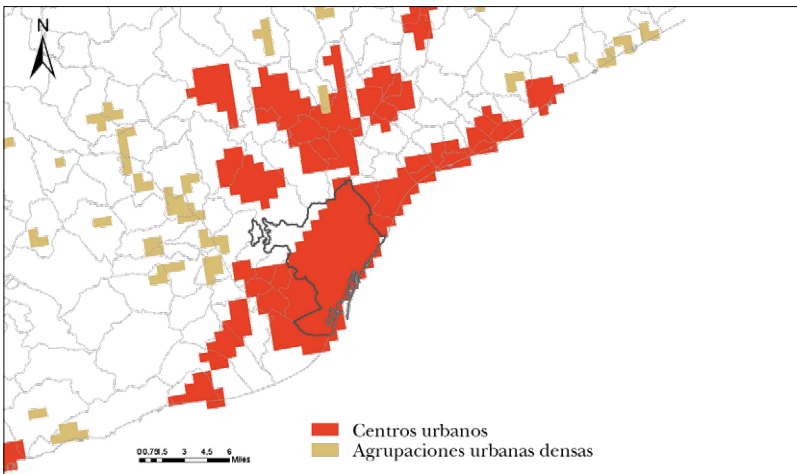
Fuenlabrada, Getafe, Leganés, Móstoles, Pozuelo de Alarcón y San Sebastián de los Reyes—. En todos ellos, el porcentaje de población que vive en el centro urbano es superior al 90 %, excepto Pozuelo de Alarcón, con un 84 %. Un ejemplo más de que la concentración de la población va más allá de los lindes municipales. Los otros

MAPA 3.2: Centros urbanos y agrupaciones urbanas densas en los municipios de Madrid, Barcelona, Valencia y Bilbao a partir de la *grid* censal 2021

a) Madrid

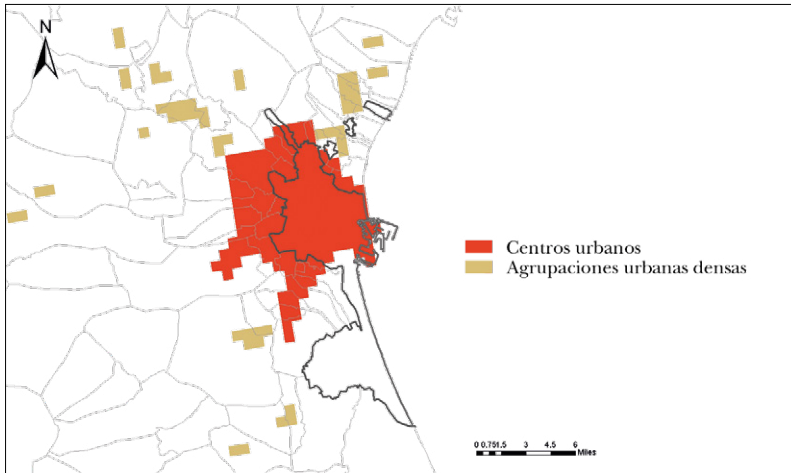


b) Barcelona

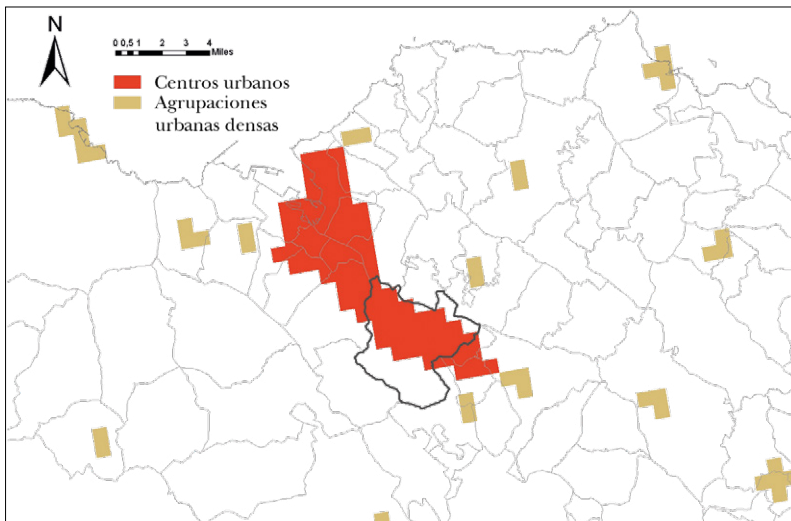


MAPA 3.2 (cont.): **Centros urbanos y agrupaciones urbanas densas en los municipios de Madrid, Barcelona, Valencia y Bilbao a partir de la *grid* censal 2021**

a) Valencia



b) Bilbao



Fuente: INE (2024), SIOSE (2024), Goerlich (2023b, 2024a), Comisión Europea *et al.* (2021), JRC (2024a) y elaboración propia.

dos centros urbanos localizados en la capital son de menor tamaño y están ubicados al suroeste del municipio, compuestos, respectivamente, por 90.000 habitantes —con población también de los municipios Rivas-Vaciamadrid y Velilla de San Antonio— y 120.000

habitantes —con población de Coslada, San Fernando de Henares y Rivas-Vaciamadrid—.

El panel *b* del mapa 3.2 ofrece los centros urbanos formados por agrupaciones de celdas en el municipio de Barcelona y alrededores. Se observa que un único centro urbano ocupa la mayor parte de la superficie de la capital catalana, pero se extiende por un elevado número de municipios vecinos, un total de 22, alcanzando una superficie de 191 km². Entre estos 22 municipios se encuentran Badalona, L'Hospitalet de Llobregat y Santa Coloma de Gramenet, con más de 100.000 habitantes cada uno y donde la totalidad de su población pertenece al centro urbano.

El centro urbano que mayor número de municipios concentra es el que se corresponde con la ciudad de Valencia y alrededores, con un total de 31 municipios en 171 km² de superficie y con 1.382.604 habitantes (mapa 3.2 panel *c*). Además de aglutinar la práctica totalidad de población del municipio de Valencia, este centro urbano concentra el 80 % de población de municipios como Torrent o Paterna, con más de 70.000 habitantes cada uno, y la totalidad de población de municipios colindantes como Mislata o Burjassot, con más de 35.000 habitantes cada uno, y de otros de menor dimensión, como Xirivella o Benetússer.

El panel *d* del mapa 3.2 muestra el centro urbano de Bilbao, el cuarto en tamaño, con 766.839 de habitantes y 78 km² de superficie. Este centro urbano no solo engloba Bilbao sino también 16 municipios que se sitúan en la ría de Bilbao como Barakaldo, con más de 100.000 habitantes, o Getxo, con más de 60.000 habitantes, de los que el 98 % y 99 % de su población, respectivamente, forman parte del centro urbano.

Estos mapas permiten ver al detalle cómo se construyen los centros urbanos, a partir de agrupaciones de celdas contiguas, sin contar diagonales, con una densidad superior a los 1500 habitantes por km² y que conjuntamente superen los 50.000 habitantes, o las celdas que estén al menos el 50 % edificadas, y aplicando iterativamente la regla de la mayoría para completar las lagunas y alisar los bordes. Son ejemplos claros de las ventajas que supone analizar el grado de urbanización a partir de una *grid* de población en lugar de lindes administrativos.

3.3. Grado de urbanización a nivel municipal

Este apartado ofrece el grado de urbanización a nivel municipal, en tanto que los centros de decisión política a nivel local se basan fundamentalmente en los municipios. Una vez clasificadas las celdas y agrupadas en las diferentes categorías de acuerdo con el grado de urbanización, se procede a clasificar los municipios a partir del porcentaje de población del municipio que reside en cada uno de los tipos de celdas, como se describe en el apartado 3.1.

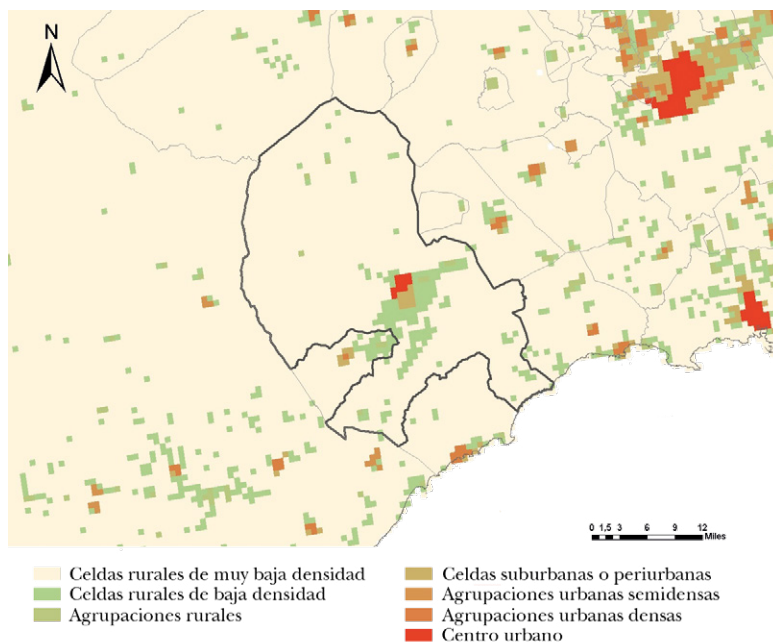
Atendiendo a la clasificación municipal, en España el 3,3 % de los municipios son ciudades, 268 en número, pero concentran más de la mitad de la población española —el 55,6 %—, mientras que el 13,6 % de los municipios son localidades o áreas semidensas, con un 31,3 % de la población —cuadro 3.5—. De estas últimas, más de una cuarta parte de la población española reside en localidades densas o semidensas —28,1 %— y el resto en áreas suburbanas o periurbanas —el 3,3 %—. Por su parte, los municipios clasificados como áreas rurales son los más abundantes, el 83,1 % de los municipios españoles, si bien concentran solo el 13 % de la población. Si profundizamos en estas áreas, la mayoría de esta población reside en aldeas —el 8,7 %—, frente a la población en municipios clasificados como áreas rurales dispersas —3,7 %— o áreas rurales mayoritariamente deshabitadas —0,6 %—, representando estas últimas el 14,7 % de los municipios en España.

Por definición, un municipio clasificado como ciudad puede tener también población rural, aunque la mayor parte de su población residirá en centros urbanos. Un ejemplo de esto es Lorca, un municipio de la Región de Murcia, que se clasifica como ciudad por tener más del 50 % de la población en centros urbanos, pero el 29,3 % de la población reside en celdas clasificadas como áreas rurales —mapa 3.3—.

CUADRO 3.5: Grado de urbanización a nivel municipal. España, 2021

Tipo de municipio	Municipios		Población	
	Número	Porcentaje	Número	Porcentaje
Ciudad	268	3,3	26.376.764	55,6
Localidad y áreas semidensas	1.106	13,6	14.857.736	31,3
Localidad densa	681	8,4	12.121.737	25,6
Localidad semidensa	184	2,3	1.185.589	2,5
Área suburbana o periurbana	241	3,0	1.550.410	3,3
Área rural	6.757	83,1	6.166.298	13,0
Aldeas	1.903	23,4	4.129.005	8,7
Área rural dispersa	3.655	45,0	1.743.954	3,7
Área rural mayoritariamente deshabitada	1.199	14,7	293.339	0,6
Total	8.131	100,0	47.400.798	100,0

Fuente: INE (2024), SIOSE (2024), Goerlich (2023b, 2024a), Comisión Europea *et al.* (2021), JRC (2024a) y elaboración propia.

MAPA 3.3: Clasificación del grado de urbanización de las celdas del municipio de Lorca (30024) a partir de la *grid* censal 2021

Fuente: INE (2024), SIOSE (2024), Goerlich (2023b, 2024a), Comisión Europea *et al.* (2021), JRC (2024a) y elaboración propia.

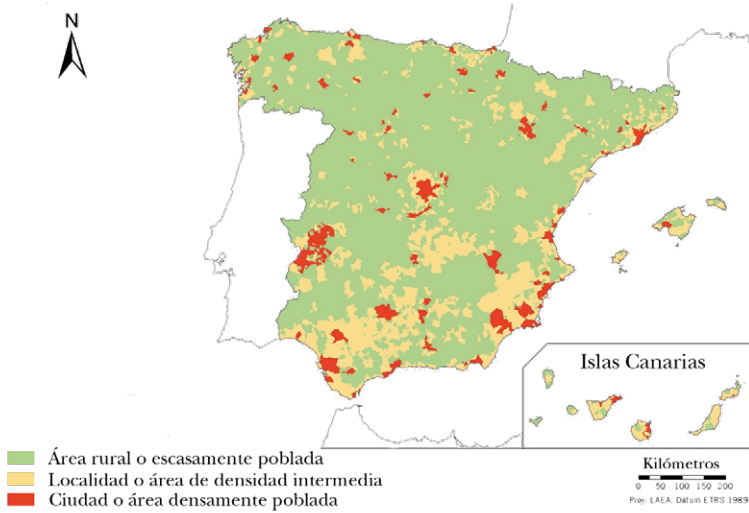
La distribución de los municipios según su grado de urbanización no es uniforme en el territorio, como se observa en el panel *a* del mapa 3.4 que representa los municipios según su grado de urbanización considerando el nivel de clasificación más agregado —3 categorías—, intensificándose esta heterogeneidad en el territorio en los grados de urbanización y ruralización al considerar las siete categorías —mapa 3.4 panel *b*—. Aunque más adelante observaremos las diferencias a nivel regional y provincial, este mapa ya permite visualizar una predominancia de áreas rurales dispersas o mayormente deshabitadas en las provincias del interior y norte de España.

El cuadro 3.6 amplía esta información y muestra la distribución del grado de urbanización de los municipios agregada a nivel regional. La Comunidad de Madrid destaca por concentrar más del 80 % de su población en municipios clasificados como ciudades, porcentaje que asciende a casi el 98 % si consideramos también las localidades y áreas semidensas. A esta región le siguen, en orden, Cataluña y País Vasco con el 63,6 % y el 61,5 % de su población en ciudades. Por su parte, en el otro extremo, destacan Extremadura y Castilla y León por ser regiones con más de un tercio de su población en áreas rurales. Sin embargo, mientras que en Extremadura la población rural se concentra en aldeas, en Castilla y León se distribuye a partes iguales entre aldeas y áreas rurales dispersas. También destaca Galicia por ser la región con mayor porcentaje de su población en áreas rurales mayoritariamente deshabitadas, un 5,5 %, cuando la media en España se sitúa en el 0,6 %. En otras palabras, de la población española que reside en áreas rurales mayoritariamente deshabitadas, la mitad se ubica en Galicia.

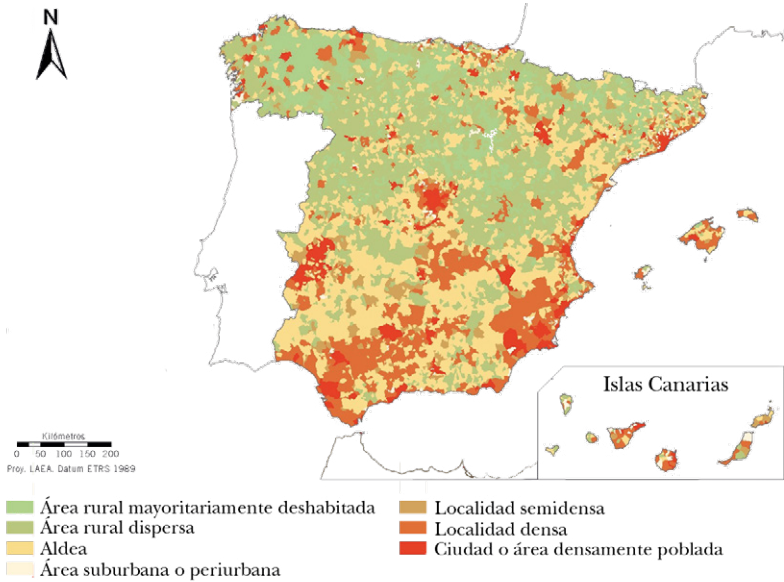
Por el contrario, además de Madrid, las regiones de Murcia y Canarias tienen un menor peso de población en municipios rurales teniendo en ambos casos la población igualmente distribuida entre ciudades y localidades y áreas semidensas.

MAPA 3.4: Grado de urbanización a nivel municipal. España, 2021

a) Clasificación de nivel 1



b) Clasificación de nivel 2



Fuente: INE (2024), SIOSE (2024), Goerlich (2023b, 2024a), Comisión Europea *et al.* (2021), JRC (2024a) y elaboración propia.

CUADRO 3.6: Distribución de la población según grado de urbanización a nivel municipal. Comunidades autónomas, 2021
(porcentaje)

Comunidades autónomas	Tipo de municipio										Total
	Ciudad	Localidad y áreas semidensas	Localidad densa	Localidad semidensa	Área suburbana o periurbana	Área rural dispersa	Aldeas	Área rural mayoritariamente deshabitada			
Andalucía	48,8	39,6	35,3	2,7	1,6	11,6	10,4	1,2	0,0	100	
Aragón	55,2	21,0	19,0	1,7	0,4	23,8	15,1	8,1	0,6	100	
P. de Asturias	57,2	24,3	22,3	2,1	0,0	18,4	8,4	7,0	3,1	100	
I. Balears	43,4	43,9	37,2	1,7	5,0	12,7	11,6	1,1	0,0	100	
Canarias	48,5	46,8	33,4	4,3	9,1	4,7	2,5	2,2	0,0	100	
Cantabria	29,4	50,6	33,6	3,0	14,1	19,9	7,6	11,0	1,3	100	
Castilla y León	44,2	20,7	14,5	3,3	2,9	35,1	16,8	16,0	2,3	100	
Castilla-La Mancha	24,5	44,2	36,2	5,4	2,6	31,3	24,4	6,5	0,4	100	
Cataluña	63,6	27,5	21,0	2,5	4,0	8,9	6,7	2,0	0,2	100	
C. Valenciana	56,2	36,2	31,3	2,0	2,8	7,6	6,6	1,0	0,0	100	
Extremadura	28,9	33,0	23,7	8,0	1,3	38,1	31,5	6,6	0,0	100	
Galicia	39,6	33,6	19,1	4,0	10,4	26,8	5,8	15,4	5,5	100	
C. de Madrid	84,3	13,5	11,2	1,1	1,2	2,2	2,0	0,2	0,0	100	
R. de Murcia	50,8	47,8	46,0	0,4	1,5	1,4	1,4	0,0	0,0	100	
C. F. de Navarra	52,5	17,3	14,1	0,9	2,3	30,1	21,1	8,2	0,8	100	
País Vasco	61,5	30,3	25,6	0,7	3,9	8,2	6,0	1,9	0,3	100	
La Rioja	47,1	29,6	29,6	0,0	0,0	23,2	15,3	7,4	0,6	100	
Total	55,6	31,3	25,6	2,5	3,3	13,0	8,7	3,7	0,6	100	

Fuente: INE (2024), SIOSE (2023b, 2024a), Goerlich (2023b, 2024a), Comisión Europea *et al.* (2021)JRC (2024a) y elaboración propia.

El gráfico 3.1 muestra el porcentaje de población que reside en ciudades a nivel provincial. De nuevo destaca Madrid, donde el 84,3 % de su población reside en ciudades, seguida de las provincias de Barcelona, Álava y Zaragoza —77,2 %, 75,9 % y 70 %, respectivamente—.

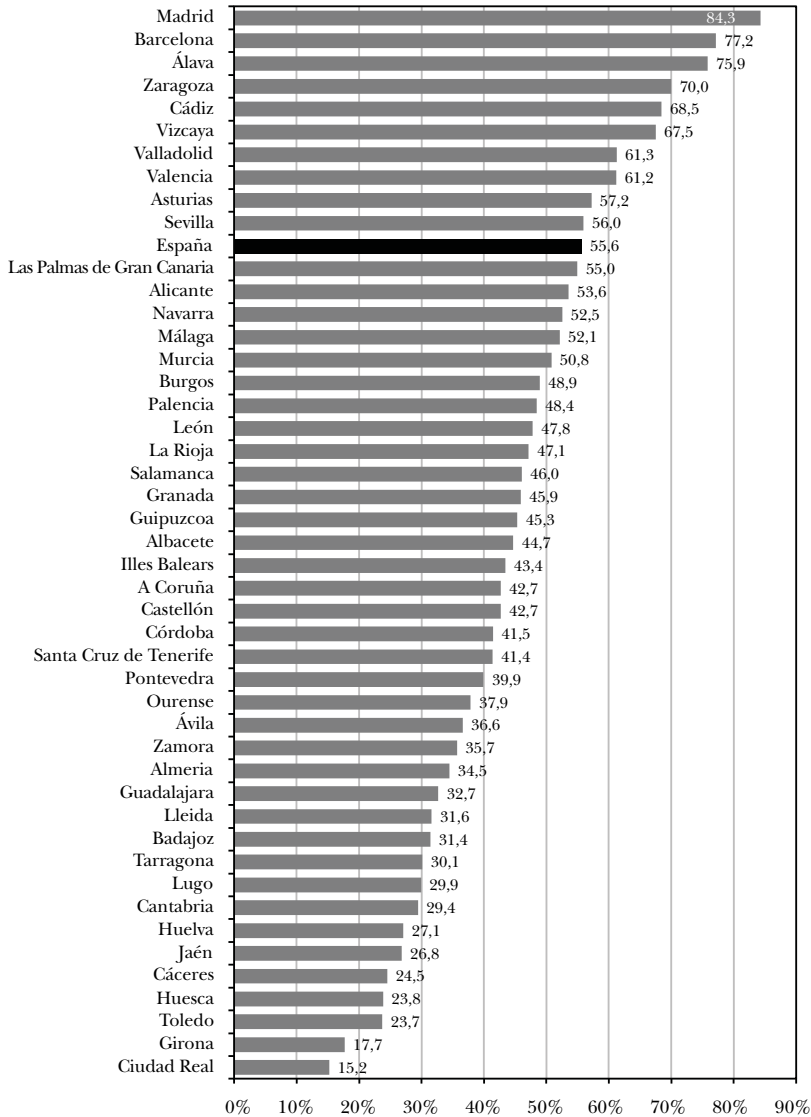
Las provincias de Vizcaya y Valencia, que albergan dos de los centros urbanos más grandes de España, concentran el 67,5 % y el 61,2 % de su población en ciudades, pero se caracterizan también por un importante peso de la población en localidades y áreas semidensas, el 25,6 % y el 31,1 %, respectivamente (tabla A.4.1 del apéndice).

En el lado opuesto se sitúan las provincias de Cuenca, Segovia, Soria y Teruel, que no tienen población en municipios clasificados como ciudades y gran parte de su población vive en municipios rurales, superando el 50 % en Segovia y Teruel —51,8 % y 55,8 %, respectivamente—, como se puede comprobar en la tabla A.4.1 del apéndice. A estas provincias se suma también Ávila —con un 54,4 % de su población en municipios rurales—, Zamora —48,9 %—, Lugo —46,7 %— y Ourense —45,6 %—. Sin embargo, mientras que en la mayoría de estas su población rural se concentra en municipios clasificados como aldeas o áreas rurales dispersas, destaca la provincia gallega de Lugo donde casi una tercera parte de su población —el 32,3 %— vive en áreas rurales mayoritariamente deshabitadas.

La clasificación del nivel de urbanización a nivel de municipio permite examinar las características sociodemográficas de la población según el tipo de municipio en el que vive. El cuadro 3.7 muestra el porcentaje de población menor de 16 años, la población de 65 años o más, la edad media del municipio y la renta neta por hogar según el tipo de municipio de acuerdo con el grado de urbanización. En promedio, la población que vive en áreas rurales está más envejecida y disfruta de un menor nivel de renta: la edad media ronda los 47,3 años —3,7 años más que la población en ciudades— y la renta neta media por hogar es de 28.421 euros —un 16 % inferior a la media española y un 22 % inferior al de la población que vive en ciudades—. Si bien los procesos de urbanización están asociados a niveles de renta más altos, se trata de valores nominales sin ajustar por paridad de poder de compra

y, por tanto, sin tener en cuenta las diferencias en el coste de la vivienda entre las grandes ciudades y las zonas rurales.

GRÁFICO 3.1: Porcentaje de población que reside en ciudades. Provincias, 2021



Fuente: INE (2024), SIOSE (2024), Goerlich (2023b, 2024a), Comisión Europea *et al.* (2021), JRC (2024a) y elaboración propia.

CUADRO 3.7: Indicadores sociodemográficos según grado de urbanización. España, 2021

Tipo de celda	Población menor de 16 años	Población de 65 o más años	Edad media	Renta por hogar	
	Porcentaje	Porcentaje	Años	Euros de 2021	Índice España=100
Ciudad	15,2	19,5	43,6	36.428	107,5
Localidad y áreas semidensas	16,3	17,7	42,6	31.717	93,6
Localidad densa	16,4	17,5	42,5	31.434	92,8
Localidad semidensa	15,4	19,1	43,7	29.960	88,5
Área suburbana o periurbana	16,2	17,6	42,8	35.354	104,4
Área rural	12,7	24,9	47,3	28.421	83,9
Aldeas	14,2	21,9	45,4	28.348	83,7
Área rural dispersa	10,1	30,0	50,7	28.601	84,4
Área rural mayoritariamente deshabitada	7,2	36,5	54,9	28.300	83,5
Total	15,2	19,6	43,8	33.872	100,0

Fuente: INE (2024, ADRH), SIOSE (2024), Goerlich (2023b, 2024a), Comisión Europea *et al.* (2021), JRC (2024a) y elaboración propia.

También en la distribución de la población por grupos de edad se observan diferencias según el grado de urbanización: la población menor de 16 años es del 12,7 % en áreas rurales y supera el 15 % en las ciudades y localidades y áreas semidensas, mientras que la población con 65 años o más representa casi una cuarta parte de la población de áreas rurales —24,9 %— frente al 19,5 % y 17,7 % que representa en ciudades y localidades y áreas semidensas, respectivamente.

Estas diferencias son aún más acusadas si bajamos al nivel 2 de la clasificación del grado de urbanización, especialmente en las áreas rurales. La edad media de la población que vive en áreas rurales mayoritariamente deshabitadas es de casi 55 años —casi 10 años más que la población que vive en aldeas—, con un 36,5 % de la población con 65 o más años —frente al 21,9 % en aldeas— y solo un 7,2 % de la población es menor de 16 años —el 14,2 % en aldeas—. En cuanto a la renta neta por hogar, no existen diferencias sustanciales entre los distintos tipos de municipios rurales, mientras que sí existen diferencias entre los tipos de localidades

y áreas semidensas, especialmente en las áreas suburbanas o periurbanas, cuya renta media por hogar se asemeja más a la de las ciudades que a la de las localidades densas o semidensas.

Las características sociodemográficas de la población no solo difieren por tipo de municipio, sino también a lo largo del territorio, es decir, el grado de envejecimiento o el nivel de renta de un municipio rural no es el mismo en todas las provincias (véase tablas A.4.2 del apéndice). Por ejemplo, el porcentaje de población con 65 años o más en los municipios rurales de la provincia de Ourense supera el 38 % frente al 17 %, menos de la mitad, de los municipios rurales de Las Palmas, Illes Balears o Madrid. Lo mismo ocurre con el nivel de renta, la renta neta media por hogar de los municipios rurales de las provincias vascas de Vizcaya y Guipúzcoa supera los 39.000 euros, más de un 80 % superior que la renta neta media por hogar de los municipios rurales de la provincia de Cáceres —21.592 euros—.

Si comparamos las ciudades de las distintas provincias españolas ocurre algo similar: no solo existen diferencias entre los tipos de urbanización, sino también entre los mismos tipos de municipios en diferentes provincias. El porcentaje de población envejecida —con 65 años o más— oscila entre el 26,6 % de la provincia de Salamanca y el 10,8 % de Melilla. La renta neta media por hogar de las ciudades oscila, por su parte, entre los 42.872 euros en los municipios clasificados como ciudades de la provincia de Madrid y los 28.340 euros de la provincia de Alicante. Así pues, observamos una gran heterogeneidad en varias direcciones, tanto en el ámbito geográfico-administrativo como en el ámbito del grado de urbanización.

3.4. Densidad experimentada por grado de urbanización

En el capítulo anterior se ha construido un indicador de densidad económica a partir de la distribución de la población en la *grid* de 1 km × 1 km —la densidad experimentada—, que se define como la población próxima al residente promedio en un radio de distancia determinado. A efectos del presente estudio se ha considerado el radio de 10 km desde el centroide de la celda para captar la mayor parte de los desplazamientos urbanos diarios.

La densidad experimentada presenta un rango bastante amplio entre comunidades autónomas y provincias, como se ha comprobado en el capítulo anterior. Estas diferencias podrían explicarse en parte por el distinto grado de urbanización de cada territorio, pero, como se verá a continuación, las diferencias se mantienen cuando se tiene en cuenta el grado de urbanización de la celda para la que se obtiene dicho indicador. Este apartado profundiza en el análisis del indicador de densidad experimentada distinguiendo por el nivel de urbanización DEGURBA de cada celda analizado en el apartado 3.2⁵³.

En promedio, para el conjunto de España, un residente tiene próximas a algo más de medio millón de personas en un radio de 10 km. Esta cifra alcanza casi el millón de habitantes (994.740) si este residente vive en centros urbanos, 140.537 si vive en aglomeraciones urbanas y poco menos de 50.000 habitantes si lo hace en zonas rurales. Sin embargo, estas diferencias son aún mayores si diferenciamos por comunidad autónoma y provincia.

El cuadro 3.8 muestra la densidad experimentada por comunidades autónomas según el nivel de urbanización de la celda en número de personas (panel *a*) y en índice que toma valor 100 para España (panel *b*). Para el caso de los centros urbanos, la densidad experimentada de los centros urbanos de la Comunidad de Madrid (1.998.330 habitantes) es 17 veces mayor que la de los centros urbanos de Extremadura (114.720) y el doble que la media de España. Es la Comunidad de Madrid, junto con Cataluña, las dos comunidades que superan el millón de habitantes en el indicador de densidad experimentada en este tipo de celdas.

También se observan grandes diferencias en las demás categorías de grado de urbanización, aunque son relativamente menores. La Comunidad de Madrid, aglomeración urbana por excelencia en España, destaca en todas ellas, incluso en las celdas rurales, con una densidad experimentada de 132.423 habitantes, que es 10 veces superior a la de Extremadura (12.825), que se posiciona de nuevo en el último puesto del *ranking*.

⁵³ En tanto que el indicador de densidad experimentada se calcula para cada celda de la *grid* de población de 1 km × 1 km, en este apartado se obtiene dicho indicador para cada una de las categorías de celda clasificadas de acuerdo al grado de urbanización, y no por categoría de los municipios analizada en el apartado 3.3.

CUADRO 3.8: Densidad experimentada según grado de urbanización de la celda por CC. AA: Población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio, 2021

a) Personas

Comunidades autónomas	Tipo de celda									
	Centros Urbanos	Agrupaciones urbanas	Agrupaciones urbanas densas	Agrupaciones urbanas semidensas	Celdas suburbanas o periurbanas	Celdas rurales	Agrupaciones rurales	Celdas rurales de baja densidad	Celdas rurales de muy baja densidad	
Andalucía	436.158	113.491	103.917	39.320	179.276	40.521	26.702	68.659	47.629	
Aragón	636.601	90.401	63.186	16.478	261.045	28.480	29.491	27.626	26.005	
P. de Asturias	242.115	102.816	92.552	26.776	144.553	65.732	64.602	81.694	34.681	
I. Balears	409.632	80.455	59.628	53.501	135.048	57.646	44.716	78.803	49.163	
Canarias	328.881	129.315	115.943	49.838	158.042	61.724	47.113	73.729	52.929	
Cantabria	249.966	121.792	115.542	64.678	146.512	51.564	50.131	58.836	27.378	
Castilla y León	218.198	90.704	80.612	35.448	145.456	25.553	33.836	22.639	12.394	
Castilla-La Mancha	131.135	54.062	51.853	38.581	74.749	20.515	20.634	20.768	17.983	
Cataluña	1.483.006	194.751	158.832	57.190	316.665	77.871	61.020	103.834	72.969	
C. Valenciana	805.659	144.461	131.981	75.929	202.793	81.492	60.606	109.586	78.866	
Extremadura	114.720	36.500	37.439	21.122	56.862	12.825	11.796	14.070	21.866	
Galicia	260.455	123.320	100.637	43.404	159.843	41.615	29.853	54.945	18.897	
C. de Madrid	1.998.330	312.471	293.476	82.149	410.261	132.423	91.447	198.145	135.943	
R. de Murcia	356.022	164.526	137.332	27.827	259.379	72.732	67.478	85.051	54.478	
C. F. de Navarra	362.438	85.319	59.269	20.255	165.905	34.195	26.959	50.472	33.097	
País Vasco	492.358	157.090	134.568	71.674	235.339	101.510	68.937	142.912	95.143	
La Rioja	184.453	61.277	54.798	-	92.785	34.233	40.669	23.189	28.818	
Ceuta	84.071	84.071	-	-	84.071	84.071	84.071	84.071	84.071	
Melilla	86.450	-	-	-	-	-	-	-	-	
España	994.740	140.537	122.841	47.928	214.168	49.652	38.983	65.917	40.149	

CUADRO 3.8 (cont.): Densidad experimentada según grado de urbanización de la celda por CC. AA: Población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio, 2021

b) Índice España = 100

Comunidades autónomas	Tipo de celda									
	Centros Urbanos	Agrupaciones urbanas	Agrupaciones urbanas densas	Agrupaciones urbanas semidensas	Agrupaciones suburbanas o periurbanas	Celdas rurales	Celdas rurales de baja densidad	Agrupaciones rurales	Celdas rurales de muy baja densidad	Celdas rurales de muy baja densidad
Andalucía	43,8	80,8	84,6	82,0	83,7	81,6	68,5	104,2	118,6	118,6
Aragón	64,0	64,3	51,4	34,4	121,9	57,4	75,7	41,9	64,8	64,8
P. de Asturias	24,3	73,2	75,3	55,9	67,5	132,4	165,7	123,9	86,4	86,4
I. Balears	41,2	57,2	48,5	111,6	63,1	116,1	114,7	119,5	122,5	122,5
Canarias	33,1	92,0	94,4	104,0	73,8	124,3	120,9	111,9	131,8	131,8
Cantabria	25,1	86,7	94,1	134,9	68,4	103,8	128,6	89,3	68,2	68,2
Castilla y León	21,9	64,5	65,6	74,0	67,9	51,5	86,8	34,3	30,9	30,9
Castilla-La Mancha	13,2	38,5	42,2	80,5	34,9	41,3	52,9	31,5	44,8	44,8
Cataluña	149,1	138,6	129,3	119,3	147,9	156,8	156,5	157,5	181,7	181,7
C. Valenciana	81,0	102,8	107,4	158,4	94,7	164,1	155,5	166,2	196,4	196,4
Extremadura	11,5	26,0	30,5	44,1	26,6	25,8	30,3	21,3	54,5	54,5
Galicia	26,2	87,7	81,9	90,6	74,6	83,8	76,6	83,4	47,1	47,1
C. de Madrid	200,9	222,3	238,9	171,4	191,6	266,7	234,6	300,6	338,6	338,6
R. de Murcia	35,8	117,1	112,0	58,1	121,1	146,5	173,1	129,0	135,7	135,7
C. F. de Navarra	36,4	60,7	48,2	42,3	77,5	68,9	69,2	76,6	82,4	82,4
País Vasco	49,5	111,8	109,5	149,5	109,9	204,4	176,8	216,8	237,0	237,0
La Rioja	18,5	43,6	44,6	-	43,3	68,9	104,3	35,2	71,8	71,8
Ceuta	8,5	59,8	-	-	39,3	169,3	215,7	127,5	209,4	209,4
Melilla	8,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
España	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fuente: INE (2024), SIOSE (2024), Goertlich (2023b, 2024a), Comisión Europea et al. (2021)JRC (2024a) y elaboración propia.

Si atendemos a las diferentes categorías de celdas rurales, resulta conveniente advertir que la densidad experimentada es, para el promedio de España, menor en las agrupaciones rurales (38.983 habitantes) que en las celdas rurales de baja o muy baja densidad (65.917 y 40.149 habitantes, respectivamente). Es en estas dos últimas donde la densidad experimentada de la Comunidad de Madrid llega incluso a triplicar el promedio de España, y es 14 y 11 veces superior, respectivamente, a la de la comunidad con menor densidad en cada caso (Extremadura y Castilla y León).

En algunas comunidades autónomas la población próxima en un radio de 10 km es menor en categorías de grado de urbanización en las que se esperaría tener una densidad mayor que en otras en las que hay mayor dispersión de la población. Por ejemplo, como ocurre con la densidad experimentada de las aglomeraciones urbanas frente a la de las celdas rurales en algunas regiones. Esto se debe a que, con bastante frecuencia, las celdas rurales están próximas a centros urbanos (véase como ejemplo el mapa 3.3) y, por tanto, al calcular la densidad experimentada de esas celdas rurales captan población que reside en los centros urbanos que se encuentran en el radio de 10 km.

Las diferencias a nivel provincial en densidad experimentada por grado de urbanización se observan en el gráfico 3.2 (y con mayor detalle en la tabla A.4.3 del apéndice), donde se distingue, en cada panel, los tres grandes tipos de celda según su nivel DEGURBA (centros urbanos, aglomeraciones urbanas y celdas rurales). Como cabría esperar, los centros urbanos con mayor densidad experimentada corresponden a las tres provincias con los centros urbanos de mayor tamaño poblacional en España: Madrid, Barcelona y Valencia, superando solo estos tres el promedio nacional con una cifra por encima del millón de habitantes. A la cola se sitúan, además de las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla, las provincias de Zamora, Ávila y Huesca, con una densidad experimentada de 70.950, 60.083 y 56.932 habitantes, respectivamente. Los centros urbanos de Madrid tienen una densidad experimentada que es 35 veces la de Huesca.

GRÁFICO 3.2: Densidad experimentada según grado de urbanización de la celda por provincias: población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio, 2021

(personas)

a) Centros urbanos

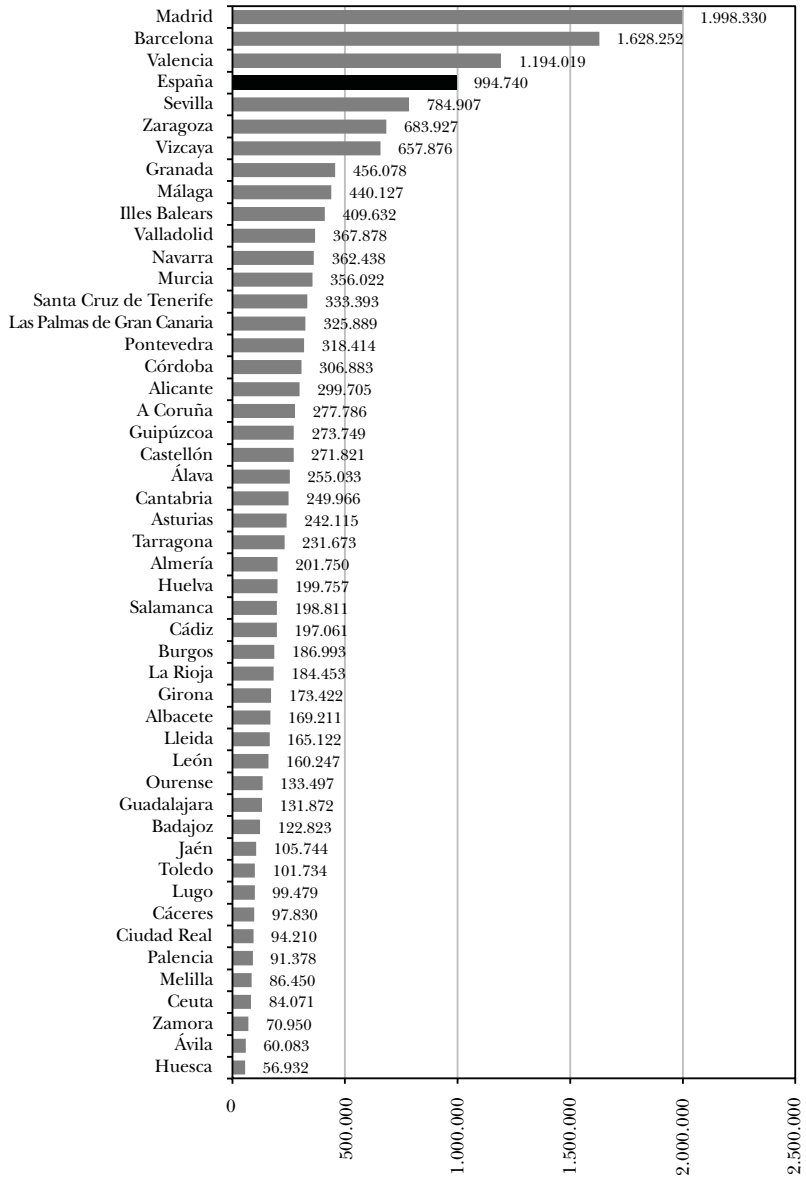


GRÁFICO 3.2 (cont.): Densidad experimentada según grado de urbanización de la celda por provincias: población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio, 2021

(personas)

b) Aglomeraciones urbanas

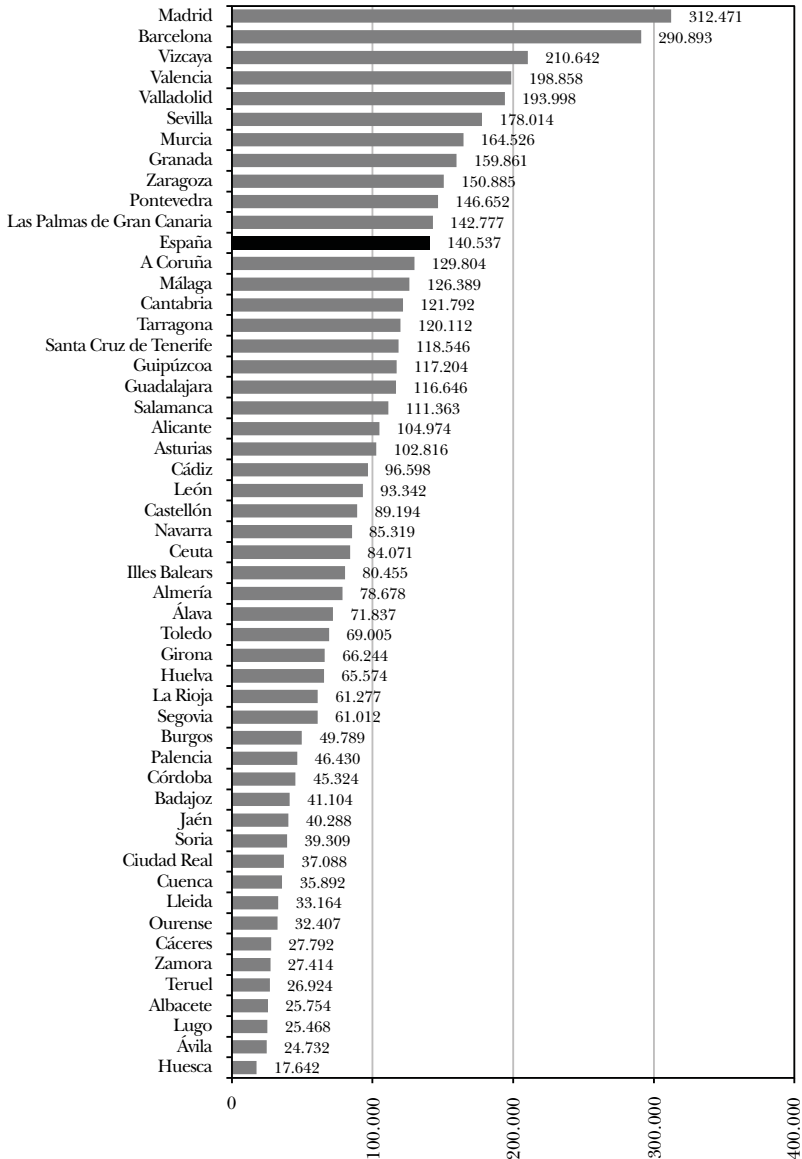
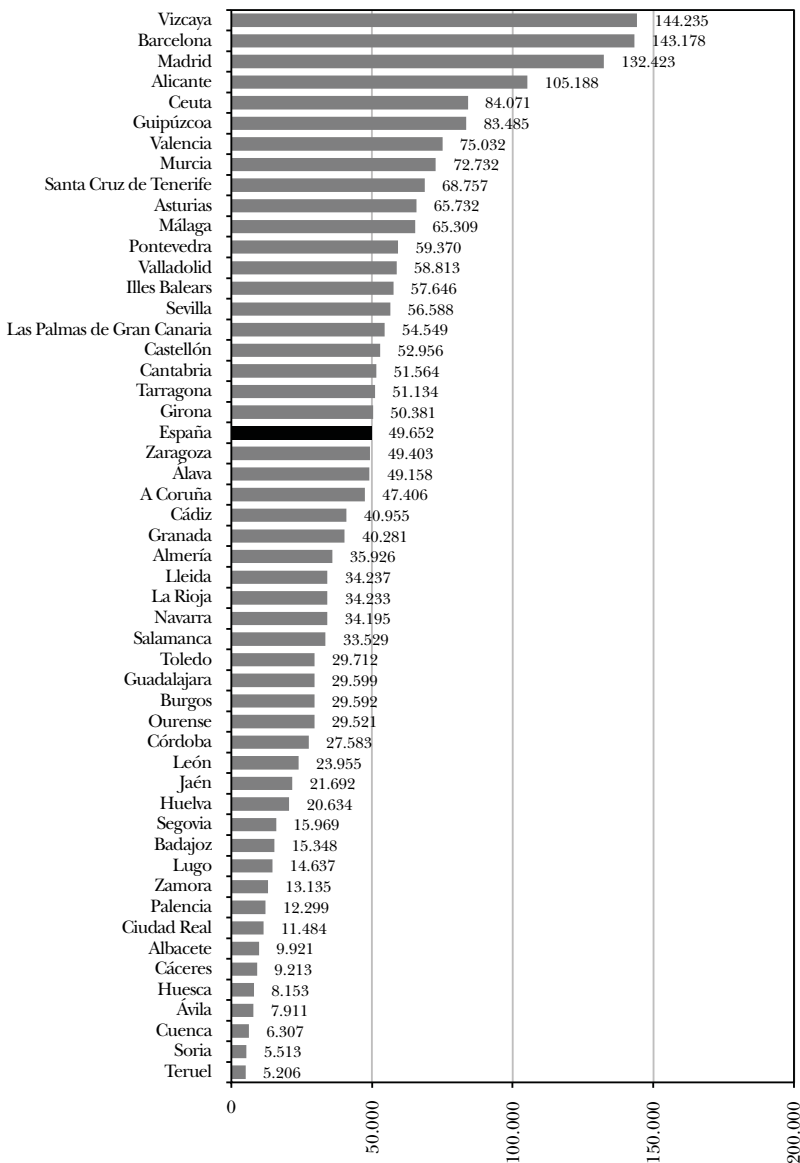


GRÁFICO 3.2 (cont.): Densidad experimentada según grado de urbanización de la celda por provincias: población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio, 2021

(personas)

c) Celdas rurales



Fuente: INE (2024), SIOSE (2024), Goerlich (2023b, 2024a), Comisión Europea *et al.* (2021), JRC (2024a) y elaboración propia.

También estas dos provincias se sitúan en los dos extremos opuestos del *ranking* de densidad experimentada por provincias para las agrupaciones urbanas, si bien el rango se reduce a la mitad: la densidad experimentada de las agrupaciones urbanas de Madrid (312.471 habitantes) es 18 veces la de Huesca (17.642).

Por su parte, las celdas rurales de la provincia de Vizcaya presentan, en promedio, la mayor densidad experimentada (144.235 habitantes), aunque a poca distancia de las de Barcelona (142.178). En cambio, este indicador apenas supera los 5 000 habitantes en las provincias de Soria y Teruel.

Estas diferencias en la ratio de vecindad en un radio de 10 km resaltan el distinto grado de interacción entre los individuos que residen en centros urbanos y los que residen en áreas urbanas intermedias o zonas rurales. Si consideramos el nivel de interacción potencial de la población como *proxy* de mayores oportunidades económicas para la población de un territorio, las cifras anteriores ofrecen un ejemplo más de cómo los centros urbanos constituyen el epicentro de las relaciones económicas y sociales, son una fuente importante de ventajas productivas y actúan como polos de atracción en detrimento de las zonas rurales o escasamente pobladas.

3.5. Conclusiones

El análisis realizado en este capítulo ofrece un ejemplo de aplicación de la estadística de población en formato de *grid* de 1 km × 1 km frente a las estadísticas tradicionales limitadas por la estructura administrativa del territorio o las unidades estadísticas básicas. En particular, se ha obtenido una clasificación de los municipios según su grado de urbanización a partir de la *grid* censal 2021, GEOSTAT2021, y tomando como referencia la metodología estandarizada de Comisión Europea *et al.* (2021).

A la vista de los resultados se ha comprobado que la población española está muy concentrada en el territorio. Más de la mitad de la población española reside en centros urbanos, ocupando solo el 2,7% de la superficie habitada, mientras que el 90,3% de esta se corresponde con celdas rurales donde habita el 17%

de la población, el mismo porcentaje que concentran conjuntamente los tres centros urbanos más grandes del territorio español: Madrid, Barcelona y Valencia. Solo las provincias de Cuenca, Segovia, Soria y Teruel no tienen ningún centro urbano.

Del mismo modo, atendiendo a la clasificación municipal que se deriva de la clasificación DEGURBA a nivel de celda, se ha comprobado que solo el 3,3 % de los municipios españoles se clasifican como ciudades, concentrando casi el 56 % de la población, pero su distribución no es uniforme en el territorio. Las provincias del interior y norte de España tienen una mayor predominancia de los municipios rurales, que están por lo general más envejecidos y son más pobres.

La concentración de la población favorece la interacción económica y social de los individuos, lo que se refleja en el indicador de densidad experimentada. La población próxima en un radio de 10 km del residente promedio en centros urbanos alcanza casi el millón de habitantes, 20 veces más que en celdas rurales donde esta ratio de vecindad supone poco menos de 50.000 habitantes, existiendo de nuevo diferencias regionales bastante importantes.

4. Ejemplo de uso de la *grid* de población con resolución $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$: el desempeño de la red de transporte por carretera

Las administraciones públicas españolas gastan del orden de 5000 millones de euros al año en inversión en las infraestructuras de transporte por carretera. El objeto es facilitar la movilidad de corta y media distancia, así como la accesibilidad general de personas y empresas a determinados servicios, públicos y privados. Una red de carreteras eficiente es esencial en las economías desarrolladas modernas.

Los indicadores de accesibilidad pueden utilizarse para examinar el efecto de estas inversiones. Sin embargo, los indicadores tradicionales, centrados en tiempos de acceso o en el número de destinos que es posible alcanzar en un radio o intervalo de tiempo determinado, reflejan, fundamentalmente, la distribución espacial de los lugares de destino y no el desempeño de las redes de transporte.

Por otra parte, la mayoría de los estudios de accesibilidad que cubren grandes áreas suelen concentrar la población en un punto de una región (Matas *et al.* 2020) o un municipio (Goerlich, Maudos y Mollá 2021) a la hora de representar el área de interés. Esto es claramente inapropiado, sobre todo si la población presenta un elevado grado de dispersión dentro de la misma, ya que implica suponer que el tiempo de viaje de un sitio a otro es el mismo para toda la población dentro del área de estudio. Los estudios tradicionales, basados en áreas administrativas, suelen cometer dos tipos de sesgos en sus cálculos. Las regiones suelen tener una distribución de tamaños muy heterogénea, por lo que un

punto no es igualmente representativo, desde el punto de vista espacial, en unas regiones o en otras. Además, no está claro cómo medir la accesibilidad dentro de la propia región, lo que es particularmente arduo en el caso de regiones grandes.

Este capítulo aplica el esquema de medición de la accesibilidad desarrollado por el International Transport Forum (ITF 2019a, 2019b) a la cuantificación del desempeño de la red de carreteras, y que permite enfatizar cómo las redes de transporte facilitan la accesibilidad dados los orígenes y la distribución espacial de los destinos. El enfoque es genérico, y puede ser aplicado a diversos modos de transporte, o incluso a otros tipos de accesibilidad (Poelman 2018; Poelman y Dijkstra 2018), pero nuestra aplicación se centrará en el transporte privado por carretera (Dijkstra, Poelman y Ackermans 2019; Brons *et al.* 2022)⁵⁴.

Al igual que el capítulo anterior, se trata de una aplicación de la *grid* de población con resolución $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, que toma las celdas pobladas como orígenes y destinos. En la *grid*, todas las unidades son del mismo tamaño y tienen la misma forma. Además, suponer que el tiempo de viaje dentro de la celda es nulo genera un sesgo muy pequeño en un análisis regional que cubre todo el territorio nacional. Un análisis urbano requeriría mayor resolución, siendo esta la razón principal por la que acometeremos la desagregación de la *grid* de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ a una resolución de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ en el capítulo siguiente.

El esquema 4.1 resume el objetivo y contenido del capítulo. En el apartado siguiente se exponen los aspectos metodológicos y computacionales, que no son en absoluto triviales. Los apartados 4.2 y 4.3 expondrán los resultados a nivel de *grid*, grado de urbanización, comunidad autónoma y provincia, para finalmente ofrecer unas breves conclusiones.

⁵⁴ La incorporación al análisis del transporte público resulta tremendamente interesante, pero presenta, todavía más dificultades computacionales y de disponibilidad y manejo de la información (Poelman y Dijkstra 2015; Poelman, Dijkstra y Ackermans 2020a; Brons *et al.* 2021; Brons, Dijkstra y Poelman 2023).

ESQUEMA 4.1: Objetivo y contenido del capítulo 4

Objetivo	Datos	Procesos	Resultados
<ul style="list-style-type: none"> • Cuantificar el desempeño de la red de carreteras en el marco del International Transport Forum. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Grid</i> de población 1 km × 1 km, GEOSTAT2021. • Datos auxiliares: OpenStreetMaps. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación de la metodología del International Transport Forum (2019a, 2019b). • Selección de los umbrales de distancia (120 km) y tiempo (90 m) para el cálculo • Se calculan 3 métricas: accesibilidad, proximidad y desempeño del modo de transporte 	<ul style="list-style-type: none"> • Accesibilidad: población en un tiempo de viaje de 90 minutos por carretera. • Proximidad: población en un radio de 120 km. • Desempeño de la red de carreteras en transporte privado. • Resultados por grado de urbanización, provincias y CC. AA.

Fuente: Elaboración propia.

4.1. Aspectos metodológicos

El marco general desarrollado por el ITF (2019a, 2019b) para cuantificar el desempeño de los sistemas de transporte se basa en dar respuesta a una pregunta relativamente simple: *¿Puedo llegar a todos los destinos cercanos en un tiempo prefijado con un determinado modo de transporte?*

Con una distribución de la población suficientemente granular, esta aproximación permite cuantificar cómo una red de transporte aumenta la accesibilidad controlando por la distribución de la población. Este marco general puede ser aplicado a cualquier modo de transporte, público o privado, incluidos los desplazamientos a pie, aunque este capítulo ofrecerá una aplicación al transporte privado por carretera.

Naturalmente, nuestra distribución granular de la población viene dada por la *grid* de población del censo 2021 con resolución de 1 km × 1 km, GEOSTAT2021. Esta es una resolución adecuada para análisis nacionales o regionales. Para estudios urbanos parece razonable utilizar una mayor resolución, como tendremos ocasión de comprobar en un capítulo posterior. Todas las celdas con población son utilizadas como lugares de origen y destino, y en este sentido se utilizan como *proxy* de actividad u oportunidades que los individuos pueden alcanzar.

El enfoque del ITF (2019a, 2019b) se basa en el cómputo de tres métricas con una interpretación muy sencilla:

- 1) Accesibilidad dado el modo de transporte considerado. Es decir, el número total de destinos —población en las celdas— que se pueden alcanzar en un umbral de tiempo fijo. Esto depende de dos grupos de factores, uno relacionado con las características concretas del modo de transporte considerado —densidad, velocidad sobre la red, geometría de esta, frecuencia de servicios, localización de las paradas en el caso del transporte público—, y otro relacionado con la distribución espacial de los destinos —las celdas pobladas—.
- 2) Proximidad es simplemente el número de destinos —población en las celdas— que existen dentro de una distancia fija —en línea recta—. Trata simplemente de captar la distribución espacial de los destinos.
- 3) El desempeño del modo de transporte es la ratio entre accesibilidad y proximidad. Por tanto, compara el número de destinos accesibles con el número de destinos próximos. Un valor alto de esta ratio indica que la mayor parte de destinos próximos son accesibles por el modo de transporte considerado, dada la distribución de estos; y, en consecuencia, el desempeño del modo de transporte es alto. Por el contrario, un valor bajo de esta ratio indica que no podemos acceder a muchos de los destinos próximos, en el modo de transporte considerado dado un umbral de tiempo, y su desempeño es bajo. En otras palabras, el indicador muestra el desempeño de un modo de transporte determinado controlando por la distribución espacial de los destinos, que en este contexto no es más que la distribución espacial de la población. Multiplicaremos dicho indicador por 100, de forma que podemos expresarlo en términos porcentuales.

Naturalmente este marco general depende de los umbrales de accesibilidad y proximidad que adoptemos, que pueden utilizarse para efectuar un análisis de sensibilidad, y que naturalmente dependen del modo de transporte a analizar.

Puesto que en nuestra aplicación vamos a analizar el transporte por carretera, desde el punto de vista de lo que podrían ser desplazamientos máximos diarios por motivos de trabajo, podemos concretar los indicadores anteriores de la siguiente forma⁵⁵:

- 1) Accesibilidad examina todos los destinos —población en las celdas— que pueden ser alcanzados en un tiempo de viaje de 90 minutos. Este es un tiempo de viaje razonable para desplazamientos por trabajo en el día, permitiendo un viaje de ida y vuelta para, por ejemplo, una reunión de trabajo.

Desde el punto de vista del cómputo, ello implica, para cada una de las celdas de GEOSTAT2021, calcular una isócrona de 90 minutos, examinar qué celdas pobladas caen dentro de dicha isócrona y calcular la población residente en las mismas. Esta es la población accesible de la celda en cuestión. Por tanto, dispondremos de una *grid* para España de población accesible, con tantas celdas como celdas con población en la *grid* original, es decir, 115.410. Esta la podemos denominar *grid* de accesibilidad de un tiempo de viaje dado, en nuestro ejemplo 90 minutos.

La regla utilizada es considerar, dentro de dicha isócrona, aquellas celdas cuyo centroide cae dentro de la misma⁵⁶.

- 2) Proximidad examina el número de destinos —población en las celdas— que existen dentro de un radio de 120 km —en línea recta—. Con estos umbrales la población próxima sería igual a la población accesible si fuera posible viajar en línea recta a una velocidad de 80 km/hora. El objeto de calcular la población próxima es controlar por la distribución espacial de los destinos.

⁵⁵ Los umbrales considerados toman como referencia Dijkstra, Poelman y Ackermans (2019) por comparabilidad.

⁵⁶ Esta cuestión de considerar qué celdas pertenecen o no a un determinado polígono ya ha aparecido con anterioridad, y en este tipo de ejercicios consideramos siempre la regla del centroide, es decir, una celda pertenecerá al polígono donde caiga su centroide. Ello permite una cierta reducción de la carga computacional sin afectar sustancialmente a los resultados.

Este es el mismo cálculo que ya hicimos al final del capítulo 2 para la obtención de la *grid* de proximidad, solo que ahora hemos cambiado el radio de cálculo por uno mucho mayor al que utilizamos entonces, 120 km frente a los 10 km utilizados en el cálculo de la densidad experimentada.

- 3) Finalmente, dividiendo la población accesible —en una isócrona de 90 minutos— por la población próxima —en un radio de 120 km— y multiplicando por 100 calculamos el desempeño de la red de carreteras en términos porcentuales. Obsérvese que el cálculo se realiza a nivel de celda, de forma que obtenemos lo que podemos denominar una *grid* de desempeño del transporte privado por carretera.

El mapa 4.1 ilustra los diferentes conceptos a partir del origen en una celda cualquiera. El contorno gris claro representa una isócrona de 90 minutos, de forma que la población de las celdas dentro de la misma, por ejemplo 4,87 millones de personas, representa la población accesible, dado ese umbral.

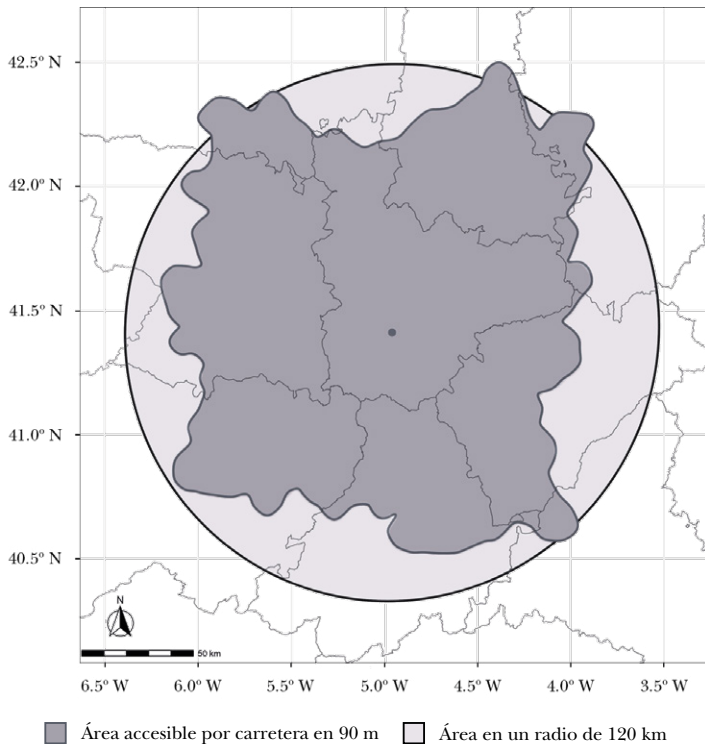
Para evaluar si la accesibilidad es alta o baja, debemos comparar la población accesible frente a un valor de referencia. Tomamos como valor de referencia la población dentro de un radio de 120 km de la celda en cuestión. Esta área está representada por el círculo gris oscuro en el mapa 4.1, de forma que la población de las celdas dentro de este círculo, por ejemplo 5,63 millones de personas, representa la población próxima, dado ese umbral.

La ratio entre población accesible y población próxima —o entre accesibilidad y proximidad— multiplicado por 100 es un indicador de desempeño de la red de carreteras para el transporte privado. En nuestro ejemplo, dicho indicador toma el valor $86,5\% = 100 \times (4,87/5,63)$, y tiene una interpretación muy clara, el 86,5% de la población próxima en un radio de 120 km es accesible en un tiempo de 90 minutos. Obsérvese que el indicador se calcula a nivel de celda, por lo que disponemos de una *grid* de desempeño de la red de transporte con la misma resolución que la *grid* de población original.

Normalmente la totalidad de la población accesible cae dentro del radio de 120 km que determina la población próxima,

pero no hay nada en los umbrales que implique que esto es así. Podemos encontrar casos, principalmente a lo largo de autopistas de alta velocidad, en las que una parte pequeña de la población accesible caiga fuera del radio de 120 km que determina el área de proximidad. Esto es visible en algunos puntos del mapa 4.1. Existe por tanto la remota posibilidad de que la población accesible sea mayor que la próxima en algún caso y, por tanto, el indicador del rendimiento de la red de transporte sea superior a 100. Ello dificulta la interpretación mencionada anteriormente en términos de porcentaje de la población próxima en un radio de 120 km que es accesible en un tiempo de 90 minutos.

MAPA 4.1: Áreas accesibles en una isócrona de 90 m y en un radio de 120 km alrededor de una celda dada

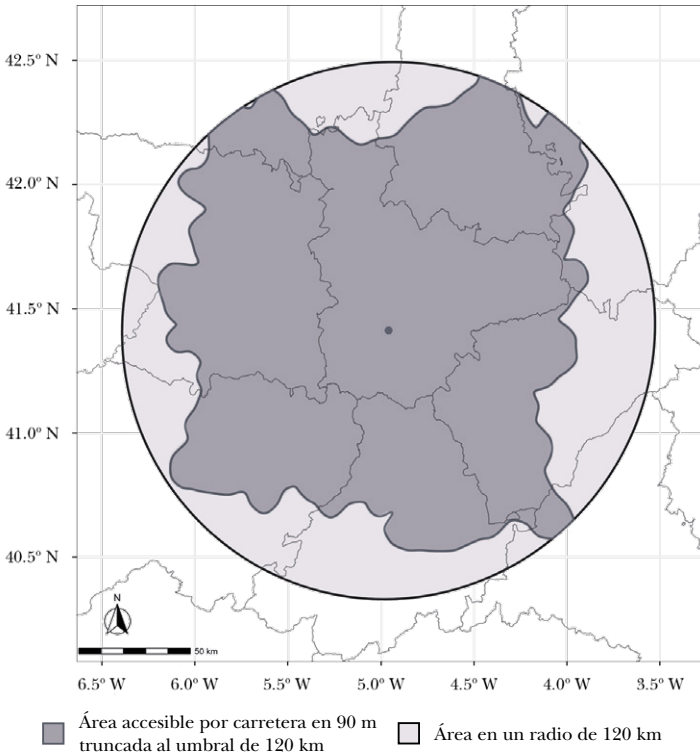


Fuente: INE (2024), OSM Foundation (OpenStreetMap) y elaboración propia.

Por cuestiones de interpretación, y eficiencia computacional, es conveniente modificar ligeramente el indicador original,

de forma que la accesibilidad se mida dentro del mismo radio que la proximidad alrededor de la celda de origen. De esta forma nuestra isócrona se trunca, cuando sea necesario, por el radio de proximidad. El mapa 4.2 muestra esta modificación del indicador para el mismo origen que el mapa 4.1. Por lo tanto, la accesibilidad solo tiene en cuenta los destinos que se pueden alcanzar en un radio de 90 minutos, en la medida que dichos destinos se encuentren dentro del radio de proximidad de 120 km alrededor del origen. Con esta modificación el indicador responde exactamente la pregunta inicial: *¿Puedo llegar a todos los destinos cercanos en un tiempo prefijado con un determinado modo de transporte?*

MAPA 4.2: Áreas accesibles en una isócrona de 90 m truncada al umbral de 120 km y en un radio de 120 km alrededor de una celda dada



Fuente: INE (2024), OSM Foundation (OpenStreetMap) y elaboración propia.

El índice de desempeño queda, pues, definido como

$$Desempeño = 100 = \frac{\text{Población accesible en 90 minutos}}{\text{Población próxima en un radio de 120 km}} \quad (4.1)$$

donde la población accesible en 90 minutos solo tiene en cuenta los destinos que se encuentran dentro de un radio de 120 km.

El desempeño de la red de transportes se calcula a nivel de *grid*, y cualquier estimación para un nivel de agregación superior, CC. AA. o provincias, por ejemplo, debe tener en cuenta la distribución de la población. En consecuencia, todos los agregados se calculan como promedios ponderados por la población de la *grid* de desempeño del transporte privado por carretera⁵⁷.

Algunos detalles de implementación son relevantes. El cálculo de la población próxima es sencillo, y sus detalles de cálculo fueron expuestos al final del capítulo 2. En aquel caso, sin embargo, el radio era relativamente reducido, 10 km, y no tuvimos en cuenta las discontinuidades del territorio. En este caso debemos afinar algunos detalles computacionales ya que no solo el radio de proximidad es mucho mayor, 120 km, sino que el objeto del análisis es evaluar el desempeño de la red de carreteras, y por tanto debemos tener en cuenta las discontinuidades de la red debido a la orografía. Por ejemplo, la red de carreteras de las islas no está conectada con la de la península, ni con la de otras islas, y este tipo de discontinuidades deben tomarse en consideración⁵⁸. Por esta razón los cálculos se efectuaron de forma separada para la península, para cada isla⁵⁹ y para las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. Esto afecta tanto a los cálculos a nivel de celda como al proceso de agregación posterior, de forma que los resultados

⁵⁷ Obsérvese que el resultado es diferente si, para una región dada, agregamos mediante suma la población accesible y la población próxima, y calculáramos el indicador de desempeño de la red de transporte como cociente entre estos dos agregados. En este caso, los pesos implícitos en el cálculo serían los de la población próxima. Sin embargo, puesto que el indicador de desempeño calculado a nivel de *grid* muestra, para cada celda, el porcentaje de población accesible de los habitantes de la celda en cuestión, los pesos adecuados en el proceso de agregación deben ser los de la población de las celdas.

⁵⁸ Otra cuestión sería una evaluación del desempeño de la red de transporte intermodal, que tuviera en cuenta la accesibilidad por medio del transporte marítimo o aéreo, pero esto requeriría una aproximación ligeramente diferente.

⁵⁹ Formentera, Ibiza, Mallorca y Menorca de Illes Balears, y Fuerteventura, Gran Canaria, Lanzarote, La Gomera, El Hierro, La Palma y Tenerife de las Canarias.

para las regiones insulares se agregan inicialmente para cada isla, y posteriormente para el conjunto de islas que forman la región. Naturalmente en ningún caso se toman en cuenta las conexiones, ni la población de países extranjeros.

Al igual que en el capítulo 1, todos los cálculos se hicieron en vectorial, y no se estableció ningún factor de descuento que otorgara más peso a la población de las celdas más cercanas (Henderson, Nigmatulina y Kriticos 2021).

4.2. Resultados a nivel de *grid*

Los cálculos de proximidad y accesibilidad se efectúan a nivel de celda de la *grid* de referencia y descansan sobre OpenStreetMap (Luxen y Vetter 2011), a la que accedemos a través del proyecto Open Source Routing Machine (OSRM) instalado en un servidor local, utilizando los centroides de las celdas como orígenes y destinos. Una vez calculada la población de proximidad en un radio de 120 km se estimó que el total de rutas a computar de forma exhaustiva excedía ligeramente los 1 000 millones, lo que resultaba impracticable desde el punto de vista del cálculo. Por esta razón los cálculos proceden a obtener una isócrona de 90 minutos de tiempo alrededor de cada celda —origen—, recortarla por los límites de proximidad —radio de 120 km—, examinar las celdas cuyo centroide cae dentro de dicha isócrona y sumar la población de estas, lo que determina la población accesible que, por construcción, no puede superar la población próxima⁶⁰. Cualquier agregado se obtiene como promedio ponderado por la población a partir de los valores obtenidos a nivel de celda, pero antes de agregar conviene examinar visualmente el conjunto de resultados obtenidos para toda la *grid*⁶¹.

⁶⁰ Se comprobó que la aproximación era excelente, mediante el cálculo exacto en algunos casos, dada la resolución con la que se estiman las isócronas.

⁶¹ En cierta forma la *grid* actúa como geometría intermedia para obtener resultados para áreas administrativas u otras zonas de interés. Al igual que sucede con los microdatos de encuestas, donde los valores individuales son poco relevantes, las celdas concretas carecen de interés consideradas individualmente, pero, al igual que los microdatos, podemos combinarlos de diferentes formas mediante los factores de elevación,

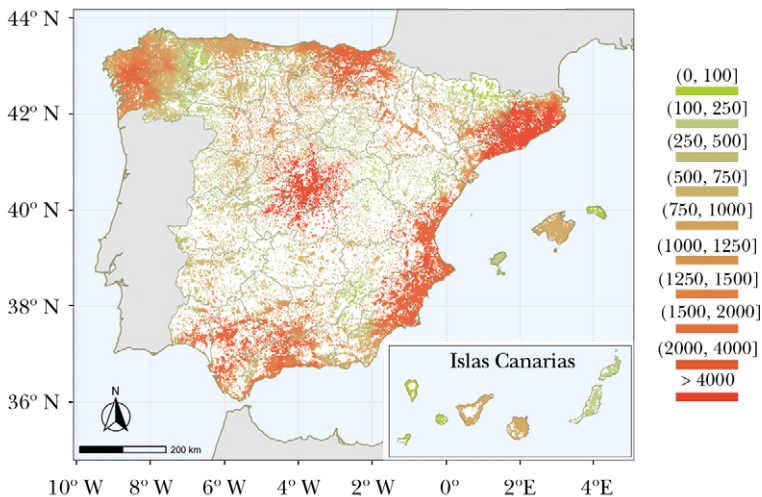
Accesibilidad

El mapa 4.3 muestra los patrones de accesibilidad a nivel de celda. Es decir, la población accesible por carretera en un tiempo de 90 minutos dada la población próxima en un radio de 120 km de distancia. Se trata de una medida de accesibilidad absoluta, cuya unidad de medida son personas. A nivel nacional la población accesible por un residente promedio en España —dados estos umbrales— es de 3,4 millones de personas.

Por razones de visualización, los valores originales son agregados —mediante promedios ponderados por la población— a celdas de 2 km × 2 km en todos los mapas a nivel de *grid* mostrados en este capítulo.

MAPA 4.3: Accesibilidad de la población en un tiempo de viaje de 90 m en transporte por carretera

(miles de personas)



Nota: El tiempo de viaje está truncado a un radio de 120 km de proximidad de la celda de referencia. La escala de la población está en miles de personas. El mapa muestra la población accesible en celdas de 2 km × 2 km para una mejor visualización, obtenida mediante promedios ponderados por la población a partir de la *grid* original con celdas de 1 km × 1 km.

Fuente: INE (2024), OSM Foundation (OpenStreetMap) y elaboración propia.

que actúan de ponderadores para elevar los resultados muestrales a los poblacionales. Las variables obtenidas a nivel de *grid* son agregadas mediante los pesos poblacionales correspondientes, ya que representan el peso demográfico de la celda en cuestión.

Lo que muestra el mapa 4.3 es un patrón sutil y variado que tiene cierta semejanza con el mapa de la distribución de la población — mapa 2.3—. En términos absolutos los mayores valores de población accesible los encontramos en Madrid, 7,7 millones de personas accesibles para el residente promedio, que extiende su área de influencia a las provincias limítrofes, Guadalajara con 6,5 millones, Toledo con 6 millones y Segovia con 4,6 millones, y Barcelona, con 6,7 millones de personas accesibles para el residente promedio, que también se extiende por la costa hacia Tarragona, 4,6 millones, y Girona, 4,1 millones. Les siguen Valencia y Alicante, con valores de población accesible en el entorno del promedio nacional, 3,4 millones. En cierta medida el mapa 4.3 refleja los patrones de concentración de la población en el área metropolitana de Madrid, la costa mediterránea y, en menor medida, el valle del Guadalquivir y la costa cantábrica.

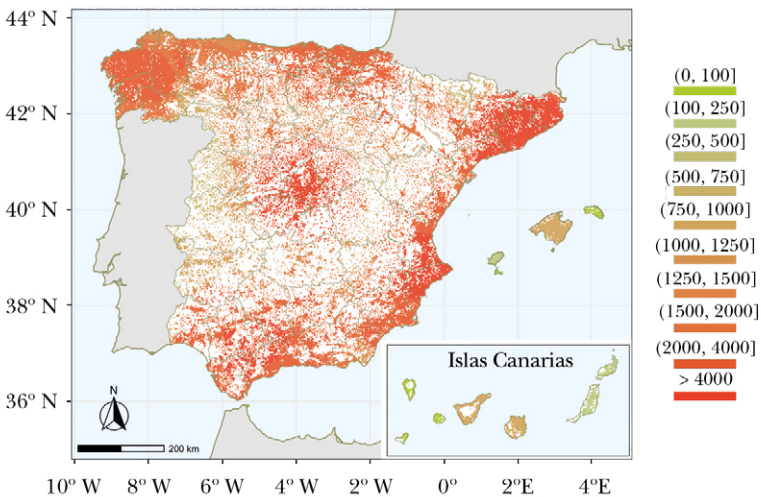
Debe tenerse en cuenta que este mapa, y los siguientes, solo representan las celdas habitadas⁶².

Proximidad

La población próxima representa el valor de referencia respecto al cual medimos la accesibilidad. La población próxima en un radio de 120 km del residente promedio se muestra en el mapa 4.4, cuyas tonalidades muestran claramente valores superiores a los de la población accesible en la mayor parte del país. Se trata, de nuevo, de una métrica absoluta, cuya unidad de medida son personas. A nivel nacional, la población próxima en un radio de 120 km del residente promedio alcanza los 4,3 millones de personas. La provincia con mayor valor es, de nuevo, Madrid, con 8 millones, seguida muy de cerca por sus provincias limítrofes, Toledo, Segovia, con 7,6 millones, Guadalajara, con 7,4 millones, y Ávila, con 7 millones. Le sigue Barcelona, con 7,2 millones, y sus provincias limítrofes, Girona, con 6 millones, y Tarragona, con 5,7 millones. Las siguientes provincias son Alicante, con 4,6 millones, y Valencia, con 4,3 millones, situándose, por tanto, en el promedio nacional. Resulta evidente que los valores más altos se encuentran en las zonas rodeadas de las principales aglomeraciones de población.

⁶² A esta resolución tenemos 52.641 celdas habitadas de un tamaño de 2 km × 2 km.

MAPA 4.4: Proximidad de la población en un radio de 120 km alrededor de la celda de referencia
(miles de personas)



Nota: La escala de la población está en miles de personas. El mapa muestra la población próxima en celdas de 2 km × 2 km para una mejor visualización, obtenida mediante promedios ponderados por la población a partir de la *grid* original con celdas de 1 km × 1 km.

Fuente: INE (2024), OSM Foundation (OpenStreetMap) y elaboración propia.

El mapa de proximidad —mapa 4.4— es muy similar al de accesibilidad —mapa 4.3—, de hecho, la correlación entre ambas variables es razonablemente elevada, 0,834 a nivel de celda. Por esta razón, el valor absoluto de la población accesible no es un buen indicador del desempeño de sistema de transporte por carretera.

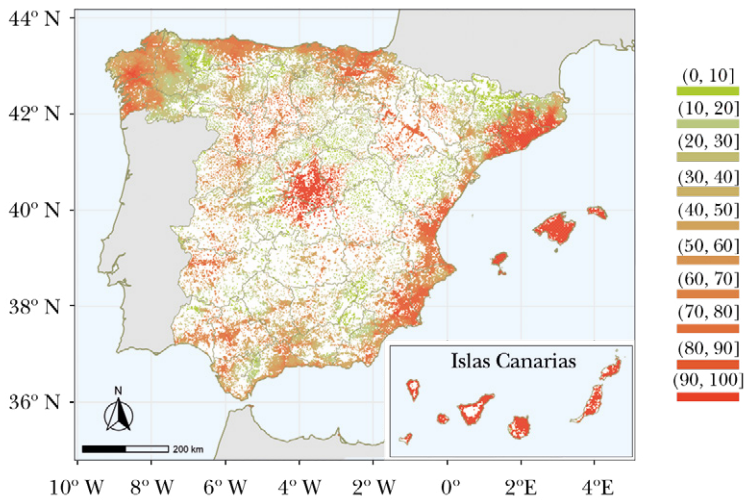
Desempeño de la red de carreteras para el transporte privado

Dividiendo la población accesible en un tiempo de 90 minutos por la población próxima en un radio de 120 km, y multiplicando por 100 obtenemos nuestro indicador de desempeño de la red de carreteras para el transporte privado representado en el mapa 4.5 que toma valores entre 0 y 100. Previamente hemos acotado la población accesible a la que está dentro del radio de 120 km, de forma que el indicador no puede sobrepasar el 100 en ningún caso —mapa 4.2—.

La referencia de los 120 km de radio para la determinación de la población próxima asume una velocidad en línea recta de 80 km/

hora. Si se dieran estas condiciones, toda la población próxima sería accesible, y el valor del indicador sería 100. En áreas con buenas y rápidas conexiones, en todas direcciones, el valor del indicador debe aproximarse a este valor. En otras áreas, con peores carreteras, o simplemente carreteras locales con más curvas, este valor debe ser sensiblemente inferior.

MAPA 4.5: Desempeño de la red de carreteras para el transporte privado
(porcentaje)



Nota: El mapa muestra el desempeño de la red de carreteras en celdas de 2 km × 2 km para una mejor visualización, obtenida mediante promedios ponderados por la población del rendimiento a partir de la *grid* original con celdas de 1 km × 1 km.

Fuente: INE (2024), OSM Foundation (OpenStreetMap) y elaboración propia.

A pesar de todo, lo que el mapa 4.5 muestra globalmente no es muy diferente del mapa de accesibilidad —mapa 4.3—, aunque la correlación a nivel de celda entre ambas variables no es especialmente alta, de 0,567. Lo que dicho mapa tiende a mostrar es que la red principal de comunicaciones se localiza alrededor de las grandes concentraciones de población, pero que al mismo tiempo hay zonas, con población más dispersa, con menor rendimiento de la red de carreteras.

El indicador de desempeño de la red de carreteras está construido para captar la eficiencia de la red para viajes de ida y vuelta en el día, lo que permite desplazamientos diarios por razones

de trabajo. Valores elevados tienden a indicar niveles óptimos de la red, al tiempo que valores bajos pueden estar asociados a niveles subóptimos de la red, pero también es cierto que la orografía juega un papel importante aquí, como tendremos ocasión de comprobar, y, en consecuencia, valores bajos pueden indicar características geográficas difíciles en términos de rugosidad, pendiente del terreno o barreras naturales como ríos o profundos valles.

4.3. Resultados a nivel regional y por grado de urbanización

A nivel nacional el indicador de desempeño de la red de carreteras a efectos del transporte privado toma un valor de 75,6%. La interpretación es muy clara, desde el punto de vista agregado, para el residente promedio, el 76% de la población que está en un radio de 120 km es accesible en 90 minutos de tiempo de viaje por carretera en vehículo privado⁶³. Veremos a continuación que existen amplias disparidades regionales, ligadas a la demografía y la orografía, que naturalmente crecen conforme aumentamos el detalle geográfico.

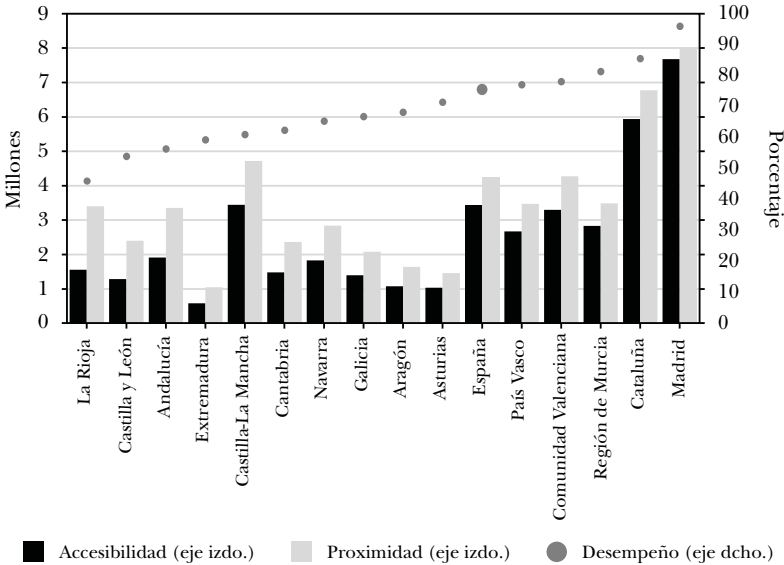
El análisis que sigue a continuación solo toma en cuenta la España peninsular, los archipiélagos, Illes Balears y Canarias, y las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla no son relevantes a efectos de este análisis, ya que su accesibilidad por carretera está limitada por su localización geográfica y el tamaño de las islas. Desde el punto de vista numérico su indicador de desempeño es prácticamente 100, ya que el tamaño físico permite acceder, en la práctica, a toda la población cuando el radio de proximidad es de 120 km.

⁶³ Nuestros resultados son sensiblemente inferiores a los mostrados por Dijkstra, Poelman y Ackermans (2019), figura 1. La explicación hay que buscarla en tres razones. Por una parte, estos autores no acotan la accesibilidad al radio de búsqueda de los 120 km de proximidad, de forma que su indicador puede tomar un valor superior a 100 en algunos casos, lo que resulta poco intuitivo. Por otra parte, estos autores utilizan una red de carreteras propia basada en la cartografía del proveedor de GPS TomTom, mientras que nosotros utilizamos un servicio de rutas basado en OpenStreetMap montado sobre un servidor local. Finalmente, estos autores utilizan la *grid* de población basada en el censo de 2011, GEOSTAT2011, que, para el caso de España, concentra en exceso la población (Goerlich 2024b), favoreciendo de esta forma la accesibilidad de esta.

4.3.1. Comunidades autónomas y provincias

El gráfico 4.1 representa la población accesible en 90 m, la población próxima en un radio de 120 km y el índice de desempeño de la red de transporte por carretera a nivel de CC. AA. Los datos están ordenados de menor a mayor valor del índice de desempeño. Claramente la comunidad que muestra mejor desempeño de la red de carreteras es Madrid, con un valor del índice de 96 %, y la comunidad con menor valor La Rioja, con tan solo el 46 %. Cinco comunidades se sitúan por encima del promedio nacional, País Vasco, Comunitat Valenciana, Región de Murcia, Cataluña y Madrid, si bien solo las 3 últimas superan el 80 %.

GRÁFICO 4.1: Población accesible, población próxima y desempeño de la red de transporte por carretera. Comunidades autónomas y España



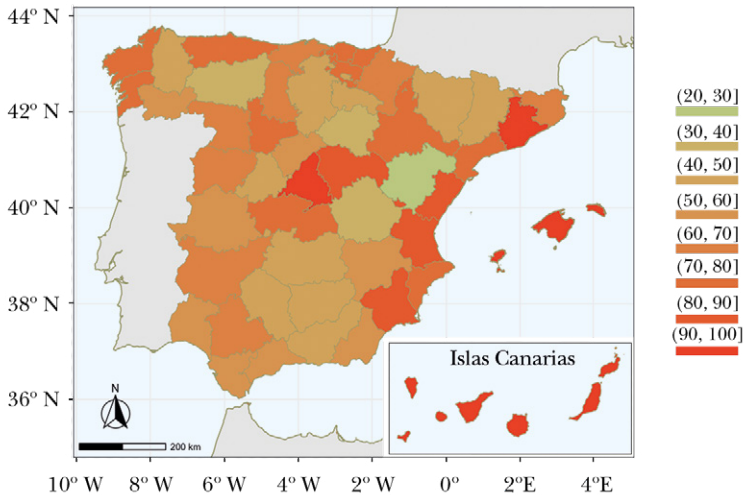
Fuente: INE (2024), OSM Foundation (OpenStreetMap) y elaboración propia.

A rasgos generales las diferencias regionales son sustanciales. Estas discrepancias tienden a crecer conforme bajamos en la escala geográfica, de forma que son mayores a nivel provincial, tal y como muestra el mapa 4.6. La provincia con mayor valor del índice de desempeño es, de nuevo, Madrid, con el 96 %, pero le sigue de cerca Barcelona, con el 93 %. Con valores superiores al 80 %

encontramos, además de Murcia, Guadalajara (84%) en el área de influencia del área metropolitana de Madrid, Castellón (81%) y Valencia (con un valor ligeramente superior al 80%)⁶⁴.

En el otro extremo encontramos que, a nivel provincial, La Rioja deja de ser la provincia con menor valor del índice de desempeño de la red de transporte por carretera, para pasar a ser Teruel, con el 23%, un valor realmente bajo que nos indica que alrededor de las $\frac{3}{4}$ partes de su población es incapaz de alcanzar, en 90 minutos de tiempo de viaje, centros urbanos de importancia situados en un radio de 120 km. Ello se debe a la conjunción de dos factores, por una parte, una deficiente red de carreteras más allá de la Autovía Mudéjar y, por otra, a la relativa lejanía de núcleos de población, situados a cierta distancia de los núcleos urbanos importantes de la provincia, Teruel y Alcañiz. Le siguen Soria, con un 33%, León, con un 35%, y Cuenca, con un 40%.

MAPA 4.6: Desempeño de la red de carreteras para el transporte privado a nivel provincial
(porcentaje)



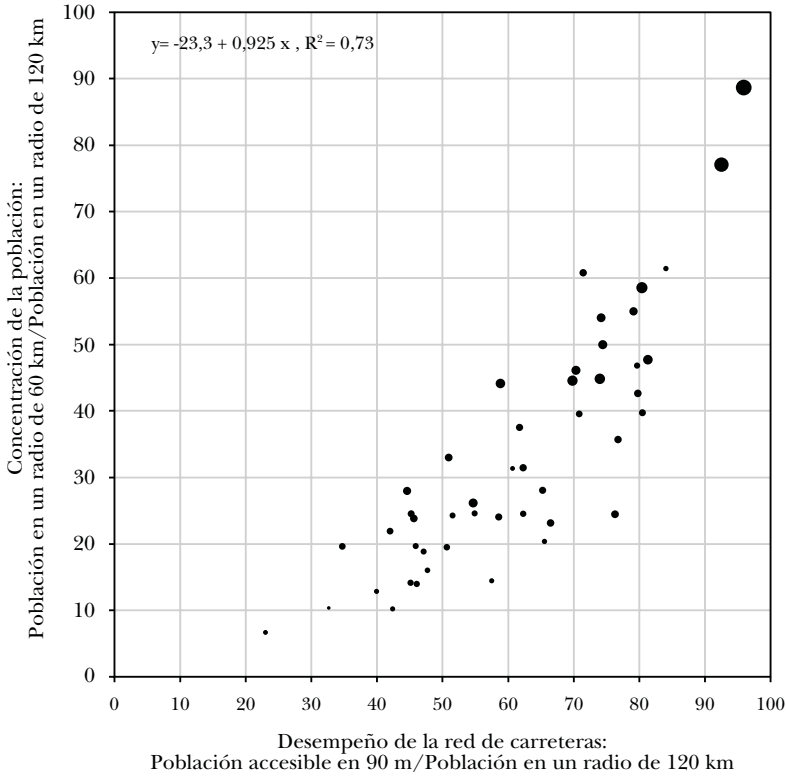
Nota: El mapa muestra el desempeño de la red de carreteras a nivel provincial obtenido mediante promedios ponderados por la población del rendimiento obtenido a partir de la *grid* original con celdas de 1 km × 1 km.

Fuente: INE (2024), OSM Foundation (OpenStreetMap) y elaboración propia.

⁶⁴ Obsérvese cómo las provincias insulares, no excluidas del mapa 4.6, alcanzan los mayores valores del índice de desempeño.

Los resultados del gráfico 4.1 y del mapa 4.6 muestran una clara relación entre la concentración de la población y el valor del índice de desempeño. Para un estado dado de la red de transportes por carretera será más fácil proporcionar acceso en 90 minutos de tiempo de viaje con una población concentrada que con una población dispersa. También debemos esperar mayores valores del índice de desempeño si la población está más concentrada alrededor del punto de partida. En cierta medida, es esto lo que explica los elevados valores de Madrid.

GRÁFICO 4.2: Concentración de la población, desempeño de la red de transporte por carretera y población. Provincias



Nota: Valores obtenidos mediante promedios ponderados por la población a partir de los resultados de la *grid* original con celdas de 1 km × 1 km. El tamaño de las bolas representa el volumen de población.

Fuente: INE (2024), OSM Foundation (OpenStreetMap) y elaboración propia.

Para examinar esta hipótesis el gráfico 4.2 muestra la relación entre la concentración de la población y el desempeño de la red de carreteras a nivel provincial. Como índice de concentración, calculamos la relación entre la población próxima en un radio de 60 km y la población próxima en un radio de 120 km —multiplicando el valor resultante por 100—. Si para un origen dado, toda la población viviera en un radio de 60 km la concentración, respecto a ese punto, sería máxima y el valor del índice sería de 100. Por el contrario, si todos vivieran a más de 60 km de distancia del punto de referencia el valor del índice sería cero. Dicho índice se calcula, pues, a nivel de celda y se agrega utilizando promedios ponderados por la población, al igual que el índice de desempeño.

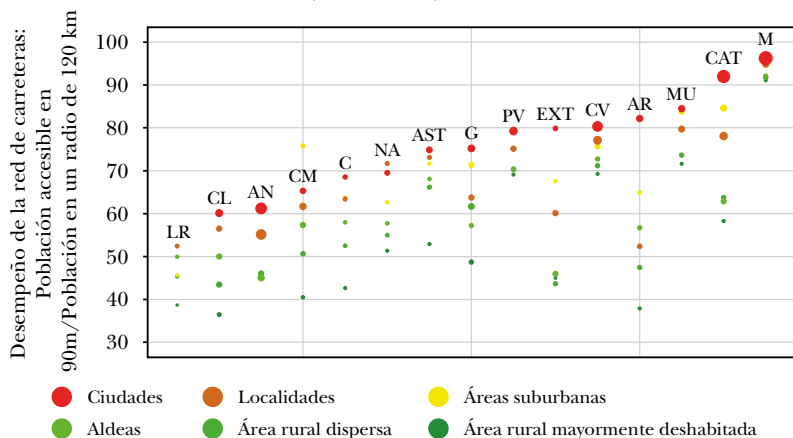
Lo que el gráfico 4.2 muestra es una clara relación positiva, estadísticamente significativa, entre concentración de la población y desempeño de la red de transportes por carretera. El R^2 de una regresión lineal simple —mostrada en el gráfico 4.2— es de 0,73, y el coeficiente no es estadísticamente diferente de 1.

Grado de urbanización (DEGURBA)

Dada la distribución de la población, todo indica que es conveniente un análisis más detallado del territorio y que las diferencias en el desempeño de la red de transportes deben ser sustanciales cuando las analizamos por grado de urbanización. La disponibilidad de resultados a nivel de *grid* facilitan la agregación a diversas áreas de interés. A nivel nacional el índice de desempeño de la red de transportes es del 83 % para las ciudades, del 73 % para las áreas de densidad intermedia —localidades y áreas suburbanas o periurbanas— y del 59 % para las áreas rurales, que disminuye hasta el 53 % para las áreas rurales mayormente deshabitadas.

Agregando las localidades densas y semidensas —capítulo 3— en una única categoría, el gráfico 4.3 representa el índice de desempeño de la red de transporte por carretera a nivel de CC. AA. y 6 grados de urbanización, donde la ordenación se ha efectuado a partir del valor para los centros urbanos. De esta forma distinguimos las localidades de las áreas suburbanas o periurbanas y mantenemos las 3 categorías rurales: aldeas, áreas rurales dispersas y áreas rurales mayormente deshabitadas.

GRÁFICO 4.3: Desempeño de la red de transporte por carretera y grado de urbanización (DEGURBA). Comunidades autónomas



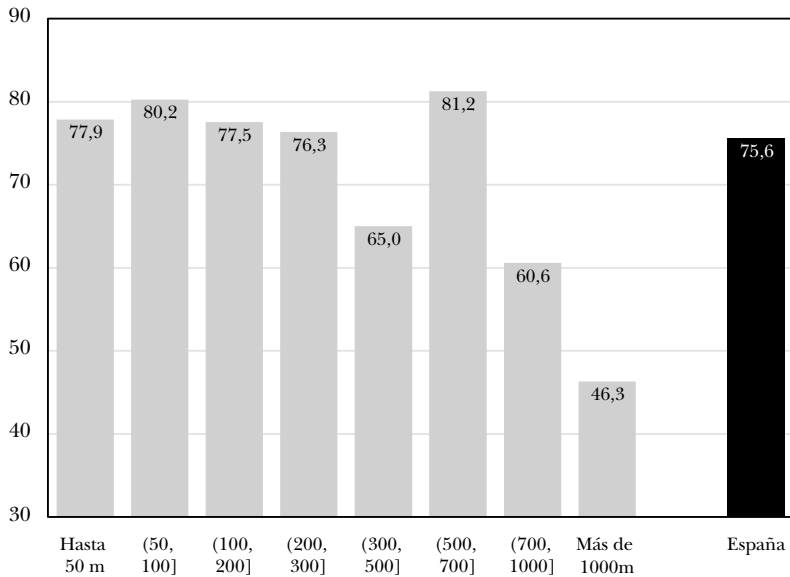
Nota: Valores obtenidos mediante promedios ponderados por la población a partir de los resultados de la *grid* original con celdas de 1 km × 1 km. El tamaño de las bolas representa el volumen de población. Valores ordenados por el valor de los centros urbanos —ciudades—.

Fuente: INE (2024), OSM Foundation (OpenStreetMap) y elaboración propia.

Así, el gráfico 4.3 muestra la variación en el desempeño de la red de transporte por carretera entre los 6 grados de urbanización considerados por CC. AA. Salvo en el caso de La Rioja —que ciertamente muestra un comportamiento atípico— el mejor desempeño de la red de transporte se observa siempre en los centros urbanos —ciudades—, y el menor en las áreas rurales. Las localidades y áreas suburbanas o periurbanas muestran un comportamiento heterogéneo, que no indica un patrón uniforme. Parece razonable que, en algunos casos, las áreas suburbanas muestren mejor desempeño que las localidades, ya que, en muchas ocasiones, se trata de celdas alrededor de los centros urbanos. Incluso en Castilla-La Mancha las áreas suburbanas o periurbanas muestran mejor desempeño que las ciudades en esta CC. AA.

Lo que sí resulta evidente del gráfico 4.3 es el peor desempeño de las áreas rurales en general, pero especialmente de las áreas rurales mayormente deshabitadas. En algunos casos, como en Castilla y León, Castilla-La Mancha, Cantabria, Galicia, Extremadura, Aragón y, en menor medida, Cataluña estas áreas muestran un desempeño notablemente menor que el resto de las tipologías de su CC. AA., existiendo en muchos casos diferencias notables entre

GRÁFICO 4.4: Desempeño de la red de transporte por carretera por cortes altimétricos
(porcentaje)



Nota: Valores obtenidos mediante promedios ponderados por la población a partir de los resultados de la *grid* original con celdas de 1 km × 1 km.

Fuente: INE (2024), OSM Foundation (OpenStreetMap) y elaboración propia.

las diferentes categorías rurales. En la mayoría de los casos estas disparidades pueden explicarse por una baja densidad de población y las largas distancias entre asentamientos, pero en otros la orografía juega un papel relevante.

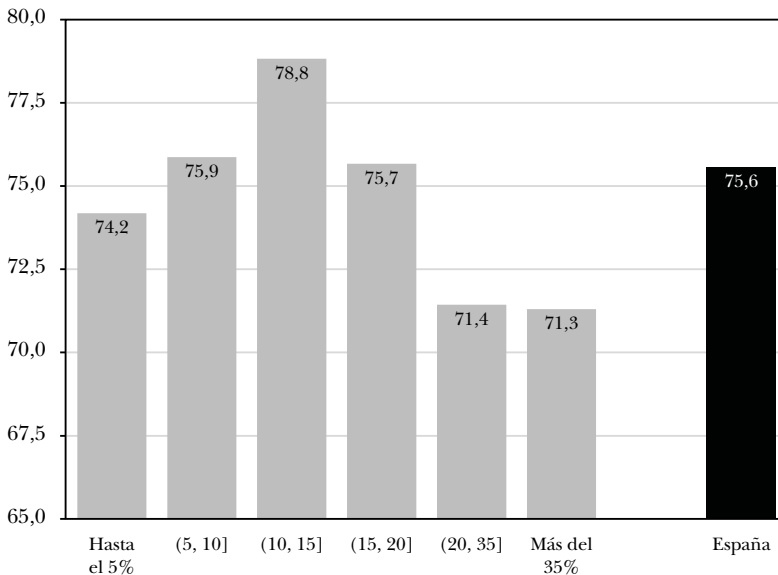
La presencia de macizos montañosos y una orografía rugosa son obstáculos evidentes para el transporte por carretera, generando una red más sinuosa, lo que representa menores velocidades de tránsito y, por tanto, un menor grado de accesibilidad, al tiempo que mayores costes de construcción y mantenimiento. No disponemos de una tipología oficial de áreas de montaña, ni a nivel de *grid*, ni a nivel de municipio, pero la flexibilidad de nuestros datos de partida nos permite agregar los resultados por los mismos cortes altimétricos y de rugosidad (pendiente) que ya utilizamos en el capítulo 2.

El gráfico 4.4 muestra el desempeño de la red de transportes por cortes altimétricos. Los resultados muestran que el índice se sitúa en valores en el entorno del promedio nacional para altitudes

que no superan los 300 m, pero disminuye de forma monótona a partir de esa altitud. La excepción en el intervalo entre 500 m y 700 m se debe al área metropolitana de Madrid, cuyas celdas habitadas se sitúan mayoritariamente en este intervalo.

Por su parte, el gráfico 4.5 muestra el índice de desempeño de la red de transportes utilizando los cortes de rugosidad ya utilizados en el capítulo 3 y expresados, por tanto, en términos de pendiente porcentual. De nuevo observamos un menor valor del índice de desempeño en los intervalos con mayor pendiente, aunque no tan bajo como en los intervalos de mayor altitud. El mayor valor lo obtenemos, al igual que antes, en el intervalo al que pertenecen la mayor parte de las celdas habitadas del área metropolitana de Madrid. Recordemos que el valor promedio de la pendiente para las celdas habitadas es del 16 % —cuadro 3.4—.

GRÁFICO 4.5: Desempeño de la red de transporte por carretera por intervalos de rugosidad expresada en pendiente del terreno (porcentaje)

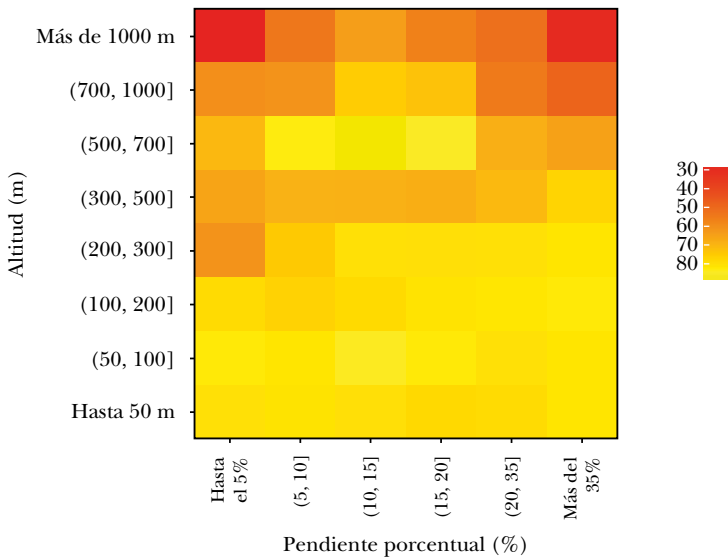


Nota: Valores obtenidos mediante promedios ponderados por la población a partir de los resultados de la *grid* original con celdas de 1 km × 1 km. La pendiente se expresa en términos porcentuales.

Fuente: INE (2024), OSM Foundation (OpenStreetMap) y elaboración propia.

Finalmente, el gráfico 4.6 resume los resultados de los dos gráficos anteriores en un gráfico bivariente —*heatmap*— que muestra claramente cómo empeora el desempeño de la red de transportes por carretera con la altitud en conjunción con la rugosidad. Es especialmente relevante el valor de la esquina superior derecha, que es solo del 29 %⁶⁵. Debe tenerse en cuenta que los cálculos solo toman en consideración la altitud y la rugosidad de la celda de origen, que es donde se asigna la población próxima y la población accesible, y no los valores de las celdas intermedias entre el origen y los diferentes destinos.

GRÁFICO 4.6: Desempeño de la red de transporte por carretera por intervalos de altitud y rugosidad expresada en pendiente del terreno
(porcentaje)



Nota: Valores obtenidos mediante promedios ponderados por la población a partir de los resultados de la *grid* original con celdas de 1 km × 1 km.

Fuente: INE (2024), OSM Foundation (OpenStreetMap) y elaboración propia.

⁶⁵ También llama la atención el bajo valor de la esquina superior izquierda, pero como muestra el cuadro 3.6 el porcentaje de población en esta celda es prácticamente nulo.

4.4. Conclusiones

Este capítulo trata de responder a una pregunta muy concreta a partir de la *grid* de población censal 2021, GEOSTAT2021, y la red de carreteras: *¿A cuántos destinos cercanos, de los existentes en un radio de 120 km, podemos llegar en un tiempo de viaje de 90 minutos utilizando el coche privado como modo de transporte?*

El indicador resultante puede ser interpretado como un índice del desempeño de la red de transporte privado por carretera.

A nivel nacional la respuesta a la anterior pregunta es el 75,6 %, es decir, el residente promedio es capaz de llegar al 76 % de los destinos cercanos en un tiempo de viaje de 90 minutos, donde la cercanía se mide a partir de un radio de 120 km de distancia. Sin embargo, este promedio esconde grandes diferencias territoriales. Dejando al margen las provincias insulares y las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla, las provincias con mejor desempeño de la red de carreteras son las más urbanizadas, destacando Madrid y Barcelona, con índices de desempeño del 95,9 % y del 92,5 % respectivamente, mientras que las provincias con peor desempeño son provincias con elevados índices de despoblación, núcleos urbanos pequeños, alejadas de las grandes urbes y una red de carreteras de mucho menor nivel, destacando Teruel y Soria, con índices de desempeño del 23,0 % y del 32,7 % respectivamente. Así pues, la dispersión en la accesibilidad a los destinos cercanos es considerable, pero la evidencia muestra una clara asociación entre la concentración de la población y el desempeño de la red de transportes por carretera.

Esta heterogeneidad también es todavía más evidente por grado de urbanización. Los centros urbanos presentan un mejor desempeño en la red de transportes por carretera, que los núcleos rurales. A nivel nacional el índice de desempeño oscila entre el 83 % para las ciudades y el 53 % para las áreas rurales mayormente deshabitadas, lo que representa una diferencia muy grande en la capacidad de acceder a destinos cercanos. En algunas CC. AA., como Aragón o Extremadura, las diferencias en el índice de desempeño por grado de urbanización entre las ciudades y el medio rural son enormes, como consecuencia, en parte, de la concentración de la población y la tipología de asentamientos

aunque, naturalmente, además de estos factores ligados a la demografía, la orografía también juega un papel importante en el desempeño de la red de transportes por carretera, sin embargo, el caso de Madrid muestra cómo estos factores geográficos pueden ser compensados, en gran parte, mediante cuantiosas inversiones en infraestructuras.

5. Cómo mejorar la resolución espacial: De la *grid* de referencia de 1 km × 1 km a una *grid* de alta precisión de 100 m × 100 m

Los capítulos anteriores han examinado la *grid* censal 2021, GEOSTAT2021, del INE con una resolución 1 km × 1 km y han realizado algunos ejercicios con ella. Además de explorar la distribución espacial de la población a esta escala, hemos construido una tipología rural/urbana utilizando la metodología estandarizada de Comisión Europea *et al.* (2021), tanto a nivel de *grid* como a nivel municipal, y hemos examinado el desempeño de la red de carreteras mediante un análisis de accesibilidad/proximidad en el que tanto los orígenes como los destinos están constituidos por las celdas que albergan población.

En todos los casos se trata de análisis a nivel nacional, en donde la extensión del ejercicio justifica la resolución, celdas de 1 km × 1 km, en gran parte por cuestiones computacionales. Sin embargo, si aumentamos la escala de trabajo, por ejemplo, al análisis urbano o de provincias concretas, las celdas de 1 km × 1 km resultan demasiado burdas, y un mayor detalle en la distribución de la población no es solo deseable, sino que es necesario para obtener resultados detallados.

El ideal sería disponer de un fichero de población georreferenciada a nivel de coordenada puntual a partir de su dirección postal, como el que disponemos para la Comunidad de Madrid —capítulo 1— a efectos de validación de los ejercicios que presentaremos en este capítulo. Dicho fichero podría ser agregado a la resolución que deseáramos para un ejercicio concreto, lo que proporcionaría una total flexibilidad. De esta forma podríamos obtener la población a nivel de edificio o manzana para análisis municipales,

incluso de barrios en grandes ciudades, o podríamos generar *grids* de población con mucha mayor resolución, que nos permitieran hacer análisis más detallados. Esta información, que en teoría existe por parte del INE a partir del censo 2021, no está disponible públicamente, entre otras razones por cuestiones de confidencialidad estadística.

Por ello, este capítulo aborda la cuestión de cómo aumentar la resolución en la distribución de la población a partir de la *grid* censal 2021, GEOSTAT2021. Se trata de un capítulo de carácter metodológico que desagrega dicha *grid* a una *grid* con celdas de $100\text{ m} \times 100\text{ m}$. La nueva *grid* sigue las directrices de INSPIRE (2023a) y, en consecuencia, es plenamente consistente con la *grid* de partida, a la que agrega de forma natural. Cada celda en la capa de destino tiene, pues, una superficie de 1 hectárea, lo que significa aumentar la resolución de la información original por 100. Existen, pues, algo más de 11 millones de celdas potencialmente habitables, aunque como tendremos ocasión de comprobar, las celdas finalmente estimadas con población son un número muy inferior.

Esta es una distribución de la población suficientemente fina como para realizar análisis a escala local y que admite una fácil agregación a una resolución intermedia, por ejemplo, celdas de $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ o de $500\text{ m} \times 500\text{ m}$.

El capítulo es eminentemente técnico, pero trata, al mismo tiempo, de ser didáctico, en el sentido de examinar diferentes alternativas a la desagregación espacial de la población y justificar los métodos finalmente elegidos. Empieza ofreciendo una breve panorámica, sin ánimo de exhaustividad, de los métodos de desagregación espacial de la población poniendo énfasis en los aspectos que la literatura ha señalado como claves. A continuación, muestra cómo combinamos la información de partida para captar estos aspectos y resolver, de esta forma, nuestro problema particular. Ensayaremos varios métodos con el propósito de ilustrar las ganancias en precisión de diversas dimensiones de los datos y, en cualquier caso, todos los resultados serán evaluados frente a nuestro conjunto de datos de validación —capítulo 1—.

ESQUEMA 5.1: Objetivo y contenido del capítulo 5

Objetivo	Datos	Procesos	Resultados
<ul style="list-style-type: none"> • Obtener el grado de urbanización a partir de la <i>grid</i> censal 1 km × 1 km de 2021 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Grid</i> de población 1 km × 1 km, GEOSTAT2021. • Datos auxiliares: SIOSE AR, MDSnE2,5, Catastro • Datos de validación: padrón georreferenciado de la Comunidad de Madrid 2021 (IEM). 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión de la literatura sobre métodos de desagregación espacial. • Estimación de la <i>grid</i> mediante el método <i>top-down</i> sobre la base de las directrices INSPIRE (2023a) y ensayo de varios métodos alternativos. • Validación de los resultados. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Grid</i> censal de población con una resolución de 100 m × 100 m de 2021

Fuente: Elaboración propia.

5.1. Desagregación espacial de la población: una revisión de la literatura

La desagregación espacial de la población es un viejo problema (Langford y Unwin 1994), precisamente porque localizar a la misma con una elevada resolución es de gran relevancia en muchos ámbitos: planificación urbana, accesibilidad a servicios públicos y privados o gestión de riesgos, por poner algunos pocos ejemplos.

La mejor forma de mapear la población con el nivel de resolución que queramos consiste en disponer de un fichero georreferenciado de la población con arreglo a un determinado criterio, residencia o trabajo, que podamos agregar a la escala que necesitemos. Este es el tipo de estructura de datos de nuestro conjunto de validación —capítulo 1.3—. Esta información no es accesible con generalidad, y es la que da lugar a las denominadas *grids* de abajo a arriba —*bottom-up*— (figura 5.1). La *grid* censal 2021 del INE, GEOSTAT2021, puede ser considerada una *grid bottom-up*.

Puesto que las estadísticas de población están disponibles, normalmente, a partir de unidades administrativas de orden relativamente elevado y en muchas ocasiones deseamos conocer la localización de la población con una elevada resolución, la literatura

ha desarrollado técnicas que permiten acotar la población en el espacio con una determinada precisión.

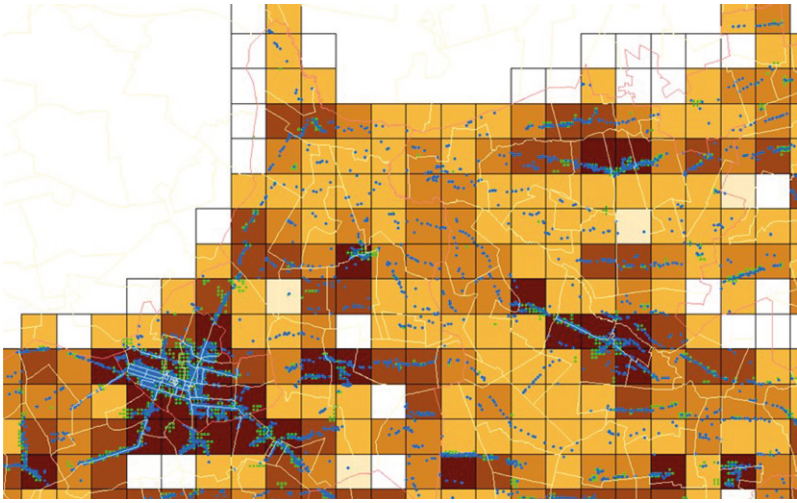
Los métodos sobre la desagregación espacial de la población son numerosos y evolucionan rápidamente conforme aparecen nuevos datos auxiliares, técnicas de análisis y herramientas en el contexto de los Sistemas de Información Geográfica (Wu, Qiu y Wang 2005). Una *grid* de población construida mediante estas técnicas es conocida en la literatura como una *grid* de arriba a abajo —*top-down*— (figura 5.2) (Goerlich y Cantarino 2013a).

Estos métodos se aplican a escala global (Pesaresi *et al.* 2016; Palacios *et al.* 2019), continental (Gallego 2010; Batista e Silva, Gallego y Lavallo 2013), nacional (Schug *et al.* 2021), regional (Langford 2006, 2007), local (Mennis y Hultgren 2006; Mennis 2009) o incluso a nivel de manzana (Batista e Silva *et al.* 2013) o edificio (Lwin y Murayama 2009, 2011), utilizando técnicas sencillas o sofisticadas, con escasez o abundancia de información auxiliar en función del contexto y la cobertura (Dmowska y Stepinski 2017; Huang *et al.* 2021; Georgati, Monteiro *et al.* 2022).

Una primera clasificación de las técnicas utilizadas en los procesos de desagregación espacial distinguiría entre aquellos métodos que no utilizan información auxiliar —hoy en día ampliamente superados— y los que sí la utilizan.

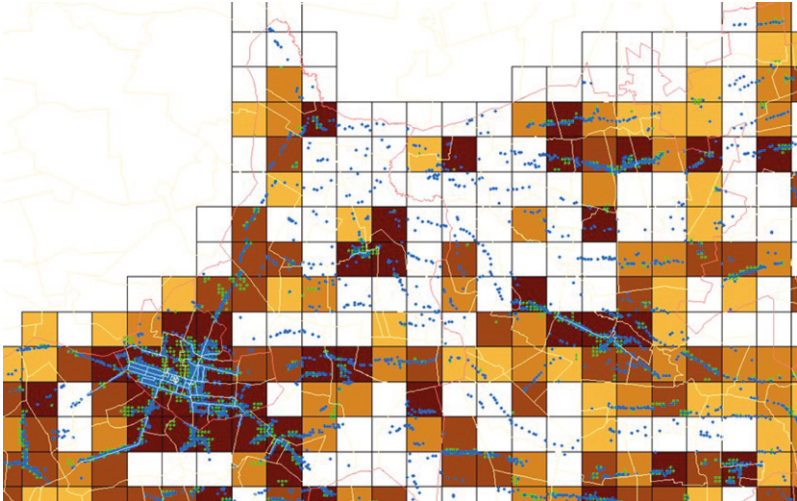
Los métodos del primer grupo, donde la información geográfica es muy escasa o inexistente, son relativamente simples. El origen de estos métodos es la denominada interpolación ponderada por áreas —*areal weighting interpolation*—, utilizada ampliamente en la transferencia de datos entre sistemas zonales incompatibles (Goodchild y Lam 1980; Xie 1995).

La aplicación de la interpolación ponderada por áreas en los casos más sencillos es muy simple, y requiere solo de algunas operaciones geométricas fácilmente implementables en los Sistemas de Información Geográfica (GIS), básicamente una intersección y el cálculo de áreas asociado. Partimos de una cartografía exhaustiva del territorio en la que cada polígono tiene una cifra de población asociada. Esta es la capa de origen —*source-zone*—, por ejemplo, las poblaciones municipales o las de las secciones censales. Nuestro objetivo es estimar la población de otra cartografía cuyos polígonos se superponen, de forma incongruente, con los de la

FIGURA 5.1: *Grid bottom-up*

Nota: Para cada habitante disponemos de sus coordenadas de acuerdo con el criterio de residencia. La superposición de la rejilla cartográfica deriva de forma inmediata la *grid* buscada.

Fuente: Jablonski (2011).

FIGURA 5.2: *Grid top-down*

Nota: Información auxiliar sobre usos del suelo, contornos urbanos y/o de edificios residenciales, es utilizada como información auxiliar en el algoritmo de desagregación espacial

Fuente: Jablonski (2011).

capa origen. Esta es la capa de destino —*target-zone*—. Por incongruente queremos decir que son capas que no agregan espacialmente, por ejemplo, los contornos municipales y las cuencas

hidrográficas, o las secciones censales y una *grid* con una determinada resolución.

La interpolación ponderada por áreas simplemente realiza una intersección geométrica entre ambas capas, calcula el área de cada polígono después de la intersección, y hace un reparto de la población de cada polígono de la capa de origen a cada polígono de la intersección en función de la proporción de superficie en los polígonos de la capa de origen, para finalmente agregar la población por los polígonos de la capa de destino. La figura 5.3 muestra visualmente el proceso en el que transferimos la población de áreas administrativas a zonas inundables mediante interpolación ponderada por áreas.

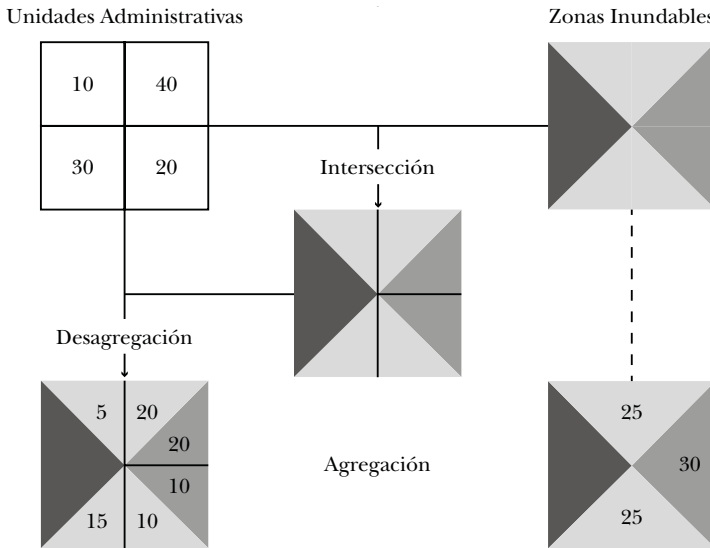
Es importante señalar que la interpolación ponderada por áreas cumple, por construcción, con la restricción picnofiláctica o de volumen (Tobler 1979), de forma que ni se crea ni se destruye población en el proceso de transferencia de esta de una zona a otra⁶⁶. En este sentido, la denominada interpolación picnofiláctica no es más que un refinamiento iterativo de interpolación ponderada por áreas que suaviza las estimaciones en los polígonos de la capa de destino para generar estimaciones más suaves sin alterar los totales de población (Tobler 1979).

También debemos tener en cuenta que, aun partiendo de población en términos de números naturales, la población estimada en la capa de destino es, normalmente, en valores reales si no introducimos ajustes adicionales. Un tema sutil sobre el que volveremos posteriormente.

Resulta evidente que la interpolación ponderada por áreas es el mecanismo más sencillo para transferir valores de una variable de un sistema zonal a otro cuando no agregan espacialmente. El supuesto fundamental que hay detrás del mismo es que la variable en cuestión se distribuye de forma uniforme en los polígonos de la capa de origen. En nuestro ejemplo, ello equivale a distribuir la población de forma uniforme en el espacio dentro de cada polígono de la zona de origen, lo que es claramente insatisfactorio.

⁶⁶ Una propiedad natural que no todos los métodos propuestos por la literatura satisfacen (De Cos 2004).

FIGURA 5.3: Transferencia de datos entre sistemas zonales incompatibles. Interpolación ponderada por áreas



Fuente: Goerlich y Cantarino (2012).

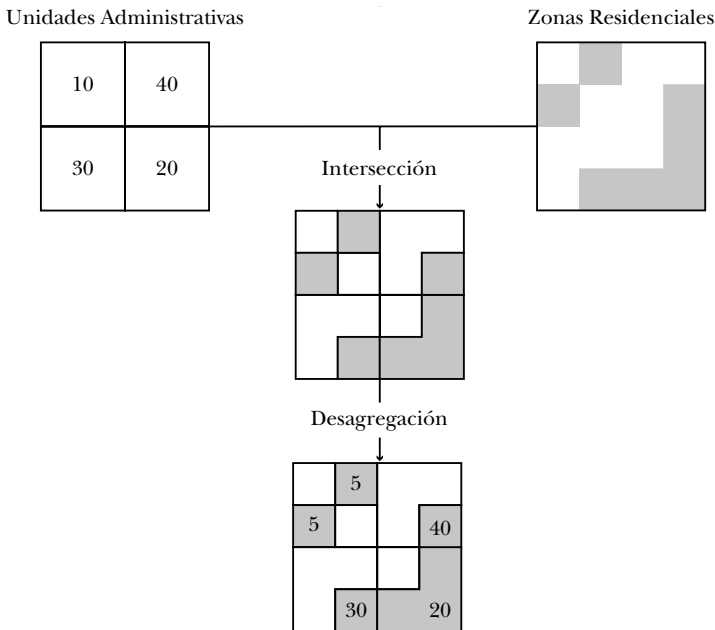
Este supuesto puede ser razonable en el caso de variables espacialmente continuas, pero no en el caso de variables espacialmente discretas, como es el caso de la población. No observamos población residente en todos los sitios, sino solo donde hay edificios, por ejemplo. Además, ni siquiera hay población residente en todos los edificios, sino solo, o mayoritariamente, en los residenciales. Esta información, esencial, no está disponible en la capa de origen.

Esto nos lleva al segundo grupo de métodos de desagregación espacial, los que utilizan información auxiliar.

La figura 5.4 muestra cómo información externa sobre zonas residenciales puede ser utilizada para acotar la población en el espacio dentro de las unidades administrativas. Una nueva intersección entre ambas capas permite estimar la población de cada zona residencial dentro de cada unidad administrativa mediante la aplicación de una distribución ponderada por áreas.

Este tipo de procedimientos se conocen en la literatura con el nombre genérico de métodos dasimétricos (Eicher y Brewer 2001) y, en principio, lo único que hacen es acotar espacialmente la población dentro de unidades más amplias. El ejemplo de la figura

FIGURA 5.4: Acotando espacialmente la población con información auxiliar

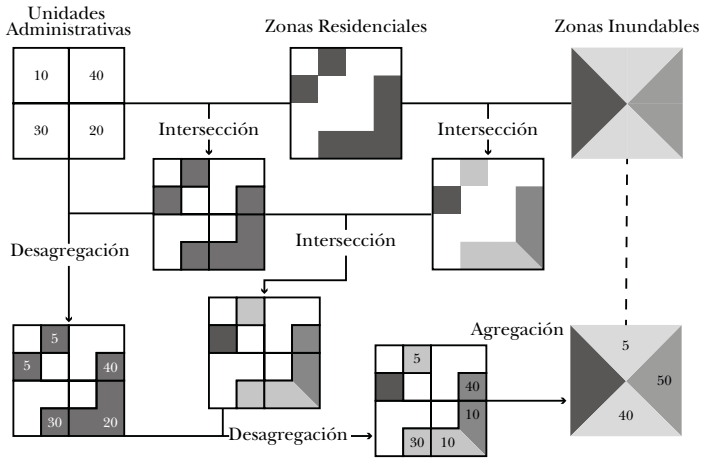


Fuente: Goerlich y Cantarino (2012).

5.2 es un método dasimétrico binario, porque simplemente asigna población a zonas residenciales, sin tomar en consideración otra información como, por ejemplo, el tipo de edificio. De nuevo, el supuesto implícito es que la distribución de la población es uniforme dentro de cada zona residencial, aunque naturalmente ganamos en realismo respecto a la distribución uniforme dentro de los polígonos de la capa de origen.

Una vez disponemos de esta información —la población por área residencial dentro de cada unidad administrativa—, una nueva aplicación de la interpolación ponderada por áreas, acotada ahora a las áreas residenciales, genera la población de cada polígono tras la intersección y, por agregación, la población de los polígonos de la capa de destino. La figura 5.5 muestra gráficamente el proceso para las zonas inundables del ejemplo de la figura 5.3 y las zonas residenciales de la figura 5.4.

FIGURA 5.5: Transferencia de datos entre sistemas zonales incompatibles. Interpolación ponderada por áreas con información auxiliar



Fuente: Goerlich y Cantarino (2012).

Al igual que sucede con la aplicación de la interpolación ponderada por áreas sin información auxiliar, la utilización de información auxiliar, aunque se aplique de forma iterativa, verifica, por construcción, la restricción picnofiláctica o de volumen (Tobler 1979), de forma que ni se crea ni se destruye población en el proceso de transferencia de la misma de una zona a otra. También al igual que antes, la población en los polígonos de la capa de destino es en términos de números reales, si no introducimos ajustes adicionales.

Naturalmente estos métodos se pueden sofisticar en función de la información disponible. Por ejemplo, podemos sustituir la distribución por áreas por una distribución por volúmenes, ya sea en términos de altura de edificios, número de plantas o superficie realmente construida (Goerlich 2016b). La distribución proporcional por volúmenes altera muy poco los principios básicos que acabamos de exponer.

También es posible incorporar información sobre diferentes usos de edificios. La aplicación más simple es una distinción binaria, a determinados usos o edificios se les asigna población de forma proporcional a su área o su volumen, al resto de usos o edificios no. Sin embargo, podemos pensar en situaciones más realistas en las que determinados polígonos o edificios se clasifican por usos,

residenciales versus no residenciales —comerciales, industriales o de servicios—, donde en estos últimos también puede residir población, aunque no sea su función principal. En estos casos es necesario asumir o modelizar estadísticamente la densidad asociada a los diferentes usos o edificios, y combinar la información para obtener una estimación de la población en los polígonos de la capa de destino. Dicha estimación no tiene por qué verificar, por construcción, la restricción picnofiláctica o de volumen (Tobler 1979), de forma que el último paso es ajustar las poblaciones estimadas en los polígonos de la capa de destinos para que se satisfaga dicha restricción.

La modelización estadística esquiva la principal debilidad de los métodos dasimétricos, que es el supuesto de que la densidad de población es constante dentro de cada uso o tipo de edificio considerado en la capa de origen. Idealmente el modelo estadístico debe aproximar mejor el mecanismo subyacente que determina la distribución de la población en función de los predictores utilizados (Stevens *et al.* 2015; Zhao *et al.* 2020; Georgati *et al.* 2024). La literatura ha considerado diversos modelos: regresión lineal, regresión geográfica ponderada —*geographically weighted regression*—, árboles de decisión —*regression trees*—, regresión de bosques aleatorios —*random forest regression*— o métodos de potenciación del gradiente —*gradient boosting*—, entre otros muchos, en orden creciente de complejidad conforme la disponibilidad y granularidad de los datos crece. Aunque existen algunas excepciones, la modelización estadística se efectúa normalmente al nivel de la capa de origen, que suele tener menor resolución que la capa de destino. Por ejemplo, Goerlich y Cantarino (2012, 2013) efectúan la modelización a nivel de sección censal para generar una *grid* de población a nivel nacional con resolución de 1 km × 1 km.

Finalmente, es posible concebir métodos híbridos, en los que el enfoque dasimétrico se combina con la modelización estadística en la determinación de ponderaciones que permitan refinar la desagregación de la población sobre la capa de destino. Naturalmente, todo ello complica los cálculos y aumenta las necesidades de computación, sobre todo si cubrimos grandes áreas y tanto la información auxiliar como la capa de destino tienen una resolución elevada.

La pregunta natural que surge de la abundante literatura sobre desagregación espacial de la población es qué método es mejor en una situación concreta. Sobre este aspecto la literatura es mucho más esquivada. Por una parte, algunos trabajos comparan diferentes *grids* de población de cobertura global para examinar sus propiedades y usos potenciales, sin entrar detalladamente en cuestiones metodológicas (Leyk *et al.* 2019). Por otra parte, algunos estudios comparan diferentes métodos de forma limitada, y parecen apuntar a que los procedimientos híbridos tienden a generar mejores resultados a costa de un mayor coste computacional (Reed *et al.* 2018). Sin embargo, este resultado no parece ser uniforme, y el mejor método depende, en gran parte, de la resolución de la información auxiliar (Sapena *et al.* 2022). Otros trabajos evalúan el efecto de diferentes tipos de datos auxiliares en el proceso de desagregación dado un método concreto (Wan *et al.* 2022). Los estudios que evalúan diferentes métodos sobre una base comparable, combinando además distintas resoluciones y tipos de información auxiliar son muy escasos, siendo Sapena *et al.* (2022) un intento reciente de sistematizar la mayor parte de los factores que afectan al proceso de desagregación espacial de la población. La evaluación de la bondad de los resultados obtenidos tropieza, en muchos casos, con la dificultad añadida de la ausencia de un conjunto de datos de validación obtenido a partir de coordenadas puntuales de población, por lo que, en ocasiones, la evaluación se realiza a un nivel de agregación intermedio entre la capa de origen y la capa de destino, lo que necesariamente supone una evaluación parcial de los resultados.

A pesar de todo hay algunas conclusiones tremendamente claras que sí es posible extraer de la literatura.

Primero, la resolución de la información auxiliar es más importante que los métodos de desagregación. En este sentido la literatura ha tendido a buscar recientemente información directa de edificios (Pajares *et al.* 2021), más que de coberturas o usos del suelo obtenida de los modelos jerárquicos tradicionales⁶⁷.

⁶⁷ Recientemente destacan las bases de datos de cobertura mundial sobre edificios de *Microsoft* (GlobalMLBuildingFootprints) o la *Global Human Settlement Layer* de la Comisión Europea (JRC 2024b) obtenidas a partir de información

Sapena *et al.* (2022) señalan que los métodos dasimétricos proporcionan los mejores resultados en presencia de información de muy alta resolución, lo que en su trabajo significa la huella de los edificios procedentes de Catastro. Por tanto, la modelización estadística no parece la mejor opción si la información auxiliar tiene el suficiente detalle.

Segundo, la información sobre alturas es especialmente relevante, sobre todo para eliminar sesgos en la distribución de la población entre el mundo urbano y el rural, donde las diferencias entre las alturas de los edificios son notables. La población vive en 3D, y las alturas, el número de plantas, la superficie realmente construida sobre una parcela dada o el número de viviendas de un edificio, se han mostrado variables esenciales en los procesos de desagregación espacial de la población (Goerlich 2016b; Steinnocher *et al.* 2019; Grippa *et al.* 2019; Schug *et al.* 2021).

Tercero, la tipología de los edificios es la otra variable clave en los procesos de desagregación espacial de la población. De hecho, los métodos que usan como información auxiliar bases de datos jerárquicas de coberturas del suelo utilizan los polígonos urbanos o residenciales como capa de destino, ya sea de forma exclusiva o al menos de forma prioritaria, en función de la resolución de la información (Eicher y Brewer 2001; Gallego 2010; Batista e Silva *et al.* 2013). Si el énfasis se mueve hacia los edificios como capa de destino o intermedia en los procesos de desagregación entonces es necesario reconocer que no todos los edificios albergan población residente, ya que muchos no disponen de una función residencial y son más bien industriales, comerciales, de servicios o pertenecientes a infraestructuras. Distribuir la población sobre todos los edificios llevaría a una dispersión excesiva de la misma. Por lo tanto, una distinción mínima entre edificios residenciales y aquellos que no lo son es esencial en este contexto.

sobre observación de la tierra procedente de los satélites. O la de cobertura europea, EUBUCCO (Technische Universität Berlin 2024) generada a partir de datos gubernamentales y de OpenStreetMap (OSM Foundation). También la información catastral sería altamente relevante en este contexto (Uhl *et al.* 2023), ya que gracias al fechado de los edificios permitiría una reconstrucción histórica de la distribución de la población sobre el territorio (Goerlich 2024c).

Más allá de estas conclusiones básicas que es posible extraer de la literatura, cada problema concreto debe adaptarse a las estadísticas disponibles para una situación particular.

La información que todavía no está actualmente disponible a nivel de edificio, y que puede ser especialmente relevante en el caso de España, es la distinción entre viviendas principales —primeras residencias— y viviendas secundarias y vacías. Si el objetivo es distribuir la población residente —lo que se conoce como la población nocturna— entonces solo las viviendas principales son de interés. Si el objetivo fuera la población estacional las viviendas secundarias cobrarían una mayor importancia (Batista e Silva *et al.* 2018a), y si el objetivo fuera la población por lugar de actividad —lo que se conoce como la población diurna— entonces el resto de edificios, muchos de ellos destinados a la actividad económica, deberían ser tenidos en cuenta (Batista e Silva *et al.* 2018b; Batista e Silva *et al.* 2020).

5.2. Procesado inicial de la información

Como hemos señalado al principio de este capítulo, el objeto del ejercicio es aumentar la resolución de la *grid* censal 2021 del INE, GEOSTAT2021. En concreto, desagregar espacialmente dicha *grid*, con resolución original de 1 km × 1 km, a una de celdas con resolución 100 m × 100 m, utilizando como información auxiliar fundamentalmente la base de datos SIOSEAR2017 —capítulo 1—. SIOSE AR tiene toda la información esencial que necesitamos para un ejercicio de esta naturaleza. Al tratarse básicamente del Catastro temático hay polígonos a nivel de edificio con información de usos asociada, incluye información sobre altura, bien a través de LiDAR o a través del número de plantas sobre rasante procedente del propio Catastro y tiene una resolución extraordinariamente elevada, 110 millones de polígonos con geometría de coberturas y casi 56 millones de polígonos con geometría de usos —cuadro 5.2—. La figura 5.6 muestra la misma captura que la figura 1.1, referente a coberturas, con GEOSTAT2021 sobreimpuesta, y la figura 5.7 muestra la misma captura que la figura 1.3, referente a usos, con GEOSTAT2021 sobreimpuesta. Esta es nuestra capa

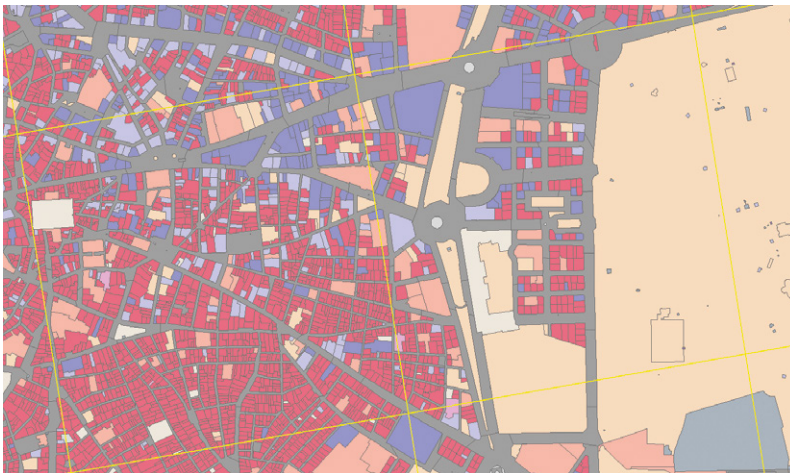
de origen con la información auxiliar básica que utilizaremos en el proceso de desagregación.

FIGURA 5.6: Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con la *grid* censal 2021 en un contexto urbano. Municipio de Madrid



Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

FIGURA 5.7: Representación espacial de la superposición de la capa de usos del suelo con la *grid* censal 2021 en un contexto urbano. Municipio de Madrid



Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

En consecuencia, para cada cifra de población en cada una de las 115.410 celdas habitadas en la capa de origen disponemos de 100 celdas en la *grid* de destino, lo que nos da un total de 11.541.000 de celdas potencialmente habitables en la capa de destino⁶⁸. En la práctica veremos que las celdas habitadas son muchas menos, y que una gran parte de las celdas de 1 km × 1 km están prácticamente vacías.

Las figuras 5.8 y 5.9 muestran las mismas capturas que las anteriores —figuras 5.6 y 5.7— con la *grid* de 100 m × 100 m sobrepuesta, de forma que añade a los anteriores la capa de destino. La inspección visual de los mismos muestra que, incluso en ambientes urbanos densamente poblados, muchas celdas de 100 m × 100 m carecen de población residente.

Antes de examinar los métodos de desagregación, y los resultados obtenidos, creemos necesario mencionar algunas particularidades de nuestro ejercicio.

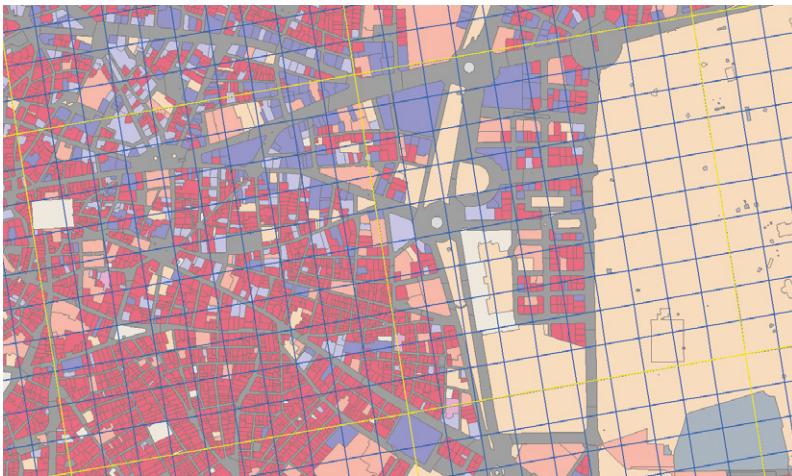
FIGURA 5.8: Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con la *grid* censal 2021 y la *grid* 100 m × 100 m en un contexto urbano. Municipio de Madrid



Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

⁶⁸ En la práctica, en la capa de destino las celdas potencialmente habitables son algunas menos, 11.419.328, puesto que la generación de la *grid* de 100 m × 100 m para todo el territorio nacional toma en cuenta los contornos administrativos (Goerlich 2024a), y es de esta *grid* de la que obtenemos la capa de destino.

FIGURA 5.9: Representación espacial de la superposición de la capa de usos del suelo con la *grid* censal 2021 y la *grid* 100 m × 100 m en un contexto urbano. Municipio de Madrid



Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

La capa de origen, GEOSTAT2021, no cubre la totalidad del territorio, sino solo algo más de la quinta parte de este, el 22,6% —capítulo 2—. Los ejercicios de desagregación espacial de la población suelen partir de población por unidades administrativas que son exhaustivas del territorio bajo consideración. Así, por ejemplo, Gallego (2010) parte de poblaciones a nivel municipal y Goerlich y Cantarino (2012, 2013) parten de poblaciones a nivel de sección censal. En nuestro caso, existe una primera acotación espacial de donde reside la población que nos viene dada y que debemos respetar. No habrá población fuera de las celdas habitadas de GEOSTAT2021, porque nuestra desagregación debe ser consistente con la *grid* de referencia, una *grid bottom-up*.

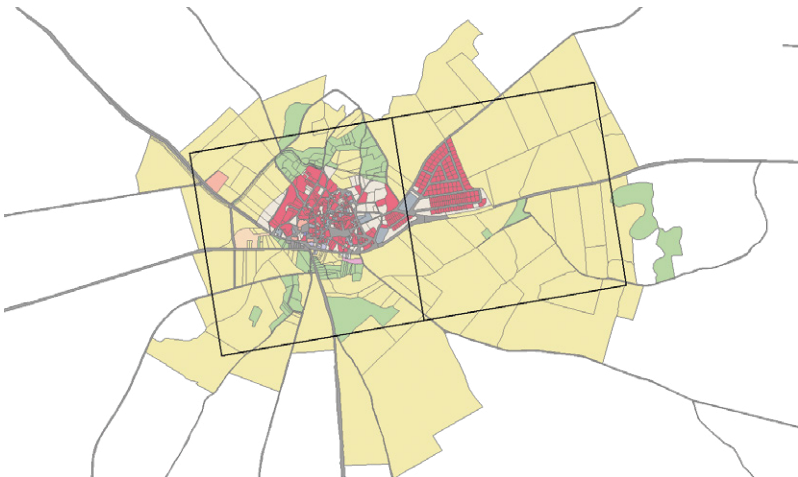
En la práctica, ello significa que no necesitamos todo SIOSE AR, sino solo aquellos polígonos que tienen intersección no nula con GEOSTAT2021. Las figuras 5.10 y 5.11 muestran una captura del municipio de Pozuelo del Rey (cuyo código de municipio del INE es 28116), para coberturas y usos respectivamente, en los que hemos seleccionado los polígonos de SIOSE AR con intersección no nula con las 2 celdas habitadas de GEOSTAT2021 en su núcleo urbano.

FIGURA 5.10: Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la *grid* censal 2021. Municipio Pozuelo del Rey (Madrid)



Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

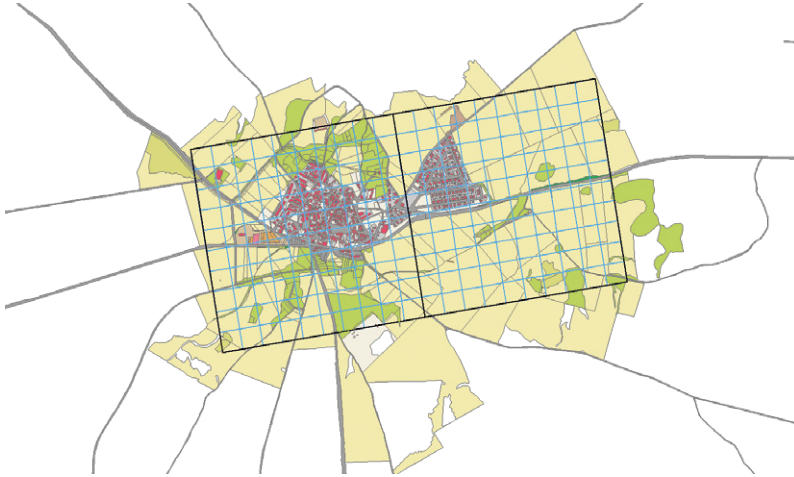
FIGURA 5.11: Representación espacial de la superposición de la capa de usos del suelo con las celdas habitadas de la *grid* censal 2021. Municipio Pozuelo del Rey (Madrid)



Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

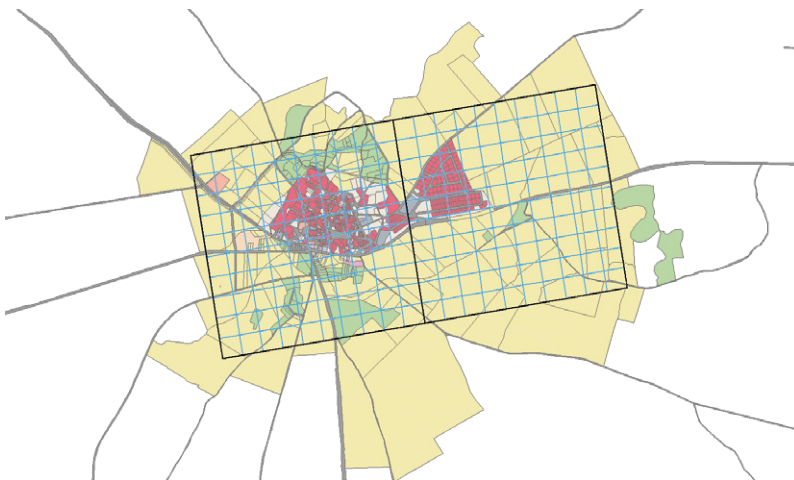
Las figuras 5.12 y 5.13 añaden a las figuras anteriores la *grid* de 100 m \times 100 m, es decir, la capa de destino, y permiten apreciar visualmente cómo una gran parte de las celdas de 100 m \times 100 m tendrán una estimación nula.

FIGURA 5.12: Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la *grid* censal 2021 y con la *grid* 100 m × 100 m. Municipio Pozuelo del Rey (Madrid)



Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

FIGURA 5.13: Representación espacial de la superposición de la capa de usos del suelo con las celdas habitadas de la *grid* censal 2021 y con la *grid* 100 m × 100 m. Municipio Pozuelo del Rey (Madrid)



Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

A efectos comparativos, y para dar una impresión visual de la ganancia en resolución en la distribución espacial de la población, también en el mundo rural, derivada de nuestro ejercicio, reproducimos

las figuras 1.2 y 1.4 —capítulo 1—, referidas a coberturas y usos, cuando filtramos espacialmente los polígonos de SIOSE AR por GEOSTAT2021. Esta información se ofrece en las figuras 5.14 y 5.15 con la capa de origen solamente, y en las figuras 5.16 y 5.17 con la capa de destino añadida, es decir, la *grid* de 100 m × 100 m.

Una vez hecha la extracción de los polígonos de SIOSE AR que tienen intersección no nula con GEOSTAT2021 el número total de polígonos que da soporte a la *grid* de referencia se ofrece en el cuadro 5.1.

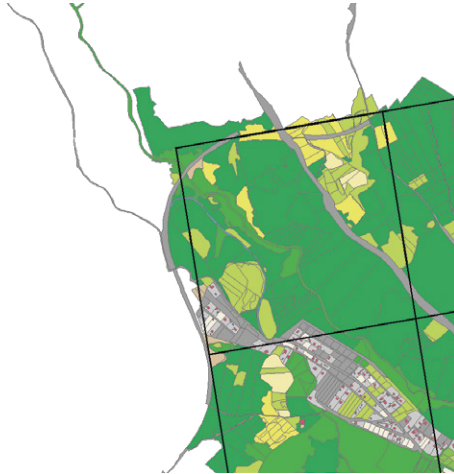
Resulta interesante comprobar cómo, aunque GEOSTAT2021 ocupa solo algo más de la quinta parte del territorio nacional, el número de polígonos SIOSE AR que le da soporte es de alrededor del 65 % del total. La razón se debe al elevado detalle geométrico de la información auxiliar en el ámbito urbano. Las figuras 5.18 y 5.19 ofrecen una muestra de este detalle para una urbanización del municipio de Nuevo Baztán (cuyo código de municipio del INE es 28100), donde es posible ver claramente las viviendas unifamiliares en la representación espacial de coberturas —figura 5.18— y las parcelas residenciales en la representación espacial de usos —figura 5.19—. Una comparación entre ambas figuras revela el mayor detalle geométrico de las coberturas frente a los usos, por lo que, si queremos aprovechar la mayor resolución geométrica posible de la información auxiliar, deberemos centrarnos en la geometría de las coberturas, la tabla T_POLIGONOS en la nomenclatura de SIOSE AR.

Dada la resolución de la información auxiliar, los resultados de Schug *et al.* (2021) y las recomendaciones de Sapena *et al.* (2022) nuestros métodos serán fundamentalmente dasimétricos, utilizando los edificios como geometría intermedia e incorporando información sobre altura y usos de estos.

Así pues, el soporte sobre el que se asienta la población son los polígonos de coberturas con edificaciones. Para ser precisos, los polígonos de la tabla T_POLIGONOS de SIOSEAR2017 que tienen intersección no nula con GEOSTAT2021 y su ROTULO contiene la cobertura EDF, en principio cualquiera que sea su atributo⁶⁹.

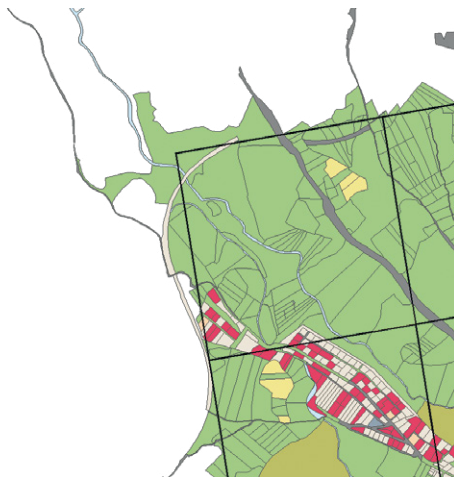
⁶⁹ Esto deja fuera, de forma razonable, algunos polígonos con coberturas relacionados con construcciones, como *Otras construcciones* (OCT), *Construcción deportiva* (DEP) y *Suelo no edificado* (SNE).

FIGURA 5.14: Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la *grid* censal 2021 en un contexto rural. Municipio Villavieja del Lozoya (Madrid)



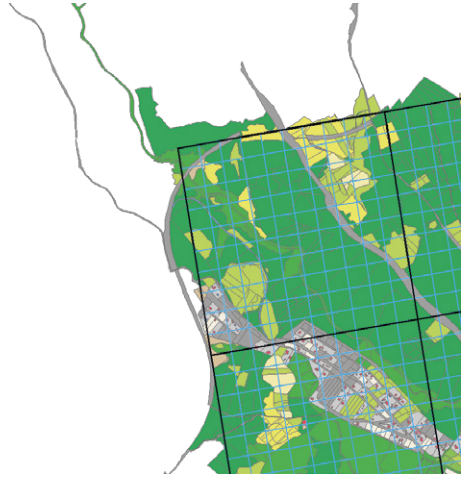
Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

FIGURA 5.15: Representación espacial de la superposición de la capa de usos del suelo con las celdas habitadas de la *grid* censal 2021 en un contexto rural. Municipio Villavieja del Lozoya (Madrid)



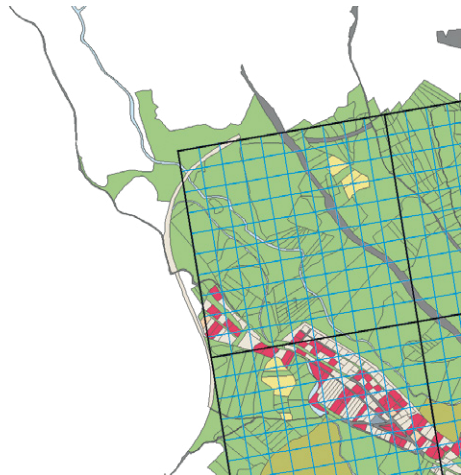
Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

FIGURA 5.16: Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la *grid* censal 2021 y con la *grid* 100 m × 100 m en un contexto rural. Municipio Villavieja del Lozoya (Madrid)



Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

FIGURA 5.17: Representación espacial de la superposición de la capa de usos del suelo con las celdas habitadas de la *grid* censal 2021 y con la *grid* 100 m × 100 m en un contexto rural. Municipio Villavieja del Lozoya (Madrid)



Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

CUADRO 5.1: Número de polígonos en las tablas básicas de SIOSEAR2017 con intersección no nula con GEOSTAT2021. Comunidades autónomas

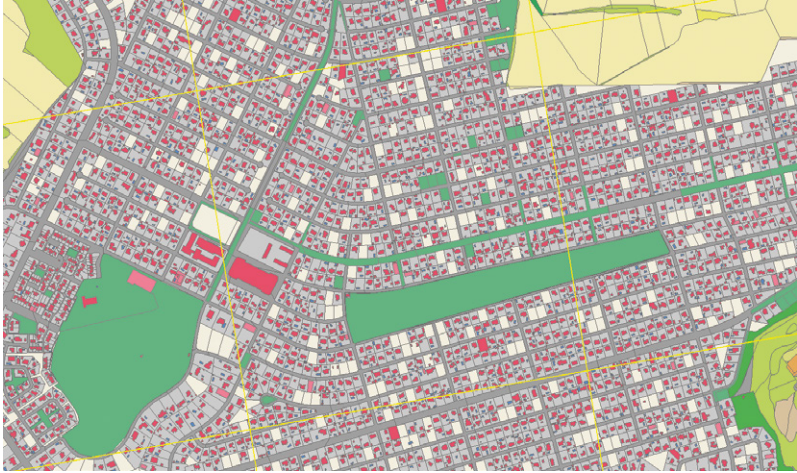
Comunidades autónomas		Tabla			
Código	Nombre	T_POLIGONOS	T_USOS	T_COMBINADA	T_VALORES
01	Andalucía	9.695.418	4.009.155	5.401.740	12.118.244
02	Aragón	2.230.021	1.075.135	1.337.046	2.806.250
03	P. de Asturias	2.516.802	1.612.327	1.251.368	3.936.118
04	Illes Balears	1.754.832	564.411	1.153.767	1.975.678
05	Canarias	2.470.029	1.208.729	1.376.241	3.145.491
06	Cantabria	1.422.751	641.284	858.807	1.866.985
07	Castilla y León	7.624.104	4.944.872	3.621.214	9.661.377
08	Castilla-La Mancha	4.272.720	2.184.281	2.176.316	5.358.420
09	Cataluña	6.347.062	2.497.999	3.882.728	9.088.377
10	C. Valenciana	7.320.016	2.738.149	4.802.542	8.895.418
11	Extremadura	2.157.205	1.026.180	1.152.593	2.667.063
12	Galicia	15.681.361	11.224.534	5.889.980	25.971.329
13	C. de Madrid	2.135.248	888.819	1.092.110	3.225.683
14	Región de Murcia	1.927.662	810.898	1.189.972	2.309.429
15	C.F. de Navarra	1.071.256	555.900	636.472	1.354.868
16	País Vasco	1.907.463	677.236	1.231.657	2.092.346
17	La Rioja	521.727	326.555	269.553	662.587
18	C. a. de Ceuta	15.346	8.458	8.401	21.267
19	C. a. de Melilla	18.885	10.880	9.106	28.218
20	Posesiones Africanas	0	0	0	0
Total		71.089.908	37.005.802	37.341.613	97.185.148

Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

Aunque no es imprescindible⁷⁰, sin edificaciones es difícil pensar en población residente, y en cualquier caso el error que podemos cometer asignando población a polígonos sin edificaciones es considerablemente mayor que el que podemos cometer si ignoramos esta posibilidad, por lo que el soporte se restringió a los polígonos de coberturas con edificaciones (EDF).

⁷⁰ De acuerdo con la Resolución de 29 de abril de 2020, de la Subsecretaría, por la que se publica la Resolución de 17 de febrero de 2020, de la Presidencia del Instituto Nacional de Estadística y de la Dirección General de Cooperación Autonómica y Local, y publicada en el BOE el 2 de mayo de 2020, el empadronamiento en una autocaravana, o incluso en situaciones de ausencia total de techo, es posible. Naturalmente estos casos son marginales a nuestros efectos, y no son tenidos en cuenta (España 2020).

FIGURA 5.18: Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con la *grid* censal 2021 en un contexto urbano con viviendas unifamiliares. Municipio Nuevo Baztán (Madrid)

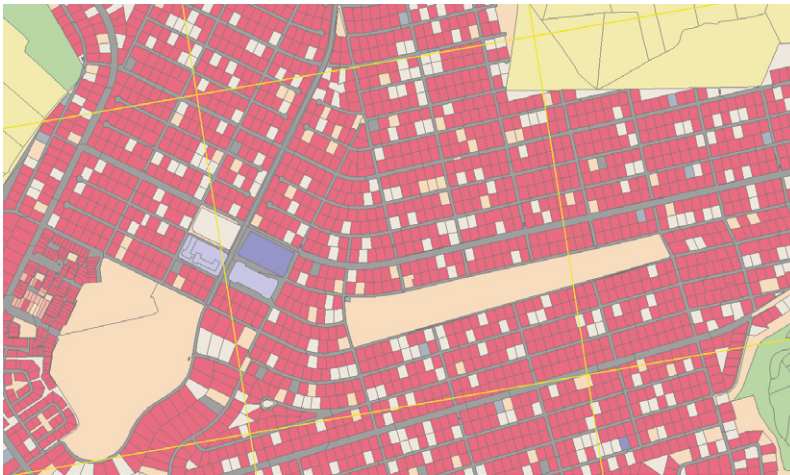


Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

Naturalmente hay edificios en SIOSEAR2017 fuera de GEOSTAT2021. En nuestro contexto se trata de edificios vacíos, en el sentido de que no albergarán población residente por construcción, de la misma forma que no lo hacen en la *grid* censal 2021. Por ejemplo, si examinamos la figura 5.10 sin filtrar espacialmente por GEOSTAT2021 —figura 5.20—, referido a Pozuelo del Rey (28116), podemos observar que fuera de las 2 celdas habitadas del núcleo principal del municipio hay edificaciones. Estos edificios no tienen población residente en GEOSTAT2021 y, por tanto, tampoco la tendrán en nuestra desagregación, que debe ser consistente con la *grid* censal.

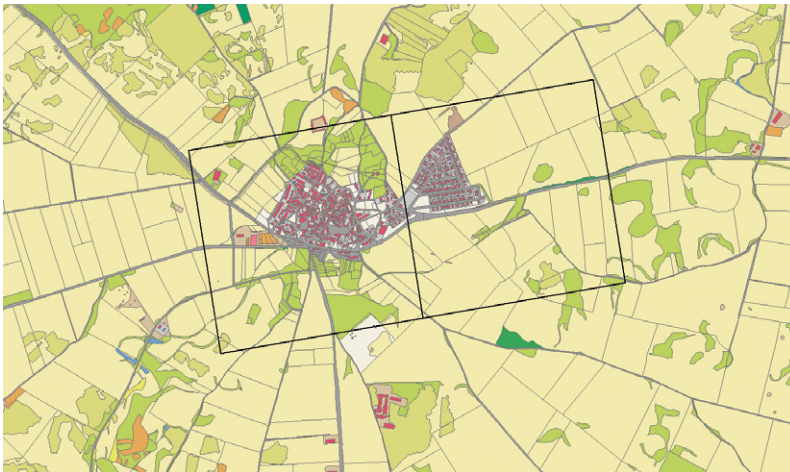
Resulta natural preguntarse si todas las celdas con población de GEOSTAT2021 tienen soporte en SIOSEAR2017 para la misma, es decir, algún polígono con edificaciones.

FIGURA 5.19: Representación espacial de la superposición de la capa de usos del suelo con la *grid* censal 2021 en un contexto urbano con viviendas unifamiliares. Municipio Nuevo Baztán (Madrid)



Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

FIGURA 5.20: Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con la *grid* censal 2021. Municipio Pozuelo del Rey (Madrid)



Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

Si efectuamos una intersección geométrica entre SIOSEAR2017 y GEOSTAT2021 encontramos los resultados que se muestran en el cuadro 5.2, donde, además, distinguimos entre el uso residencial

y no residencial de los edificios. La práctica totalidad de las celdas, el 99,6 %, tienen soporte para la población, y un 75,4 % contienen edificios de uso residencial. Solo un 0,4 %, 478 celdas, carecen de soporte para la misma. De estas, encontramos 37 celdas en las que no hay edificios, pero sí existen polígonos de uso residencial. Las coberturas asociadas en estos casos suelen ser *Otras construcciones* (OCT) o *Suelo no edificado* (SNE), y el resto, 441 celdas, no tienen ni edificaciones, ni polígonos de uso residencial.

CUADRO 5.2: Características de las celdas de GEOSTAT2021 según cobertura de Edificación y uso Residencial en SIOSEAR2017

		Cobertura: Edificación (EDF)		Total
		Con Edificación	Sin Edificación	
Uso (RESID)	Residencial	87.054	37	87.091
	No residencial	27.878	441	28.319
	Total	114.932	478	115.410
Distribución porcentual (%)				
		Cobertura: Edificación (EDF)		Total
		Con Edificación	Sin Edificación	
Uso (RESID)	Residencial	75,43	0,03	75,46
	No residencial	24,16	0,38	24,54
	Total	99,59	0,41	100,00

Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

Estos desajustes pueden deberse a varios factores. En primer lugar, falta de concordancia con las fechas de referencia. Mientras que SIOSE AR está referido a 2017, y en ocasiones a 2018, GEOSTAT2021 está referido a 2021, de forma que nuevas construcciones pueden haber aparecido en este tiempo. En segundo lugar, puede haber errores geométricos o en las bases de datos de referencia. En cualquier caso, estas celdas requerirán tratamiento especial para no perder población en el proceso de desagregación.

Las celdas con cobertura *Edificación* (EDF) pero uso no residencial —el 24,2 % del total— son celdas puras en la terminología de Goerlich y Cantarino (2012, 2013) y podrían ser utilizadas para modelizar la densidad en este tipo de edificios no residenciales. Por el contrario, las celdas con cobertura *Edificación* (EDF), que también tienen polígonos de uso residencial suelen contener al mismo tiempo polígonos de uso no residencial, de forma

que en estas celdas tenemos un *mix* de edificios residenciales y no residenciales. Solo existen 514 celdas en la que todos los edificios son de tipo residencial. Así pues, las celdas puras de cobertura *Edificación* (EDF) y uso *Residencial* (RESID) son escasas, y no parece que puedan utilizarse para modelizar las densidades en este tipo de edificios.

El cuadro 5.3 ofrece la misma información en términos de población afectada. Los resultados muestran que las 478 celdas problemáticas apenas albergan población, tan solo 1 362 residentes —el 0,0029 %—. Solo 9 celdas, de las 441 que no disponen ni de edificios, ni de polígonos de uso residencial, superan los 10 habitantes, y la mayor solo tiene 60 residentes. Por tanto, desde el punto de vista demográfico estas celdas son irrelevantes. La práctica totalidad de la población —el 100 % con 2 decimales de precisión— reside en celdas de 1 km × 1 km que tienen soporte en términos de edificios donde asignarla, y el 99,4 % lo hace en celdas donde hay edificios de uso residencial. Es aquí, pues, donde hay que centrarse en afinar los métodos de desagregación, ya que es en estas celdas donde se concentra la práctica totalidad de la población.

CUADRO 5.3: Población en las celdas de GEOSTAT2021 según cobertura de Edificación y uso Residencial en SIOSEAR2017

		Cobertura: Edificación (EDF)		Total
		Con Edificación	Sin Edificación	
Uso (RESID)	Residencial	47.103.191	88	47.103.279
	No residencial	296.245	1.274	297.519
	Total	47.399.436	1.362	47.400.798
Distribución porcentual (%)				
		Cobertura: Edificación (EDF)		Total
		Con Edificación	Sin Edificación	
Uso (RESID)	Residencial	99,3721 %	0,0002 %	99,37 %
	No residencial	0,6250 %	0,0027 %	0,63 %
	Total	99,9971 %	0,0029 %	100,00 %

Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

Por su parte, las 514 celdas puras de cobertura *Edificación* (EDF) y uso *Residencial* (RESID) solo acogen a una población de 34.641 personas, y solo en 8 de estas celdas la población excede de 1 000 habitantes. Se trata pues de celdas en cierta forma

marginal que no permiten una estimación razonable de las densidades en los edificios residenciales.

Una vez decidido el soporte y la geometría utilizada para el ejercicio de desagregación —polígonos de T_POLIGONOS en los que el ROTULO contiene EDF— debemos asociar a dichos polígonos la información sobre usos y alturas.

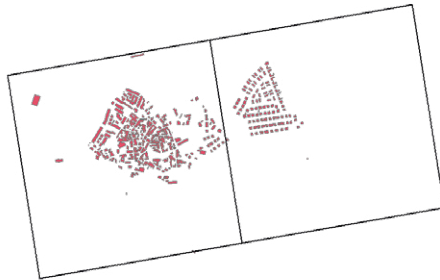
Antes de examinar cómo se ha efectuado este proceso de asociación conviene examinar, en las figuras anteriores, la información de soporte sobre la que descansa el ejercicio. Las figuras 5.21, 5.22, 5.23 y 5.24 no son más que la contrapartida de las figuras 5.6, 5.10, 5.14 y 5.18 en los que solo se muestran los polígonos cuyo ROTULO contiene EDF. Es decir, muestran el soporte sobre el que distribuir la población de cada celda de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, para en un segundo paso asignar dicha población a las celdas de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$. Estas figuras permiten apreciar una gran variedad de situaciones posibles, desde un mundo evidentemente urbano o rural —figuras 5.21 y 5.23— a núcleos urbanos reducidos —figura 5.22— o urbanizaciones —figura 5.24—, cada uno de ellos con sus peculiaridades. Veamos ahora cómo incorporamos toda la información relevante a cada uno de los polígonos que aparecen en estas figuras.

FIGURA 5.21: Representación espacial de la superposición de los polígonos con cobertura Edificación de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la *grid* censal 2021 en un contexto urbano. Municipio de Madrid



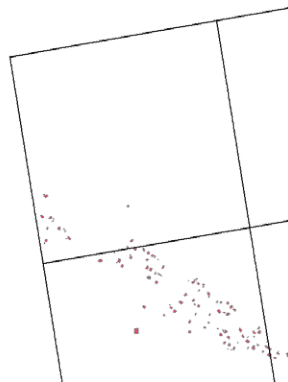
Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

FIGURA 5.22: Representación espacial de la superposición de los polígonos con cobertura Edificación de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la *grid* censal 2021. Municipio Pozuelo del Rey (Madrid)



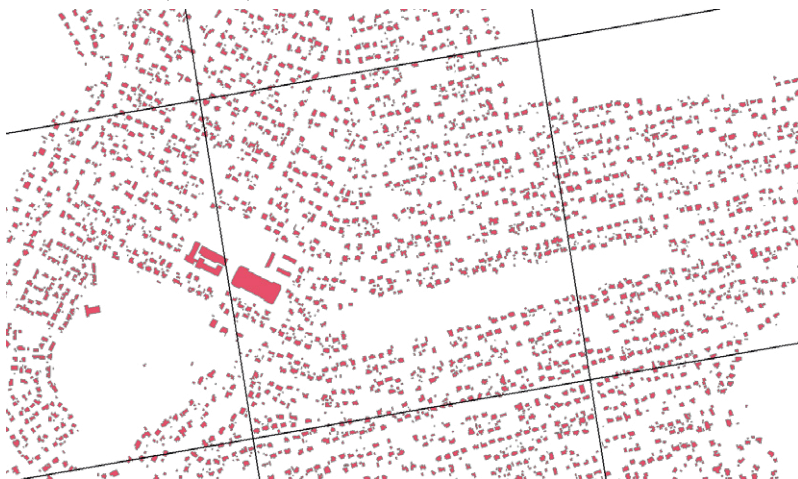
Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

FIGURA 5.23: Representación espacial de la superposición de los polígonos con cobertura Edificación de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la *grid* censal 2021 en un contexto rural. Municipio Villavieja del Lozoya (Madrid)



Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

FIGURA 5.24: Representación espacial de la superposición de los polígonos con cobertura Edificación de la capa de coberturas del suelo con celdas habitadas de la *grid* censal 2021 en un contexto urbano con viviendas unifamiliares. Municipio Nuevo Baztán (Madrid)



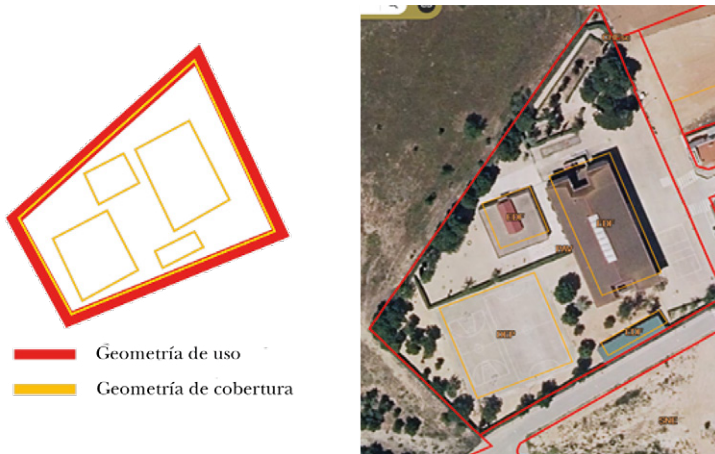
Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

La información sobre usos no está en la capa T_POLIGONOS de SIOSE AR, sino en la capa T_USOS con otra geometría diferente. Afortunadamente, la geometría de ambas capas es consistente en el siguiente sentido. La geometría de usos —T_USOS— coincide, en principio, con la parcela catastral, tiene una referencia catastral única y un identificador único —ID_PARCELA— por geometría de uso. La geometría de coberturas —T_POLIGONOS— tiene un identificador único —ID_POLYGON—, y se relaciona con la geometría de usos —T_USOS— mediante ID_PARCELA, que aparece en ambas tablas⁷¹. Por otra parte, no existen superposiciones entre las geometrías de usos y las geometrías de coberturas, aunque naturalmente pueden compartir lindes. Así pues, los polígonos

⁷¹ En los polígonos *SIOSEAR2017* que dan soporte a *GEOSTAT2021* —tabla 6.1— solo encontramos 1 error en esta falta de correspondencia. Un ID_PARCELA en T_USOS en la provincia de Pontevedra, cuyo uso es residencial (RESID), y que no tiene correspondencia en T_POLIGONOS. Encontramos, además, 4 errores en la provincia de Vizcaya en la correspondencia existente entre ID_POLYGON en la tabla T_POLIGONOS y la tabla T_VALORES, que no tiene geometría asociada. Estos 4 errores son irrelevantes a nuestros efectos ya que no se trata de polígonos que incluyan EDF.

de coberturas están siempre contenidos en polígonos de usos, de forma que un polígono de cobertura no puede estar, geoméricamente, en dos polígonos de usos. Dado que el uso se corresponde, en principio, con una parcela catastral, este uso debe estar cubierto en su totalidad por polígonos de coberturas. La relación entre ambas tablas es de 1 a muchos a partir del campo único en T_USOS que enlaza ambas tablas —ID_PARCELA— y la relación entre las geometrías puede observarse visualmente en la figura 5.25.

FIGURA 5.25: SIOSE AR: Relación entre las geometrías de usos y de coberturas



Fuente: SIOSE (2022a).

Esta excelente característica del modelo de datos de SIOSE AR nos permite añadir a cada ID_POLYGON de T_POLIGONOS el correspondiente ROTULO de uso procedente de T_USOS, de forma que tenemos en la misma tabla —T_POLIGONOS—, y con la geometría de coberturas, la información de coberturas y usos.

El siguiente paso es añadir en T_POLIGONOS un valor de altura para cada polígono que tenga cobertura *Edificación* (EDF) o uso *Residencial* (RESID). Esta información está disponible en el propio SIOSE AR en dos sitios diferentes y procedente de dos fuentes distintas, aunque no cubre todos los casos.

En primer lugar, en la tabla T_POLIGONOS tenemos el campo LIDAR_HMEAN_EDF que nos proporciona la altura media de las edificaciones dentro del polígono según LiDAR (Goerlich 2023b). Esta es nuestra primera opción, y cubre el 76 % de los polígonos para los que necesitamos un valor de altura, pero todavía nos faltan unos 4,2 millones de polígonos para los que no disponemos de altura. La altura media de LIDAR_HMEAN_EDF para los polígonos implicados es de 6,4 m y la máxima de 249 m⁷².

En segundo lugar, en la tabla T_VALORES tenemos el campo CONSTRU_SR que nos proporciona el número de plantas sobre rasante de las construcciones de Catastro⁷³. A partir de este campo estimamos la altura de los edificios suponiendo una altura de 3 m por planta⁷⁴. Esta información está disponible para el 85 % de los polígonos para los que necesitamos un valor de altura. La altura media para los polígonos implicados es, en este caso, de 7,4 m. Esta es nuestra segunda opción, por lo que la usamos para completar los casos anteriores. Después de esta asignación, conseguimos alturas para el 90 % de los casos necesarios.

Para completar el 10 % restante, alrededor de 1,8 millones de polígonos, utilizamos la altura media de los edificios

⁷² Existen, además, unos 49 mil registros, de los algo más de 18 millones que intervienen en los cálculos, con valor de LIDAR_HMEAN_EDF igual a 0. Estos son eliminados, y sustituidos en los pasos posteriores del procedimiento de cálculo de alturas.

⁷³ También se dispone del campo CONSTRU_BR que proporciona el número de plantas bajo rasante de las construcciones de Catastro, y que no fue utilizado en la generación de alturas. Por una parte, es razonable suponer que no hay población residente viviendo en sótanos, por otra, la altura utilizando la información del número de plantas bajo rasante no sería consistente con la información sobre alturas procedente del campo LIDAR_HMEAN_EDF.

⁷⁴ Puesto que la relación entre T_POLIGONOS y T_VALORES es de 1 a muchos a partir del campo único en T_POLIGONOS que identifica a cada polígono —ID_POLYGON— el procedimiento exacto para la determinación de la altura a partir de CONSTRU_SR fue el siguiente. Una vez filtrados los registros para los que no se dispone de esta información, se calculó la media de CONSTRU_SR por ID_POLYGON en T_VALORES, se añadió 1, se multiplicó el resultado por 3 y se truncó la altura máxima a 250 m. Existen muchos valores de CONSTRU_SR que toman el valor 0, lo que entendemos como un edificio con solo planta baja, lo que justifica el 1 que añadimos a la media por ID_POLYGON en el cálculo. Por otra parte, existen algunos registros con un número poco realista de plantas —superior a 100—, lo que justifica truncar las alturas estimadas a 250 m.

del municipio en cuestión, obtenida a partir de los datos disponibles hasta el momento⁷⁵.

Después de este proceso disponemos de una capa con geometría de coberturas —T_POLIGONOS— que contiene además información de usos, y en la que todos los polígonos que dan soporte a GEOSTAT2021 con cobertura *Edificación* (EDF) o uso *Residencial* (RESID) disponen de un valor de altura. La altura media de estos polígonos resultó ser de 6,3 m. Esta es la capa de información auxiliar de referencia.

Las 478 celdas que no disponen de soporte para la población, es decir, polígonos sin cobertura *Edificación* (EDF) —cuadro 5.2—, fueron objeto de tratamiento especial. Debemos distinguir entre los dos casos que aparecen en dicho cuadro.

Primero, cuando, a pesar de que no hay edificaciones, sí existen algunos polígonos de uso *Residencial* (RESID), normalmente debido a *Otras construcciones* (OCT) o *Suelo no edificado* (SNE). Hay 37 celdas en esta situación, lo que afecta solamente a 88 personas. En estos casos simplemente la población es asignada a los polígonos residenciales utilizando el criterio que corresponda según el método de desagregación elegido. Estos polígonos también disponen de dato de altura.

Segundo, cuando en SIOSEAR2017 no encontramos ni polígonos con cobertura *Edificación* (EDF), ni uso *Residencial* (RESID), y por tanto no hay un soporte natural donde asignar la población. Hay 441 celdas en esta situación que afectan a 1274 personas. En estos casos recurrimos a información adicional. En primer lugar, buscamos en el *Modelo Digital de Superficies de Edificación* (MDSnE2,5) del IGN, convenientemente tratado en Goerlich (2023b), la presencia de píxeles de edificación donde asignar la población. De esta información disponemos no solo de la huella de los edificios, sino también la altura —que es la información original— y los volúmenes edificados (Goerlich 2023b)⁷⁶.

⁷⁵ Después de este proceso todavía quedaron 3 códigos municipales SIOSE AR, correspondientes a condominios de Navarra —31523, 31544 y 31587— para los que no se disponía de información. Los polígonos afectados eran solo 14. En estos casos se utilizó la media de altura de los edificios de la provincia, 7,1 m, como valor a imputar.

⁷⁶ Esta información procede de la 1.ª cobertura de LIDAR con fechas de referencia 2008-2015.

Si no encontramos información aquí buscamos en Catastro, convenientemente tratado en Uhl *et al.* (2023), la presencia de píxeles de edificación donde asignar la población⁷⁷. De esta información disponemos de la huella del edificio —*building footprint area* (BUFA)— y también la superficie total construida —*building indoor area* (BIA)—, que recoge la altura de los edificios. Existe, además, la versión residencial de estas dos variables. La huella del edificio y la superficie total construida solo para los edificios catalogados como residenciales —*residential building footprint area* (RESBUFA) y *residential building indoor area* (RESBIA)—.

La información del MDSnE2,5 y de Catastro es la única utilizada en el proceso de desagregación en formato ráster, la totalidad del resto de la información utilizada lo es en formato vectorial, y el proceso de desagregación opera celda a celda, lo que requiere bastante tiempo de computación.

A pesar de ello para 279 celdas, que afectan a 845 personas, no se encontró soporte donde asignar la población. En estos casos la población de la celda de 1 km × 1 km fue asignada aleatoriamente a una de las celdas de la *grid* de 100 m × 100 m. Se prefirió este margen de incertidumbre en la localización espacial de la población en estos pocos casos, a perder las personas residentes en estas celdas.

Finalmente, dos precisiones técnicas y un comentario sobre la validación de los métodos de desagregación.

En primer lugar, SIOSE AR incorpora valores sobre las superficies de todos los polígonos, calculadas en la proyección de distribución del fichero, y porcentajes de ocupación en el caso de que el ROTULO incluya varias coberturas. Sin embargo, todas las superficies utilizadas en el proceso de desagregación son de elaboración propia después de la reproyección de SIOSE AR a ETRS89-LAEA, de forma que la nueva proyección coincide con la de la *grid*.

En segundo lugar, puesto que la cifra de población es un número natural, el proceso de desagregación debe respetar esta característica. Por tanto, las cifras de población en la *grid* de 100 m × 100 m

⁷⁷ Esta información procede de la conversión a ráster de la información vectorial del Catastro INSPIRE (Goerlich 2023d) y tiene fecha de referencia 2020.

serán números naturales. La literatura es silenciosa sobre este punto y, hasta donde nosotros conocemos, solo Goerlich y Cantarino (2012, 2013) y Batista e Silva y Poelman (2016) ofrecen un proceso de desagregación espacial de la población a números naturales. Pudiera parecer una cuestión estética o trivial, pero no lo es en absoluto. Existe cierta evidencia de que distribuir la población en reales aumenta la dispersión de esta sobre la capa de destino. Goerlich (2024c) genera *grids* de población históricas para todos los años censales desde 1900 hasta 2021. En todos los casos, excepto en 2011, la desagregación se efectúa a números naturales. El motivo es que en 2011 el INE ofreció cifras de población en reales, lo que el propio INE (2023) ha reconocido que no fue una buena idea. En dicho año se observa un pico en el número de celdas habitadas respecto a la tendencia observada, que se revierte en 2021, y que, al menos parcialmente, se puede rastrear a un número no despreciable de celdas con población inferior a 1 habitante, de forma que muchas de ellas desaparecen cuando se efectúa un redondeo a enteros. Algo similar sucede con las *grids* de población de la *Global Human Settlement Layer* (Freire *et al.* 2016) cuyo número de celdas habitadas se reduce considerablemente si redondeamos sus valores a enteros (Goerlich 2024c).

Este efecto de aumento artificial de la dispersión cuando la desagregación se efectúa a números reales es especialmente acusado cuando las unidades en la capa de origen son pequeñas en términos demográficos, como sucede en este caso —cuadro 5.4—. El 76 % de las celdas de GEOSTAT2021 no superan los 100 habitantes, que son el número de celdas en la capa de destino por cada celda en la capa de origen, y el 39 % no supera los 10 habitantes. En este contexto es fácil entender cómo una estimación en reales tiende a generar una excesiva dispersión de la población. Por ejemplo, consideremos una celda con solo un habitante. Existen 8486 celdas con esta población en GEOSTAT2021. Resulta obvio que este habitante solo puede ocupar una celda en la capa de destino, independientemente de su resolución, pero si hay varios polígonos con edificios en diferentes celdas de la capa de destino, y no restringimos el resultado a números naturales, ese habitante será repartido entre diversas celdas en la capa de destino. La conclusión lógica es que es necesario efectuar una desagregación a números

naturales, en lugar de a números reales, aun a costa de aumentar la complejidad y el tiempo de cálculo de los procesos. Con seguridad la distribución espacial de la población conseguida será mucho más realista.

El algoritmo de ajuste a enteros, efectuado a nivel de celda de 1 km \times 1 km, es el método de los restos mayores (Cox 1987; Balinski y Rachev 1993, 1997), que es básicamente el implementado por Bastista e Silva y Poelman (2016), y que ya fue utilizado anteriormente por Goerlich y Cantarino (2012, 2013). Nuestra *grid* de 100 m \times 100 m será pues una *grid* con población en enteros.

Las *grids* generadas serán evaluadas frente al conjunto de datos de validación de la Comunidad de Madrid descrito en el capítulo 2, pero es necesario elegir una métrica de bondad del ajuste para cuantificar las discrepancias entre la *grid* de referencia, obtenida mediante procedimientos *bottom-up* para la Comunidad de Madrid a partir del Padrón 2021, y la *grid top-down* generada mediante procedimientos de desagregación.

Utilizaremos la misma métrica que la ya utilizada en Goerlich y Cantarino (2012, 2013) y que parte de un indicador absoluto de discrepancias definido a nivel de celda como

$$\Delta = \sum_j \left| P_j - P_j^{ref} \right| \quad (5.1)$$

donde j indexa las celdas de la *grid*, y el superíndice *ref* se refiere a la población utilizada como referencia.

El valor de Δ oscila entre 0, cuando la distribución por celdas de la población es idéntica a la de la población de referencia, y 2 veces la población en la *grid*, cuando toda la población está en celdas diferentes. Obsérvese que se trata de un indicador de desajuste espacial un tanto ingenuo, ya que la contribución a la discrepancia es independiente del error en la distancia que cometemos al localizar incorrectamente la población, es decir, la contribución es la misma si a una persona la situamos en la celda contigua de donde debe estar o en la otra parte del país. Aunque la distancia es esencial en un indicador de discrepancias con contenido geográfico (O'Sullivan y Wong 2007) mantendremos (5.1) como indicador de referencia, tanto por su fácil interpretabilidad una vez normalizado, como por comparabilidad.

Dada la dependencia de [6.1] respecto al tamaño de las poblaciones bajo comparación resulta útil reescalarlo al intervalo [0,1], y definir el indicador de discrepancias relativo como

$$\delta = \frac{\Delta}{2 \times \sum_j P_j} = \frac{\sum_j |P_j - P_j^{ref}|}{2 \times \sum_j P_j} \quad (5.2)$$

De esta forma $100 \times \delta$ puede interpretarse como el porcentaje de población que situamos de forma incorrecta sobre el territorio, donde la precisión de la incorrección en la localización viene determinada por la resolución de la *grid*.

Ya observamos en el capítulo 1 que las poblaciones de GEOSTAT2021 para Madrid y la población de referencia, derivada del Padrón georreferenciado, no son exactamente las mismas, $\sum_j P_j \neq \sum_j P_j^{ref}$. En estas condiciones, la normalización de Δ para que esté acotado entre 0 y 1 es la siguiente:

$$\delta' = \frac{\Delta - \Delta_{\min}}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}} \quad (5.3)$$

La razón es sencilla. El valor máximo de (5.1) es 2 veces la población cuando la población en la *grid* y la de referencia son exactamente las mismas. En caso contrario, el valor máximo resulta ser la suma de las poblaciones, $\Delta_{\max} = \sum_j P_j + \sum_j P_j^{ref}$. El valor mínimo ahora no es cero, porque si situamos toda la población correctamente en sus celdas, no todos los sumandos en (5.1) se anulan. El valor mínimo resulta ser la diferencia (en valor absoluto) de las poblaciones, $\Delta_{\min} = |\sum_j P_j - \sum_j P_j^{ref}|$. En estas circunstancias la normalización que acota el índice Δ en el intervalo [0,1] es precisamente (5.3), lo que implica tanto un cambio de origen como de escala.

La métrica δ' , expresada en términos porcentuales, $100 \times \delta'$, será la utilizada con generalidad en la evaluación de la bondad de los diferentes métodos de desagregación, si bien podremos utilizar adicionalmente otras métricas, como el coeficiente de correlación entre las poblaciones en ambas celdas o un análisis de los errores por exceso o por defecto de forma separada.

5.3. Métodos de desagregación

Aunque el límite superior de la métrica δ que utilizaremos para evaluar la bondad del ajuste de nuestros métodos de desagregación es 1, esta es una cota superior en cierta forma teórica, ya que en la práctica dicho límite es considerablemente más bajo para un caso dado. Dicho límite superior viene dado por una distribución uniforme, es decir, el valor de δ si simplemente distribuyéramos la población de cada celda de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ de forma uniforme dentro de la misma, sin tomar en consideración ninguna información auxiliar. Lo que en representación cartográfica vendría a ser un mapa de coropletas. Esta sería la distribución natural si no tuviéramos ninguna información adicional acerca de donde se localiza la población dentro de las celdas en la capa de origen, y parece natural tomar esta distribución como punto de partida para investigar en cuánto podemos mejorarla a partir de la información auxiliar y nuestros métodos.

Si distribuimos la población de forma uniforme dentro de cada una de las 115.410 celdas de origen, con tamaño de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, en las celdas de destino, con tamaño de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, con la única restricción de que el dato de población en estas celdas de destino debe ser un número natural, entonces encontramos unos 4,5 millones de celdas habitadas y un valor de δ , multiplicado por 100, de 48,6%. Esta es nuestra distribución de referencia. La interpretación es clara. Si utilizamos una distribución uniforme, alrededor de la mitad de la población está ubicada incorrectamente con una precisión de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$. Este error se reduce de forma considerable si disminuimos la precisión, de forma que es del 38,8% cuando consideramos celdas de $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ y del 25,7% en el caso de celdas de $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$.

Si no hubiéramos introducido la restricción de que la población en las celdas de la capa de destino fuera un número natural, entonces una distribución uniforme hubiera ocupado los 11,4 millones de celdas de la capa de destino en las que se expande la capa de origen, la mayoría de estas celdas con una cifra de población muy inferior a 1 habitante, generando una excesiva dispersión de esta. Ello es poco realista, además de inconsistente con las estadísticas demográficas, y constituye otro ejemplo de que

la desagregación a números reales genera una mayor dispersión de la población de la que, dado un método de desagregación, podríamos observar en el mundo real.

Salvo este caso de la distribución uniforme, que no utiliza información auxiliar y tomamos como referencia, todos los métodos ensayados a continuación son de tipo dasimétrico, toman la cobertura *Edificación* (EDF) de SIOSE AR como el soporte donde situar a la población y responden al siguiente esquema general.

Partimos de 3 capas geométricas de información:

- 1) Capa o geometría de origen: celdas pobladas de GEOSTAT2021, con resolución de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, y para las que disponemos de una cifra de población para cada celda.
- 2) Capa o geometría de destino: celdas con resolución de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ cuya cifra de población se desea estimar. De esta capa solo disponemos de la geometría. Dichas celdas agregan geoméricamente la capa de origen, y esa consistencia en la agregación también se deberá verificar para las poblaciones estimadas.
- 3) Capa o geometría intermedia: polígonos de SIOSEAR2017 con cobertura *Edificación* (EDF), para los que disponemos de determinados atributos como usos, alturas y superficies, pero no disponemos de una cifra de población. Los polígonos se superponen de forma incongruente tanto con la capa de origen como con la capa de destino.

La figura 5.26 muestra una imagen ampliada de la figura 5.21 donde podemos observar las 3 capas de interés. La población de cada celda de GEOSTAT2021 será distribuida entre las celdas de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ contenidas en ella mediante la geometría intermedia, lo que requerirá estimar la población de cada elemento de dicha geometría.⁷⁸

Para redistribuir la población de cada celda de GEOSTAT2021 a las celdas de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ contenidas en ella primero efectuamos

⁷⁸ En realidad, de cada elemento de la intersección geométrica entre la geometría intermedia y la capa de destino.

FIGURA 5.26: Representación espacial de la superposición de los polígonos con cobertura Edificación de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la *grid* censal 2021 y la *grid* 100 m × 100 m en un contexto urbano. Municipio de Madrid



Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

una intersección geométrica de la capa de SIOSEAR2017 con cobertura *Edificación* (EDF) con la capa de destino, la *grid* de 100 m × 100 m. Ello genera una geometría transicional que contiene las combinaciones únicas entre todos los polígonos superpuestos de la capa intermedia —los polígonos SIOSEAR2017 con cobertura *Edificación* (EDF)— y la capa de destino. Sea T la capa de destino —*target zone*— e I la capa o geometría intermedia, esta operación genera un conjunto de polígonos, $G \cap I \cap T$, que mantienen el identificador único de los elementos de la geometría intermedia y el de la capa de destino. Para cada elemento de esta geometría transicional, G , obtenemos un peso, por ejemplo, el área o el volumen del polígono tras la intersección. Dicho peso puede ser agregado a partir del identificador único de los elementos de la geometría intermedia, o a partir del identificador único de los elementos de la capa de destino. En nuestro caso, en el que queremos estimar la población de los polígonos en la capa de destino, agregamos el peso a partir del identificador único de los elementos de dicha capa —el identificador de celda en la *grid* de 100 m × 100 m—, ω_p , $t \in T$.

Este peso, para cada elemento en la capa de destino, se utiliza para redistribuir la población de la celda en la capa de origen —*source zone*—, GEOSTAT2021. Por tanto,

$$P_t = P_s \left(\frac{\omega_t}{\sum_{j \in T \cap S} \omega_j} \right) \quad \forall t \in T \cap S \quad (5.4)$$

donde P_s es la población conocida en la celda de la capa de origen, S , P_t es la población estimada en las celdas de la capa de destino, T , y ω son los pesos para cada elemento de la capa de destino obtenidos por agregación a partir de la geometría transicional.

Obsérvese que el esquema anterior puede ser utilizado para estimar la población por polígono con cobertura *Edificación* (EDF), es decir, la población en los elementos de soporte de la geometría intermedia, aunque en este caso la intersección geométrica debería hacerse directamente con la capa de origen —*source zone*—, lo que nos daría directamente los pesos de interés.

La figura 5.27 muestra gráficamente la forma de obtener estos pesos a partir de la intersección entre la capa intermedia y la capa de destino, es decir, muestra la geometría transicional. Los pesos pueden representar cualquier característica relevante en los polígonos tras la intersección.

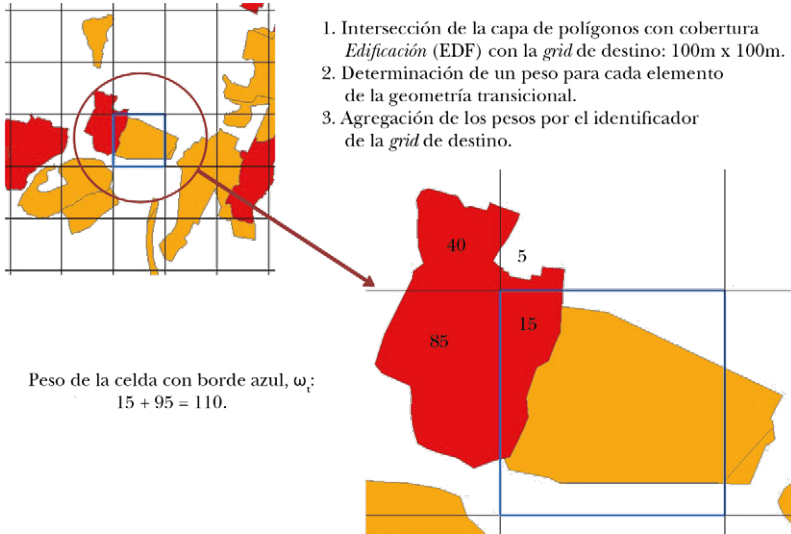
Diferentes formas de obtener los pesos y diferentes atributos de los edificios definen diferentes métodos de desagregación. Por ejemplo, los pesos pueden representar áreas, ajustadas por utilización en función del tipo de edificio, volúmenes edificados, número de viviendas residenciales por edificio, o incluso ser una variable binaria en función de si en las celdas de destino se observa la existencia de edificios de una determinada categoría o no.

Puesto que los pesos relativos suman la unidad, las poblaciones estimadas en las celdas de la capa de destino, P_t , suman, por construcción, la población de la celda en la capa de origen, P_s .

$$\sum_{t \in T \cap S} P_t = P_s \left(\frac{\sum_{t \in T \cap S} \omega_t}{\sum_{j \in T \cap S} \omega_j} \right) = P_s \quad (5.5)$$

En este punto las poblaciones estimadas, P_t , son un número real. Ya hemos argumentado sobre la conveniencia de ofrecer

FIGURA 5.27: Determinación de los pesos de distribución a partir de la geometría transicional



Fuente: Elaboración propia.

estimaciones de población como números naturales, de forma que el último paso es ajustar las poblaciones estimadas para la capa de destino al valor entero de la celda correspondiente en la capa de origen por el método de los restos mayores (Cox 1987; Balinski y Rachev 1993, 1997).

Un esquema alternativo, y que reduce considerablemente la carga computacional, hubiera sido convertir los polígonos con cobertura *Edificación* (EDF) a geometría puntual —centroides— de forma que evitáramos la intersección geométrica, que es una operación computacionalmente costosa, y en su lugar solo hubiéramos necesitado una unión —*join*— espacial de punto a polígono. Al fin y al cabo, los procesos de georreferenciación de la población residente localizan a la misma en un punto del edificio, normalmente la entrada de este, y no en el polígono del edificio o en su parcela catastral. Sin embargo, algo de experimentación mostró que los resultados de validación eran marginalmente mejores con el proceso descrito anteriormente, en lugar de trabajar con geometrías puntuales de edificios, quizá porque los centroides geométricos de los edificios no son el punto adecuado a utilizar.

Puesto que la redistribución se hizo en vectorial operó celda a celda, ya que restricciones de memoria impidieron ejecutar el proceso de forma completa en un solo paso.

Con este esquema general examinamos los siguientes métodos de desagregación espacial de la población en orden creciente de complejidad.

- 1) Distribución uniforme: Esta es nuestra distribución de referencia, y aunque no utiliza información auxiliar, ni efectúa operación de intersección alguna, podría ser acomodada en el esquema anterior simplemente haciendo que los pesos fueran 1, $\omega_i = 1$. En este caso, $\sum_{j \in T \cap S} \omega_j$ será 100 para las celdas interiores, pero será menos de 100 en las celdas frontera o que lindan con el mar. La distribución uniforme generó 4.452.744 celdas habitadas y un error de validación, medido por δ , del 48,6% para la *grid* con resolución de celdas de 100 m \times 100 m.
- 2) Distribución dasimétrica binaria: En este caso los pesos en (5.4) indican simplemente si la celda en la capa de destino tiene edificios. La intersección se utiliza simplemente para determinar la presencia de edificios en las celdas de la *grid* de 100 m \times 100 m. Por tanto,

$$\omega_i = \begin{cases} 1 & \text{en } t \text{ hay presencia de edificios} \\ 0 & \text{en } t \text{ no hay presencia de edificios} \end{cases} \quad \forall t \quad (5.6)$$

La distribución dasimétrica binaria generó 2.579.190 celdas habitadas y un error de validación, medido por $100 \times \delta$, del 41,7% para la *grid* con resolución de celdas de 100 m \times 100 m. Por tanto, una distribución uniforme dentro de las celdas donde detectamos la presencia de edificios, independientemente de sus características, mejora la localización de la población, pero el error es todavía muy elevado a esta resolución.

- 3) Distribución proporcional por áreas de la huella de los edificios —*building footprint area*—: Esta es una distribución bidimensional en la que los pesos están determinados por las superficies que ocupan los polígonos donde se detecta la presencia de edificios. En este caso los números de la figura

5.5 representan superficies, de forma que la distribución es proporcional a estas áreas. Por tanto,

$$\omega_t = \text{área de la huella de los edificios en } t \quad (5.7)$$

que será 0 si en una celda concreta no hay edificios. La distribución proporcional por áreas de la huella de los edificios generó 2.110.780 celdas habitadas y un error de validación, medido por $100 \times \delta$, del 34% para la *grid* con resolución de celdas de 100 m \times 100 m.

- 4) Distribución proporcional por volúmenes edificadas —*building indoor area*—: Esta es una distribución tridimensional en la que los pesos están determinados por los volúmenes que ocupan los polígonos donde se detecta la presencia de edificios. En este caso los números de la figura 5.5 representan volúmenes, de forma que la distribución es proporcional a estos volúmenes. Por tanto,

$$\omega_t = \text{volumen de la huella de los edificios en } t \quad (5.8)$$

que será 0 si en una celda concreta no hay edificios. La distribución proporcional por volúmenes edificadas generó 2.070.421 celdas habitadas y un error de validación, medido por $100 \times \delta$, del 27,7% para la *grid* con resolución de celdas de 100 m \times 100 m.

- 5) Distribución proporcional por áreas de la huella de los edificios residenciales —*residential building footprint area*—: Esta es la misma distribución que la que usa las áreas de los edificios, solo que en este caso se utilizan únicamente los polígonos donde se detecta la presencia de edificios de uso residencial. Se trata pues de una distribución proporcional por áreas en la que los usos se utilizan de forma binaria, residencial *versus* no residencial. Los edificios residenciales se les supone una ocupación plena, mientras que los no residenciales se supone no albergan población residente. Por tanto,

$$\omega_t = \text{área de la huella de los edificios residenciales en } t \quad (5.9)$$

que será 0 si en una celda concreta no hay edificios residenciales. Naturalmente esto aplica solo al 75,4% de las celdas donde se detectan edificios residenciales, que suponen el 99,4% de la población. Para las celdas donde los edificios son todos ellos no residenciales la distribución por áreas se aplica a estos edificios. La distribución proporcional por áreas de la huella de los edificios residenciales generó 1.340.385 celdas habitadas y un error de validación, medido por $100 \times \delta$, del 21,4% para la *grid* con resolución de celdas de 100 m \times 100 m. Así pues, la restricción del soporte de la población solo a los edificios residenciales reduce considerablemente el número de celdas habitadas en la capa de destino, al tiempo que disminuye los errores de localización de la población.

- 6) Distribución proporcional por volúmenes edificados de uso residencial —*residential building indoor area*—: Esta es la misma distribución que la que usa los volúmenes de los edificios, solo que en este caso se utilizan solo los polígonos donde se detecta la presencia de edificios de uso residencial. Se trata pues de una distribución proporcional por volúmenes en la que los usos se utilizan de forma binaria, residencial *versus* no residencial. Al igual que en el caso anterior, a los edificios residenciales se les supone una ocupación plena, mientras que los no residenciales se supone no albergan población residente. Por tanto,

$$\omega_t = \frac{\text{volumen de la huella de los edificios residenciales en } t}{\text{volumen de la huella de los edificios residenciales en } t} \quad (5.10)$$

que será 0 si en una celda concreta no hay edificios residenciales. Al igual que en el caso anterior, esto solo aplica al 75,4% de las celdas donde se detectan edificios residenciales, que suponen el 99,4% de la población. Para las celdas donde los edificios son todos ellos no residenciales la distribución por volúmenes se aplica a estos edificios. La distribución proporcional por volúmenes edificados de uso residencial generó 1.328.856 celdas habitadas y un error de validación, medido por $100 \times \delta$, del 17,2% para la *grid* con resolución de celdas de 100 m \times 100 m.

El cuadro 5.4 muestra las celdas habitadas estimadas en la *grid* de 100 m × 100 m según cada uno de los métodos de desagregación que acabamos de exponer, así como el error de validación, medido por $100 \times \delta$, para diferentes resoluciones: 100 m × 100 m, 200 m × 200 m y 500 m × 500 m.

CUADRO 5.4: Celdas habitadas en la *grid* de 100 m × 100 m y error de validación (%) a diversas resoluciones

	Método de desagregación	Celdas de 100 m × 100 m habitadas	Error de validación, $100 \times d'$, en la <i>grid</i> de		
			100 m × 100 m	200 m × 200 m	500 m × 500 m
1	Uniforme	4.452.744	48,6	38,8	25,7
2	Dasimétrico binario	2.070.421	41,7	31,7	19,4
3	Área edificada	2.110.780	34,0	25,9	16,0
4	Volumen edificado	2.070.421	27,7	20,6	12,7
5	Área residencial edificado	1.340.385	21,4	15,0	8,9
6	Volumen residencial edificado	1.328.856	17,2	11,1	6,2

Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM, SIOSE (2022a) e INE (2024).

Los resultados están ampliamente en línea con la literatura (Goerlich 2016b; Schug *et al.* 2021; Sapena *et al.* 2022) y muestran que una distribución uniforme, o incluso dasimétrica binaria, genera un elevado error, que se reduce considerablemente considerando dos atributos básicos de los edificios: altura y uso residencial *versus* no residencial. Pasar de áreas a volúmenes reduce el error, en la *grid* de 100 m × 100 m, entre 5 y 7 puntos porcentuales, mientras que incorporar el uso residencial en el proceso de desagregación espacial de la población reduce el error, en la *grid* de 100 m × 100 m, entre 10 y 13 puntos porcentuales. Se trata de magnitudes importantes en ambos casos, pero todo indica que el uso es más importante, desde el punto de vista cuantitativo, que la altura de las edificaciones.

El cuadro 5.4 también permite observar cómo se reduce el error considerablemente conforme disminuimos la resolución. Con el mejor método de desagregación el error se reduce a una tercera parte, de un 17,2 % en la *grid* de 100 m × 100 m a un 6,2 % en la *grid*

de 500 m × 500 m. A grandes rasgos los errores son comparables a los obtenidos en otros trabajos (Sapena *et al.* 2022).

Como métrica alternativa, el cuadro 5.5 muestra el coeficiente de correlación⁷⁹ entre las celdas de la *grid* de referencia —procedente del Padrón georeferenciado de Madrid 2021— y la *grid* estimada por los diferentes métodos considerados, y muestra mejoras similares a las del cuadro 5.4. Con esta métrica los resultados son muy buenos, ya que utilizando volúmenes edificados de uso residencial el coeficiente de correlación excede el 90 % en todos los casos.

CUADRO 5.5: Coeficiente de correlación (%) entre las celdas estimadas y las del conjunto de validación a diferentes resoluciones

Método de desagregación	Coeficiente de correlación en la <i>grid</i> de		
	100 m × 100 m	200 m × 200 m	500 m × 500 m
1 Uniforme	68,3	77,9	89,4
2 Dasimétrico binario	72,1	82,7	92,7
3 Área edificada	76,4	85,5	94,0
4 Volumen edificado	84,1	90,7	96,0
5 Área residencial edificado	89,2	94,6	97,9
6 Volumen residencial edificado	92,3	96,9	98,9

Nota: El coeficiente de correlación se calcula para todas las celdas del conjunto de validación, habitadas o no habitadas.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM, SIOSE (2022a) e INE (2024).

El método que proporciona mejores resultados, volúmenes edificados de uso residencial, no asigna ninguna población a edificios que en SIOSE AR no tengan asignado uso residencial⁸⁰. Es una decisión binaria, residencial *versus* no residencial, que quizá podría mejorar los resultados si consideráramos que algunos edificios no etiquetados como de uso residencial pueden albergar población residente. Sabemos que este es efectivamente el caso. Hay población residente en algunas naves industriales, edificios religiosos

⁷⁹ Calculado sobre todas las celdas del conjunto de validación —la provincia de Madrid—, ya estén habitadas o no.

⁸⁰ Naturalmente esto solo afecta al 75,4 % de las celdas del cuadro 5.2 que cubren el 99,4 % de la población —cuadro 5.3—.

o centros de servicios. Sin embargo, la población en este tipo de edificios es escasa, por lo que permitir que en ellos exista población residente puede dispersar en exceso la misma. Para comprobar si podemos mejorar nuestras estimaciones permitiendo que algo de población resida en edificios de uso no residencial se aplicó el método dasimétrico por volúmenes edificados considerando que los edificios no residenciales tengan un peso diferente según su uso sea residencial o no. En la práctica, ello implica considerar 2 tipos de pesos, ω_p , en las fórmulas (5.8)/(5.10), según el edificio en cuestión tenga uso residencial o no. Matemáticamente la formulación queda de la siguiente forma

$$P_t = P_s \left(\frac{\omega_t \theta_u}{\sum_{j \in T \cap S} \omega_j \theta_j} \right) \quad \forall t \in T \cap S, \forall u \in U \quad (5.11)$$

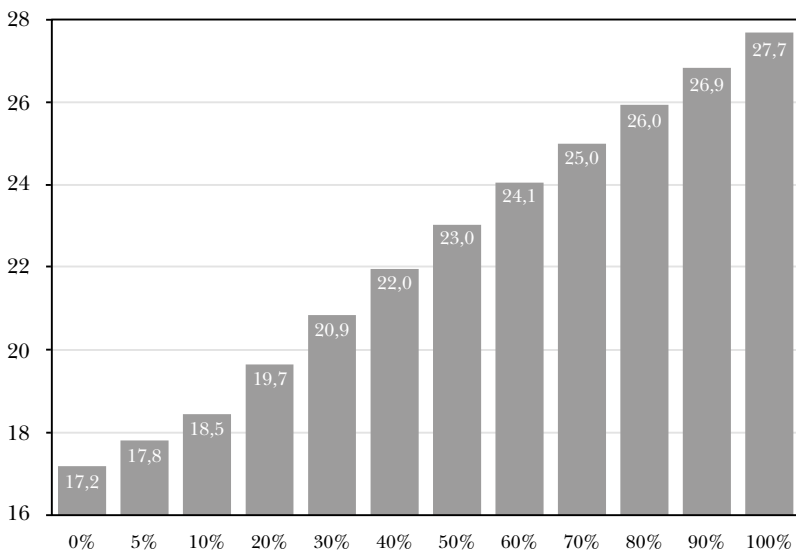
donde U es el conjunto de usos de los edificios considerado, solo 2 en nuestra aplicación, residencial *versus* no residencial, y θ_u es un coeficiente de ocupación del edificio en función del uso.

Si $\theta_u = 1$ para cualquier uso, es decir, para todos los edificios, ello nos devuelve a la fórmula (5.8) y a una distribución por volúmenes edificados. Por su parte, si $\theta_u = 1$ solo para los edificios residenciales, mientras que $\theta_u = 0$ para los edificios no residenciales, ello nos devuelve a la fórmula (5.10) y a una distribución por volúmenes residenciales edificados. Para examinar si podemos mejorar la distribución respecto a este último caso simplemente consideramos que los edificios residenciales son totalmente habitables —no disponemos de información sobre los edificios vacíos— mientras que los no residenciales son solo parcialmente habitables. Como no hay forma obvia de estimar el porcentaje de habitabilidad de los edificios no residenciales simplemente consideramos porcentajes de ocupación del 5 %, 10 %, 20 %, y así sucesivamente hasta el 90 % y examinamos los resultados en términos de número de celdas habitadas estimadas y el error de validación.

Los resultados de este experimento se muestran en los gráficos 5.1 para el error de validación y 5.2 para las celdas habitadas estimadas. Con la parametrización de nuestro ejercicio, el 100 % de habitabilidad para los edificios no residenciales se corresponde

GRÁFICO 5.1: Error de validación en la *grid* de 100 m × 100 m según porcentaje de ocupación supuesto en los edificios no residenciales

(porcentaje)



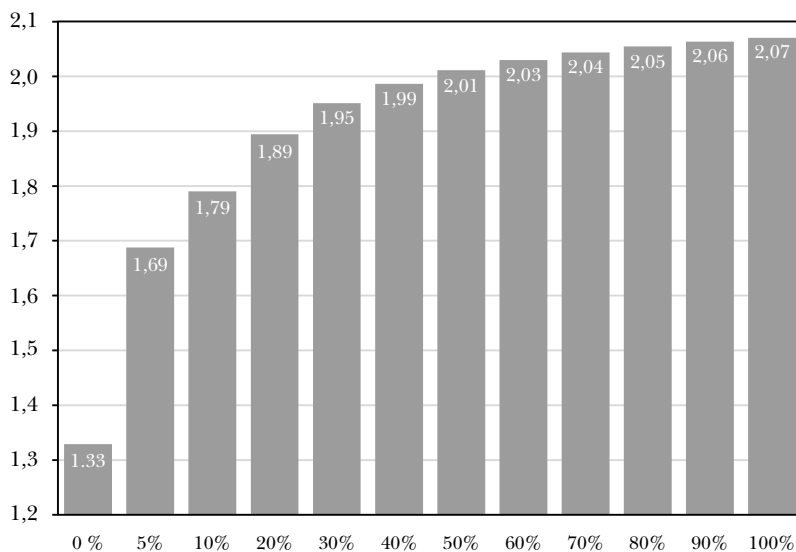
Nota: Un porcentaje del 0% implica no asignar población a los edificios no residenciales, mientras que un porcentaje del 100% implica que los edificios no residenciales tienen el mismo tratamiento que los residenciales a efectos de asignarles población.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM, SIOSE (2022a) e INE (2024).

con la distribución proporcional por volúmenes edificados, que arrojó un error de validación del 27,7%, mientras que un 0% de porcentaje de habitabilidad para los edificios no residenciales se corresponde con la distribución proporcional por volúmenes edificados de uso residencial, que arrojó un error de validación del 17,2%.

Los resultados de los gráficos 5.1 y 5.2 no pueden ser más claros. Dada la resolución de nuestra información auxiliar, asignar población a edificios no residenciales, aún en porcentajes de habitabilidad muy bajos, empeora los resultados y tiende a dispersar en exceso la población. El gráfico 5.1 muestra claramente como el error de validación empeora de forma monótona conforme aumentamos el porcentaje de habitabilidad de los edificios no residenciales. Un porcentaje de habitabilidad de los edificios no residenciales tan bajo como el 5% supone un ligero incremento del error

GRÁFICO 5.2: Celdas habitadas en la *grid* de 100 m × 100 m según porcentaje de ocupación supuesto en los edificios no residenciales
(millones)



Nota: Un porcentaje del 0% implica no asignar población a los edificios no residenciales, mientras que un porcentaje del 100% implica que los edificios no residenciales tienen el mismo tratamiento que los residenciales a efectos de asignarles población.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM, SIOSE (2022a) e INE (2024).

de validación, del 17,2% al 17,8%. A partir de aquí el error crece de forma monótona hasta el 26,9%, que lo obtenemos cuando el porcentaje de habitabilidad se supone del 90%, y que alcanza el 27,7% cuando no hacemos distinción entre edificios residenciales y no residenciales.

Otros trabajos (Sapena *et al.* 2022) encuentran resultados óptimos con porcentajes de habitabilidad para edificios no residenciales entre el 10% y el 40%, pero claramente este no es nuestro caso. La información auxiliar es de tal calidad y resolución que nuestra mejor opción es asignar población solo a edificios de uso residencial.

Por su parte el gráfico 5.2 muestra las celdas habitadas estimadas en la *grid* de 100 m × 100 m conforme variamos el porcentaje de habitabilidad de los edificios no residenciales. Suponer un porcentaje de habitabilidad del 5% para los edificios no residenciales

implica pasar de 1,3 millones de celdas habitadas a 1,7 millones de celdas habitadas, lo que resulta un incremento sustancial.

Resulta curioso observar como para todos los porcentajes de habitabilidad considerados en el gráfico 5.2, excepto el 0% —población asignada solo a los edificios de uso residencial—, el soporte inicial sobre el que distribuir la población es siempre el mismo, aunque el número de celdas habitadas crece de forma monótona conforme aumentamos dicho porcentaje. La razón hay que buscarla en nuestra estimación de cifras de población en enteros. El redondeo hace que al disminuir el porcentaje de habitabilidad de los edificios no residenciales disminuyamos también el número de celdas habitadas estimadas, simplemente porque los polígonos más pequeños no alcanzan a tener población estimada. Naturalmente obtenemos un salto importante al pasar del 0% al 5%, ya que en este caso si alteramos de forma importante el soporte sobre el que distribuir la población.

El resumen de este ejercicio es que mantendremos como soporte para la población solo los edificios con uso residencial de SIOSE AR.

Finalmente introduciremos dos pequeños cambios sobre el método de distribución proporcional por volúmenes edificadas de uso residencial. Tal y como ha sido implementado, en los resultados de los cuadros 5.4 y 5.5 las áreas sobre las que se obtienen los volúmenes para la distribución de la población proceden de la intersección entre la capa de destino —*target-zone*— y la capa o geometría intermedia de los edificios residenciales. Sin embargo, el ROTULO SIOSE AR incluye porcentajes de edificación que, de momento, no hemos utilizado y parece razonable hacerlo. La primera modificación es, por tanto, ajustar las áreas resultantes del proceso de intersección por el porcentaje de edificación dentro del polígono correspondiente derivado del ROTULO SIOSE AR. Es cierto que la mayoría de los porcentajes son del 100%, debido a la elevada resolución de la información, pero en algunos casos el porcentaje es inferior y parece natural ajustar las superficies.

La segunda modificación consiste en incorporar información sobre los atributos de los edificios. Aunque la mayoría de las coberturas de *Edificación* (EDF) no llevan atributo, SIOSE AR considera 3 posibles atributos para los edificios: *nave* (nv), *en construcción*

(ec) y *en ruinas* (er). Todo indica, sin embargo, que su utilización es bastante incompleta, ya que la mayor parte de los polígonos con cobertura de *Edificación* (EDF), esta figura sin ningún atributo. En cualquier caso, parece razonable excluir las naves⁸¹ (EDF_{nv}) y los edificios en ruinas (EDF_{er}). Mantenemos, sin embargo, los edificios en construcción (EDF_{ec}), ya que dado el desfase temporal entre SIOSE AR y el censo 2021 es de esperar que los edificios en construcción en 2017 ya estuvieran acabados en 2021.

La primera de estas modificaciones generó una mejora marginal en los estadísticos que miden la bondad del ajuste entre la *grid* estimada y la de validación, mientras que la segunda no produjo resultados apreciables. Sin embargo, parece razonable excluir del soporte para la población los edificios específicamente catalogados como nave en SIOSE, dentro de los polígonos de uso residencial, y aquellos identificados como en ruinas. Por tanto, el método finalmente utilizado se basa en volúmenes residenciales edificados, ajustados por los porcentajes del ROTULO SIOSE y excluyendo los edificios específicamente etiquetados como nave y los identificados como en ruinas.

Las celdas habitadas, el error de validación y el coeficiente de correlación entre las celdas estimadas y las del conjunto de validación se ofrecen en el cuadro 5.6. Según nuestras estimaciones, disponemos de 1,3 millones de celdas habitadas a una escala de 100 m × 100 m. Por tanto, aumentar la resolución de la información en una escala de 100 solo multiplica las celdas habitadas en un factor ligeramente superior a 10, de forma que una gran parte del territorio habitado en las celdas de 1 km × 1 km permanece vacío cuando aumentamos la escala a celdas de 100 m × 100 m. El error de validación es del 16,9%, lo que constituye una estimación del porcentaje de población que situamos incorrectamente, aunque el método asegura, por construcción, que la incorrección no sobrepasa la capa de origen, es decir, se sitúa dentro de las celdas de 1 km × 1 km. Este error se reduce de forma importante conforme disminuimos la resolución de la *grid*, siendo del 10,9% para

⁸¹ Estas estarán normalmente excluidas, puesto que solo se consideran edificios de uso residencial, pero esta exclusión explícita en las coberturas elimina cualquier nave que caiga dentro de un polígono clasificado como de uso residencial.

celdas de 200 m × 200 m y del 6,1 % para celdas de 500 m × 500 m. Por su parte, el coeficiente de correlación entre la *grid* estimada y la de validación es del 92,6 % a una resolución de 100 m × 100 m, del 97,1 % para celdas de 200 m × 200 m y del 99,0 % para celdas de 500 m × 500 m.

La figura 5.28 muestra la distribución de la población sobre la *grid* de 1 km × 1 km para la zona central del municipio de Madrid (28079) y sus alrededores, mientras que los dos siguientes permiten apreciar la ganancia en resolución procedente de nuestro ejercicio de desagregación para la *grid* de 100 m × 100 m finalmente seleccionada.

CUADRO 5.6: Celdas habitadas en la *grid* de 100 m × 100 m, error de validación (%) y coeficiente de correlación (%) entre las celdas estimadas y las del conjunto de validación a diferentes resoluciones para el método seleccionado

Método de desagregación	Volumen residencial edificado ajustado según la superficie del ROTULO SIOSE y excluidos EDFnv y EDFer		
Celdas de 100 m × 100 m habitadas	1.324.147		
Error de validación, 100 × d', en la <i>grid</i> de	100 m × 100 m	200 m × 200 m	500 m × 500 m
	16,9	10,9	6,1
Coeficiente de correlación en la <i>grid</i> de	100 m × 100 m	200 m × 200 m	500 m × 500 m
	92,6	97,1	99,0

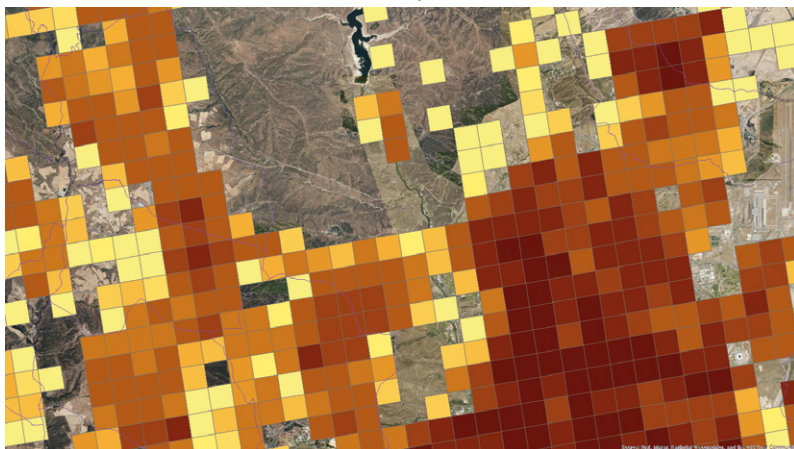
Nota: El coeficiente de correlación se calcula para todas las celdas del conjunto de validación, habitadas o no habitadas.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM, SIOSE (2022a) e INE (2024).

La figura 5.29 impone sobre la anterior —celdas de 1 km × 1 km—, las celdas habitadas estimadas de 100 m × 100 m, y permite apreciar como ganamos precisión en la localización de la población, puesto que una gran parte de las celdas de 1 km × 1 km están vacías una vez aumentamos la resolución a celdas de 100 m × 100 m. Ello es evidente sobre todo en las celdas con escasa población.

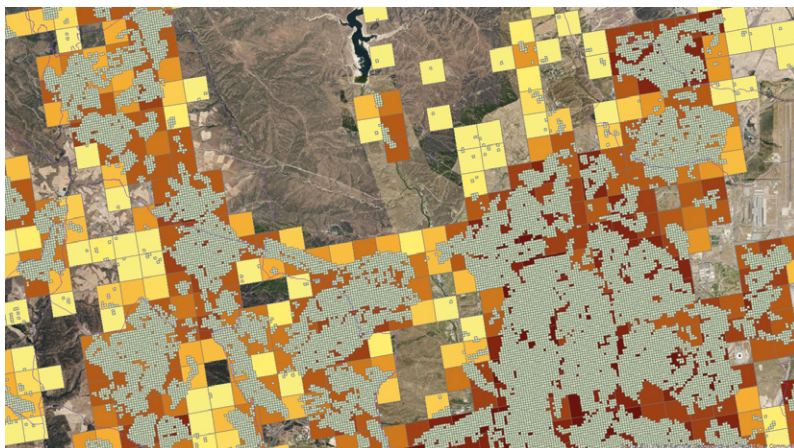
Finalmente, la figura 5.30 muestra la distribución de la población sobre la *grid* de 100 m × 100 m y visualiza las mejoras sobre la distribución de GEOSTAT2021 mostrada en la figura 5.28. Esta resolución es esencial en estudios urbanos o locales, si bien resulta evidente que la carga computacional de manejar esta *grid* crece enormemente.

FIGURA 5.28: Distribución de la población sobre una *grid* de 1 km × 1 km, GEOSTAT2021. Madrid y alrededores



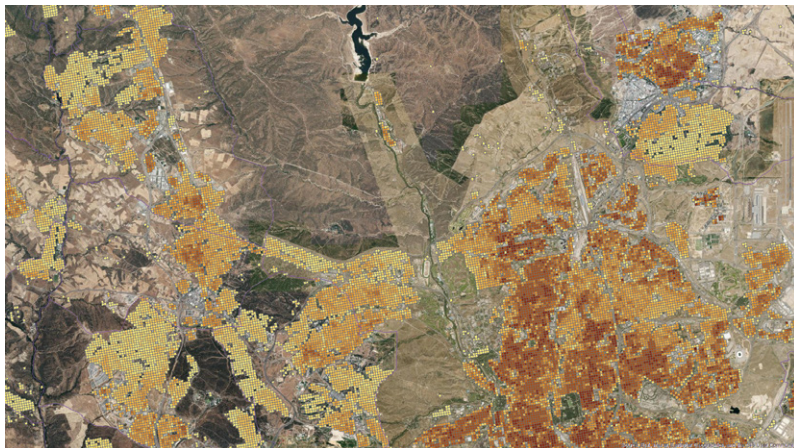
Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM, SIOSE (2022a) e INE (2024).

FIGURA 5.29: Ganancia de resolución de la *grid* de 100 m × 100 m versus la *grid* de 1 km × 1 km. Madrid y alrededores



Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM, SIOSE (2022a) e INE (2024).

FIGURA 5.30: Distribución de la población sobre una *grid* de 100 m × 100 m. Madrid y alrededores



Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM, SIOSE (2022a) e INE (2024).

6. Ejemplo de uso de la *grid* de población con resolución 100 m × 100 m: accesibilidad de la población a áreas verdes en ciudades seleccionadas

EL acceso a zonas verdes y espacios de ocio es un claro indicador de calidad de vida urbana (Goerlich y Reig 2020). Es en este sentido por el que Valencia ha sido declarada Capital Verde Europea durante el año 2024, como reconocimiento, por parte de la Comisión Europea, a sus políticas públicas para conseguir una ciudad más amable con las futuras generaciones, así como por sus amplios espacios verdes urbanos (Ajuntament de València 2024).

Además, las zonas verdes cumplen una amplia variedad de funciones que van más allá de aspectos recreativos y estéticos, como, por ejemplo, valores ecológicos relacionados con la biodiversidad o la promoción de la salud pública. Por otra parte, están estrechamente relacionados con una de las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)⁸² de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas: *«El ODS 11 pretende conseguir ciudades y comunidades sostenibles, a través del acceso de toda la población a viviendas, servicios básicos y medios de transporte adecuados, asequibles y seguros, especialmente para las personas en situación de vulnerabilidad y fomentando en las ciudades la reducción del impacto medioambiental, las zonas verdes y espacios públicos seguros e inclusivos, un urbanismo sostenible y una mejora de las condiciones en los barrios marginales.»*

⁸² Objetivo 11: *«Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles»* (REPM 2024).

Sin embargo, los indicadores habitualmente utilizados para cuantificar la disponibilidad de espacios verdes urbanos son agregados a nivel de municipio, ciudad o área urbana, no miden realmente la accesibilidad de la población a estas zonas verdes y no tienen en cuenta la diferente disponibilidad de acceso en función, tanto del lugar de residencia de la población dentro de la ciudad, como de la distribución de las zonas verdes en la misma.

Los dos indicadores más habituales en este contexto son la superficie verde per cápita y la proporción de espacios verdes sobre el total de superficie de la ciudad. Si bien es cierto que un nivel mínimo de superficie verde es claramente una condición previa para garantizar un mínimo de acceso o disponibilidad a espacios verdes, una gran proporción o superficie verde no garantiza en modo alguno una distribución adecuada de dichos espacios para que cumplan con las funciones relevantes para la población residente urbana. Debe resultar obvio que las zonas verdes urbanas deben distribuirse espacialmente de forma adecuada, con relación a la distribución de la población, para que cumplan con sus funciones relevantes para la población urbana. El problema no es muy diferente al de la distribución de la renta, una cuantía sustancial de la misma, y un elevado valor medio, no asegura que todos los ciudadanos disfruten de un mínimo adecuado de dicha renta.

Este capítulo ofrece indicadores de accesibilidad de la población urbana a espacios verdes para ciudades seleccionadas como aplicación de la *grid* con celdas de 100 m × 100 m que hemos derivado en el capítulo anterior. Ello nos permite disponer de la distribución de la población dentro de la ciudad, lo que unido a la resolución de SIOSE AR nos permite examinar la distribución de la accesibilidad de la población a los espacios verdes y derivar indicadores mucho más completos que los valores medios habitualmente utilizados en este contexto.

A continuación, ofrecemos las ciudades objeto de estudio, junto con algunas de sus características básicas. El apartado siguiente expone el flujo de trabajo en la preparación de los datos, las decisiones metodológicas y el proceso de construcción de los indicadores, para finalmente exponer los resultados obtenidos y derivar algunas conclusiones. El esquema 6.1 resume el objetivo y el contenido del capítulo.

ESQUEMA 6.1: Objetivo y contenido del capítulo 6

Objetivo	Datos	Procesos	Resultados
<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar la accesibilidad de la población urbana a espacios verdes de su entorno para ciudades seleccionadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Grid</i> de población estimada 100 m × 100 m. • Datos auxiliares: SIOSE AR. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aproximación a los trabajos de Poelman (2016, 2018). • Selección del medio de transporte (a pie) y el umbral de tiempo (10 minutos). • Definición armonizada de área verde urbana. • Generación de isocronas alrededor de cada punto representativo de la población. 	<ul style="list-style-type: none"> • Indicadores de accesibilidad urbana a zonas verdes: <ul style="list-style-type: none"> – Superficie media accesible por la población a 10 minutos andando. – Porcentaje de población sin acceso a zonas verdes a 10 minutos andando. • Resultados para las 10 ciudades seleccionadas.

Fuente: Elaboración propia.

6.1. Ciudades seleccionadas

Ya observamos en el capítulo 4, al examinar el desempeño de la red de transportes por carretera, cómo algunos problemas son intratables, desde el punto de vista computacional, con la *grid* de celdas de 1 km × 1 km si no reducimos la dimensión de este. Esta cuestión es más evidente con la *grid* de celdas de 100 m × 100 m que, para el conjunto nacional, tiene 1,3 millones de celdas habitadas.

Al objeto de mantener el ejercicio en unas dimensiones razonables analizamos solamente los resultados para las 10 ciudades —en realidad municipios— con mayor población según el censo 2021. Los aspectos metodológicos del ejercicio pueden extenderse, sin embargo, a cualquier otro ámbito territorial. Dichas ciudades, junto con algunos de sus estadísticos básicos y los dos indicadores habituales de espacios verdes a nivel de ciudad se ofrecen en el cuadro 6.1.

Las ciudades analizadas difieren ampliamente en tamaño, tanto en lo que hace referencia a la población, desde los más de 3

millones de Madrid (cuyo código de municipio es 28079) hasta los algo menos de 350 mil habitantes de Bilbao (48020), como en superficie, de los casi 1 000 km² de Zaragoza (50297), seguida de cerca por Murcia (30030), hasta los escasos 41 km² de Bilbao (48020). Ello se traduce en enormes diferencias en la densidad, obtenida esta sobre la totalidad del término municipal, y que oscila entre los algo más de 500 habitantes por km² de Murcia (30030) y los más de 16 mil de Barcelona (08019).

Solo dos ciudades, Madrid (28079) y Barcelona (08019), superan el millón de habitantes, y otras cuatro se sitúan entre los 500.000 y el millón de residentes.

Para apreciar cómo mejora la granularidad en la distribución de la población, el cuadro 6.1 también ofrece el número de celdas habitadas en la *grid* con celdas de 1 km × 1 km, GEOSTAT2021, y en nuestra estimación de la *grid* con celdas de 100 m × 100 m que hay detrás de las ciudades analizadas⁸³. Si analizar Madrid (28079) a nivel de celdas de 1 km × 1 km implica 385 localizaciones para la población, un análisis a nivel de celdas de 100 m × 100 m involucra a 14.712 celdas. Un número mucho mayor que las secciones censales de dicho municipio, que se sitúan en el orden de unas 2 400. En conjunto podemos ver que la escala de trabajo se multiplica por, aproximadamente, un factor de 25. Por tanto, a esta resolución el análisis es realmente detallado. La contrapartida es que la carga computacional crece de forma considerable ya que, finalmente, los cálculos se realizan celda a celda⁸⁴.

Finalmente, el cuadro 6.1 ofrece los dos indicadores habituales sobre zonas verdes a nivel municipal, por una parte, la superficie (m²) de áreas verdes por habitante y, por otra, el porcentaje de superficie verde sobre el total de superficie municipal, obtenidos en los dos casos de SIOSEAR2017. Ambos indicadores se ofrecen para dos definiciones de zonas verdes, una definición reducida

⁸³ Técnicamente se trata de una intersección geométrica entre las celdas habitadas a las diferentes resoluciones y los términos municipales. Para la *grid* de 1 km × 1 km esta información está disponible directamente en Goerlich (2024a) para cualquier ámbito administrativo.

⁸⁴ Ello deriva, en parte, de nuestro empeño en realizar los cálculos en vectorial, básicamente por dos razones, por una parte, porque la información geométrica de partida está en este formato, y por otra porque los cálculos son más precisos.

CUADRO 6.1: Ciudades seleccionadas. Estadísticos descriptivos

Código	Municipio		Superficie (km ²)	Densidad (hab./km ²)	Celdas habitadas en la <i>grid</i>			Superficie verde por habitante (m ²)		Porcentaje (%) de superficie verde		
	Nombre	Población			1 km × 1 km	100 m × 100 m	Artificial y arbolado urbano	Total	Artificial y arbolado urbano	Total	Artificial y arbolado urbano	Total
28079	Madrid	3.277.451	605	5.421	385	1.4712	20,6	70,6	10,6	36,4		
08019	Barcelona	1.627.559	99	16.361	114	5.555	5,8	17,3	7,3	21,7		
46250	Valencia	788.842	139	5.660	139	3.581	7,8	11,5	3,6	5,3		
41091	Sevilla	684.340	142	4.829	127	4.011	17,2	20,7	7,5	9,0		
50297	Zaragoza	681.430	974	700	286	4.696	20,4	122,3	1,3	8,1		
29067	Málaga	578.063	396	1.461	336	5.929	9,9	146,2	1,4	20,1		
30030	Murcia	459.778	885	520	507	8.665	18,3	336,3	0,9	17,1		
07040	Palma	424.837	210	2.024	219	4.721	17,4	134,2	2,6	19,7		
35016	Palmas de Gran Canaria, Las	380.667	103	3.687	124	3.134	6,0	14,4	1,6	3,8		
48020	Bilbao	345.749	41	8.360	57	1.594	7,6	35,9	5,9	27,9		
Total		9.248.716	3.594	2.573	2.294	56.598	14,6	73,5	3,4	17,3		

Nota: La Zona verde artificial y arbolado urbano se corresponde en SIOSE-AR con la cobertura del mismo nombre (ZAU), mientras que el total incluye, además de esta, las coberturas de Pasto arbolado (PPA), Arbolado (ARB), Frondosas caducifolias (FDC), Frondosas perennifolias (FDP), Coníferas (CNF) y Arbolado mixto (ARX).
Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

a las *Zonas verdes artificiales y arbolado urbano* (ZAU), cobertura existente como tal en SIOSE AR, y una definición amplia, que incluye además superficies boscosas y de arbolado más en general. Un tema sobre el que volveremos en el apartado siguiente, pero que no es en absoluto trivial.

Lo que interesa destacar ahora es que ninguno de estos dos indicadores recoge, en modo alguno, la accesibilidad de la población a los espacios verdes. Para empezar, se trata de indicadores promedio a nivel agregado para el área de análisis, que son independientes de la distribución de la población y de la distribución de los espacios verdes. Por otra parte, al igual que la densidad municipal habitual, se trata de indicadores que dependen en exceso de los tamaños municipales. Esto es particularmente evidente en la superficie verde por habitante para el total de zonas verdes, donde el valor de Murcia (30030) destaca sobre todos los demás, lo que se debe a su enorme término municipal con coberturas boscosas y de arbolado general, unido a una población relativamente baja, ya que presenta la menor densidad de población. Por el contrario, Murcia (30030) muestra el menor porcentaje de ZAU, lo que se debe, en parte, al mismo motivo y a la definición alternativa de las zonas verdes a considerar. La correlación entre ambos indicadores —superficie por habitante o porcentaje de ocupación— es prácticamente nula —de 0,08 y 0,12 según la definición de zona verde que utilizemos—, mientras que la correlación para un mismo indicador oscila entre 0,51 y 0,59 según la definición de zona verde. De hecho, la proporción de ZAU dentro del total de zonas verdes es notablemente heterogénea, y oscila entre el 5,4% de Murcia (30030) y el 67,5% de Valencia (46250). De nuevo, una parte importante de estas diferencias se debe a los diferentes tamaños municipales. En resumen, ambos indicadores muestran aspectos diferentes de nuestras ciudades, pero ninguno parece ser relevante para la cuestión de cómo de accesibles son las zonas verdes para la población que reside en las mismas. Esta medición es notablemente más compleja y requiere conocer la distribución espacial de la población dentro de las ciudades con gran precisión.

6.2. Flujo de trabajo: cómo medir la accesibilidad a los espacios verdes urbanos

Los aspectos metodológicos siguen de cerca los trabajos de Poelman (2016, 2018), convenientemente adaptados a nuestras disponibilidades de información, y tienen como objetivo cuantificar la facilidad con la que los residentes de una ciudad pueden acceder a las zonas verdes de su entorno. Sin embargo, aunque obtengamos indicadores a nivel de municipio o área urbana, el objetivo no es medir la accesibilidad a todos los espacios verdes de la ciudad, que puede ser de dimensiones enormes, piénsese en Zaragoza (50297), Murcia (30030) o Madrid (28079), sino cuantificar la accesibilidad próxima —inicialmente a nivel de cada celda de 100 m × 100 m—, lo que nos permitirá luego agregar de forma flexible.

Como en cualquier ejercicio de accesibilidad debemos elegir un medio de transporte. Mediremos la superficie de las zonas verdes urbanas que se encuentran a una distancia tal que las personas puedan recorrer a pie en un umbral de tiempo prefijado, en concreto, utilizaremos un umbral de 10 minutos andando. Suponiendo una velocidad a pie de 5 km/hora esto representa algo menos de 1 km de distancia⁸⁵. Naturalmente la distancia a recorrer es a través de la red viaria, y tiene en cuenta los obstáculos existentes para el desplazamiento a pie dentro de la ciudad.

Para obtener resultados que permitan realizar comparaciones entre diferentes áreas, debemos utilizar conceptos y fuentes de datos armonizados, y esto exige tomar una serie de decisiones que afectan, necesariamente, a los resultados cuantitativos obtenidos. Aunque quizá el ámbito de centro urbano a nivel de *grid* —capítulo 3— sería más adecuado para el análisis, preferimos mantenernos a nivel de municipio, por una mayor facilidad con la identificación de los centros de decisión política a nivel local. Al fin y al cabo, todos los municipios del cuadro 6.1 son municipios urbanos o ciudades en la terminología de *DEGURBA* —capítulo 3—.

⁸⁵ En concreto 833 m.

Además, ello permite la comparación con otros indicadores disponibles a nivel municipal.

La distribución de la población dentro de la ciudad viene dada por las celdas de 100 m x 100 m de nuestra *grid* estimada en el capítulo anterior. Más concretamente situaremos la población en el centroide de la celda. El número de puntos de población de cada municipio se ofrece en el cuadro 6.1. El objetivo final es asignar a cada uno de estos puntos, la superficie verde a la que se puede llegar andando, por la red viaria, en un tiempo de 10 minutos. Naturalmente necesitamos una definición armonizada de áreas verdes urbanas que permita comparar resultados entre ciudades. Esta definición no existe, pero puede ser construida a partir de SIOSE AR.

En SIOSE AR existe una cobertura específica de *Zonas verdes artificiales y arbolado urbano* (ZAU), pero esta parece una definición excesivamente restrictiva para nuestros propósitos. Por una parte, mucha población en la periferia de las ciudades tiene acceso a otras zonas verdes no necesariamente etiquetadas como urbanas en SIOSE AR. Por otra parte, hay ciudades con amplios espacios verdes, algunos de ellos muy accesibles, que no están etiquetados como *Zonas verdes artificiales y arbolado urbano* (ZAU) en SIOSE AR, por ejemplo, la Casa de Campo de Madrid (28079). Parece natural adoptar una definición más amplia de espacios verdes urbanos que incluya estos casos. A partir del listado de coberturas de SIOSE AR —apéndice A.1— consideramos como zonas verdes las coberturas de *Zonas verdes artificiales y arbolado urbano* (ZAU), *Pasto arbolado* (PPA), *Arbolado* (ARB), *Frondosas caducifolias* (FDC), *Frondosas perennifolias* (FDP), *Coníferas* (CNF) y *Arbolado mixto* (ARX), y tomamos como unidad de acceso verde el polígono SIOSE AR⁸⁶,

⁸⁶ Mantener el polígono original SIOSE AR como unidad de acceso, y medir superficies a partir de él, no es, en absoluto, una cuestión trivial o carente de significado cuantitativo. La razón, que puede tener implicaciones en otros ámbitos, es que la unidad básica de SIOSE AR es la parcela catastral, y por tanto esta se respeta, aunque haya coberturas idénticas en parcelas contiguas. Esta es una característica atípica en las bases de datos de coberturas y usos del suelo, donde el criterio que define el polígono es la homogeneidad de este. Dado nuestro procedimiento de cálculo, limitar la obtención de superficies verdes al polígono original SIOSE AR sesga a la baja los resultados, pero preferimos adoptar este criterio a tocar la geometría de la información original y porque, en algunos casos, una disolución por cobertura y contigüidad podría generar

de donde obtendremos su superficie adecuadamente ponderada por los porcentajes del ROTULO SIOSE.

Para determinar la accesibilidad de la población a las zonas verdes urbanas, generamos una isócrona o área de servicio de 10 minutos alrededor de cada punto representativo de la población —el centroide de cada celda—. Estas isócronas son polígonos irregulares generados alrededor de la red viaria que representan el espacio abarcable en 10 minutos de tiempo de desplazamiento a pie, partiendo del centroide de la celda en cuestión. Las áreas de servicio pueden entonces intersectarse con los polígonos de SIOSE AR que representan las zonas verdes urbanas. Aquellos polígonos que presentan una intersección no nula son las zonas verdes urbanas accesibles por la población de la celda para la que hemos generado el área de servicio. Para estas zonas verdes detectadas tomamos en cuenta toda la superficie de los polígonos correspondientes, convenientemente ajustada por el porcentaje de ocupación del ROTULO SIOSE⁸⁷. En consecuencia, para cada celda habitada conocemos su población y la superficie verde accesible en un tiempo de 10 minutos andando por parte de dicha población.

Debe tenerse en cuenta que para las celdas habitadas en la periferia del término municipal se tienen en cuenta las zonas verdes de municipios contiguos, es decir, aunque los cálculos se limitan a las celdas habitadas de una ciudad concreta, las zonas verdes no se limitan a las del término municipal, sino que hay superficie verde accesible en otros municipios. Esta característica de los indicadores de accesibilidad es diferente de los indicadores más tradicionales

resultados anormalmente elevados. El apéndice A.5 realiza un análisis de sensibilidad de los cálculos de este capítulo tomando Bilbao (48020) como ejemplo, y en el que se varían: (i) los umbrales de acceso 10 minutos *versus* 15 minutos, (ii) la definición de zona verde, solo *Zonas verdes artificiales y arbolado urbano (ZAU)* *versus* el total de zonas verdes consideradas en este capítulo, y (iii) los cálculos de superficies a partir de los polígonos originales SIOSE AR *versus* a partir de polígonos disueltos por ROTULO SIOSE y contigüidad.

⁸⁷ La superficie verde considerada es, pues, aquella de los polígonos con intersección no nula con las isócronas determinadas a partir de los centroides de las celdas habitadas de 100 m × 100 m, y no la superficie derivada de una hipotética intersección geométrica entre ambos polígonos. Este procedimiento da idea de lo que puede representar la decisión de mantener como unidad para el cálculo de superficies verdes el polígono original SIOSE AR.

mostrados en el cuadro 6.1 que están limitados a los lindes administrativos de la ciudad.

El proceso se realiza enteramente a partir de información vectorial, y opera celda a celda.

De esta forma, conseguimos la accesibilidad a zonas verdes con la misma resolución que la información sobre población, y podemos estudiar la distribución de la accesibilidad a espacios verdes al mismo nivel de detalle que la distribución de la población dentro de las ciudades. Lo único que hemos hecho es añadir información a nivel de celda de $100\text{ m} \times 100\text{ m}$, que luego podemos agregar de forma flexible a las áreas que queramos. Por ejemplo, para cada ciudad podemos calcular la superficie media o mediana ponderada por la población como medida resumen de la accesibilidad a espacios verdes, pero también podemos examinar la dispersión en accesibilidad en diferentes barrios e ilustrar espacialmente las zonas con mejores o peores accesos. Además, también podemos calcular fácilmente la proporción total de población urbana que no dispone de áreas verdes en su entorno.

6.3. Resultados

El cuadro 6.2 muestra algunos resultados sobre la accesibilidad a zonas verdes urbanas a nivel de ciudad después de aplicar el algoritmo descrito en el apartado anterior. Las hectáreas (ha) medias accesibles por la población en las ciudades seleccionadas oscila entre algo menos de 10 ha en Las Palmas de Gran Canaria (35016) y las más de 40 ha en Madrid (28079). La mediana, un indicador más robusto frente a valores extremos, muestra valores similares con la excepción de Madrid, lo que se debe a una pequeña minoría de personas en esta ciudad con fácil acceso a áreas verdes muy grandes en su vecindad. De esta forma la mediana muestra menor rango de variación entre ciudades que la media.

La correlación entre estos indicadores de proximidad y los más tradicionales, mostrados en el cuadro 6.1, es negativa en el caso de la superficie verde por habitante —siendo $-0,25$ para la media y $-0,32$ para la mediana—, y solo moderadamente positiva en el caso del porcentaje de superficie verde del término

CUADRO 6.2: Accesibilidad a zonas verdes urbanas en ciudades seleccionadas en un tiempo de 10 minutos andando

Código	Municipio		Media	Primer decil	Primer cuartil	Mediana	Tercer cuartil	Noveno decil	Rango Intercuartílico	Población (%) sin acceso
	Nombre									
28079	Madrid		43,1	3,8	9,9	24,3	46,9	79,8	37,0	0,1
08019	Barcelona		18,7	7,3	10,4	15,8	25,0	33,8	14,6	0,0
46250	València		16,6	6,9	10,0	14,8	20,5	30,4	10,5	0,0
41091	Sevilla		23,2	4,6	8,0	15,2	33,4	49,8	25,4	0,2
50297	Zaragoza		24,2	6,5	14,9	23,0	30,9	41,5	16,1	0,0
29067	Málaga		11,9	3,0	4,7	8,8	14,7	28,1	10,0	0,2
30030	Murcia		10,1	0,7	2,6	7,5	13,9	19,4	11,4	0,9
07040	Palma		13,2	3,6	5,6	8,5	12,7	19,5	7,1	0,3
35016	Palmas de Gran Canaria, Las		8,4	1,1	3,7	6,5	11,6	17,5	7,9	2,1
48020	Bilbao		16,1	5,7	9,8	14,8	21,2	27,7	11,5	0,1

Nota: Las zonas verdes urbanas comprenden las coberturas en SIOSE AR de Zona verde artificial y arbolado urbano (ZAU), Pasto arbolado (PPA), Arbolado (ARB), Frondosas caducifolias (FDC), Frondosas perennifolias (FDP), Comíferas (CNF) y Arbolado mixto (ARX). Las superficies se miden en hectáreas (ha).

Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

municipal —siendo de 0,51 para la media y de 0,32 para la mediana—. Así pues, disponer de abundantes zonas verdes en el municipio en cuestión, o en términos per cápita, no garantiza una buena accesibilidad a las mismas por parte de la población.

Parece existir una relación moderada entre el tamaño de una ciudad y el acceso a espacios verdes, al contrario de lo que sucede con las estimaciones a nivel europeo (Poelman 2016, 2018). Así, por ejemplo, la correlación entre la población y el valor medio de zonas verdes accesibles en un tiempo de 10 minutos es de 0,87, aunque esto se debe, en parte, al elevado valor de Madrid (28079), ya que la correlación con la mediana es solo de 0,67⁸⁸. Sin embargo, para confirmar esta hipótesis necesitaríamos estimaciones para un mayor número de ciudades, además de una mayor homogeneidad en los datos, especialmente en los referentes a coberturas y usos del suelo, si deseamos hacer comparaciones con estimaciones europeas.

El porcentaje de población sin acceso a zonas verdes es despreciable, y solo alcanza el 2,1 % en Las Palmas de Gran Canaria (35016).

Los estadísticos de distribución de las zonas verdes en el interior de las ciudades muestran importantes diferencias en las mismas, y complementan los datos de los valores medios. Así, por ejemplo, el 10 % de la población con peor acceso no alcanza nunca las 10 ha de zonas verdes, y en Murcia (30030) ni siquiera llega a 1 ha. Madrid (28079) muestra, en este decil, un valor muy modesto, con apenas 3,8 ha de accesibilidad a espacios verdes por parte de la población con menor acceso. Por el contrario, Barcelona (08019) es la que mejor desempeño muestra en este decil, con 7,3 ha de accesibilidad por parte de la población con menor acceso, probablemente la naturaleza compacta de este municipio está detrás de estos resultados. Obsérvese que Barcelona no tiene un valor especialmente elevado, ni en media, ni tampoco en mediana. Si nos movemos al otro extremo de la distribución observaremos que las diferencias de acceso para la población con mayor proximidad

⁸⁸ La correlación es significativamente menor si utilizamos la superficie como indicador de tamaño, siendo de 0,27 para la media y de 0,31 para la mediana.

a zonas verdes son enormes. Así, por ejemplo, en Madrid (28079) el 25 % de la población con mayor acceso tiene próximas al menos 47 ha de zonas verdes, y para el 10 % de la población con mayor acceso este valor alcanza las 80 ha. Por el contrario, en otras ciudades, como Palma (07040), Murcia (30030) o Las Palmas de Gran Canaria (35016) estos valores son notablemente más bajos, y no alcanzan las 20 ha en ninguno de los casos.

Si nos fijamos en el rango intercuartílico, como medida de dispersión en el acceso a zonas verdes dentro de la ciudad, observaremos, de nuevo, una importante heterogeneidad, siendo Madrid (28079) la ciudad con mayor dispersión, muy por encima del resto, algo que puede observarse a través de la evolución de sus percentiles. De nuevo parece existir una asociación positiva entre tamaño de la ciudad y dispersión, ya que el coeficiente de correlación entre el rango intercuartílico y la población es de 0,83⁸⁹.

La distribución de la población según su nivel de accesibilidad a las zonas verdes urbanas permite una mejor comparación entre ciudades. Los paneles del gráfico 6.1 muestran los resultados, para las ciudades seleccionadas, en dos bloques según tamaño de población, y parecen mostrar características diferentes. Estos gráficos se interpretan de la siguiente manera: el Y% porcentaje de población urbana representada en el eje de ordenadas dispone de al menos X hectáreas de zonas verdes en un tiempo de desplazamiento andando de 10 minutos⁹⁰. Cuanto más suave sea la pendiente de esta curva más uniforme será la distribución de acceso a zonas verdes, lo que no significa una distribución más igualitaria o equitativa, sino más bien al contrario, ya que los percentiles a ambos lados de la mediana se encuentran más separados. En el mismo sentido, cuanto más abrupta sea la pendiente de esta curva

⁸⁹ También, nuevamente, la asociación es mucho más débil si utilizamos la superficie como medida de tamaño, ya que la correlación es, en este caso, solo de 0.24.

⁹⁰ Técnicamente estos gráficos representan el complementario de los percentiles. Si el percentil 25 del acceso a zonas verdes es de 15 hectáreas, ello implica que el 25 % de la población con peor acceso tiene próximas 15 hectáreas o menos de zonas verdes, pero también que el 75 % de la población tiene acceso a por lo menos a 15 hectáreas de zonas verdes. Es este último porcentaje el que se representa en el gráfico 6.1. El valor correspondiente al 50 % de población se corresponde con la mediana de la distribución, cuyos valores se ofrecen en el cuadro 6.2, de forma que la mitad de la población tiene acceso a más de esa superficie y la otra mitad a menos de esa superficie.

más concentrada estará la distribución de acceso, ya que los percentiles a ambos lados de la mediana se encuentran más próximos, y cuanto más cercana esté la curva del eje de ordenadas menor será el acceso a zonas verdes.

Lo que el gráfico 6.1 muestra es una elevada heterogeneidad en los niveles de acceso y la distribución espacial de las zonas verdes en relación con la población. Esta heterogeneidad se observa en ambos grupos de ciudades, pero sobre todo en las más grandes.

El panel *a* del gráfico 6.1 muestra las ciudades de mayor tamaño, por encima de los 600.000 habitantes. Claramente Madrid (28079) es la que presenta mayor acceso, con una distribución relativamente uniforme, pero también más desigual. De este grupo, Valencia (46250) es la que presenta un acceso más igualitario, aunque ciertamente más modesto que Madrid (28079) y Zaragoza (50297).

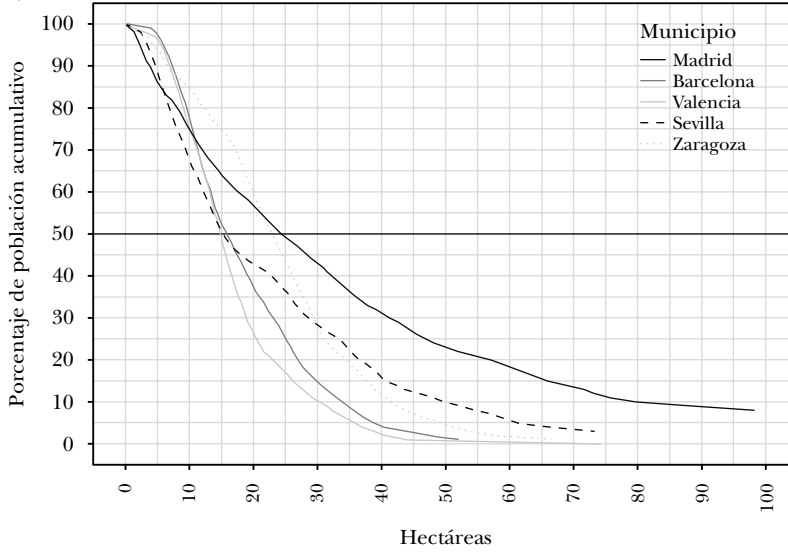
El panel *b* del gráfico 6.1 muestra las ciudades seleccionadas de menor tamaño, entre los 350.000 y los 600.000 habitantes y muestra, como grupo, un comportamiento algo más homogéneo con la excepción de Bilbao (48020), que destaca sobre el resto. Comparando ambos paneles es posible observar la relación entre tamaño demográfico y accesibilidad. Las ciudades pequeñas tienen menor acceso, este tiende a ser más igualitario y estar concentrado en valores relativamente bajos. Las ciudades más grandes tienden a ser más heterogéneas.

Una forma alternativa de examinar estos resultados es por medio de histogramas, representados en el gráfico 6.2. En ellos observamos una distribución para Madrid (28070) mucho más uniforme que en el resto de los casos y con una cierta tendencia hacia la bimodalidad, los menores porcentajes de población se sitúan en el centro de la distribución. En el resto de las ciudades, exceptuando de nuevo Zaragoza (50297), los mayores porcentajes de población no suelen superar las 15 hectáreas de zonas verdes accesibles, y la distribución suele ser asimétrica con una larga cola derecha.

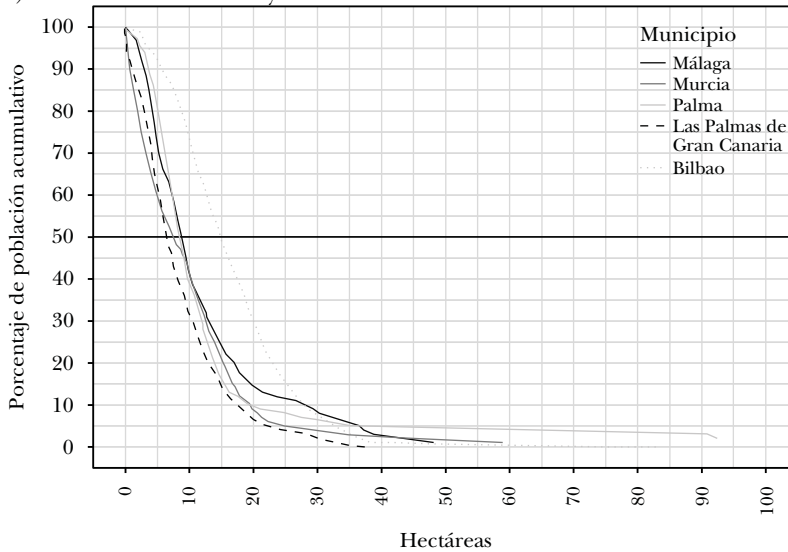
El examen de la distribución espacial de la accesibilidad muestra otra dimensión interesante de las ciudades. A continuación, se ofrecen figuras para algunas de las ciudades seleccionadas, donde las tonalidades más oscuras indican accesibilidad a una mayor superficie de zonas verdes.

GRÁFICO 6.1: Distribución de la población de acuerdo con la superficie accesible a zonas verdes urbanas en ciudades seleccionadas en un tiempo de 10 minutos andando

a) Ciudades con más de 600.000 habitantes



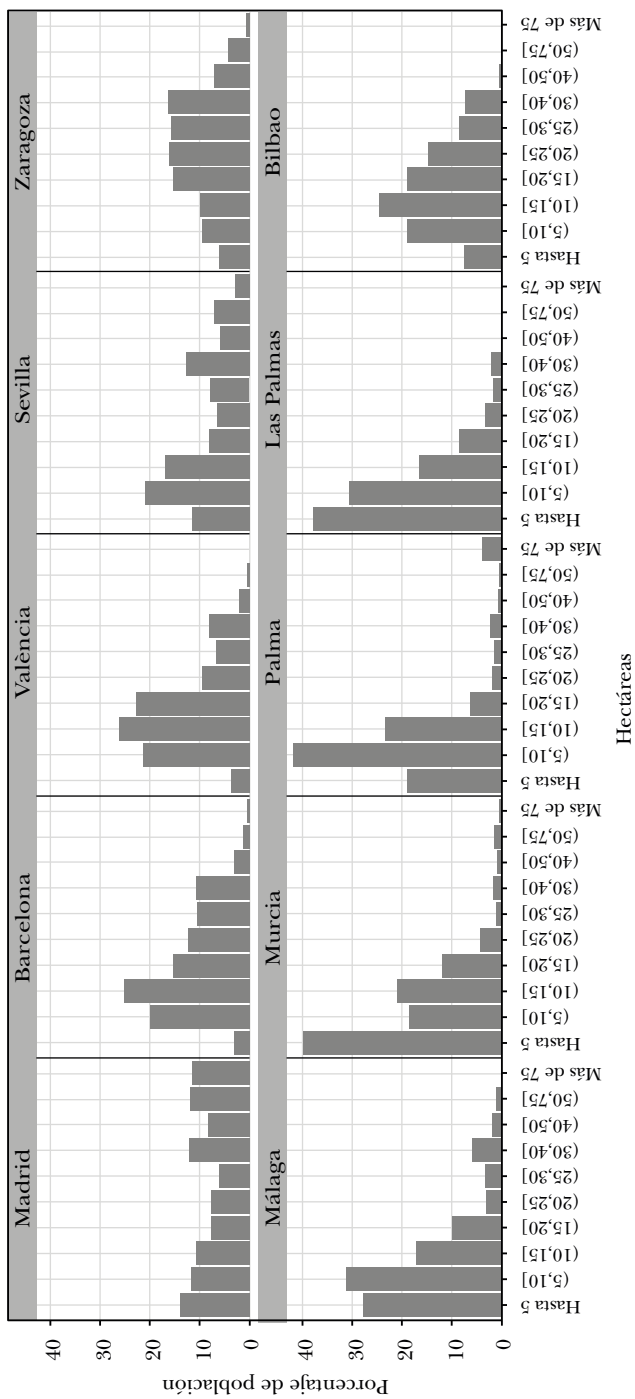
b) Ciudades entre 340.000 y 600.000 habitantes



Nota: Las zonas verdes urbanas comprenden las coberturas en SIOSE AR de Zona verde artificial y arbolado urbano (ZAU), Pasto arbolado (PPA), Arbolado (ARB), Frondosas caducifolias (FDC), Frondosas perennifolias (FDP), Coníferas (CNF) y Arbolado mixto (ARX). Las superficies se miden en hectáreas (ha).

Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

GRÁFICO 6.2: Distribución de la población relativa —histogramas— de la superficie accesible a zonas verdes urbanas en ciudades seleccionadas en un tiempo de 10 minutos andando

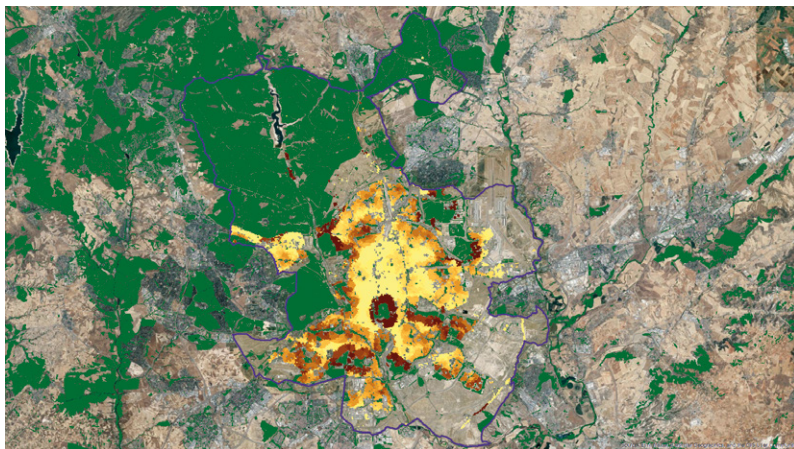


Nota: Las zonas verdes urbanas comprenden las coberturas en SIOSE AR de Zona verde artificial y arbolado urbano (ZAU), Pásto arbolado (PPA), Arbolado (ARB), Frondosas caducifolias (FDC), Frondosas perennifolias (FDP), Coníferas (CNF) y Arbolado mixto (ARX). Las superficies se miden en hectáreas (ha).
Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

La figura 6.1 muestra el municipio de Madrid, la figura 6.2 el de Barcelona, la figura 6.3 el de Valencia, la figura 6.4 el de Palma y la figura 6.5 el de Bilbao. En conjunto todas estas figuras muestran comportamientos heterogéneos y revelan que los lugares más accesibles a espacios verdes no se encuentran en el centro de las ciudades, sino en la periferia, donde hay zonas próximas a bosques, de hecho, los centros de las ciudades muestran valores de accesibilidad bastante reducidos. Valencia (46250) representa una excepción interesante a este patrón general gracias a la recuperación, como espacio verde urbano, del antiguo cauce del río Turia, que recorre la ciudad de oeste a este.

Estas figuras revelan, también, la importancia de los grandes parques urbanos. Examinados con detalle podemos observar cómo destacan el Retiro de Madrid (28079), los parques Güell y del Guinardó de Barcelona (08019), el Jardín Real de Viveros de Valencia (46250), el Castillo de Bellver de Palma (07040) o el Etxebarria Parkea de Bilbao (48020), que situado en la margen derecha del río Nervión limita la accesibilidad a esta zona de la población residente en la margen izquierda.

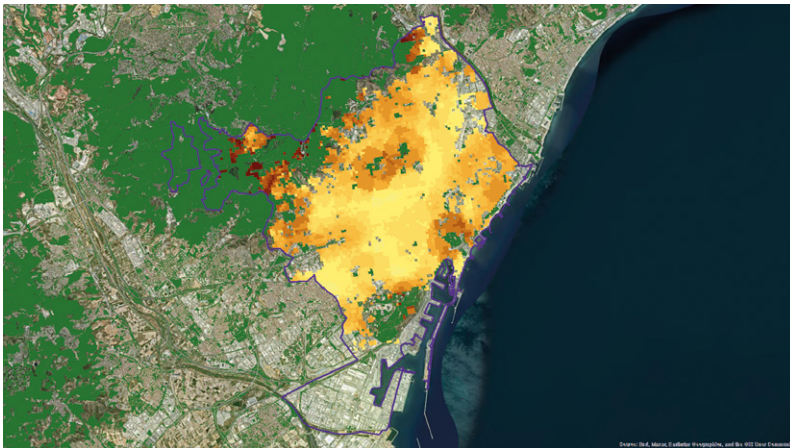
FIGURA 6.1: Distribución espacial de la población de acuerdo con la superficie accesible a zonas verdes urbanas en un tiempo de 10 minutos andando. Madrid



Nota: Las zonas verdes urbanas comprenden las coberturas en SIOSE AR de Zona verde artificial y arbolado urbano (ZAU), Pasto arbolado (PPA), Arbolado (ARB), Frondosas caducifolias (FDC), Frondosas perennifolias (FDP), Coníferas (CNF) y Arbolado mixto (ARX). Las superficies se miden en hectáreas (ha).

Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

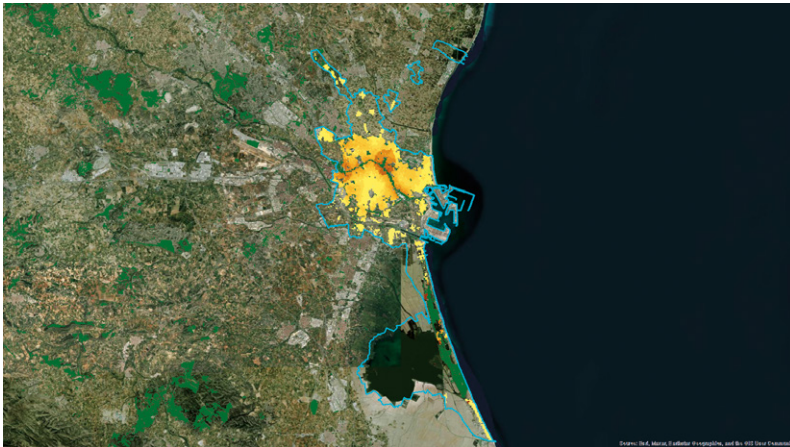
FIGURA 6.2: Distribución espacial de la población de acuerdo con la superficie accesible a zonas verdes urbanas en un tiempo de 10 minutos andando. Barcelona



Nota: Las zonas verdes urbanas comprenden las coberturas en SIOSE AR de Zona verde artificial y arbolado urbano (ZAU), Pasto arbolado (PPA), Arbolado (ARB), Frondosas caducifolias (FDC), Frondosas perennifolias (FDP), Coníferas (CNF) y Arbolado mixto (ARX). Las superficies se miden en hectáreas (ha).

Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

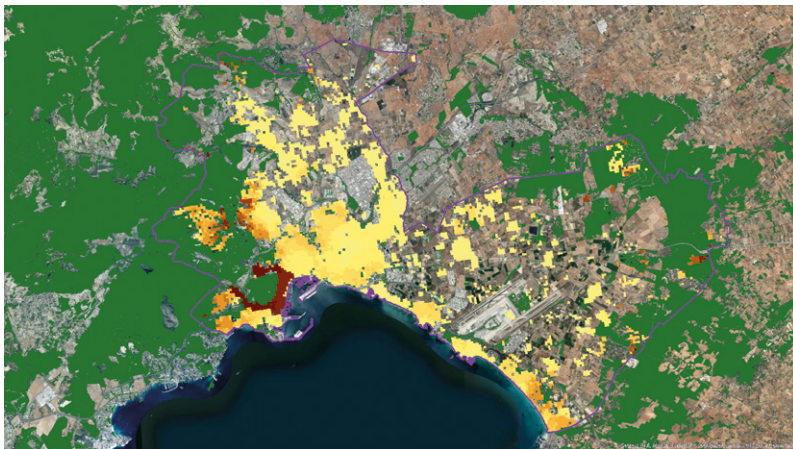
FIGURA 6.3: Distribución espacial de la población de acuerdo con la superficie accesible a zonas verdes urbanas en un tiempo de 10 minutos andando. Valencia



Nota: Las zonas verdes urbanas comprenden las coberturas en SIOSE AR de Zona verde artificial y arbolado urbano (ZAU), Pasto arbolado (PPA), Arbolado (ARB), Frondosas caducifolias (FDC), Frondosas perennifolias (FDP), Coníferas (CNF) y Arbolado mixto (ARX). Las superficies se miden en hectáreas (ha).

Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

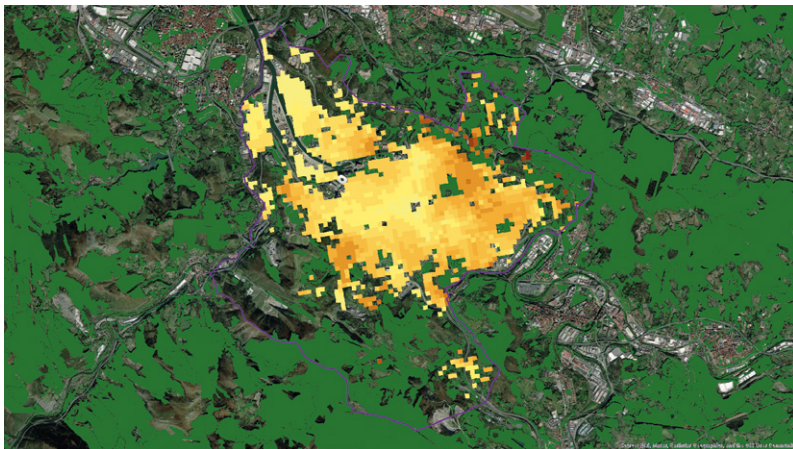
FIGURA 6.4: Distribución espacial de la población de acuerdo con la superficie accesible a zonas verdes urbanas en un tiempo de 10 minutos andando. Palma



Nota: Las zonas verdes urbanas comprenden las coberturas en SIOSE AR de Zona verde artificial y arbolado urbano (ZAU), Pasto arbolado (PPA), Arbolado (ARB), Frondosas caducifolias (FDC), Frondosas perennifolias (FDP), Coníferas (CNF) y Arbolado mixto (ARX). Las superficies se miden en hectáreas (ha).

Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

FIGURA 6.5: Distribución espacial de la población de acuerdo con la superficie accesible a zonas verdes urbanas en un tiempo de 10 minutos andando. Bilbao



Nota: Las zonas verdes urbanas comprenden las coberturas en SIOSE AR de Zona verde artificial y arbolado urbano (ZAU), Pasto arbolado (PPA), Arbolado (ARB), Frondosas caducifolias (FDC), Frondosas perennifolias (FDP), Coníferas (CNF) y Arbolado mixto (ARX). Las superficies se miden en hectáreas (ha).

Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

6.4. Conclusiones

Cuantificar la proximidad de la población a las zonas verdes urbanas mejora nuestra información sobre la calidad de vida en las ciudades. Este capítulo realiza una aportación en esta dirección más allá de los indicadores estándar de la superficie verde per cápita o el porcentaje de zonas verdes dentro del término municipal. Para ello es necesario una distribución muy granular de la población dentro de la ciudad, que viene dada por la *grid* con resolución de celdas de 100 m × 100 m estimada en el capítulo anterior.

Los indicadores propuestos miden el acceso a la superficie verde en un umbral de tiempo de desplazamiento a pie dado, son complementarios de otros indicadores más tradicionales y proporcionan una visión armonizada que permite comparaciones sencillas entre ciudades. La disponibilidad de información adicional sobre la tipología, el acceso efectivo y las funciones concretas de las zonas verdes urbanas podría ayudar a refinar, todavía más, el análisis, siempre que la información disponible sea comparable y coherente. En este sentido una cuestión pendiente es la distinción entre espacios verdes privados y públicos.

Los resultados muestran, en general, el peor acceso de los centros de las ciudades a zonas verdes y el papel que juegan a este respecto los grandes parques urbanos. A pesar de todo, la heterogeneidad de resultados en esta dimensión es enorme, y está condicionada, en gran parte, por la geografía urbana.

Sería interesante poner en relación estos resultados de alta resolución sobre accesibilidad a espacios verdes en el interior de las ciudades con otras variables socioeconómicas, como la renta intraciudad o la valoración de los inmuebles, así como con otras variables ambientales, algo para lo que todavía necesitamos aumentar la resolución de la información disponible.

7. Ejemplo de uso de la *grid* de población con resolución 100 m × 100 m: indicadores de accesibilidad saludable en ciudades seleccionadas

Facilitar la movilidad urbana sostenible deriva de un conjunto de medidas que implican la provisión eficiente de los servicios de transporte público —autobús, tranvía, metro y tren de cercanías—, pero también abrir la puerta a modos de movilidad activa, limpia y saludable. Los desplazamientos a pie y en bicicleta son muy adecuados para viajes de corta distancia en el interior de las ciudades, y también en su periferia (Ruiz-Apilánez y Solís 2021). Además, la utilización del transporte público urbano siempre se combina, en mayor o menor grado, con estos modos de desplazamiento.

Este capítulo adapta el marco conceptual del International Transport Forum (ITF 2019a, 2019b), ya utilizado en el capítulo 4 en el contexto de la medición del desempeño de la red de carreteras, a modos de transporte saludables: desplazamientos a pie o en bicicleta en el interior de las ciudades. Hacer atractivos estos modos de movilidad urbana puede mejorar sustancialmente la calidad de vida en las ciudades, rebajar las emisiones de efecto invernadero y reducir la congestión del tráfico urbano (FLOW Project 2016). Nuestra *grid* estimada, con resolución de celdas de 100 m × 100 m, nos permite aumentar la escala de análisis de forma importante, y considerar desplazamientos en distancias que medidos a partir de la *grid* con resolución de celdas de 1 km × 1 km no serían adecuados.

El trabajo se enmarca, en cierta medida, en el espíritu de cuantificar la denominada ciudad de los 15 minutos, un modelo urbano que ha ganado popularidad en los últimos años, pero cuya investigación ha sido predominantemente cualitativa hasta fechas muy recientes

(Pouzoukidou y Chatziyiannaki 2021; Papadopoulos, Sdoukopoulos y Politis 2023; Bruno *et al.* 2024). Este concepto —la ciudad de los 15 minutos⁹¹— pretende crear un modelo de lugares para vivir en los que todas las necesidades básicas de una persona puedan satisfacerse en desplazamientos de 15 minutos, ya sea a pie o en bicicleta.

La incorporación al análisis del transporte público, en conjunción con los desplazamientos a pie o en bicicleta, resulta una extensión extremadamente interesante en este contexto (Poelman, Dijkstra y Ackermans 2020b), pero está más allá del alcance de esta monografía, cuyo eje central no es la medición de la accesibilidad según diferentes modos de transporte, sino aumentar la resolución con la que podemos representar la población en el espacio. El volumen y tipo de información requerido para esta extensión no está disponible, ni con la generalidad, ni con la homogeneidad necesaria, además de que la tecnología y los requerimientos de cálculo computacional crecen de forma sustancial en este contexto. Nos centraremos, por tanto, en la accesibilidad a pie y en bicicleta en ciudades seleccionadas, un tema relacionado con la medición de la densidad económica, que ya introdujimos en el capítulo 2 desde una óptica agregada, y cuyo cálculo podemos ahora refinar todavía más en contextos mucho más locales. El esquema 7.1 sintetiza el objetivo y contenido del capítulo.

ESQUEMA 7.1: **Objetivo y contenido del capítulo 7**

<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar la accesibilidad de la población urbana a espacios verdes de su entorno para ciudades seleccionadas 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Grid</i> de población estimada 100 m × 100 m. • Datos auxiliares: SIOSE AR. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aproximación a los trabajos de Poelman (2016, 2018). • Selección del medio de transporte (a pie) y el umbral de tiempo (10 minutos). • Definición armonizada de área verde urbana. • Generación de isocronas alrededor de cada punto representativo de la población. 	<ul style="list-style-type: none"> • Indicadores de accesibilidad urbana a zonas verdes: <ul style="list-style-type: none"> — Superficie media accesible por la población a 10 minutos andando. — Porcentaje de población sin acceso a zonas verdes a 10 minutos andando. • Resultados para las 10 ciudades seleccionadas
---	---	---	--

Fuente: Elaboración propia.

⁹¹ Y que a veces se extiende al concepto de los territorios de 45 minutos.

7.1. Aspectos metodológicos

Recordemos que el enfoque del ITF (2019a, 2019b) en la medición de la accesibilidad gira alrededor de tres métricas básicas a partir de una distribución muy granular de la población.

- 1) Accesibilidad dado el modo de transporte considerado. Es decir, el número total de destinos que se pueden alcanzar en un umbral de tiempo fijo. Esto depende de dos grupos de factores, uno relacionado con las características concretas del modo de transporte considerado y otro relacionado con la distribución espacial de los destinos.
- 2) Proximidad es simplemente el número de destinos que existen dentro de una distancia fija —en línea recta—. Trata simplemente de captar la distribución espacial de los destinos.
- 3) El rendimiento del modo de transporte —indicador relativo de accesibilidad— es la ratio entre accesibilidad y proximidad. Por tanto, compara el número de destinos accesibles con el número de destinos próximos. Un valor alto de esta ratio indica que la mayor parte de destinos próximos son accesibles por el modo de transporte considerado, dada la distribución de estos. Por el contrario, un valor bajo de esta ratio indica que no podemos acceder a muchos de los destinos próximos, en el modo de transporte considerado, dado un umbral de tiempo, y su desempeño es bajo. Multiplicaremos dicho indicador por 100, de forma que podemos expresarlo en términos porcentuales.

Para evitar que el indicador relativo de accesibilidad pueda superar el 100 la accesibilidad se restringe a los destinos próximos. De esta forma responde de forma exacta a la pregunta: *¿Puedo llegar a todos los destinos cercanos en un tiempo prefijado con un determinado modo de transporte?* Los mapas 4.1 y 4.2 ilustran gráficamente el proceso.

Tomaremos como origen y destino las celdas de población con resolución de 100 m × 100 m en las ciudades ya analizadas en el capítulo anterior, de forma que el indicador de accesibilidad relativo se calcula a nivel de celda, y se agrega a niveles superiores

mediante promedios ponderados por la población, igual que ya hicimos en el análisis del desempeño de la red de carreteras. La población, a esta resolución, se considera así como un indicador de densidad económica, además de como una medida de las interacciones potenciales entre los individuos cercanos.

Ya hemos indicado que vamos a considerar dos modos de transporte bajos en emisiones de carbono: desplazamientos a pie y en bicicleta. Dada la distinta velocidad media con ambos modos, debemos considerar umbrales de tiempo y distancia diferentes en ambos casos.

Para viajes de muy corta distancia dentro de las ciudades, caminar suele ser a menudo la forma más fácil de desplazarse. Calcularemos la población a la que se tiene acceso durante un paseo de duración máxima de 15 y de 30 minutos, de forma que podamos examinar la sensibilidad de los resultados a ambos umbrales. Suponiendo, al igual que en el capítulo anterior, una velocidad media andando de 5 km/hora, ello implica comparar estos umbrales frente a la población próxima que reside en un radio de 1,25 km y de 2,5 km respectivamente. El rendimiento resultante del transporte a pie está condicionado por la densidad de la red viaria, así como por la estructura de esta y los posibles obstáculos que los peatones deban sortear —calles no accesibles a pie o ríos que atraviesan la ciudad—.

En distancias algo más largas, pero en un contexto de proximidad, la bicicleta suele ser más eficiente. Por comparabilidad con los desplazamientos a pie, analizaremos la población a la que se tiene acceso en bicicleta en un recorrido de 15 y de 30 minutos, pero también desplazamientos algo más largos, de 45 minutos, que son perfectamente factibles en este modo de transporte. Suponiendo una velocidad media en bicicleta de 15 km/hora, ello implica comparar estos umbrales de tiempo frente a la población próxima que reside en un radio de 3,75 km, 7,5 km y 11,25 km. Al igual que sucede con los desplazamientos a pie o en coche, el rendimiento resultante está condicionado por la red ciclista urbana, la densidad de la red viaria y las restricciones para circular en bici dentro de las ciudades.

También al igual que en el capítulo 4, los cálculos de distancias y tiempos, que se efectúan a nivel de celda de la *grid*, descansan

sobre OpenStreetMaps (Luxen y Vetter 2011), al que accedemos a través del proyecto *Open Source Routing Machine* (OSRM) instalado en un servidor local, utilizando los centroides de las celdas de 100 m × 100 m como orígenes y destinos. Dicho servidor permite distinguir entre los modos de transporte considerados, es decir, además del vehículo privado, es posible realizar cálculos de rutas tanto a pie como en bicicleta.

El procedimiento de cálculo es enteramente similar al ya empleado en el capítulo 4 con los umbrales y modos de transporte que acabamos de mencionar. Es decir, para cada celda de población de las ciudades implicadas se calcula la población próxima en un radio determinado. Para ello se traza un círculo con dicho radio a partir del centroide de la celda, se cogen todas aquellas celdas de la *grid* cuyo centroide cae dentro de dicho círculo y se suma la población correspondiente. Esa es la población próxima dado el radio de proximidad. La única precaución que hay que tener en este caso es que, dado que el cálculo no es exhaustivo para toda la *grid*, debemos tener en cuenta que la población en los límites exteriores de las ciudades también tiene población próxima de otras ciudades que debe ser tenida en cuenta en los cálculos.

Al igual que en los capítulos 2 y 4 los cálculos se realizan en el sistema de referencia de coordenadas (CRS) de la *grid*, ETRS89-LAEA, y naturalmente las distancias son euclídeas.

La estimación exhaustiva de todas las rutas es inviable desde el punto de vista computacional. Por esta razón procedemos, para cada celda, a trazar una isócrona para el umbral de tiempo determinado y modo de transporte considerado, recortarla por los límites de proximidad, examinar las celdas cuyo centroide cae dentro de dicha isócrona y sumar la población de estas, lo que determina la población accesible que, por construcción, no puede superar la población próxima. Cualquier agregado se obtiene como promedio ponderado por la población a partir de los valores obtenidos a nivel de celda. En cierta forma la *grid* actúa como geometría intermedia para obtener resultados para las ciudades seleccionadas, pero la granularidad de la información permite examinar cómo varía la proximidad o la accesibilidad en el interior de las ciudades.

7.2. Ciudades seleccionadas

Analizamos las mismas ciudades que en el capítulo anterior, los 10 municipios con mayor población en el censo 2021, y que van desde los casi 350 mil habitantes de Bilbao hasta los más de 3 millones de Madrid.

El cuadro 7.1 muestra estadísticos descriptivos relacionados con la densidad de población, estándar y personal —capítulo 2—, así como la población próxima en los radios considerados en los diferentes ejercicios de este capítulo, lo que en el capítulo 3 denominamos densidad experimentada.

La densidad de población estándar simplemente divide por la superficie municipal y ya hemos indicado que es poco representativa de la concentración de la población sobre el territorio, al estar influida en gran medida por el tamaño municipal. La densidad de población personal (Henderson, Nigmatulina y Kriticos 2021) es simplemente la media, ponderada por la población, de la distribución de tamaños de las celdas de la *grid*, de forma que las celdas más pobladas pesan más en los cálculos. Intuitivamente es una medida de las interacciones potenciales entre los individuos, restringiendo el radio de acción al tamaño de las celdas de la *grid*. En el caso del cuadro 7.1 es la media ponderada de la *grid* de 100 m × 100 m, aunque la densidad está escalada en términos de habitantes por km², y no por hectárea.

A nivel nacional la densidad de población personal supera ligeramente los 20 mil habitantes. Resulta ser el doble de la ofrecida en el cuadro 2.8, algo superior a los 10 mil habitantes. La razón de esta diferencia radica en la escala de medida. En el cuadro 2.8 la medición se efectúa sobre la *grid* de 1 km × 1 km, mientras que en el cuadro 7.1 la medición se efectúa sobre la *grid* de 100 m × 100 m. Naturalmente la escala afecta a nuestra medida de densidad de población personal, y lo que nos indica un valor mucho mayor al aumentar la resolución espacial de la población es la elevada concentración de esta sobre el territorio. De hecho, ya observamos como a una escala de celdas de 1 km × 1 km teníamos 8,486 celdas con 1 habitante, lo que representa un 7,4% del total, mientras que para la *grid* de celdas de 100 m × 100 m tenemos 265.832 celdas estimadas con 1 habitante, lo que representa un 20,1% del total.

Por tanto, aumentar la resolución espacial de la población tiende a mostrar una mayor concentración de esta. El tamaño medio de las celdas de la *grid* de 100 m × 100 m es de 36 habitantes, mientras que el tamaño mediano es de solo 7 habitantes. El tercer cuartil es inferior a la media, siendo tan solo de 28 habitantes. Esto significa que la mitad de las celdas de esta *grid*, algo más de 660 mil, tiene menos de 7 habitantes, y el 75 %, casi un millón de celdas, no alcanza los 28 habitantes.

Aunque todas las ciudades muestran una mayor densidad estándar de población que el promedio nacional, incluidas las dos con mayores términos municipales, Murcia (30030) y Zaragoza (50297), esto no es exactamente así para la densidad de población personal, ya que Murcia (30030) muestra un valor algo inferior al promedio nacional. Considerado como índice de concentración, la densidad de población personal indica que la mayor concentración la obtenemos en Barcelona (08019), seguida de Bilbao (48020) y Zaragoza (50297), y la que menos en Murcia (30030), Las Palmas de Gran Canaria (35016) y Palma (07040). La correlación entre esta medida de concentración y el tamaño demográfico es débil, 0,41, indicando, de nuevo, que tamaño y concentración no van parejos para un ámbito territorial dado.

La población próxima a diferentes radios, o densidad experimentada en terminología de Duranton y Puga (2020), ofrece algunos patrones interesantes, y muestra amplias diferencias, tanto entre ciudades como conforme variamos el radio de proximidad.

En las cortas distancias, 1,25 km, 2,50 km, 3,75 km y 7,50 km, es Barcelona (08019) la ciudad con mayor densidad experimentada. El residente promedio de Barcelona (08019) tiene casi 150 mil vecinos en un radio de 1,25 km, casi medio millón en un radio de 2,5 km, casi un millón en un radio de 3,75 km y alrededor de 2 millones en un radio de 7,5 km. Sin embargo a partir de esta distancia es sobrepasada por Madrid (28079), cuyo efecto tamaño acaba dominando en distancias más largas, 11,25 km. Valencia (46250), partiendo de una población próxima en un radio de 1,25 km similar a la de Madrid (28079), acaba con una población próxima en un radio de 11,25 km aproximadamente la mitad que la de Madrid (28079), simplemente porque la aglomeración de población en Valencia (46250) es mucho menor.

Algo similar sucede con Bilbao (48020), que partiendo de una población próxima en un radio de 1,25 km similar a las de Madrid (28079) o Valencia (46250), acaba con una población próxima en un radio de 11,25 km aproximadamente la mitad que la de Valencia (46250).

Las dos ciudades insulares, Las Palmas de Gran Canaria (35016) y Palma (07040) son las que menos ven crecer su población próxima conforme se incrementa el radio de proximidad, quizá porque la insularidad limita su crecimiento expansivo.

El efecto tamaño domina pues cuando el radio de proximidad aumenta. De hecho, si bien la correlación entre población próxima en un radio de 1,25 km y tamaño demográfico —volumen de población— es baja, tan solo de 0,46, esta correlación crece de forma monótona conforme aumentamos el radio de proximidad, siendo de 0,86 cuando el radio es de 7,50 km y de 0,93 cuando el radio es de 11,25 km.

Lo que las cifras promedio del cuadro 7.1 no muestran es la heterogeneidad dentro de las ciudades, que es mucho más visible mediante mapas. Los mapas 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 y 7.5 muestran la población de la *grid* con resolución de las celdas de 100 m × 100 m y la población próxima, a nivel de celda, con radios de 1,25 km, 2,50 km y 7,50 km para Madrid (28079), Barcelona (08019), Málaga (29067), Las Palmas de Gran Canaria (35016) y Bilbao (48020), e ilustran algunas pautas generales, pero también una importante diversidad en el interior de las ciudades.

En las distancias cortas —un radio de 1,25 km— la población próxima define clústeres dentro de las ciudades en el entorno central, pero no necesariamente en el centro de la ciudad. Este es claramente el caso de Madrid (28079), Barcelona (08019) o, en menor medida, Las Palmas de Gran Canaria (35016). Se trata de barrios con interacciones más intensas que en el resto de la ciudad. A esta distancia las interconexiones son mucho menores en la periferia, que se muestra menos conectada con el resto.

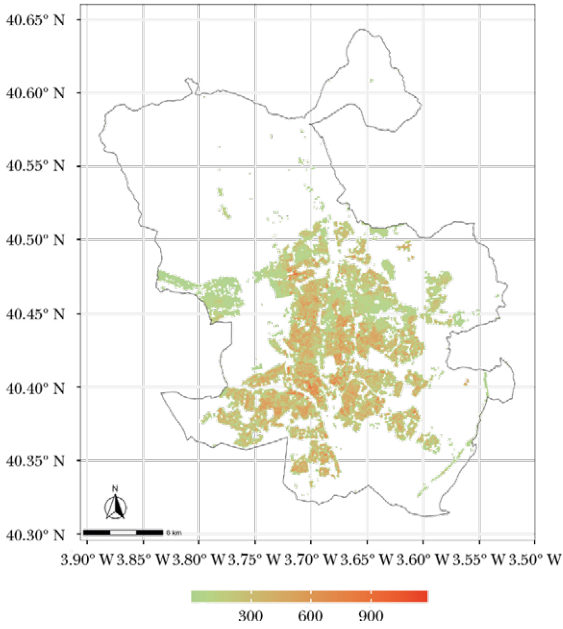
CUADRO 7.1: Densidad de población y población próxima. Ciudades seleccionadas

Código	Municipio		Superficie (km²)	Densidad de población:		Población próxima en un radio de ... km del residente promedio					
	Nombre	Población		Estándar (hab./km²)	Personal (hab./km²)	1,25 km	2,50 km	3,75 km	7,5 km	11,25 km	
28079	Madrid	3.277.451	605	5.421	36.606	90.048	306.356	632.175	1.930.676	3.147.173	
08019	Barcelona	1.627.559	99	16.361	46.672	141.164	483.608	936.842	2.014.796	2.670.876	
46250	València	788.842	139	5.660	36.421	95.533	298.580	556.247	1.124.430	1.412.947	
41091	Sevilla	684.340	142	4.829	27.479	60.750	181.637	338.141	750.266	990.583	
50297	Zaragoza	681.430	974	700	37.136	84.520	253.404	428.770	637.083	684.732	
29067	Málaga	578.063	396	1.461	30.210	60.896	172.035	280.762	492.276	607.434	
30030	Murcia	459.778	885	520	18.935	35.233	93.012	154.903	350.267	500.124	
07040	Palma	424.837	210	2.024	26.679	67.367	174.607	263.588	401.804	463.288	
35016	Palmas de Gran Canaria, Las	380.667	103	3.687	26.659	43.939	122.806	205.774	371.374	465.523	
48020	Bilbao	345.749	41	8.360	40.909	90.838	236.131	341.638	559.842	767.105	
	Total Ciudades	9.248.716	3.594	2.573	35.740	89.467	288.462	551.392	1.339.438	1.960.624	
	España	47.400.798	506.240	94	20.679						

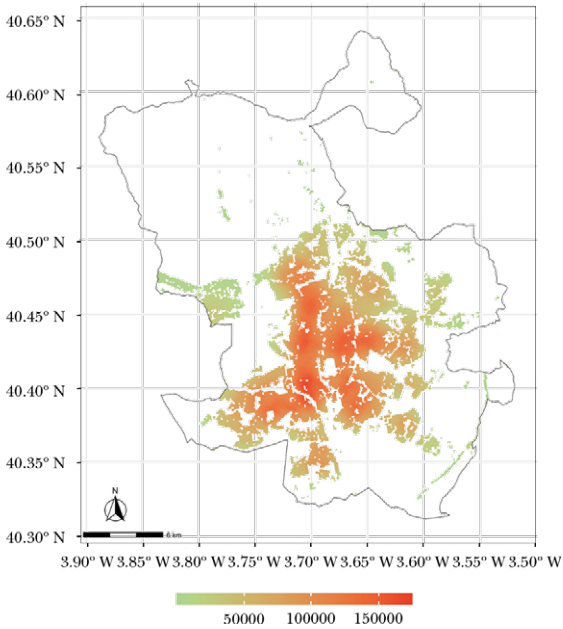
Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

MAPA 7.1: Grid de población 100 m × 100 m. Madrid

a) Población



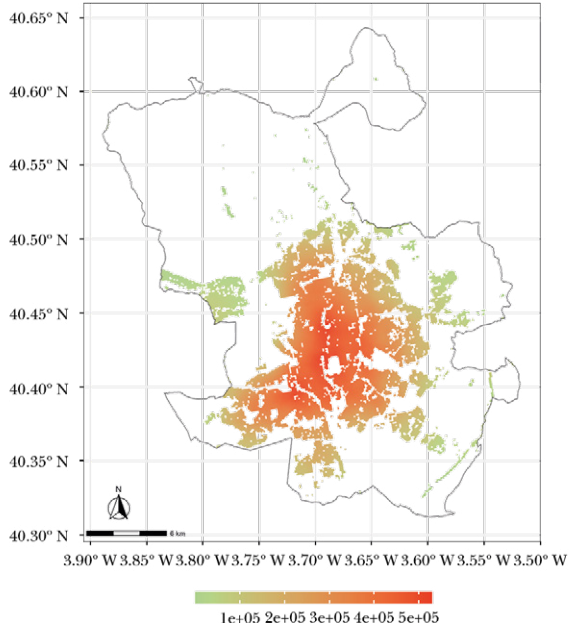
b) Población próxima en un radio de 1,25 km



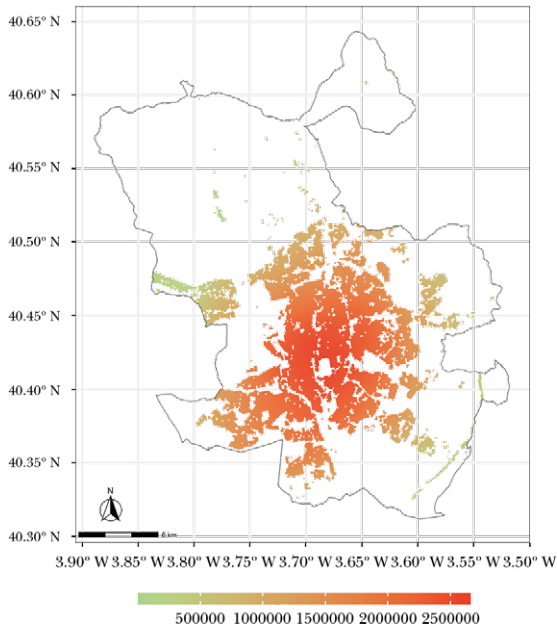
Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

MAPA 7.1 (cont.): Grid de población 100 m × 100 m. Madrid

c) Población próxima en un radio de 2,50 km



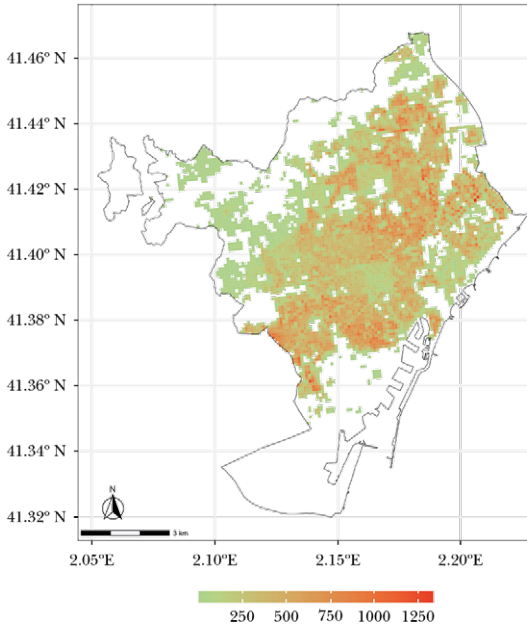
d) Población próxima en un radio de 7,50 km



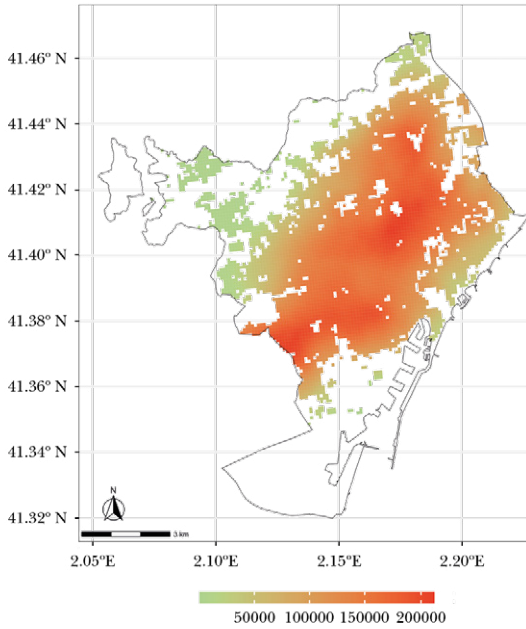
Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

MAPA 7.2: Grid de población 100 m × 100 m. Barcelona

a) Población



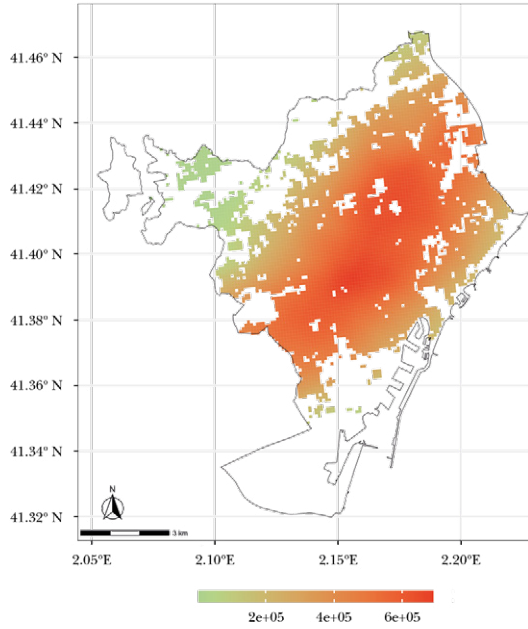
b) Población próxima en un radio de 1,25 km



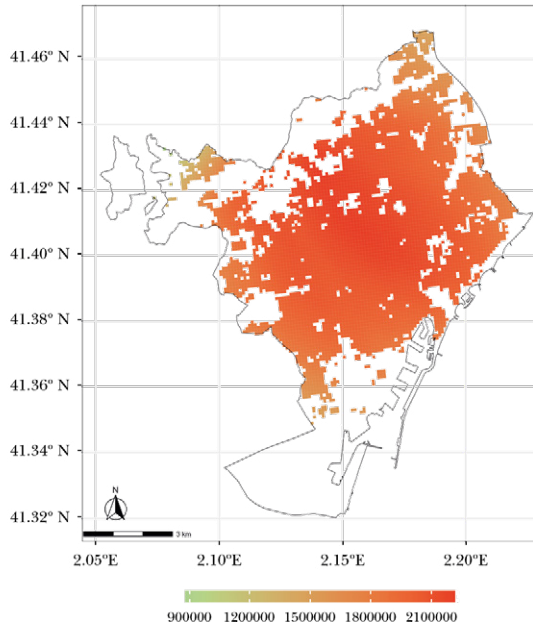
Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

MAPA 7.2 (cont.): Grid de población 100 m × 100 m. Barcelona

c) Población próxima en un radio de 2,50 km



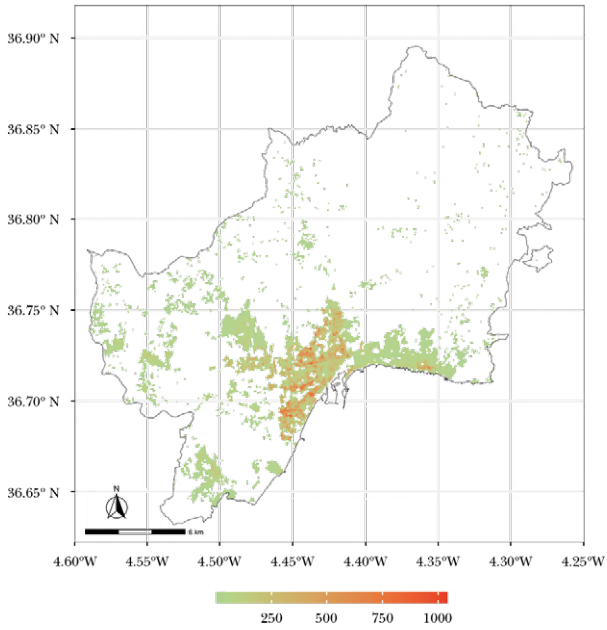
d) Población próxima en un radio de 7,50 km



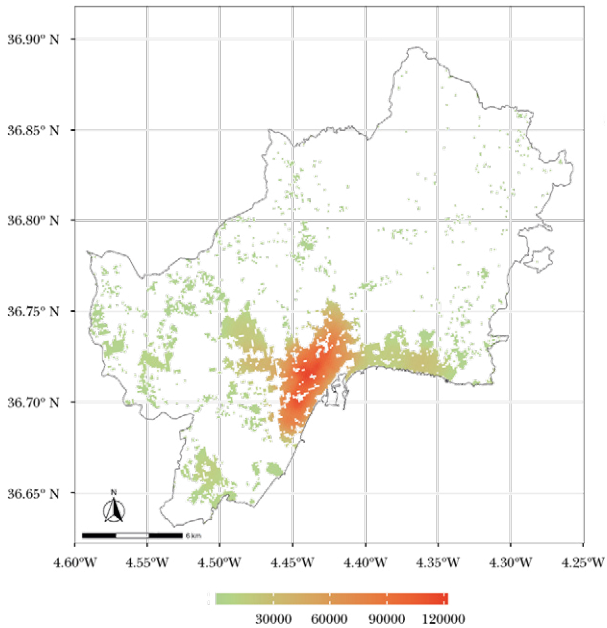
Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

MAPA 7.3: Grid de población 100 m × 100 m. Málaga

a) Población



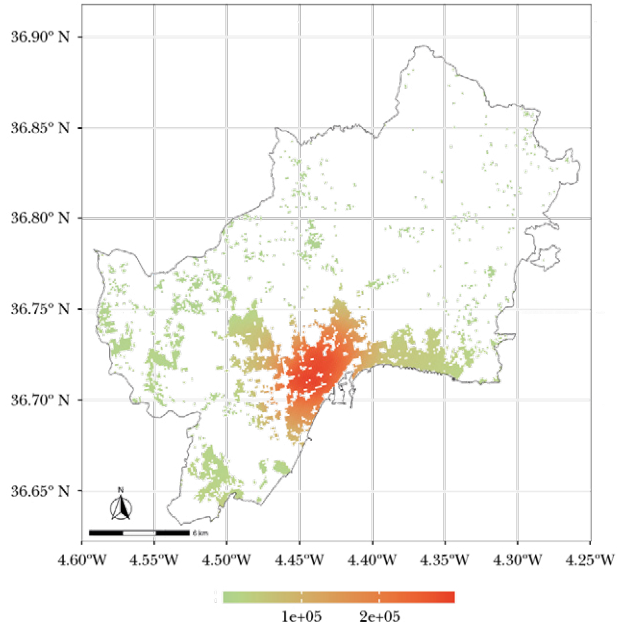
b) Población próxima en un radio de 1,25 km



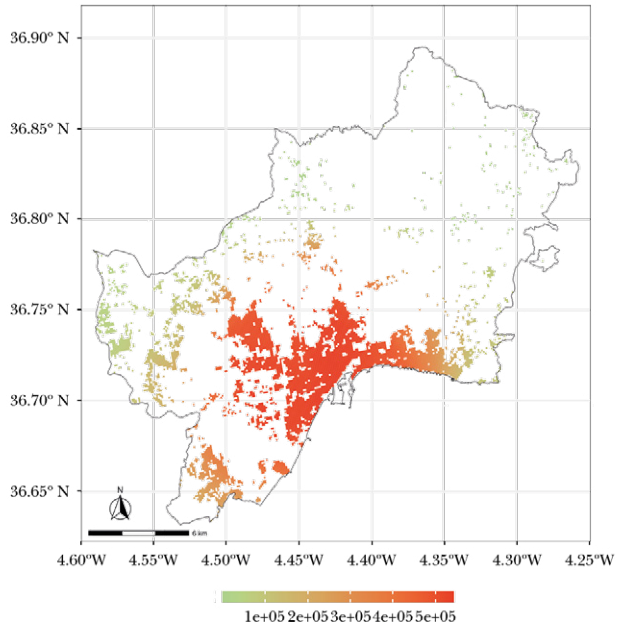
Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

MAPA 7.3 (cont.): Grid de población 100 m × 100 m. Málaga

c) Población próxima en un radio de 2,50 km



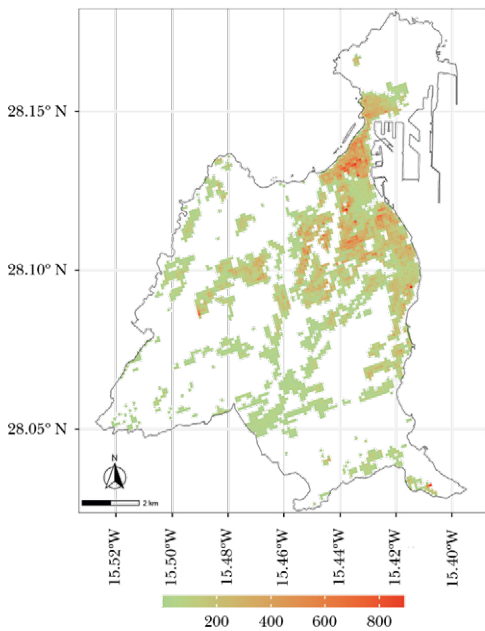
d) Población próxima en un radio de 7,50 km



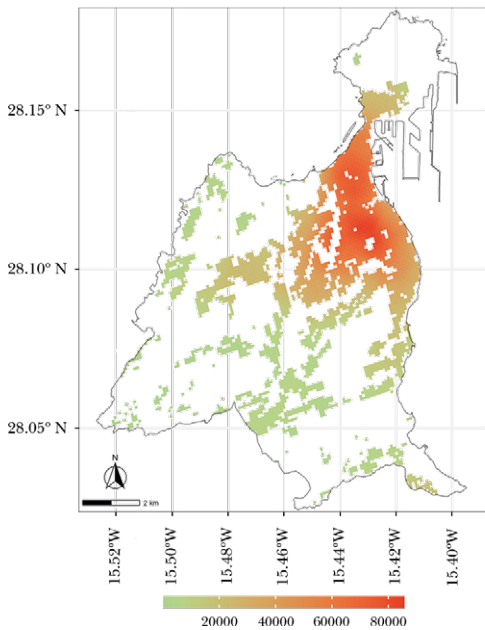
Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

MAPA 7.4: **Grid de población 100 m × 100 m. Las Palmas de Gran Canaria**

a) Población



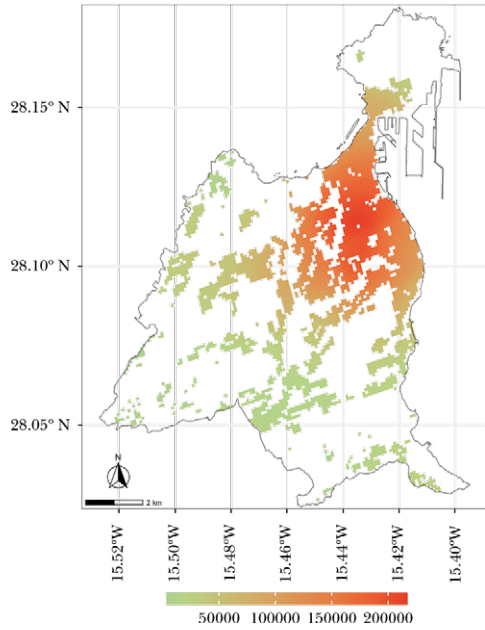
b) Población próxima en un radio de 1,25 km



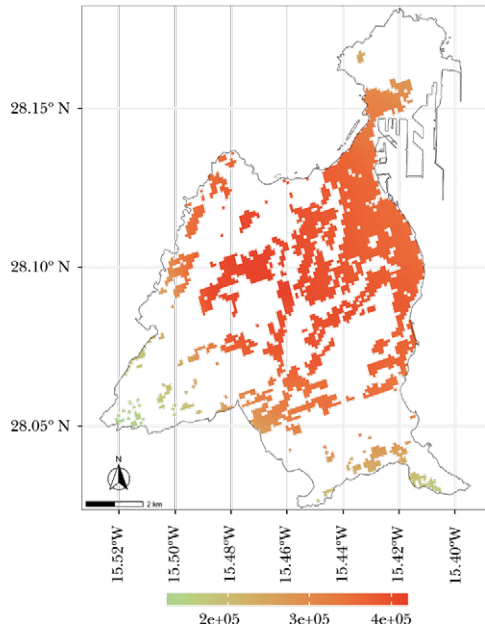
Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

MAPA 7.4 (cont.): Grid de población 100 m × 100 m. Las Palmas de Gran Canaria

c) Población próxima en un radio de 2,50 km



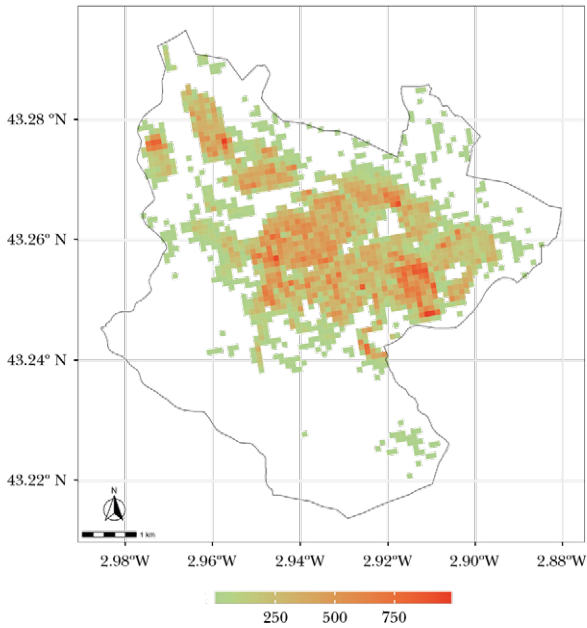
d) Población próxima en un radio de 7,50 km



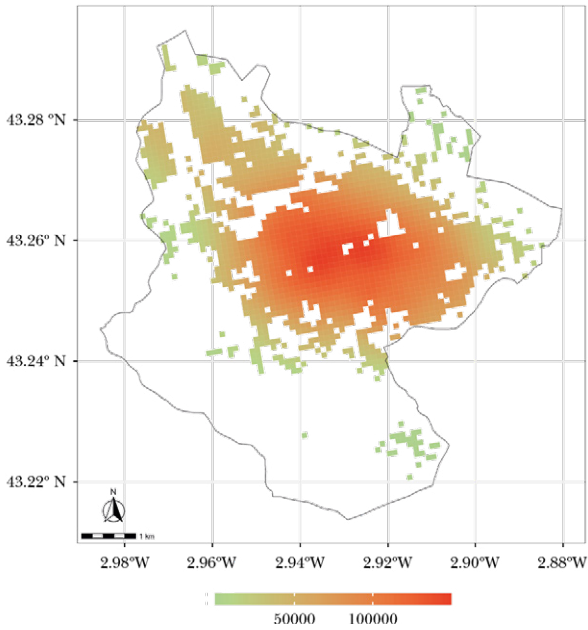
Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

MAPA 7.5: Grid de población 100 m × 100 m. Bilbao

a) Población



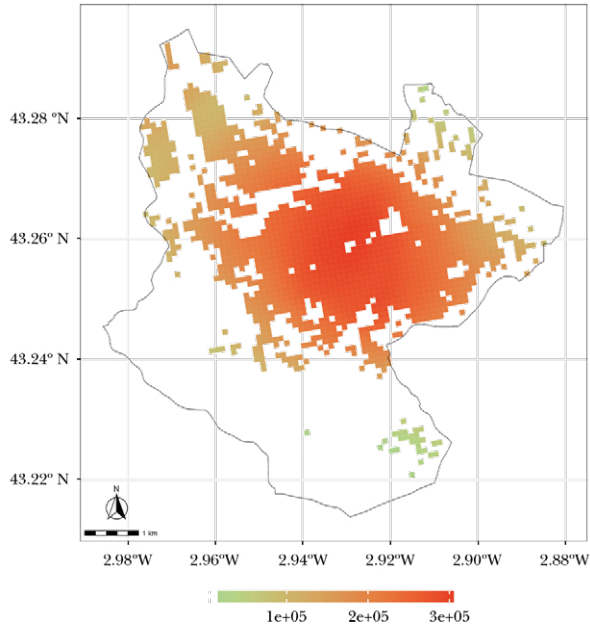
b) Población próxima en un radio de 1,25 km



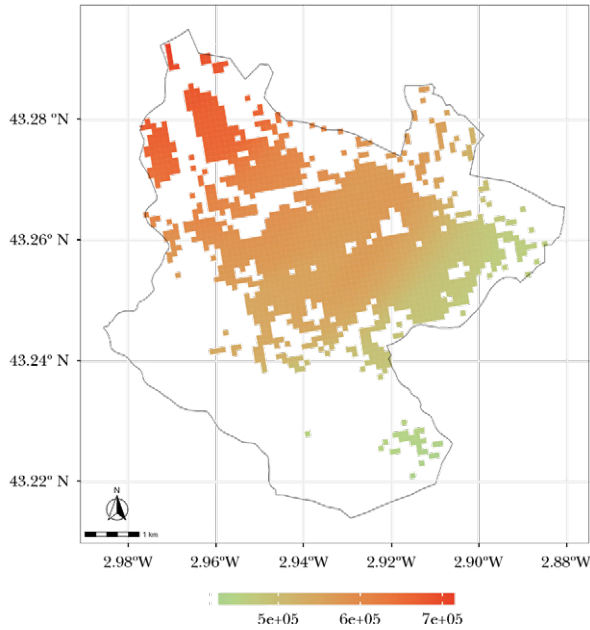
Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

MAPA 7.5 (cont.): Grid de población 100 m × 100 m. Bilbao

c) Población próxima en un radio de 2,50 km



d) Población próxima en un radio de 7,50 km



Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

Conforme aumentamos el radio de proximidad —un radio de 2,50 km— el mayor volumen de interacciones —población próxima— se desplaza hacia el centro de la ciudad. Esta es una característica común en todas las ciudades representadas en los mapas anteriores. Para un radio de proximidad bastante mayor —de 7,50 km—, superior a lo que sería razonable para los desplazamientos andando, la estructura de la ciudad y sus alrededores comienza a tomar protagonismo y aparecen comportamientos claramente diferenciados⁹². Así, por ejemplo, en Bilbao (48020), Las Palmas de Gran Canaria (35016) y, en menor medida, en Barcelona (08019), los mayores volúmenes de población próxima se desplazan desde el centro de la ciudad hacia la periferia en una determinada dirección, como consecuencia de la vecindad con población cercana de otros municipios⁹³, y también por la imposibilidad de captar población en dirección al mar, como es el caso de Las Palmas de Gran Canaria (35016) o Barcelona (08019). Por el contrario, Madrid (28079) o Málaga (29067), que también linda con el mar, se muestran como ciudades más monocéntricas en este sentido.

Estos resultados muestran no solo cómo la densidad varía en el interior de las ciudades, sino también como se ve afectada conforme cambiamos el entorno de referencia. Así pues, la granularidad de nuestra información hace más compleja la medición de la densidad en el ámbito urbano, pero al mismo tiempo la hace mucho más interesante y con más potencialidades para el análisis.

7.3. Movilidad activa: accesibilidad y rendimiento de los desplazamientos a pie y en bicicleta

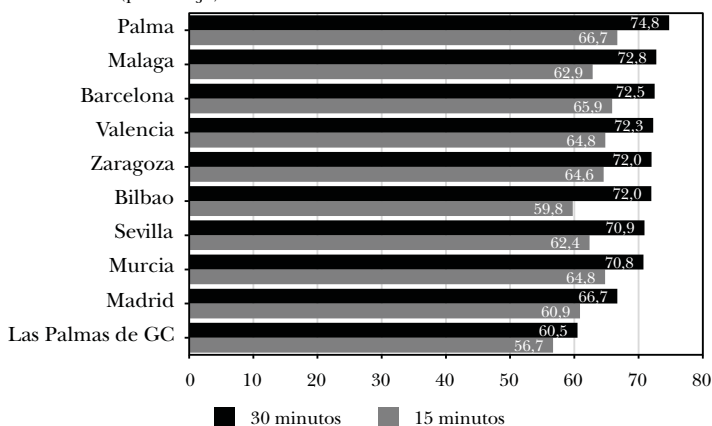
Una vez examinada la población próxima podemos medir el rendimiento de los desplazamientos a pie y en bicicleta en umbrales dados de tiempo.

⁹² Obsérvese que, aunque la escala de colores se mantiene en los mapas 7.1 a 7.5, la escala numérica a la que hacen referencia los colores entre los diferentes mapas, (a), (b), (c) y (d), no.

⁹³ Aunque los resultados hacen referencia a los límites administrativos de las ciudades, los cálculos sobre población próxima y accesible toman en consideración la población completa de la *grid*, y en consecuencia trascienden los lindes municipales.

El gráfico 7.1 muestra el rendimiento de los desplazamientos a pie para umbrales de tiempo de 15 y 30 minutos para nuestras ciudades. Recordemos que los desplazamientos a pie de 15 minutos se comparan frente a la población próxima en un entorno de 1,25 km, mientras que los desplazamientos de 30 minutos se comparan frente a la población próxima en un entorno de 2,5 km.

GRÁFICO 7.1: Rendimiento de los desplazamientos a pie en 15 y 30 minutos
(porcentaje)



Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

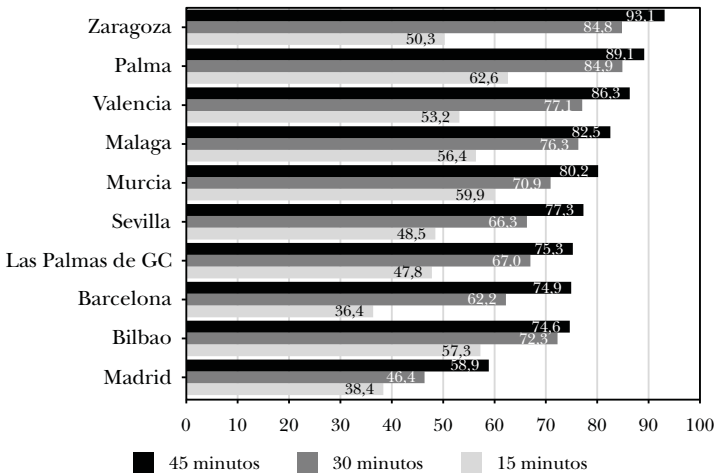
Para el agregado de las 10 ciudades consideradas el rendimiento es del 70 % para los desplazamientos a pie de 30 minutos y del 63 % para los desplazamientos de 15 minutos.

Vale la pena señalar que el rendimiento aumenta con el umbral de tiempo considerado en todos los casos y que son razonablemente elevados, oscilando entre el 61 % y el 75 % para los desplazamientos a pie de 30 minutos, y entre el 57 % y el 67 % para los desplazamientos de 15 minutos. La ciudad con mayor rendimiento es Palma (07040), y la que presenta menor rendimiento Las Palmas de Gran Canaria (35016), que al mismo tiempo es la que menor diferencia de rendimiento presenta al variar el umbral de tiempo de 15 a 30 minutos. La mayor diferencia en rendimiento se observa para Bilbao (48020), 12 puntos porcentuales⁹⁴.

⁹⁴ En general nuestros resultados muestran un mejor rendimiento que los obtenidos por Poelman, Dijkstra y Ackermans (2020b) para un conjunto amplio de ciudades

El gráfico 7.2, por su parte, muestra el rendimiento de los desplazamientos en bicicleta para umbrales de tiempo de 15, 30 y 45 minutos. Recordemos que los desplazamientos en bicicleta de 15 minutos se comparan frente a la población próxima en un entorno de 3,75 km, los de 30 minutos frente a la población próxima en un entorno de 7,5 km y los de 45 minutos frente a la población próxima en un entorno de 11,25 km.

GRÁFICO 7.2: Rendimiento de los desplazamientos en bicicleta en 15, 30 y 45 minutos
(porcentaje)



Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

Para el agregado de las 10 ciudades consideradas el rendimiento es del 45 % para los desplazamientos de 15 minutos, del 63 % para los desplazamientos de 30 minutos y del 73 % para los de 45 minutos. Así pues, el rendimiento de los desplazamientos en bicicleta parece ser inferior que el de los desplazamientos a pie para umbrales cortos, pero superior para umbrales mayores.

europeas. En sus resultados Barcelona (08019) también muestra mejor rendimiento que Madrid (28079) para los desplazamientos a pie de 30 minutos, de forma que para estas ciudades hay coincidencia en el *ranking*. Las diferencias se deben, casi con seguridad, a cuestiones metodológicas —fechado de la población y resolución de la *grid*— y de computación sobre la red viaria.

Al igual que sucede con los desplazamientos a pie, el rendimiento aumenta conforme se incrementa el umbral de tiempo, siendo relativamente bajos para desplazamientos en bicicleta de solo 15 minutos, y bastante elevado, sobre todo en algunas ciudades, para los desplazamientos de 45 minutos. Observamos aquí una mayor dispersión de resultados que para los desplazamientos a pie, tanto en lo que hace referencia a las ciudades consideradas, como en lo que hace referencia a los resultados cuando variamos los umbrales.

La ciudad con mayor rendimiento para los desplazamientos en bicicleta es Zaragoza (50297), sobre todo si nos fijamos en los umbrales de 30 y 45 minutos, y la ciudad con menor rendimiento es Madrid, sea cual sea el umbral de tiempo de desplazamiento en bicicleta considerado. En general, existe una diferencia importante en el rendimiento cuando pasamos de un umbral de 15 minutos a uno de 30 minutos, sobre todo en Barcelona (08019) o Zaragoza (50297). Las ciudades con mejor rendimiento son ciudades relativamente planas, como Zaragoza (50297), Palma (07040) o Valencia (46250), y en consecuencia muy adaptables para los desplazamientos en bicicleta⁹⁵.

Si comparamos los resultados para ambos modos de transporte encontramos una relación muy débil para el umbral de tiempo de desplazamiento de 15 minutos —con un coeficiente de correlación de solo 0,19—, y algo más fuerte para el umbral de tiempo de desplazamiento de 30 minutos —con un coeficiente de correlación de 0,52—. No obstante, Palma (0704) se muestra como una ciudad con buen rendimiento en los dos casos considerados, mientras que Madrid (28079) presenta el comportamiento opuesto.

⁹⁵ Al contrario de lo que sucede con los desplazamientos a pie, en este caso nuestros resultados muestran un menor rendimiento que los obtenidos por Poelman, Dijkstra y Ackermans (2020b) en Barcelona (08019) y Madrid (28079) para los desplazamientos en bicicleta de 30 minutos. Las diferencias se deben, casi con seguridad, a cuestiones metodológicas —fechado de la población y resolución de la *grid*— y de computación sobre la red viaria y ciclista. Resulta interesante comprobar, no obstante, que la ordenación se mantiene en ambos casos, tanto para los desplazamientos a pie como en bicicleta, es decir, de acuerdo con los resultados de Poelman, Dijkstra y Ackermans (2020b), Barcelona (08019) presenta mejor rendimiento que Madrid (28079), en ambos modos de transporte.

7.4. Conclusiones

Adaptar el enfoque conceptual del ITF (2019a, 2019b) a problemas de accesibilidad urbana es directo si disponemos de información con la suficiente resolución. Este capítulo realiza una aportación en esa dirección mostrando resultados sobre accesibilidad urbana de los modos de transporte activos, los desplazamientos a pie y en bicicleta. Ello requiere, al igual que en el ejercicio de la accesibilidad a espacios verdes urbanos, de una distribución muy granular de la población dentro de la ciudad, que en nuestro caso viene dada por la *grid* con resolución de celdas de $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ estimada en el capítulo 6.

Los indicadores propuestos calculan, como paso intermedio, la población próxima en un determinado radio, lo que algunos autores han definido como la densidad experimentada (Duranton y Puga 2020), y que permite examinar cómo varía localmente la densidad dentro de una ciudad. Aunque el capítulo ofrece resultados a nivel de ciudad, la resolución de los cálculos permitiría obtenerlos para barrios o distritos urbanos, además de poder visualizarlos en mapas.

Una vez estimada la población próxima y la población accesible por un determinado modo de transporte en un tiempo dado calculamos el rendimiento del modo de transporte como la ratio entre accesibilidad y proximidad. Los resultados indican que, para un tiempo de viaje comparable —30 minutos—, el rendimiento de los desplazamientos en bicicleta suele ser superior a los desplazamientos a pie⁹⁶, al tiempo que presentan mayor variabilidad entre ciudades. En cualquier caso, excepto para los desplazamientos de corta distancia en bicicleta, el rendimiento es bastante elevado en la mayoría de los casos, y las diferencias se deben tanto a la red viaria y ciclista como a la propia geografía de las ciudades.

Queda fuera del ámbito de este estudio la incorporación de la accesibilidad en transporte público, que necesita parcialmente de la accesibilidad a pie o en bicicleta, pero que tiene otros requerimientos técnicos de cálculo, además de fuentes de información de arduo tratamiento y homogeneización.

⁹⁶ La única excepción a este respecto la presenta Madrid (28079).

8. Resumen y conclusiones: usos potenciales

Una localización precisa de la población sobre el territorio es esencial para muchos aspectos, desde cuestiones relacionadas con la accesibilidad a los servicios públicos y privados hasta análisis de riesgos como consecuencia de desastres naturales. El objetivo esencial de esta monografía es ofrecer una capa de población residente mucho más granular de lo que existe en las estadísticas oficiales de población, e ilustrar la potencialidad de esta información.

Avances metodológicos

En tanto que el objetivo principal de la monografía es la elaboración una *grid* de población española con una resolución de $100\text{ m} \times 100\text{ m}$, el resultado supone un avance metodológico relevante en el ámbito de la economía urbana. El punto de partida para el ejercicio de desagregación no es la población por lindes administrativos: secciones censales o municipios, sino la *grid* de población del censo 2021, con resolución de $1\text{ km} \times 1\text{ km}$, que ha publicado el INE por mandato de Eurostat, GEOSTAT2021. Disponer de estadísticas demográficas en un formato que no dependa de los límites administrativos tiene innumerables ventajas, ya que no hay alteraciones de lindes, ni aparición o desaparición de nuevas unidades a lo largo del tiempo, además de que los contornos que contienen población son de tamaño idéntico a lo largo del territorio. En el otro lado del espectro, son estadísticas algo más complejas de manejar si luego queremos obtener resultados por lindes administrativos, ya que estos están ligados a los centros de decisión político y administrativo.

El proceso de desagregación espacial de la población toma como base la *grid* censal de población 2021 con resolución $1\text{ km} \times 1\text{ km}$, pero la calidad del resultado final depende, en gran medida, de la

fineza y resolución de la información auxiliar utilizada en el proceso de desagregación espacial de la población. En particular, cobra especial relevancia el Sistema de Información de Ocupación del Suelo Español de Alta Resolución (SIOSE AR).

Esta base informativa mejora sustancialmente el SIOSE tradicional del que disponíamos hasta ahora, y llega a un nivel de detalle sin precedentes. Como se indica en el capítulo 1, SIOSE AR es básicamente el Catastro temático, de forma que sobre la base de la parcela catastral se ha añadido información sobre coberturas y usos del suelo. El SIOSE AR es una muestra de la resolución con la que disponemos actualmente de información geográfica de calidad, directamente manipulable en un ordenador doméstico, y que puede combinarse con información sociodemográfica para aumentar la resolución de esta.

La información demográfica de partida, la *grid* censal 2021, que presenta la distribución espacial de la población no es muy conocida a pesar de sus importantes implicaciones en la planificación urbanística y territorial. Los resultados del análisis realizado en el capítulo 2 confirman las tendencias que ya conocemos a partir de datos municipales, de sección censal o a partir del nomenclátor de población, refuerzan la visión que tenemos de la elevada concentración de la población y las disparidades regionales en este contexto, y permiten experimentar con medidas alternativas de densidad, como concepto local que varía en el interior de las ciudades.

El eje central de la monografía corresponde al capítulo 5 donde se ofrece, tras una breve revisión de la literatura, el detalle metodológico del proceso de desagregación de la *grid* censal 2021, con resolución de 1km x 1km, a una *grid* con resolución de 100 m x 100 m, plenamente consistente con la información original. Ello quiere decir que, puesto que ambas *grids* siguen las directrices de INSPIRE (2023a), la de mayor resolución agrega a la de menor resolución, y en consecuencia la población verifica esta restricción de agregación celda a celda. Nuestra desagregación toma en consideración los dos elementos fundamentales que la literatura ha identificado como esenciales en este contexto, una clasificación por usos de los edificios y su altura. No disponemos, sin embargo, de información a esta resolución de las viviendas vacías, siendo este el siguiente elemento a considerar en el futuro. Por otra parte, una característica

CUADRO 8.1: Distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las celdas en la *grid* estimada de 100 m × 100 m

Intervalos	Celdas			Población		
	Número	Porcentaje	Porcentaje acumulado	Población	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Hasta 5	607.838	45,90	45,90	1.332.203	2,81	2,81
(5, 10]	166.174	12,55	58,45	1.283.386	2,71	5,52
(10, 20]	155.761	11,76	70,22	2.307.210	4,87	10,39
(20, 50]	164.206	12,40	82,62	5.342.592	11,27	21,66
(50, 100]	97.996	7,40	90,02	7.037.731	14,85	36,50
(100, 200]	73.407	5,54	95,56	10.386.942	21,91	58,42
(200, 300]	29.540	2,23	97,79	7.218.331	15,23	73,65
(300, 500]	23.012	1,74	99,53	8.728.789	18,41	92,06
(500, 1.000]	6.167	0,47	100,00	3.712.676	7,83	99,89
Más de 1.000	46	0,00	100,00	50.938	0,11	100,00
Total	1.324.147	100,00		47.400.798	100,00	

Fuente: SIOSE (2022a), INE (2024) y elaboración propia.

poco común de nuestro proceso de desagregación es que las cifras desagregadas son enteros, lo que reduce la dispersión de la población sobre el territorio.

Como resultado de este proceso pasamos de disponer de una distribución de la población sobre 115.410 celdas, que son las celdas habitadas en la *grid* del INE con resolución de 1 km × 1 km, a una distribución de la población sobre 1.324.147 celdas con resolución de 100 m × 100 m, que son el número de celdas estimadas que contienen población.

La concentración de la población sobre el territorio, medida a esta escala, es enorme. El 20 % de las celdas —265.832— albergan 1 solo residente y un 10 % de las celdas —132.467— tienen solo 2 habitantes. Sin embargo, en ambos casos la población es solo el 0,6 % del total. En el otro extremo, un 4 % de celdas entre 200 y 500 habitantes albergan un tercio del total de población —33,6 %— y un 6 % de celdas entre 100 y 200 habitantes albergan algo más de la quinta parte de la población —22,9 %—. Así pues, el 10 % de las celdas llega a concentrar más de la mitad de la población —55,6 %—. El cuadro 8.1 ofrece la distribución de celdas por tamaños y la población contenida en ellas, y permite observar la elevada concentración a esta escala. Casi la mitad de las celdas

—45,9%— no supera los 5 habitantes, y solo el 0,5 % de las mismas supera los 500 residentes⁹⁷.

Aplicaciones relevantes

Además de la desagregación espacial de la *grid* de población, que se encuentra desarrollada extensamente en el capítulo 5 de la monografía, ofrecemos, además, una serie de aplicaciones con la intención de mostrar la potencialidad de este tipo de estadísticas y los métodos de análisis asociados a ellos. Todas estas aplicaciones son susceptibles de profundización, ya que, en gran medida, tienen un carácter ilustrativo.

Los capítulos 3 y 4 ofrecen dos aplicaciones de la *grid* censal con resolución de 1 km × 1 km, y en ambos casos la cobertura es nacional.

El capítulo 3 implementa la clasificación del grado de urbanización, tanto a nivel de *grid* como a nivel de municipio, utilizando la metodología de la Comisión Europea *et al.* (2021). Esta metodología está actualmente estandarizada a nivel europeo para poder ofrecer resultados comparables, tanto sobre el mundo urbano como sobre el mundo rural, en un contexto internacional, y terminará siendo implementada en los institutos nacionales de estadística de los diferentes países europeos. Según los resultados obtenidos directamente de GEOSTAT2021, el 52 % de la población española reside en centros urbanos y un 31 % adicional en agrupaciones urbanas, por lo que en sentido amplio el 83 % de la población es urbana, frente a un 17 % que es clasificada como rural. Cuando transferimos estos resultados, obtenidos inicialmente a nivel de celda, a los municipios, encontramos 268 municipios urbanos, solo el 3,3 % del total pero que albergan el 56 % de la población residente, y 1 106 localidades y áreas semidensas, el 13,6 % del total, que acogen al 31 % de la población. El resto, 6 757 municipios, el 83,1 %, son identificados como áreas rurales, albergando solamente el 13 % de la población. Para cualquier partición

⁹⁷ Una comparación de nuestra estimación a nivel nacional con la del conjunto de validación para Madrid a esta escala, celdas de 100 m × 100 m, —cuadro A.2.2— muestra todavía una mayor concentración de la población en esta comunidad autónoma o, si se quiere ver de otra forma, una mayor dispersión a nivel nacional de la que se observa en Madrid.

geográfica que usemos, la población urbana, en sentido amplio, abarca alrededor del 85 % del total, y se concentra en un territorio muy reducido, mientras que la población rural representa el 15 % restante, pero ocupa la mayor parte del territorio.

El capítulo 4 representa un intento de medir el desempeño de la red de carreteras tratando de dar respuesta a una pregunta aparentemente sencilla: *¿Puedo llegar a todos los destinos cercanos, en un radio de 120km, con un tiempo prefijado, de 90 minutos, utilizando como modo de transporte el coche privado?* Los resultados tentativos del capítulo 4 indican que, para el residente promedio, el 76 % de la población que está en un radio de 120 km es accesible en 90 minutos de tiempo de viaje por carretera en vehículo privado, o visto desde otro punto de vista, la respuesta a la pregunta formulada es sí para el 76 % de la población. Sin embargo, como es habitual, existen amplias disparidades regionales. Se observa, además, una correlación positiva entre la concentración de la población y el indicador de accesibilidad, si bien todo indica que la orografía juega un papel importante en esta forma de medir el desempeño de la red de transportes por carretera.

Una vez realizada la desagregación de la *grid* de población de 1 km × 1 km a una con mayor resolución, 100 m × 100 m, los dos capítulos finales, el 6 y el 7, ofrecen dos aplicaciones ilustrativas de la misma. Si la *grid* original, con resolución de 1 km × 1 km es adecuada para análisis a nivel nacional, la *grid* estimada es especialmente útil en estudios urbanos o de carácter local. Con esta resolución los cálculos a nivel nacional son inviables desde el punto de vista computacional, por lo que las aplicaciones en estos dos últimos capítulos solo consideran los 10 municipios más poblados según el censo 2021.

El capítulo 6 ofrece un ejemplo de accesibilidad a las áreas verdes urbanas. Esencialmente da respuesta a una pregunta sencilla: *¿A cuánto espacio verde pueden acceder los residentes de una ciudad dando un paseo a pie de 10 minutos?* Este tipo de indicadores son complementarios de los más tradicionales basados en el promedio de superficie verde urbana por habitante y la proporción de superficie verde del término municipal. Al margen de que ofrecen una visión diferente de la accesibilidad a espacios verdes urbanos, tienen la ventaja de poder examinar la accesibilidad dentro de la ciudad,

dada la resolución con la que se efectúan los cálculos, pudiendo determinar la población sin acceso a espacios verdes urbanos en un umbral de tiempo fijado.

Finalmente, el capítulo 7 adapta el marco de movilidad introducido en el capítulo 4 para los modos de transporte activos, es decir, para los desplazamientos a pie y en bicicleta, que son apropiados en un contexto urbano. Ello nos permite observar cómo, por ejemplo, los desplazamientos en bicicleta presentan un mayor rendimiento que los desplazamientos a pie para el mismo umbral de tiempo de viaje, en el sentido de que proporcionan mayor acceso a la población próxima dado un supuesto sobre la velocidad de desplazamientos a pie y en bicicleta y unos umbrales prefijados. Un aspecto importante de nuestros cálculos es la resolución con la que se efectúan, pues, aunque los resultados se ofrecen para ciudades, las estimaciones se realizan a nivel de celda, y pueden ser agregados de forma flexible para las áreas en las que estemos interesados, lo que permite análisis en el interior de las ciudades, por barrios o distritos.

Implicaciones prácticas de los resultados

Los dos ejemplos de aplicaciones prácticas de la *grid* de población de 100 m × 100 m simplemente tratan de ilustrar la potencialidad de la información generada. Otros usos, todos ellos relacionados con la disponibilidad de una distribución espacial de la población muy granular, son posibles. Así, por ejemplo, podemos utilizar los datos producidos tanto para análisis de marketing —la población representa en última instancia consumidores potenciales— como para determinar la población afectada por determinados fenómenos —ruido o contaminación, por poner algunos ejemplos—. Por otra parte, nuestra información puede ser enriquecida en diversas direcciones, así sería posible desagregar, a nivel de celda de 100 m × 100 m, la población por grandes grupos de edad, por sexos o por otras características demográficas. Esta información, disponible a nivel de *grid* de 1 km × 1 km en el GISCO de Eurostat, con cierto grado de perturbación por cuestiones de confidencialidad, debería estar disponible por parte del INE en un futuro cercano, aunque quizá no inmediato, y podría ser utilizada para desagregarla a una *grid* de 100 m × 100 m con métodos

similares a los expuestos en este trabajo. En consecuencia, sería factible pensar en la disponibilidad de una información demográfica comparable a la que existe actualmente para los municipios o las secciones censales con este formato y la resolución alcanzada en este trabajo.

Naturalmente los ejemplos de uso utilizados en este trabajo no están exentos de limitaciones. Vale la pena señalar que se trata de aplicaciones que tratan de ilustrar la potencialidad de este tipo de estadísticas, pero cada uno de ellos podría constituir una investigación es si misma. En particular el ejercicio sobre el desempeño de la red de transporte por carretera debería ir acompañado de un análisis de la infraestructura física de la red de carreteras, su longitud por tipos y su impacto sobre el rendimiento. En la misma dirección los ejercicios sobre accesibilidad deberían incorporar el transporte público, una extensión que, sin embargo, está más allá de los límites de este trabajo, ya que requiere de un formato de datos específico y de otra tecnología en la medición de los tiempos de acceso.

Por otra parte, la disponibilidad de los denominados censos anuales, que el INE ha puesto en marcha tras el censo 2021, abre la posibilidad a disponer de *grids* de población con carácter anual. Aunque la resolución original de esta información serían celdas de 1 km \times 1 km, los procedimientos descritos en el capítulo 5 podrían aplicarse de forma rutinaria y semiautomática para desagregarla, de forma consistente, a celdas de 100 m \times 100 m.

APÉNDICES

A.1. El modelo de datos de SIOSE AR

CUADRO A.1.1: Coberturas de SIOSE AR

ID cobertura	Descripción	Etiqueta	Superficie	
			km ²	%
101	Edificación	EDF	3.110,82	0,6147 %
102	Zona verde artificial y arbolado urbano	ZAU	1.150,49	0,2273 %
104	Zonas pavimentadas o selladas	PAV	3.427,06	0,6772 %
105	Piscina	PSC	55,44	0,0110 %
106	Balsas y estanques	BET	295,22	0,0583 %
111	Otras construcciones	OCT	268,65	0,0531 %
112	Construcción deportiva	DEP	150,92	0,0298 %
121	Suelo no edificado	SNE	2.143,29	0,4235 %
122	Zona abierta	ZAB	1.117,16	0,2208 %
132	Zonas de extracción	ZEX	719,13	0,1421 %
133	Zonas de vertido	ZEV	98,75	0,0195 %
140	Red de transporte terrestre sin catalogar	RTT	1.294,41	0,2558 %
141	Autopistas y autovías	AUT	985,56	0,1947 %
142	Carreteras	CAR	2.518,60	0,4977 %
143	Vías urbanas	VIU	1.291,72	0,2552 %
144	Caminos y sendas	CAM	5.721,01	1,1305 %
145	Vías de ferrocarril	VFC	411,60	0,0813 %
200	Cultivos	CUL	701,99	0,1387 %
210	Cultivos herbáceos	CHE	121.215,19	23,9522 %
219	Cultivos herbáceos y prados	CHP	791,13	0,1563 %
222	Frutales cítricos	LFC	2.893,04	0,5717 %
223	Frutales no cítricos	LFN	6.782,88	1,3403 %
224	Frutos secos	LFS	6.770,80	1,3379 %
231	Viñedo	LVI	9.232,13	1,8243 %
232	Olivar	LOL	25.615,41	5,0616 %
241	Otros cultivos permanentes	LOP	42,27	0,0084 %
251	Viñedo-olivar	LVO	72,43	0,0143 %
252	Viñedo-frutal	LVF	27,80	0,0055 %
253	Frutos secos y viñedo	LFV	4,58	0,0009 %
254	Asociación cítricos-viñedo	LCV	0,24	0,0000 %
255	Frutos secos y olivar	LFL	27,74	0,0055 %
256	Olivar-frutal	LOF	27,19	0,0054 %
257	Asociación olivar-cítricos	LOC	6,33	0,0013 %
258	Asociación cítricos-frutales	LCF	18,69	0,0037 %

CUADRO A.1.1 (cont.): Coberturas de SIOSE AR

ID cobertura	Descripción	Etiqueta	Superficie	
			km ²	%
259	Asociación cítricos-frutales de cáscara	LCS	0,51	0,0001 %
260	Asociación frutales-frutales de cáscara	LFF	2,34	0,0005 %
280	Huerta	HUE	434,75	0,0859 %
290	Prados	PRD	50.255,89	9,9306 %
300	Pastizal	PST	15.112,06	2,9862 %
301	Pastizal-matorral	PMT	67.477,54	13,3336 %
302	Pasto arbolado	PPA	24.412,15	4,8239 %
310	Arbolado	ARB	15.955,83	3,1529 %
312	Frondosas caducifolias	FDC	26.140,33	5,1654 %
313	Frondosas perennifolias	FDP	36.343,66	7,1815 %
316	Coníferas	CNF	53.272,85	10,5268 %
317	Arbolado mixto	ARX	2,17	0,0004 %
320	Matorral	MTR	1.685,91	0,3331 %
330	Terrenos con escasa o nula vegetación	TEV	8.307,01	1,6415 %
331	Playas, dunas y arenales	PDA	223,15	0,0441 %
335	Glaciares y nieves permanentes	GNP		
351	Acantilados marinos	ACM	142,96	0,0282 %
352	Afloramientos rocosos y roquedo	ARR	53,27	0,0105 %
354	Coladas lávicas	COL	302,23	0,0597 %
400	Coberturas húmedas	HUM	76,36	0,0151 %
412	Turberas	HTU	18,87	0,0037 %
421	Marismas	HMA	311,76	0,0616 %
423	Salinas	HSA	103,03	0,0204 %
500	Coberturas de agua	AGU	1.132,57	0,2238 %
511	Cursos de agua	ACU	2.199,45	0,4346 %
513	Lagos y lagunas	ALG	230,73	0,0456 %
514	Embalses	AEM	2.620,62	0,5178 %
515	Canales	ACA	143,65	0,0284 %
522	Estuarios	AES	85,51	0,0169 %
523	Mares y océanos	AMO		
999	Desconocido	DSC	33,40	0,0066 %
Total			506.070,25	100,0000 %

Fuente: SIOSE (2022b) y elaboración propia.

De acuerdo con SIOSEAR2017 la superficie edificada, sea cual sea su uso, asciende a 3 110,82 km², mientras que las estimaciones a partir de la 1^a cobertura LiDAR arrojan un valor algo superior, 3 660,76 km² (Goerlich 2023b).

CUADRO A.1.2: Atributos de las coberturas de SIOSE AR

ID Atributos	Descripción	Etiqueta
27	nave	nv
28	en construcción	ec
29	en ruinas	er
31	secano	sc
32	regadío regado	rr
36	es forzado	fz
37	barbecho	ba
38	abandonado	ab
40	plantación	pl
41	formación de ribera	fr
43	desarbolado por fenómenos naturales	fn
44	función de cortafuegos	fc
45	cortas	ct
46	sobre agua	sa
47	zonas quemadas	zq
51	permanente	pm
52	estacional	et
53	esporádico	ep

Fuente: SIOSE (2022b)

CUADRO A.1.3: Usos de SIOSE AR

ID uso	Descripción	Etiqueta	HILUCS
1110	Producción agrícola comercial	PAGRI	111
1120	Infraestructuras agrícolas	PINAG	112
1200	Silvicultura	PSILV	120
1300	Industrias extractivas	PEXTR	130
1310	Extracción de materiales productores de energía	PEMPE	131
1320	Extracción de minerales metálicos	PEMIM	132
1330	Otras industrias extractivas (minas, canteras y graveras)	POTRA	133
1410	Acuicultura	PACUI	141
1420	Pesca	PESCA	142
1500	Otras actividades primarias	POTPR	150
1600	Dehesa	PDEHE	150
2000	Producción secundaria	IPROS	200
2110	Fabricación de productos textiles	ITEXT	211
2120	Fabricación de madera y productos basados en la madera	IMADE	212
2130	Fabricación de pasta papelera y de papel	IPAPE	213

CUADRO A.1.3 (cont.): Usos de SIOSE AR

ID uso	Descripción	Etiqueta	HILUCS
2140	Fabricación de coque y productos refinados de petróleo y de combustible nuclear	IPECN	214
2150	Fabricación de sustancias químicas, productos químicos y fibras artificiales	IQUIM	215
2160	Fabricación de metales básicos y metalurgia	IMETA	216
2170	Fabricación de productos minerales no metálicos	IMINE	217
2180	Fabricación de productos de caucho y de plástico	IPLAS	218
2190	Fabricación de otras materias primas	IOTMP	219
2210	Fabricación de maquinaria	IMAQE	221
2220	Fabricación de vehículos y medios de transporte	IVEHI	222
2230	Fabricación de otros productos finales pesados	IOTFP	223
2310	Elaboración de alimentos, bebidas y productos de tabaco	IALIM	231
2320	Elaboración de productos de ropa y cuero	IROPA	232
2330	Edición e impresión	IIMPR	233
2340	Fabricación de aparatos eléctricos y ópticos	IELEC	234
2350	Fabricación de otros productos finales ligeros	IOTPL	235
2400	Producción de energía	EENER	240
2410	Producción de energía nuclear	ENUCL	241
2420	Producción de energía basada en combustibles fósiles	ECFOS	242
2430	Producción de bioenergía	EBIOM	243
2441	Eólica	EEOLI	244
2442	Solar	ESOLA	244
2443	Hidroeléctrica	EHIDR	244
2444	Otras energías renovables	EOTRE	244
2500	Otros sectores de la industria	IOTRO	250
3110	Comercio mayorista y minorista, reparación de vehículos y de efectos personales y enseres domésticos	TCREP	311
3120	Servicios inmobiliarios	TINMO	312
3131	Alojamiento	TALOJ	313
3132	Restauración	TREST	313
3133	Camping	TCAMP	313
3140	Otros servicios comerciales	TOTCO	314
3210	Servicios financieros y de seguros	TFINA	321
3220	Servicios profesionales, técnicos y científicos	TPROF	322
3230	Servicios de información y comunicación	TTELE	323
3240	Servicios administrativos y de asistencia	TADAS	324
3250	Otros servicios financieros, profesionales y de información	TOTRO	325
3310	Servicios de administración pública, de defensa y de seguridad social	TPUBA	331

CUADRO A.1.3 (cont.): Usos de SIOSE AR

ID uso	Descripción	Etiqueta	HILUCS
3311	Penitenciario	TPENI	331
3320	Servicios de educación	TEDUC	332
3330	Servicios sanitarios y sociales	TSASO	333
3340	Servicios religiosos	TRELI	334
3350	Otros servicios a la comunidad	TOTSC	335
3351	Cementerio	TCEME	335
3410	Servicios culturales	TCULT	341
3421	Parque recreativo	TPREC	342
3422	Ocio	TOCIO	342
3431	Campo de golf	TGOLF	343
3432	Instalaciones deportivas	TDEPO	343
3441	Parque urbano	TPARQ	344
3442	Zonas recreativas	TZREC	344
3450	Otras actividades recreativas	TOTRE	345
3500	Otras actividades del sector terciario	TOTAT	350
4111	Vías	RTVIA	411
4112	Áreas de estacionamiento	RTAES	411
4113	Estaciones y áreas de servicio e infraestructuras	RTEST	411
4121	Vías de ferrocarril	RTVFC	412
4122	Infraestructuras ferroviarias	RTIFC	412
4130	Transporte aéreo	RTAIR	413
4140	Transporte marítimo y por vías navegables interiores	RTMAR	414
4150	Otras redes de transporte	ROTRP	415
4200	Servicios logísticos y de almacenamiento	LOGAL	420
4310	Servicios de distribución de energía eléctrica, gas y energía térmica	UELEC	431
4321	Depuradoras y potabilizadoras	UDEPU	432
4322	Desalinizadoras	UDESAL	432
4331	Vertederos y escombreras	UVERT	433
4332	Plantas de tratamiento	UPTRA	433
4340	Otros servicios básicos de abastecimiento y gestión de residuos	UOTSB	434
5000	Uso residencial	RESID	500
6100	Áreas transitorias	ATRAN	610
6200	Áreas abandonadas	AABAN	620
6310	Áreas naturales terrestres	ANATE	631
6320	Áreas de agua	ANAGU	632
6600	Uso desconocido	AUSDE	660

Fuente: SIOSE (2022b).

A.2. El conjunto de datos de validación

A.2.1. Grid de 1 km × 1 km

Cuando las 453.003 coordenadas con población de la Comunidad de Madrid se dejan caer sobre la *grid* de 1 km × 1 km ocupan 2536 celdas, un 29,9 % de superficie a esta escala. Las celdas oscilan entre 1 habitante —107 celdas— y algo más de 40.000 residentes —4 celdas superan esta cifra, teniendo la más poblada 43.303 habitantes—. El tamaño medio es de 2635 habitantes, muy por encima del tercer cuartil, que se sitúa en los 1828 residentes, sin embargo, el tamaño mediano es solo de 218 residentes, lo que indica la fuerte asimetría en la distribución de tamaños. El cuadro A.2.1 muestra la distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las celdas de 1 km × 1 km. Casi una cuarta parte de las celdas —el 22,6 %— alberga una población de 10 residentes o menos, mientras que solo 87 celdas —el 3,4 %— superan los 10.000 habitantes, aunque estas suponen el 36,4 % del total de población en la *grid*.

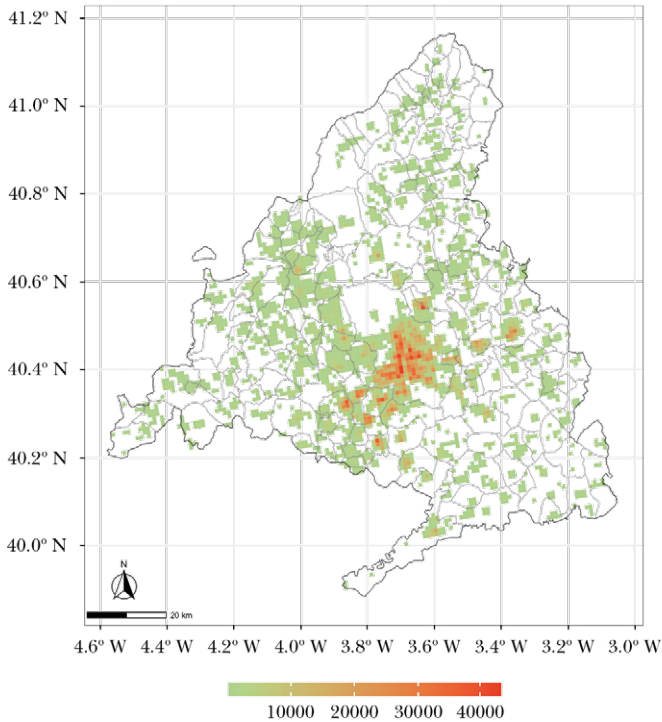
CUADRO A.2.1: **Distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las celdas en la *grid* de 1 km × 1 km del IEM. Madrid**

Intervalos	Celdas			Población		
	Número	Porcentaje	Porcentaje acumulado	Población	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Hasta 10	572	22,56	22,56	2.347	0,04	0,04
(10, 25]	200	7,89	30,44	3.393	0,05	0,09
(25, 50]	142	5,60	36,04	5.180	0,08	0,16
(50, 100]	145	5,72	41,76	10.647	0,16	0,32
(100, 200]	184	7,26	49,01	27.397	0,41	0,73
(200, 300]	128	5,05	54,06	32.233	0,48	1,22
(300, 500]	156	6,15	60,21	62.069	0,93	2,14
(500, 1.000]	221	8,71	68,93	161.689	2,42	4,56
(1.000, 5.000]	426	16,80	85,73	1.057.238	15,82	20,38
(5.000, 10.000]	144	5,68	91,40	1.030.842	15,43	35,81
(10.000, 20.000]	131	5,17	96,57	1.855.862	27,77	63,58
Más de 20.000	87	3,43	100,00	2.433.970	36,42	100,00
Total	2.536	100,00		6.682.867	100,00	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM.

La distribución espacial de la población a esta escala se muestra en el mapa A.2.1, donde observamos que las celdas más pobladas se sitúan en el centro de la capital y en algunos municipios de su área de influencia.

MAPA A.2.1: Grid de población 1 km × 1 km. Madrid



Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM.

A.2.2. Grid de 100 m × 100 m

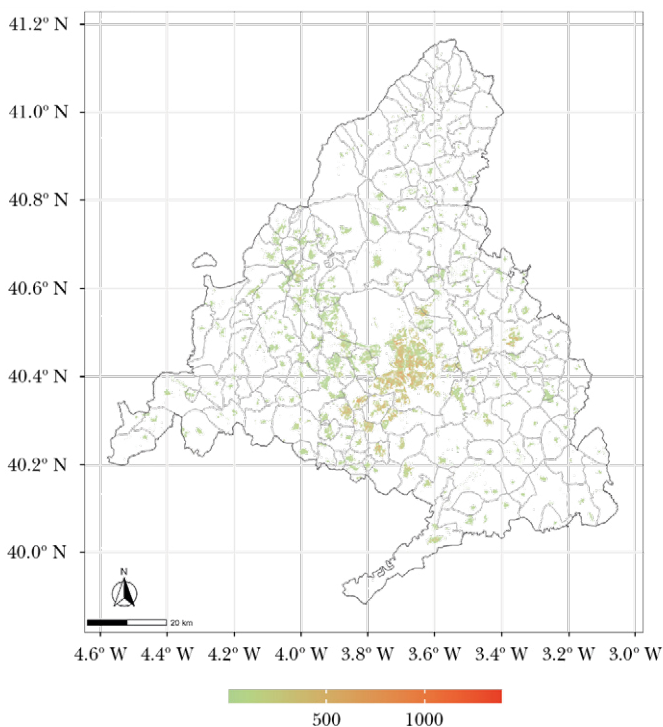
Si dejamos caer las coordenadas sobre la *grid* de 100m × 100m entonces obtenemos un total de 59.263 celdas habitadas. El tamaño medio es de 113 habitantes, pero el tamaño mediano es de solo 36 residentes. En este caso, al contrario de lo que sucede con las celdas de 1 km × 1 km, el tercer cuartil es superior a la media, 151 habitantes, lo que implica una menor asimetría en la distribución de tamaños. No obstante, dicha distribución sigue siendo fuertemente asimétrica, tal y como se observa en el cuadro A.2.2. El 40,8 % de las

CUADRO A.2.2: Distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las celdas en la *grid* de 100 m × 100 m del IEM. Madrid

Intervalos	Celdas			Población		
	Número	Porcentaje	Porcentaje acumulado	Población	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Hasta 5	9.977	16,84	16,84	29.536	0,44	0,44
(5, 10]	6.529	11,02	27,85	51.125	0,77	1,21
(10, 20]	7.658	12,92	40,77	113.996	1,71	2,91
(20, 50]	8.831	14,90	55,68	294.756	4,41	7,32
(50, 100]	7.341	12,39	68,06	534.238	7,99	15,32
(100, 200]	6.883	11,61	79,68	993.030	14,86	30,18
(200, 300]	4.258	7,18	86,86	1.056.706	15,81	45,99
(300, 500]	5.335	9,00	95,86	2.078.752	31,11	77,09
(500, 1.000]	2.425	4,09	99,96	1.501.555	22,47	99,56
Más de 1.000	26	0,04	100,00	29.173	0,44	100,00
Total	59.263	100,00		6.682.867	100,00	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM.

MAPA A.2.2: *Grid* de población 100 m × 100 m. Madrid



Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM.

celdas tiene una población que no excede los 20 habitantes, y el 68,1 % no excede de los 100 residentes. La distribución espacial de la población a escala de una hectárea se muestra en el mapa A.2.2.

A.2.3. Grid de 500 m × 500 m

Si dejamos caer las 453.003 coordenadas del padrón sobre la *grid* de 500 m × 500 m entonces obtenemos un total de 6051 celdas habitadas. Las celdas oscilan entre 1 habitante —231 celdas— y 14.763 residentes —53 celdas superan los 10.000 habitantes—. El tamaño medio es de 1 104 habitantes, ligeramente superior al tercer cuartil en la distribución de tamaños —1 067 habitantes—, pero el tamaño mediano es de solo 166 residentes. La distribución de frecuencias de los tamaños de celdas se muestra en el cuadro A.2.3, lo que permite observar su asimetría. El 20,7 % de las celdas no superan los 10 habitantes, y el 42,7 % no exceden los 100 residentes.

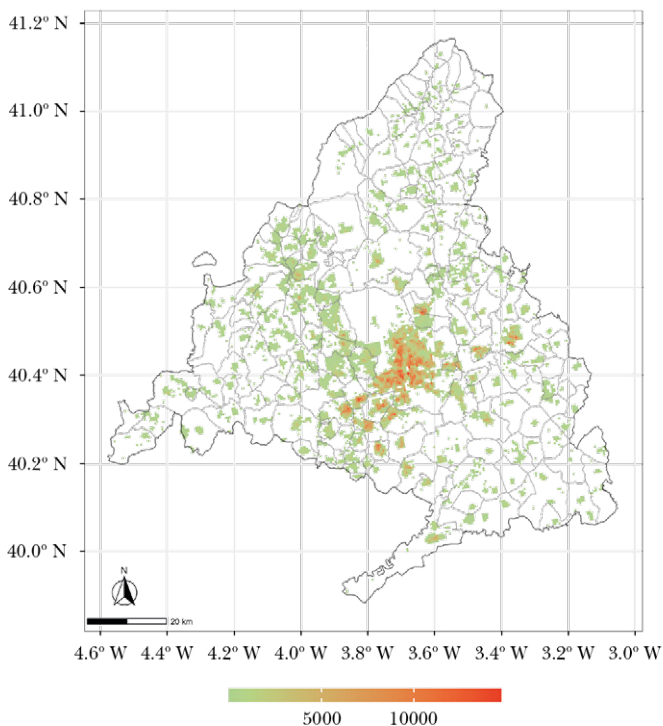
CUADRO A.2.3: Distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las celdas en la grid de 500 m × 500 m

Intervalos	Celdas			Población		
	Número	Porcentaje	Porcentaje acumulado	Población	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Hasta 10	1.255	20,74	20,74	5.220	0,08	0,08
(10, 25]	464	7,67	28,41	7.886	0,12	0,20
(25, 50]	374	6,18	34,59	13.868	0,21	0,40
(50, 100]	493	8,15	42,74	36.069	0,54	0,94
(100, 200]	623	10,30	53,03	90.958	1,36	2,30
(200, 300]	355	5,87	58,90	88.177	1,32	3,62
(300, 500]	401	6,63	65,53	154.241	2,31	5,93
(500, 1000]	532	8,79	74,32	389.026	5,82	11,75
(1000, 2000]	509	8,41	82,73	744.401	11,14	22,89
(2000, 5000]	633	10,46	93,19	2.039.949	30,53	53,42
(5000, 10000]	359	5,93	99,12	2.505.230	37,49	90,90
Más de 10000	53	0,88	100,00	607.842	9,10	100,00
Total	6.051	100,00		6.682.867	100,00	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid.

La distribución espacial de la población a esta escala se muestra en el mapa A.2.3.

MAPA A.2.3: **Grid de población 500 m × 500 m. Madrid**



Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid.

A.2.4. Grid de 200 m × 200 m

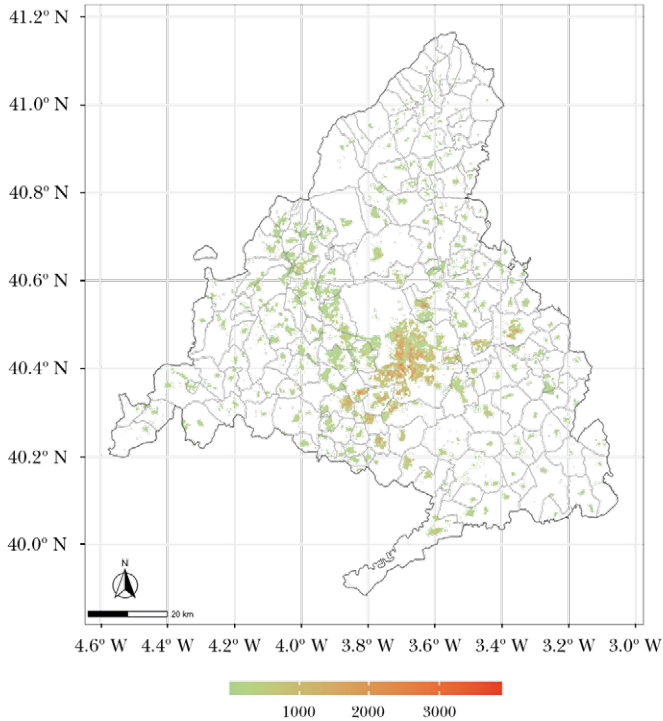
Si dejamos caer las 453.003 coordenadas del padrón sobre la *grid* de 200 m × 200 m entonces obtenemos un total de 21.627 celdas habitadas. Las celdas oscilan entre 1 habitante —686 celdas— y casi los 4000 residentes —la celda más poblada alberga 3901 habitantes, y tan solo 8 celdas superan los 3000 residentes—. El tamaño medio es de 309 habitantes, inferior al tercer cuartil en la distribución de tamaños —379 habitantes—, pero el tamaño mediano es de solo 78 residentes. La distribución de frecuencias de los tamaños de celdas se muestra en el cuadro A.2.4, lo que permite observar su asimetría. El 19,2 % de las celdas no superan los 10 habitantes, y algo más de la mitad —el 53,7 %— no exceden los 100 residentes.

CUADRO A.2.4: Distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las celdas en la *grid* de 200 m × 200 m

Intervalos	Celdas			Población		
	Número	Porcentaje	Porcentaje acumulado	Población	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Hasta 5	2.788	12,89	12,89	7.643	0,11	0,11
(5, 10]	1.374	6,35	19,24	10.756	0,16	0,28
(10, 20]	1.835	8,48	27,73	27.824	0,42	0,69
(20, 50]	3.323	15,37	43,09	112.700	1,69	2,38
(50, 100]	2.287	10,57	53,67	163.933	2,45	4,83
(100, 200]	2.273	10,51	64,18	331.083	4,95	9,79
(200, 300]	1.512	6,99	71,17	374.588	5,61	15,39
(300, 500]	1.788	8,27	79,44	699.854	10,47	25,86
(500, 1.000]	2.214	10,24	89,67	1.596.104	23,88	49,75
(1.000, 2.000]	1.954	9,04	98,71	2.713.858	40,61	90,36
Más de 2.000	279	1,29	100,00	644.524	9,64	100,00
Total	21.627	100,00		6.682.867	100,00	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid.

MAPA A.2.4: *Grid* de población 200 m × 200 m. Madrid



Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM.

La distribución espacial de la población a esta escala se muestra en el mapa A.2.4, relativamente parecido, visualmente, al mapa con resolución $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ —mapa A.2.2—.

A.2.5. Intersección espacial de la *grid* censal del INE con los lindes de la Comunidad de Madrid

Si efectuamos la intersección espacial de la *grid* censal del INE, GEOSTAT2021, con los lindes de la Comunidad de Madrid encontramos que tenemos 2996 celdas habitadas de un total de 8476, y que la población en dicha *grid* es de 6.756.464 residentes, unos 30 mil más que la población que da el censo para dicha comunidad (Goerlich 2024b, tabla 1). Así pues, el porcentaje de superficie habitada a esta escala para la Comunidad de Madrid es del 35,3%, sensiblemente superior a la estimación que obtenemos de las coordenadas de padrón del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid —un 29,9%—. A pesar de ello el coeficiente de correlación entre los tamaños de celdas de ambas *grids* es de 0,999.

CUADRO A.2.5: Distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las celdas en la *grid* de $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ del INE. Madrid

Intervalos	Celdas			Población		
	Número	Porcentaje	Porcentaje acumulado	Población	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Hasta 10	877	29,27	29,27	3.522	0,05	0,05
(10, 25]	255	8,51	37,78	4.156	0,06	0,11
(25, 50]	145	4,84	42,62	5.190	0,08	0,19
(50, 100]	183	6,11	48,73	13.192	0,20	0,39
(100, 200]	198	6,61	55,34	29.868	0,44	0,83
(200, 300]	122	4,07	59,41	29.707	0,44	1,27
(300, 500]	175	5,84	65,25	68.663	1,02	2,28
(500, 1.000]	228	7,61	72,86	164.897	2,44	4,72
(1.000, 5.000]	444	14,82	87,68	1.083.418	16,04	20,76
(5.000, 10.000]	146	4,87	92,56	1.023.259	15,14	35,90
(10.000, 20.000]	137	4,57	97,13	1.931.089	28,58	64,49
Más de 20.000	86	2,87	100,00	2.399.503	35,51	100,00
Total	2.996	100,00		6.756.464	100,00	

Fuente: INE (2024) y elaboración propia.

El cuadro A.2.5 muestra la distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las celdas de $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ de GEOSTAT2021,

que puede ser comparada con la distribución de frecuencias de la *grid* obtenida a partir del padrón del IEM —cuadro A.2.1—. Lo que estos cuadros indican es que las diferencias entre ambas distribuciones se producen en las celdas con menor número de residentes, de hecho, GEOSTAT2021 contiene 305 celdas más que la *grid* de padrón del IEM con población que no supera los 10 habitantes, y 55 celdas más con población entre los 11 y los 25 residentes. Las diferencias, pues, afectan a muchas celdas, pero a poca población.

Un estadístico sencillo para medir la similitud entre dos estructuras porcentuales es

$$\zeta = \frac{1}{2} \sum_j |S_{1j} - S_{2j}| \quad (\text{A.2.1})$$

donde S_j y S_2 representan las estructuras porcentuales bajo comparación y j indexa el número de elementos en dicha estructura. Este estadístico, ζ , varía entre 0, si ambas estructuras porcentuales son idénticas, y 1, en el caso de máxima discrepancia, cuando las estructuras porcentuales no se solapan.

El valor de ζ , expresado en términos porcentuales, $100 \times \zeta$, es de 7,7% para las distribuciones relativas de las celdas en los cuadros A.2.1 y A.2.5, pero solo de 1,2% cuando comparamos las estructuras porcentuales de las poblaciones por tamaños de celdas.

Resulta útil examinar la tabulación cruzada de celdas habitadas y vacías entre ambas distribuciones. Esta información se muestra en el cuadro A.2.6, tanto en términos absolutos como relativos. Solo un 8,1% de las celdas habitadas en la *grid* de padrón del IEM se encuentran vacías en GEOSTAT2021, es decir, 206 celdas que afectan a 2 674 personas. Por su parte, el 22,2% de las celdas habitadas en GEOSTAT2021 se encuentran vacías en la *grid* de padrón del IEM, es decir, 666 celdas que afectan a 32.893 personas. La *grid* censal del INE muestra, pues, una mayor dispersión que la *grid* padronal del IEM.

Una generalización del estadístico de similitud (A.2.1), y que introducimos en el capítulo 5 para medir la bondad de nuestros métodos de desagregación espacial, arroja un valor, expresado en términos porcentuales, de 1,4%. Un margen de error que deberemos tener en cuenta, ya que desagregaremos GEOSTAT2021

CUADRO A.2.6: Matriz de confusión de la *grid* de 1 km × 1 km: IEM versus INE. Madrid

Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid	INE					
	Celdas			Porcentajes		
	Habitadas	Vacías	Total	Habitadas	Vacías	Total
Habitadas	2.330	206	2.536	27,49	2,43	29,92
Vacías	666	5.274	5.940	7,86	62,22	70,08
Total	2.996	5.480	8.476	35,35	64,65	100,00

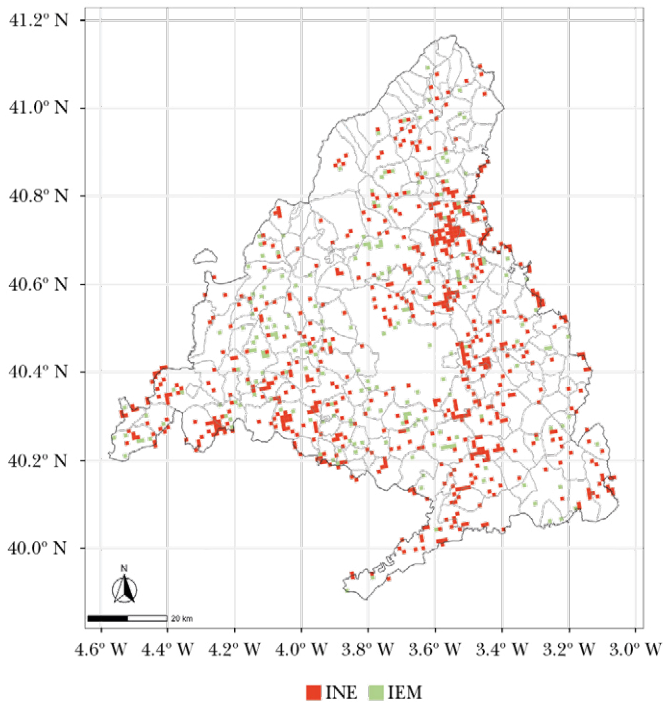
Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM e INE (2024).

a una *grid* de 100 m × 100 m, pero efectuaremos la validación sobre la *grid* de padrón del IEM con la misma resolución. A una resolución de 1 km × 1 km nuestros métodos preservan el volumen de población de GEOSTAT2021 celda a celda, y por tanto el error es nulo, pero validados sobre la *grid* de padrón de 1 km × 1 km arrojarían un error de 1,4%.

La distribución espacial de las celdas que están pobladas en una *grid*, pero no en la otra, se muestra en el mapa A.2.5. En muchos casos se trata de celdas contiguas, lo que puede deberse a una imprecisión en las coordenadas de ambas fuentes, pero en otros casos es más difícil encontrar justificación. En algunas situaciones se observan clústeres de celdas en GEOSTAT2021, que aparecen como deshabitadas en la *grid* de padrón del IEM.

En cualquier caso, estas discrepancias en ambas *grids* se deben a cuestiones metodológicas relacionadas con el proceso de georreferenciación. La *grid* de padrón del IEM procede de la geocodificación a partir de las direcciones postales, y sitúan las coordenadas en los puntos de entrada de los edificios, mientras que la geocodificación del INE no procede de un callejero actualizado, por el contrario, la georreferenciación se ha llevado a cabo en base a la dirección de las viviendas catastrales donde se ha situado la población, lo que puede resultar en unas coordenadas menos precisas, ya que Catastro no necesariamente sitúa las coordenadas en los puntos de entrada de los edificios.

MAPA A.2.5: Grid de población 1 km × 1 km del IEM —Padrón 2021— versus la del INE —Censo 2021—. Celdas con población en una grid pero no en la otra. Madrid



Fuente: Elaboración propia a partir de datos sobre el Padrón 2021 proporcionados por el IEM e INE (2024).

A.3. Cuadros del capítulo 2 a nivel provincial

CUADRO A.3.1: Celdas habitadas y densidad. Provincia

Código	Provincia		Celdas habitadas (%)	Densidad: Superficie	
	Nombre			Total	Terrestre habitada
01	Álava		29,7	110	338
02	Albacete		8,4	26	302
03	Alacant/Alicante		60,9	324	524
04	Almería		31,3	83	264
05	Ávila		12,9	20	148
06	Badajoz		9,9	31	307
07	Illes Balears		64,9	236	345
08	Barcelona		61,3	735	1.155
09	Burgos		14,3	25	168
10	Cáceres		9,2	20	212
11	Cádiz		26,6	168	633
12	Castellón/Castelló		24,0	89	372
13	Ciudad Real		6,2	25	389
14	Córdoba		16,4	56	339
15	Coruña, A		72,5	140	187
16	Cuenca		5,4	11	208
17	Girona		52,5	132	243
18	Granada		21,4	73	336
19	Guadalajara		8,8	22	242
20	Guipúzcoa		63,1	366	555
21	Huelva		15,1	52	347
22	Huesca		10,4	14	137
23	Jaén		13,0	47	350
24	León		18,7	29	152
25	Lleida		21,7	36	162
26	Rioja, La		13,1	63	470
27	Lugo		63,0	33	51
28	Madrid		35,3	838	2.269
29	Málaga		45,6	232	499
30	Murcia		35,9	134	371
31	Navarra		18,8	64	329
32	Ourense		44,5	42	92
33	Asturias		48,9	95	191
34	Palencia		11,1	20	170
35	Palmas, Las		44,8	278	596

CUADRO A.3.1 (cont.): Celdas habitadas y densidad. Provincia

Provincia		Celdas habitadas (%)	Densidad: Superficie	
Código	Nombre		Total	Terrestre habitada
36	Pontevedra	70,0	210	287
37	Salamanca	11,6	27	223
38	Santa Cruz de Tenerife	48,4	310	618
39	Cantabria	41,1	110	258
40	Segovia	12,4	22	178
41	Sevilla	17,6	139	774
42	Soria	7,3	9	115
43	Tarragona	36,4	130	351
44	Teruel	5,5	9	160
45	Toledo	10,8	46	419
46	Valencia/València	29,8	240	787
47	Valladolid	10,8	64	565
48	Vizcaya	65,4	521	742
49	Zamora	12,0	16	130
50	Zaragoza	7,5	56	735
51	Ceuta	69,2	4.197	5.353
52	Melilla	50,0	6.352	7.088
00	España	22,6	94	419

Fuente: INE (2024) y elaboración propia.

CUADRO A.3.2: Indicadores de desigualdad y concentración de la población

Provincia		Desigualdad		Población en determinados porcentajes de las celdas más pobladas (%)				
Código	Nombre	Gini	Theil	10	5	3	2	1
01	Álava	0,928	2,773	92,4	86,6	79,2	71,1	49,4
02	Albacete	0,928	3,116	90,9	80,8	71,4	62,0	47,4
03	Alacant/Alicante	0,888	2,625	84,1	70,8	59,3	50,0	34,7
04	Almería	0,906	2,743	87,6	74,8	62,9	52,7	37,8
05	Ávila	0,851	2,007	78,1	66,1	57,3	49,9	37,5
06	Badajoz	0,889	3,062	82,5	64,8	52,2	43,1	29,2
07	Illes Balears	0,895	2,481	86,3	73,5	62,2	53,5	39,3
08	Barcelona	0,907	3,358	87,3	72,9	59,4	47,9	31,3
09	Burgos	0,901	2,276	86,8	80,5	75,3	70,9	59,1
10	Cáceres	0,880	2,717	79,9	65,4	54,8	47,3	34,2
11	Cádiz	0,894	3,203	84,6	66,8	51,4	40,3	25,3
12	Castellón/ Castelló	0,917	3,071	89,0	77,7	66,3	56,6	41,0
13	Ciudad Real	0,890	3,177	83,2	64,7	51,0	40,8	26,4

CUADRO A.3.2 (cont.): Indicadores de desigualdad y concentración de la población

Código	Provincia Nombre	Desigualdad		Población en determinados porcentajes de las celdas más pobladas (%)				
		Gini	Theil	10	5	3	2	1
14	Córdoba	0,923	3,271	90,4	77,6	66,3	56,9	40,9
15	Coruña, A	0,835	1,700	77,9	69,5	62,7	56,5	44,2
16	Cuenca	0,850	2,124	77,0	64,5	55,3	47,2	32,1
17	Girona	0,893	2,536	84,7	71,9	60,8	51,3	35,9
18	Granada	0,902	2,998	85,4	71,2	58,9	49,4	34,1
19	Guadalajara	0,878	2,260	83,5	71,2	60,9	52,1	38,6
20	Guipúzcoa	0,900	2,844	88,3	69,7	54,3	42,8	26,1
21	Huelva	0,908	3,023	88,2	73,6	60,4	49,0	32,3
22	Huesca	0,887	2,246	83,8	74,1	67,0	60,9	48,1
23	Jaén	0,907	3,133	87,2	72,0	58,8	49,2	34,0
24	León	0,848	1,837	78,8	70,2	63,5	57,8	46,5
25	Lleida	0,911	2,593	88,8	78,2	67,9	59,6	45,5
26	Rioja, La	0,900	2,741	87,2	73,3	60,1	49,7	35,1
27	Lugo	0,792	1,362	72,9	66,7	62,7	59,4	52,5
28	Madrid	0,842	3,013	73,4	51,2	36,6	27,1	15,3
29	Málaga	0,906	2,982	86,9	72,4	61,0	51,9	36,2
30	Murcia	0,909	2,917	88,6	74,5	61,3	50,4	34,6
31	Navarra	0,903	2,647	87,7	75,5	64,7	56,0	39,9
32	Ourense	0,796	1,432	72,4	64,5	59,4	55,6	48,7
33	Asturias	0,897	2,196	86,9	81,7	76,3	70,1	57,2
34	Palencia	0,872	2,041	82,4	72,2	64,9	59,0	47,6
35	Palmas, Las	0,849	2,353	76,4	59,9	47,5	38,3	25,5
36	Pontevedra	0,808	1,603	72,7	61,9	54,0	47,8	38,0
37	Salamanca	0,870	2,254	80,7	71,7	63,4	56,1	44,2
38	Santa Cruz de Tenerife	0,812	2,077	70,0	51,9	40,3	32,2	20,7
39	Cantabria	0,863	2,089	80,5	68,8	59,7	52,1	38,6
40	Segovia	0,828	1,817	74,9	61,5	52,0	44,8	34,2
41	Sevilla	0,891	3,447	83,0	63,5	48,8	38,2	23,7
42	Soria	0,876	2,005	83,9	76,4	70,2	62,7	51,3
43	Tarragona	0,886	2,730	82,2	67,7	56,3	46,8	32,9
44	Teruel	0,836	1,982	74,3	60,9	52,6	46,9	37,1
45	Toledo	0,814	2,279	67,9	49,5	38,4	31,3	21,8
46	Valencia/ València	0,902	3,111	86,4	71,7	57,9	47,7	31,1
47	Valladolid	0,876	2,440	82,7	69,6	57,5	48,2	33,3
48	Vizcaya	0,911	2,857	90,1	76,6	63,2	51,4	33,3

CUADRO A.3.2 (cont.): Indicadores de desigualdad y concentración de la población

Provincia		Desigualdad		Población en determinados porcentajes de las celdas más pobladas (%)				
Código	Nombre	Gini	Theil	10	5	3	2	1
49	Zamora	0,830	1,783	74,6	65,0	58,8	53,9	44,2
50	Zaragoza	0,901	2,824	86,4	76,1	65,2	55,5	37,5
51	Ceuta	0,728	2,330	45,3	25,6	16,4	10,9	5,5
52	Melilla	0,642	1,959	34,5	17,7	10,6	7,1	3,5
00	España	0,910	2,798	88,3	77,0	66,2	56,9	41,2

Nota: El índice de Theil se corresponde con el segundo índice propuesto en Theil (1967), es decir, el correspondiente al parámetro $\theta = 0$ en la familia de índices de entropía generalizados (Goerlich y Villar 2009).

Fuente: INE (2024) y elaboración propia.

CUADRO A.3.3: Densidad de población personal y densidad experimentada: Población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio

Provincia		Densidad de población personal		Densidad experimentada: Población próxima en un radio de 10 km del residente promedio		
Código	Nombre	Personas	España = 100	Celdas	Personas	España = 100
01	Álava	10.984	107,2	114	199.788	35,0
02	Albacete	9.893	96,6	40	82.568	14,5
03	Alacant/Alicante	9.121	89,0	188	199.165	34,9
04	Almería	5.903	57,6	119	110.431	19,3
05	Ávila	3.054	29,8	50	26.660	4,7
06	Badajoz	4.325	42,2	53	52.884	9,3
07	Illes Balears	8.042	78,5	189	202.669	35,5
08	Barcelona	18.299	178,6	199	1.292.095	226,2
09	Burgos	7.320	71,4	60	106.735	18,7
10	Cáceres	3.622	35,4	48	34.430	6,0
11	Cádiz	7.455	72,8	97	151.400	26,5
12	Castellón/ Castelló	8.368	81,7	110	148.926	26,1
13	Ciudad Real	5.295	51,7	37	39.598	6,9
14	Córdoba	7.782	76,0	90	136.394	23,9
15	Coruña, A	6.097	59,5	221	160.671	28,1
16	Cuenca	3.654	35,7	22	21.409	3,7
17	Girona	4.944	48,3	183	80.342	14,1
18	Granada	6.062	59,2	110	254.247	44,5
19	Guadalajara	5.161	50,4	43	90.181	15,8

CUADRO A.3.3 (cont.): Densidad de población personal y densidad experimentada: Población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio

Provincia		Densidad de población personal		Densidad experimentada: Población próxima en un radio de 10 km del residente promedio		
Código	Nombre	Personas	España = 100	Celdas	Personas	España = 100
20	Guipúzcoa	7.282	71,1	194	180.781	31,6
21	Huelva	5.823	56,8	83	92.182	16,1
22	Huesca	4.276	41,7	50	22.789	4,0
23	Jaén	6.255	61,1	66	51.277	9,0
24	León	4.960	48,4	83	95.326	16,7
25	Lleida	5.525	53,9	96	72.176	12,6
26	La Rioja	9.275	90,5	60	110.590	19,4
27	Lugo	3.740	36,5	208	38.150	6,7
28	Madrid	16.144	157,6	138	1.686.299	295,1
29	Málaga	9.533	93,0	171	275.901	48,3
30	Murcia	6.733	65,7	152	217.433	38,1
31	Navarra	7.138	69,7	87	208.381	36,5
32	Ourense	3.966	38,7	177	65.227	11,4
33	Asturias	10.139	99,0	183	164.969	28,9
34	Palencia	5.667	55,3	49	54.784	9,6
35	Las Palmas	6.493	63,4	138	226.119	39,6
36	Pontevedra	6.179	60,3	210	182.934	32,0
37	Salamanca	7.179	70,1	55	122.820	21,5
38	Santa Cruz de Tenerife	4.834	47,2	121	190.681	33,4
39	Cantabria	5.961	58,2	155	142.176	24,9

A.4. Cuadros del capítulo 3 a nivel provincial

CUADRO A.4.1: Distribución de la población según grado de urbanización a nivel municipal a partir de la grid censal 2021. Provincias
(porcentaje)

Provincia	Tipo de municipio										Total
	Ciudad	Localidad y áreas semidensas	Localidad densa	Localidad semidensa	Área suburbana o periurbana	Área rural	Aldeas	Área rural dispersa	Área rural mayoritariamente deshabitada	Área rural mayoritariamente deshabitada	
Álava	75,9	8,5	8,5	0,0	0,0	15,7	10,4	4,3	1,0	100	
Albacete	44,7	30,8	28,8	2,0	0,0	24,5	19,7	4,8	0,1	100	
Alicante	53,6	41,5	35,6	1,8	4,1	5,0	4,2	0,8	0,0	100	
Almería	34,5	53,0	46,9	5,1	1,0	12,5	9,6	3,0	0,0	100	
Ávila	36,6	9,0	5,0	4,0	0,0	54,4	31,6	20,7	2,1	100	
Badajoz	31,4	34,5	26,2	6,2	2,1	34,2	30,9	3,3	0,0	100	
Illes Balears	43,4	43,9	37,2	1,7	5,0	12,7	11,6	1,1	0,0	100	
Barcelona	77,2	19,4	14,8	1,1	3,5	3,5	2,8	0,6	0,1	100	
Burgos	48,9	21,1	21,1	0,0	0,0	30,0	12,9	13,5	3,6	100	
Cáceres	24,5	30,6	19,4	11,1	0,0	44,9	32,5	12,4	0,1	100	
Cádiz	68,5	27,5	26,5	1,0	0,0	4,0	3,9	0,1	0,0	100	
Castellón	42,7	41,8	37,7	2,5	1,6	15,5	13,0	2,4	0,1	100	
Ciudad Real	15,2	64,7	59,8	4,9	0,0	20,1	16,4	3,7	0,0	100	
Córdoba	41,5	43,3	38,9	3,8	0,6	15,3	15,0	0,3	0,0	100	
A Coruña	42,7	32,8	16,2	5,3	11,3	24,5	6,6	16,1	1,8	100	
Cuenca	0,0	52,5	46,4	6,1	0,0	47,5	25,9	20,5	1,1	100	

CUADRO A.4.1 (cont.): Distribución de la población según grado de urbanización a nivel municipal a partir de la grid censal 2021. Provincias
(porcentaje)

Provincia	Tipo de municipio										Total
	Ciudad	Localidad y áreas semidensas	Localidad densa	Localidad semidensa	Área suburbana o periurbana	Área rural	Aldeas	Área rural dispersa	Área rural mayoritariamente deshabitada	Área rural mayoritariamente deshabitada	
Girona	17,7	58,8	45,8	8,4	4,7	23,5	17,1	6,0	0,5	100	
Granada	45,9	33,0	24,6	6,4	2,0	21,1	18,0	3,1	0,0	100	
Guadalajara	32,7	35,0	32,4	2,6	0,0	32,3	21,2	9,0	2,1	100	
Guiptúzcoa	45,3	47,7	42,1	0,0	5,6	7,0	6,0	1,0	0,0	100	
Huelva	27,1	54,0	50,2	3,8	0,0	19,0	17,2	1,8	0,0	100	
Huesca	23,8	36,7	32,6	4,2	0,0	39,4	19,8	17,6	2,0	100	
Jaén	26,8	49,0	45,8	2,6	0,5	24,2	22,0	2,2	0,0	100	
León	47,8	16,1	6,5	3,5	6,2	36,1	13,0	19,9	3,2	100	
Lleida	31,6	30,4	25,1	4,5	0,8	38,0	27,7	8,5	1,8	100	
La Rioja	47,1	29,6	29,6	0,0	0,0	23,2	15,3	7,4	0,6	100	
Lugo	29,9	23,4	20,3	3,1	0,0	46,7	9,5	4,9	32,3	100	
Madrid	84,3	13,5	11,2	1,1	1,2	2,2	2,0	0,2	0,0	100	
Málaga	52,1	38,6	34,2	0,3	4,1	9,2	8,0	1,3	0,0	100	
Murcia	50,8	47,8	46,0	0,4	1,5	1,4	1,4	0,0	0,0	100	
Navarra	52,5	17,3	14,1	0,9	2,3	30,1	21,1	8,2	0,8	100	
Ourense	37,9	16,5	13,4	3,2	0,0	45,6	9,7	30,0	5,9	100	
Asturias	57,2	24,3	22,3	2,1	0,0	18,4	8,4	7,0	3,1	100	
Palencia	48,4	17,4	0,0	16,3	1,1	34,2	17,9	13,1	3,2	100	
Las Palmas de Gran Canaria	55,0	41,4	26,3	6,4	8,7	3,6	2,0	1,5	0,0	100	
Pontevedra	39,9	43,5	24,0	3,1	16,4	16,6	2,4	13,5	0,6	100	

CUADRO A.4.1 (cont.): Distribución de la población según grado de urbanización a nivel municipal a partir de la grid censal 2021. Provincias
(porcentaje)

Provincia	Tipo de municipio										Total
	Ciudad	Localidad y áreas semidensas	Localidad densa	Localidad semidensa	Área suburbana o periurbana	Área rural	Aldeas	Área rural dispersa	Área rural mayoritariamente deshabitada	Área rural mayoritariamente deshabitada	
Salamanca	46,0	19,3	11,9	1,9	5,5	34,7	14,3	19,6	0,8	0,8	100
Santa Cruz de Tenerife	41,4	52,7	41,0	2,1	9,6	5,9	3,0	2,9	0,0	0,0	100
Cantabria	29,4	50,6	33,6	3,0	14,1	19,9	7,6	11,0	1,3	1,3	100
Segovia	0,0	48,2	39,8	0,0	8,4	51,8	32,0	17,3	2,5	2,5	100
Sevilla	56,0	37,9	34,0	2,4	1,5	6,1	6,0	0,1	0,0	0,0	100
Soria	0,0	54,0	44,8	6,1	3,2	46,0	25,2	14,4	6,3	6,3	100
Tarragona	30,1	52,6	38,7	5,8	8,1	17,3	13,0	4,2	0,1	0,1	100
Teruel	0,0	44,1	44,1	0,0	0,0	55,9	31,4	22,9	1,5	1,5	100
Toledo	23,7	38,4	22,5	8,3	7,6	37,9	33,2	4,7	0,0	0,0	100
Valencia	61,2	31,1	26,8	2,1	2,2	7,7	6,8	0,9	0,0	0,0	100
Valladolid	61,3	17,8	12,9	3,9	1,0	20,9	14,4	6,2	0,3	0,3	100
Vizcaya	67,5	25,6	20,3	1,4	4,0	6,9	4,8	1,8	0,3	0,3	100
Zamora	35,7	15,4	15,4	0,0	0,0	48,9	13,9	32,2	2,8	2,8	100
Zaragoza	70,0	14,2	12,4	1,3	0,6	15,8	11,7	3,9	0,2	0,2	100
Ceuta	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
Melilla	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
España	55,6	31,3	25,6	2,5	3,3	13,0	8,7	3,7	0,6	0,6	100

Fuente: INE (2024), SIOSE (2024), Goerlich (2023b, 2024a), Comisión Europea *et al.* (2021), JRC (2024) y elaboración propia.

Código	Provincia	Densidad de población personal		Densidad experimentada: Población próxima en un radio de 10 km del residente promedio		
		Personas	España = 100	Celdas	Personas	España = 100
40	Segovia	2.870	28,0	47	36.617	6,4
41	Sevilla	8.665	84,6	92	477.663	83,6
42	Soria	4.816	47,0	28	23.092	4,0
43	Tarragona	6.123	59,8	144	134.842	23,6
44	Teruel	3.207	31,3	24	13.934	2,4
45	Toledo	4.073	39,8	61	58.980	10,3
46	Valencia/ València	12.124	118,3	160	758.911	132,8
47	Valladolid	9.206	89,8	60	264.201	46,2
48	Vizcaya	13.071	127,6	200	500.090	87,5
49	Zamora	3.852	37,6	50	34.389	6,0
50	Zaragoza	14.684	143,3	57	484.264	84,8
51	Ceuta	10.701	104,4	27	84.071	14,7
52	Melilla	12.148	118,6	18	86.450	15,1
00	España	10.246	100,0	134	571.344	100,0

Fuente: INE (2024) y elaboración propia.

CUADRO A.4.2: Indicadores sociodemográficos según grado de urbanización. Provincias, 2021

a) Población menor de 16 años (porcentaje)

Provincia	Tipo de municipio			Total
	Ciudad	Localidad y áreas semidensas	Área rural	
Álava	15,4	14,4	16,1	15,4
Albacete	16,2	15,6	11,9	15,0
Alicante	15,4	15,3	12,6	15,2
Almería	18,0	19,0	11,7	17,8
Ávila	15,9	13,5	10,5	12,7
Badajoz	16,7	15,7	12,7	15,0
Illes Balears	15,0	16,1	15,7	15,6
Barcelona	15,2	17,0	16,2	15,6
Burgos	14,6	14,7	11,0	13,5
Cáceres	15,4	14,7	10,3	12,9
Cádiz	16,5	16,4	14,4	16,4
Castellón	16,2	15,9	13,1	15,6
Ciudad Real	15,6	15,5	12,0	14,8
Córdoba	15,6	15,5	13,4	15,2

CUADRO A.4.2 (cont.): Indicadores sociodemográficos según grado de urbanización. Provincias, 2021

Provincia	Tipo de municipio			Total
	Ciudad	Localidad y áreas semidensas	Área rural	
A Coruña	13,1	13,8	10,4	12,7
Cuenca	-	15,6	10,6	13,2
Girona	18,1	16,6	15,9	16,7
Granada	15,9	16,9	13,4	15,7
Guadalajara	16,4	20,1	14,6	17,1
Guipúzcoa	13,4	15,8	17,1	14,8
Huelva	16,0	17,1	13,4	16,1
Huesca	16,2	15,9	11,7	14,3
Jaén	15,4	15,1	13,1	14,7
León	12,6	13,9	8,0	11,1
Lleida	16,3	17,4	14,1	15,8
La Rioja	15,2	16,6	13,2	15,2
Lugo	13,8	12,0	8,1	10,7
Madrid	15,2	19,4	16,6	15,8
Málaga	15,9	17,2	14,1	16,2
Murcia	17,7	18,2	14,9	17,9
Navarra	16,4	17,0	15,4	16,2
Ourense	12,9	12,3	7,7	10,4
Asturias	12,0	11,0	10,1	11,4
Palencia	13,2	14,0	9,1	11,9
Las Palmas de Gran Canaria	13,5	14,2	13,8	13,8
Pontevedra	13,5	13,8	11,4	13,3
Salamanca	12,8	14,5	9,6	12,0
Santa Cruz de Tenerife	12,8	14,3	11,1	13,5
Cantabria	12,2	15,1	12,6	13,7
Segovia	-	14,7	13,0	13,8
Sevilla	16,7	17,9	15,4	17,1
Soria	-	15,7	9,8	13,0
Tarragona	16,8	16,8	14,7	16,4
Teruel	-	16,0	12,0	13,8
Toledo	16,6	19,2	15,2	17,0
Valencia	15,2	16,0	13,4	15,3
Valladolid	13,4	16,4	12,7	13,8
Vizcaya	13,0	15,1	15,0	13,6
Zamora	12,2	13,2	7,3	9,9

CUADRO A.4.2 (cont.): Indicadores sociodemográficos según grado de urbanización. Provincias, 2021

Provincia	Tipo de municipio			Total
	Ciudad	Localidad y áreas semidensas	Área rural	
Zaragoza	14,7	17,8	12,6	14,9
Ceuta	21,0	-	-	21,0
Melilla	23,8	-	-	23,8
España	15,2	16,3	12,7	15,2

b) Población de 65 años o más (porcentaje)

Provincia	Tipo de municipio			Total
	Ciudad	Localidad y áreas semidensas	Área rural	
Álava	21,5	24,6	19,3	21,4
Albacete	16,9	18,4	25,3	19,4
Alicante	19,2	20,7	26,9	20,2
Almería	15,0	12,8	26,2	15,2
Ávila	20,4	22,9	30,1	25,9
Badajoz	17,1	18,8	23,4	19,8
Illes Balears	16,0	15,7	17,5	16,0
Barcelona	19,5	17,4	19,6	19,1
Burgos	23,2	21,9	27,4	24,2
Cáceres	18,0	20,1	28,5	23,4
Cádiz	17,5	16,1	18,6	17,2
Castellón	18,1	19,1	25,2	19,6
Ciudad Real	18,0	19,1	25,7	20,3
Córdoba	19,6	18,9	22,8	19,8
A Coruña	24,4	22,1	30,8	25,2
Cuenca	-	18,1	28,1	22,9
Girona	15,5	18,2	20,5	18,3
Granada	17,9	16,5	21,6	18,2
Guadalajara	17,8	10,5	20,5	16,1
Guipúzcoa	23,8	22,0	21,0	22,7
Huelva	18,9	14,7	21,4	17,1
Huesca	20,6	19,6	26,1	22,4
Jaén	19,1	18,9	21,7	19,6
León	25,5	20,9	33,3	27,6
Lleida	18,4	16,9	22,5	19,5
La Rioja	21,2	18,4	25,0	21,2
Lugo	22,7	26,2	35,7	29,6
Madrid	18,8	12,8	17,3	18,0
Málaga	18,1	16,4	21,6	17,8

CUADRO A.4.2 (cont.): Indicadores sociodemográficos según grado de urbanización. Provincias, 2021

Provincia	Tipo de municipio			Total
	Ciudad	Localidad y áreas semidensas	Área rural	
Murcia	16,3	15,5	21,4	16,0
Navarra	18,8	18,5	22,6	19,9
Ourense	25,4	26,3	38,6	31,6
Asturias	25,6	26,7	29,4	26,6
Palencia	24,9	20,3	30,8	26,1
Las Palmas de Gran Canaria	16,6	14,5	17,0	15,8
Pontevedra	22,8	21,5	28,3	23,2
Salamanca	26,6	20,8	30,3	26,8
Santa Cruz de Tenerife	19,0	15,9	23,3	17,6
Cantabria	25,7	20,2	24,0	22,6
Segovia	-	20,8	24,1	22,5
Sevilla	17,8	15,5	18,9	17,0
Soria	-	20,6	30,7	25,2
Tarragona	18,4	18,5	22,8	19,2
Teruel	-	19,6	27,2	23,9
Toledo	18,4	14,3	21,1	17,9
Valencia	19,5	18,3	22,4	19,4
Valladolid	25,5	16,8	23,7	23,6
Vizcaya	24,3	21,1	21,5	23,3
Zamora	26,2	21,9	37,6	31,1
Zaragoza	21,6	16,0	24,6	21,3
Ceuta	12,3	-	-	12,3
Melilla	10,8	-	-	10,8
España	19,5	17,7	24,9	19,6

c) Edad media (años)

Provincia	Tipo de municipio			Total
	Ciudad	Localidad y áreas semidensas	Área rural	
Álava	44,6	46,6	44,4	44,8
Albacete	42,3	43,1	47,6	43,8
Alicante	43,4	44,1	48,0	43,9
Almería	40,5	39,0	47,7	40,6
Ávila	44,2	46,3	50,7	47,9
Badajoz	42,2	43,2	46,3	43,9
Illes Balears	41,7	41,5	42,8	41,8
Barcelona	43,3	42,3	43,8	43,1

CUADRO A.4.2 (cont.): Indicadores sociodemográficos según grado de urbanización. Provincias, 2021

Provincia	Tipo de municipio			Total
	Ciudad	Localidad y áreas semidensas	Área rural	
Burgos	45,7	45,4	49,8	46,9
Cáceres	43,5	44,4	49,9	46,7
Cádiz	42,4	41,9	43,7	42,3
Castellón	42,8	43,5	47,1	43,7
Ciudad Real	43,0	43,5	47,8	44,3
Córdoba	43,7	43,3	45,9	43,9
A Coruña	46,8	45,8	50,7	47,5
Cuenca	-	43,1	49,5	46,1
Girona	40,2	42,5	44,1	42,5
Granada	42,6	41,7	45,2	42,9
Guadalajara	42,4	38,3	45,2	41,9
Guipúzcoa	46,3	44,7	44,0	45,4
Huelva	43,2	40,8	45,3	42,3
Huesca	43,9	43,7	48,3	45,6
Jaén	43,5	43,4	45,5	43,9
León	47,8	45,7	53,2	49,4
Lleida	42,8	41,8	45,6	43,6
La Rioja	44,7	42,9	47,2	44,7
Lugo	46,1	48,2	53,9	50,3
Madrid	43,2	39,7	42,7	42,7
Málaga	42,7	41,7	45,1	42,6
Murcia	41,2	40,6	44,5	41,0
Navarra	42,8	42,6	45,3	43,5
Ourense	47,3	47,9	55,1	51,0
Asturias	48,1	49,2	50,8	48,9
Palencia	47,1	45,3	51,8	48,4
Las Palmas de Gran Canaria	43,0	42,1	43,3	42,6
Pontevedra	46,0	45,3	49,1	46,2
Salamanca	47,7	45,2	51,3	48,5
Santa Cruz de Tenerife	44,3	42,5	47,1	43,5
Cantabria	47,6	44,7	47,4	46,1
Segovia	-	44,7	47,3	46,1
Sevilla	42,4	40,9	43,3	41,9
Soria	-	44,2	51,4	47,5
Tarragona	42,4	42,7	45,5	43,1

CUADRO A.4.2 (cont.): Indicadores sociodemográficos según grado de urbanización. Provincias, 2021

Provincia	Tipo de municipio			Total
	Ciudad	Localidad y áreas semidensas	Área rural	
Teruel	-	43,8	48,6	46,5
Toledo	42,6	40,1	44,6	42,4
Valencia	43,6	43,1	46,0	43,7
Valladolid	47,1	42,8	47,3	46,4
Vizcaya	46,9	45,0	45,5	46,3
Zamora	48,2	46,1	55,0	51,2
Zaragoza	44,8	41,6	47,3	44,7
Ceuta	38,0	-	-	38,0
Melilla	36,1	-	-	36,1
España	43,6	42,6	47,3	43,8

d) Renta por hogar (euros de 2021)

Provincia	Tipo de municipio			Total
	Ciudad	Localidad y áreas semidensas	Área rural	
Álava	36.602	35.803	36.693	36.549
Albacete	34.160	26.983	24.515	29.447
Alicante	28.340	26.256	25.149	27.306
Almería	30.519	26.348	22.192	27.139
Ávila	31.939	26.864	24.016	27.039
Badajoz	31.211	25.690	22.045	26.054
Illes Balears	38.879	35.187	36.361	36.899
Barcelona	39.511	39.855	38.404	39.537
Burgos	35.323	31.611	30.975	33.192
Cáceres	32.395	26.557	21.592	25.491
Cádiz	29.512	26.840	23.279	28.500
Castellón	32.938	30.650	27.950	31.149
Ciudad Real	35.257	27.612	23.493	27.905
Córdoba	32.367	25.386	23.569	27.914
A Coruña	34.047	32.764	29.893	32.651
Cuenca	-	31.358	24.598	27.954
Girona	38.488	33.447	38.579	35.525
Granada	31.716	26.043	22.000	27.742
Guadalajara	36.131	36.411	28.866	33.588
Guipúzcoa	40.842	39.262	39.581	40.003
Huelva	30.236	27.712	24.611	27.767
Huesca	34.208	33.562	33.276	33.600
Jaén	32.338	26.057	22.639	26.810

CUADRO A.4.2 (cont.): Indicadores sociodemográficos según grado de urbanización. Provincias, 2021

Provincia	Tipo de municipio			Total
	Ciudad	Localidad y áreas semidensas	Área rural	
León	31.348	30.337	28.192	30.023
Lleida	35.342	33.141	34.310	34.296
La Rioja	34.179	31.293	28.072	31.876
Lugo	31.666	29.161	27.533	29.149
Madrid	42.872	46.271	32.308	43.044
Málaga	29.750	28.507	22.291	28.516
Murcia	33.722	28.797	26.093	31.241
Navarra	40.118	35.605	36.540	38.246
Ourense	30.750	26.559	25.726	27.697
Asturias	32.706	30.948	29.099	31.619
Palencia	32.032	30.851	29.671	31.008
Las Palmas de Gran Canaria	32.239	30.320	31.410	31.411
Pontevedra	34.416	30.533	27.235	31.522
Salamanca	30.891	29.959	26.537	29.165
Santa Cruz de Tenerife	32.092	28.260	26.637	29.777
Cantabria	35.015	32.430	30.035	32.725
Segovia	-	34.157	30.183	32.038
Sevilla	33.388	26.761	23.050	30.265
Soria	-	34.852	31.233	33.125
Tarragona	35.333	32.496	32.243	33.289
Teruel	-	34.986	29.216	31.664
Toledo	33.453	29.426	25.979	28.999
Valencia	33.393	31.336	28.117	32.326
Valladolid	34.390	33.010	30.485	33.345
Vizcaya	37.808	39.737	39.350	38.391
Zamora	29.763	26.454	24.952	26.851
Zaragoza	35.503	33.491	30.821	34.479
Ceuta	40.660	-	-	40.660
Melilla	41.846	-	-	41.846
España	36.428	31.717	28.421	33.872

Fuente: INE (2024, ADRH), SIOSE (2024), Goerlich (2023b, 2024a), Comisión Europea *et al.* (2021), JRC (2024) y elaboración propia.

CUADRO A.4.3: Densidad experimentada según grado de urbanización de la celda por provincias: población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio, 2021
(personas)

Provincias	Centros Urbanos	Tipo de celda							Celdas rurales de muy baja densidad
		Agrupaciones urbanas	Agrupaciones urbanas densas	Agrupaciones urbanas semidensas	Celdas suburbanas o periurbanas	Celdas rurales	Agrupaciones rurales	Celdas rurales de baja densidad	
Álava	255.033	71.837	38.254	-	127.820	49.158	34.484	67.223	54.267
Albacete	169.211	25.754	24.548	31.135	32.927	9.921	7.074	13.703	20.951
Alicante	299.705	104.974	97.349	80.742	129.692	105.188	91.061	118.534	85.628
Almería	201.750	78.678	76.802	54.929	103.950	35.926	31.362	45.179	26.491
Ávila	60.083	24.732	10.132	9.866	49.212	7.911	7.942	8.063	7.202
Badajoz	122.823	41.104	40.501	31.188	54.175	15.348	13.142	20.218	31.119
Illes Balears	409.632	80.455	59.628	53.501	135.048	57.646	44.716	78.803	49.163
Barcelona	1.628.252	290.893	231.644	95.576	428.251	143.178	97.733	200.965	136.010
Burgos	186.993	49.789	35.520	-	133.632	29.592	45.620	27.286	8.455
Cáceres	97.830	27.792	30.805	9.885	64.451	9.213	9.437	8.560	11.136
Cádiz	197.061	96.598	83.378	16.490	140.732	40.955	19.306	68.456	49.733
Castellón	271.821	89.194	86.847	43.009	121.330	52.956	42.269	78.010	45.587
Ciudad Real	94.210	37.088	37.796	30.543	35.867	11.484	10.785	11.817	18.142
Córdoba	306.883	45.324	34.909	27.291	111.696	27.583	18.809	47.959	38.926
A Coruña	277.786	129.804	105.177	41.290	175.085	47.406	32.678	59.528	24.912
Cuenca	-	35.892	40.077	6.876	33.654	6.307	6.718	5.913	6.021
Girona	173.422	66.244	66.097	47.539	80.761	50.381	49.725	52.329	46.485
Granada	456.078	159.861	142.589	83.339	281.193	40.281	83.546	56.953	37.574

CUADRO A.4.3 (cont.): Densidad experimentada según grado de urbanización de la celda por provincias: población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio, 2021
(personas)

Provincias	Tipo de celda									
	Centros Urbanos	Agrupaciones urbanas	Agrupaciones urbanas densas	Agrupaciones urbanas semidensas	Celdas suburbanas o periurbanas	Celdas rurales	Agrupaciones rurales	Celdas rurales de baja densidad	Celdas rurales de muy baja densidad	
Guadalajara	131.872	116.646	124.688	25.442	115.495	29.599	35.101	28.133	8.625	
Guipúzcoa	273.749	117.204	108.982	-	149.270	83.485	55.333	116.929	89.250	
Huelva	199.757	65.574	69.730	16.460	67.995	20.634	15.428	31.900	37.316	
Huesca	56.932	17.642	18.602	9.685	19.226	8.153	8.959	7.749	7.235	
Jacán	105.744	40.288	41.254	10.550	48.660	21.692	20.322	24.968	25.810	
León	160.247	93.342	45.988	98.131	135.036	23.955	15.034	30.919	15.179	
Lleida	165.122	33.164	22.936	50.211	69.824	34.237	39.673	27.586	23.292	
La Rioja	184.453	61.277	54.798	-	92.785	34.233	40.669	23.189	28.818	
Lugo	99.479	25.468	17.986	13.382	53.031	14.637	10.781	20.857	11.772	
Madrid	1.998.330	312.471	293.476	82.149	410.261	132.423	91.447	198.145	135.943	
Málaga	440.127	126.389	115.185	12.509	157.435	65.309	45.644	100.711	65.665	
Murcia	356.022	164.526	137.532	27.827	259.379	72.732	67.478	85.051	54.478	
Navarra	362.438	85.319	59.269	20.255	165.905	34.195	26.959	50.472	33.097	
Ourense	133.497	32.407	20.262	13.624	69.614	29.521	16.021	39.307	16.800	
Asturias	242.115	102.816	92.552	26.776	144.553	65.732	64.602	81.694	34.681	
Las Palmas de Gran Canaria	325.889	142.777	123.879	51.054	194.575	54.549	30.339	71.839	48.792	
Pontevedra	318.414	146.652	137.374	62.419	162.976	59.370	46.070	68.085	27.850	

CUADRO A.4.3 (cont.): Densidad experimentada según grado de urbanización de la celda por provincias: población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio, 2021
(personas)

Provincias	Tipo de celda									
	Centros Urbanos	Agrupaciones urbanas	Agrupaciones urbanas densas	Agrupaciones urbanas semidensas	Celdas suburbanas o periurbanas	Celdas rurales	Agrupaciones rurales	Celdas rurales de baja densidad	Celdas rurales muy baja densidad	
Salamanca	198.811	111.363	78.784	7.812	167.903	33.529	33.467	23.656	18.006	
Santa Cruz de Tenerife	333.393	118.546	110.098	41.815	132.108	68.757	61.910	75.643	58.135	
Cantabria	249.966	121.792	115.542	64.678	146.512	51.564	50.131	58.836	27.378	
Segovia	-	61.012	58.441	-	70.096	15.969	19.005	14.371	7.755	
Sevilla	784.907	178.014	164.954	13.709	308.064	56.588	19.901	146.532	82.032	
Soria	-	39.309	43.517	5.879	43.532	5.513	4.840	7.813	3.007	
Tarragona	231.673	120.112	128.587	16.264	134.913	51.134	43.681	61.304	56.914	
Teruel	-	26.924	27.578	-	23.322	5.206	5.927	4.500	4.647	
Toledo	101.734	69.005	64.804	50.244	90.137	29.712	28.218	33.847	34.702	
Valencia	1.194.019	198.858	176.143	83.289	310.418	75.032	55.613	109.351	85.293	
Valladolid	367.878	193.998	217.539	22.254	283.253	58.813	70.309	43.081	44.813	
Vizcaya	657.876	210.642	177.923	71.674	324.110	144.235	102.658	192.042	125.167	
Zamora	70.950	27.414	18.740	-	67.033	13.135	30.089	8.203	6.760	
Zaragoza	683.927	150.885	106.025	21.263	350.352	49.403	44.763	54.749	70.989	
Ceuta	84.071	84.071	-	-	84.071	84.071	84.071	84.071	84.071	
Melilla	86.450	-	-	-	-	-	-	-	-	
España	994.740	140.537	122.841	47.928	214.168	49.652	38.983	65.917	40.149	

Fuente: INE (2024), SIOSE (2024), Goerlich (2023b, 2024a), Comisión Europea *et al.* (2021), JRC (2024) y elaboración propia.

A.5. Análisis de sensibilidad de los cálculos de accesibilidad de la población a las zonas verdes del capítulo 6

Los cálculos del capítulo 6 dependen de una serie de parámetros y decisiones metodológicas que tienen cierta influencia sobre los resultados cuantitativos. Este apéndice examina como se afectan los resultados de accesibilidad de la población a espacios verdes urbanos utilizando Bilbao (48020) como ejemplo.

Consideramos las siguientes variaciones:

- 1) Umbral de acceso a pie a las zonas verdes de 10 minutos *versus* 15 minutos. Con una velocidad de 5km/hora 15 minutos representan 1,25 km de distancia recorrida.
- 2) Definición estricta de zona verde, solo Zonas verdes artificiales y arbolado urbano (ZAU) *versus* el total de zonas verdes entendidas como las coberturas de Zonas verdes artificiales y arbolado urbano (ZAU), Pasto arbolado (PPA), Arbolado (ARB), Frondosas caducifolias (FDC), Frondosas perennifolias (FDP), Coníferas (CNF) y Arbolado mixto (ARX).
- 3) Polígonos originales de SIOSE AR, por tanto, respetando la geometría original, *versus* polígonos disueltos por ROTULO SIOSE y contigüidad, de forma que dos polígonos con idéntico ROTULO y que sean adyacentes son considerados un único polígono a efectos de los cálculos de áreas de accesibilidad⁹⁸.

Los resultados del experimento se muestran en el cuadro A.5.1 utilizando los siguientes estadísticos: (*i*) el número de polígonos utilizados en los cálculos⁹⁹, (*ii*) la superficie media ponderada accesible, (*iii*) la superficie mediana ponderada accesible y (*iv*) la población sin acceso a espacios verdes en el umbral de tiempo considerado¹⁰⁰.

⁹⁸ La disolución se efectúa por idéntico ROTULO SIOSE y contigüidad, de forma que si el ROTULO es idéntico en coberturas, pero no en el porcentaje de estas, no se disuelve.

⁹⁹ Naturalmente esto incluye polígonos duplicados, puesto que los cálculos se realizan celda a celda, y luego se agregan. El número de polígonos implicados en los cálculos es la suma de todos ellos.

¹⁰⁰ La población sin acceso es independiente de si los polígonos son los originales de SIOSE AR o los disueltos por ROTULO SIOSE y contigüidad.

CUADRO A.5.1: Análisis de sensibilidad de los cálculos de accesibilidad de la población a zonas verdes. Bilbao

a) Polígonos implicados en el cálculo

		Umbral: 10 minutos		Umbral: 15 minutos	
		Artificial y arbolado urbano	Total	Artificial y arbolado urbano	Total
Polígonos	Originales	159.435	174.484	359.245	402.369
	Disueltos	63.438	75.489	137.774	171.006

b) Superficie media ponderada (ha)

		Umbral: 10 minutos		Umbral: 15 minutos	
		Artificial y arbolado urbano	Total	Artificial y arbolado urbano	Total
Polígonos	Originales	14,1	16,1	31,6	39,1
	Disueltos	18,8	21,4	38,1	47,1

c) Superficie mediana ponderada (ha)

		Umbral: 10 minutos		Umbral: 15 minutos	
		Artificial y arbolado urbano	Total	Artificial y arbolado urbano	Total
Polígonos	Originales	13,7	14,8	30,9	36,0
	Disueltos	18,2	19,8	36,0	45,0

d) Población sin acceso a zonas verdes (porcentaje)

		Umbral: 10 minutos		Umbral: 15 minutos	
		Artificial y arbolado urbano	Total	Artificial y arbolado urbano	Total
Polígonos	Originales	0,3	0,1	0,1	0,0
	Disueltos	0,3	0,1	0,1	0,0

Nota: La Zona verde artificial y arbolado urbano se corresponde en SIOSE AR con la cobertura del mismo nombre (ZAU), mientras que el total incluye las coberturas de Pasto arbolado (PPA), Arbolado (ARB), Frondosas caducifolias (FDC), Frondosas perennifolias (FDP), Coníferas (CNF) y Arbolado mixto (ARX).

Fuente: INE (2024), SIOSE (2022a) y elaboración propia.

A grandes rasgos las conclusiones que podemos extraer de este ejercicio son las siguientes:

- 1) La población sin acceso a zonas verdes es prácticamente despreciable en todos los casos.
- 2) El umbral de tiempo afecta de forma importante a los resultados, siendo el factor que mayor influencia tiene. Las superficies verdes accesibles más que se duplican en todos

los casos al pasar de un umbral de 10 minutos de tiempo de desplazamiento a un umbral de 15 minutos.

- 3) Las diferencias entre usar la media y la mediana como medida representativa de la superficie verde accesible por la población son pequeñas. Sin embargo, en algún caso si se detectaron diferencias significativas, asociadas a *outliers* en la distribución de áreas verdes derivadas de polígonos muy grandes con coberturas verdes. En este sentido la mediana es un estadístico más robusto (Poelman 2016, 2018).
- 4) Como es natural, una definición amplia de zona verde supone una mayor superficie accesible, aunque las diferencias respecto a una definición más estricta no son grandes, especialmente cuando el umbral de acceso son 10 minutos.
- 5) La disolución de polígonos por ROTULO SIOSE y contigüidad siempre eleva la superficie accesible. Por tanto, considerar los polígonos originales tiene a subestimar, en cierta medida, la superficie verde accesible por la población. Esta característica de SIOSE AR merece la pena ser investigada en mayor profundidad en este tipo de ejercicios.
- 6) La disolución de polígonos por ROTULO SIOSE y contigüidad reduce de forma considerable los polígonos utilizados en los cálculos, lo que indica la existencia de un número importante de polígonos adyacentes con idéntico ROTULO SIOSE.

En base a estos resultados los parámetros bajo los cuales realizamos el ejercicio del capítulo 6 son un umbral de acceso de 10 minutos a pie, utilizando la definición amplia de zonas verdes y manteniendo los polígonos originales de SIOSE AR, siendo esta la decisión más crítica desde el punto de vista metodológico. Los resultados del capítulo 6 son, pues, algo conservadores.

Bibliografía

- AJUNTAMENT DE VALÈNCIA. Capital Verde Europea 2024. València. Disponible en: <https://www.valencia.es/web/cve> [consulta: sep. 2024].
- ALDÁS MANZANO, Joaquín, Francisco José GOERLICH GISBERT y Matilde MAS IVARS. *Gasto de las familias en las comunidades autónomas españolas. Pautas de consumo, desigualdad y convergencia*. A Coruña: Fundación Caixa Galicia, Centro de Investigación Económica y Financiera, 2006. Puede acceder en: https://www.afundacion.org/es/cultura/publicacion/gasto_de_las_familias_en_las_comunidades_autnomas_espao-las._pautas_de_consu
- BALINSKI, Michel L., y Svetlozar T. RACHEV. «Rounding proportions: rules of rounding». *Numerical Functional Analysis and Optimization* 14, n.º 5-6 (ene. 1993): 475-501. <https://doi.org/10.1080/01630569308816535>
- . «Rounding proportions: methods of rounding». *Mathematical Scientist* 22, n.º 1 (1997): 1-26.
- BANDRÉS, Eduardo y Vanessa AZÓN. *La despoblación de la España interior*. Madrid: Funcas, 2021. Puede acceder en: <https://www.funcas.es/wp-content/uploads/2021/02/La-despoblacion-de-la-Espa%C3%B1a-interior.pdf>
- BATISTA E SILVA, Filipe, Hugo POELMA, Veerle MARTENS y Carlo LAVALLE. *Population Estimation for the Urban Atlas Polygons*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2013. Puede acceder en: <https://data.europa.eu/doi/10.2788/54791>
- BATISTA E SILVA, Filipe, Francisco Javier GALLEGRO y Carlo LAVALLE. «A high-resolution population grid map for Europe». *Journal of Maps* 9, n.º 1 (2013): 16-28. Puede acceder en: <https://doi.org/10.1080/17445647.2013.764830>
- BATISTA E SILVA, Filipe y Hugo POELMAN. *Mapping population density in Functional Urban Areas*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2016. Puede acceder en: <https://data.europa.eu/doi/10.2791/06831>
- BATISTA E SILVA, Filipe, Mario A. MARÍN, Konstantín ROSINA, Ricardo RIBEIRO, Sérgio FREIRE y Marcello SCHIAVINA. «Analysing spatiotemporal patterns of tourism in Europe at high-resolution with conventional and big data sources». *Tourism Management* 68 (oct. 2018a): 101-115. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.02.020>
- BATISTA E SILVA, Filipe, Konstantín ROSINA, Marcello SCHIAVINA, Mario A. MARÍN, Sérgio FREIRE, Lukasz ZIEMBA, Massimo CRAGLIA y Carlo LAVALLE. «From place of residence to place of activity: towards spatiotemporal mapping of population density in Europe» [ponencia]. En: *Proceedings of the AGILE Conference 2018*. Lund, 12-15 de jun. 2018b. Puede acceder en: https://agile-gi.eu/images/conferences/2018/documents/shortpapers/128AGILE_2018_v1c_ShortPaper_ENACT_final.pdf
- BATISTA E SILVA, Filipe, Sérgio FREIRE, Marcello SCHIAVINA, Konstantín ROSINA, Mario A. MARÍN, Lukasz ZIEMBA, Massimo CRAGLIA, Eric KOOMEN y Carlo LAVALLE. «Uncovering temporal changes in Europe's population density patterns using a data fusion approach». *Nature Communications* 11, n.º 1 (sep. 2020): 4631. Puede acceder en: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18344-5>

- BATISTA E SILVA, Filipe. *The JRC-GEOSTAT 2018 Population. Metadata/Technical fiche*. Sevilla: Comisión Europea, JCR (European Commission Joint Research Centre), 2021. Puede acceder en: https://ec.europa.eu/eurostat/cache/GISCO/geodatafiles/JRC_GRID_2018.zip
- BATISTA E SILVA, Filipe, Hugo POELMAN y Lewis DIJKSTRA. «The JRC-GEOSTAT 2018. A novel small-area population estimation for Europe» [ponencia]. En. *European Forum for Geography and Statistics (EFGS) Conference 2021*. 7 y 8 sep. 2021. Puede acceder en: https://www.efgs.info/wp-content/uploads/2021/09/Session5b-4_Batista_Poelman_Dijkstra.pdf
- BRONS, Martijn, Hugo POELMAN, L. ACKERMANS, Juan N. IBÁÑEZ y Lewis DIJKSTRA. «Passenger rail performance in Europe: regional and territorial accessibility indicators for passenger rail». Working Paper n.º 01/2022. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2021. Puede acceder en: https://human-settlement.emergency.copernicus.eu/documents/AGILE_2018_v1c_ShortPaper_ENACT.pdf?t=1526990908
- BRONS, Martijn, Lewis DIJKSTRA, Juan N. IBÁÑEZ y Hugo POELMAN. «Road infrastructure in Europe: road length and its impact on road performance». Working Paper n.º 03/2022. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2022. Puede acceder en: https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/work/road-2022/road-infrastructure-2022.pdf
- BRONS, Martijn, Lewis DIJKSTRA y Hugo POELMAN. «How fast are rail trips between EU cities and is rail faster than air?». Working Paper n.º 03/2023. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2023. Puede acceder en: <https://data.europa.eu/doi/10.2776/27137>
- BRUNO, Matteo, Hygor P. MONTEIRO, Bruno CAMPANELLI y Vittorio LORETO. «A universal framework for inclusive 15-minute cities». *Nature Cities* 1, n.º 10 (sep. 2024): 633-41. <https://doi.org/10.1038/s44284-024-00119-4>
- CAPDEVILA I SUBIRANA, Joan. *Historia del deslinde de la frontera Hispano-Francesa. Del tratado de los Pirineos (1659) a los tratados de Bayona (1856-1868)*. Huesca: Centro Nacional de Información Geográfica, 2009. Puede acceder en: <https://www.ign.es/resources/acercade/libDigPub/FronterasPirineosbaja.pdf>
- CICCONE, Antonio y Robert E. HALL. «Productivity and the density of economic activity». *The American Economic Review* 86, n.º 1 (marzo de 1996): 54-70. Puede acceder en: <https://www.jstor.org/stable/2118255>
- COMISIÓN EUROPEA. Enabling access to European geospatial data for the Green Deal. Bruselas. Disponible en: https://commission.europa.eu/privacy-policy-websites-managed-european-commission_en [consulta: sep. 2024].
- COMISIÓN EUROPEA, FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), UN-HABITAT (Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos), OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) y BANCO MUNDIAL. *Applying the Degree of Urbanisation. A methodological manual to define cities, towns and rural areas for international comparisons. 2021 edition*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2021. Puede acceder en: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/15348338/KS-02-20-499-EN-N.pdf>
- COS, Olga de. «Valoración del método de densidades focales (kernel) para la identificación de los patrones espaciales de crecimiento de la población en España». *GeoFocus* n.º 4 (2004): 136-165. Puede acceder en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/1067983.pdf>

- Cox, Lawrence H. «A constructive procedure for unbiased controlled rounding». *Journal of the American Statistical Association* 82, n.º 398 (jun. 1987): 520-524. <https://doi.org/10.1080/01621459.1987.10478456>
- DÍEZ MINGUELA, Alfonso, FRANCISCO JOSÉ GOERLICH GISBERT y DANIEL A. TIRADO FABREGAT. «Nuevos métodos, nueva evidencia sobre el asentamiento de la población en la Comunitat Valenciana: la construcción de una grid de población para 1887» [ponencia]. En. *I Congreso Internacional de Fuentes Geohistóricas: territorio y sociedad en el tiempo*. Madrid: Centro Cultural UAM «La Corrala», 23-25 de may. 2024. Puede acceder en: <https://doi.org/10.22429/Euc2024.010>
- DJIKSTRA, Lewis y Hugo POELMAN. «A harmonised definition of cities and rural areas: the new degree of urbanisation». Regional Working Paper n.º 01/2014. Bruselas: Comisión Europea, 2014. https://ec.europa.eu/regional_policy/en/information/publications/working-papers/2014/a-harmonised-definition-of-cities-and-rural-areas-the-new-degree-of-urbanisation
- DJIKSTRA, Lewis, Hugo POELMAN y Linde ACKERMANS. «Road transport performance in europe. Introducing a new accessibility framework». Working Paper n.º 01/2019. Bruselas: Comisión Europea, 2019. Puede acceder en: <https://data.europa.eu/doi/10.2776/046835>
- DMOWSKA, Anna, y Tomasz F. STEPINSKI. «A high resolution population grid for the conterminous United States: The 2010 edition». *Computers, Environment and Urban Systems*, 61, part A (ene. 2017): 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbysys.2016.08.006>
- DURANTON, Gilles y Diego PUGA. «The economics of urban density». *Journal of Economic Perspectives* 34, n.º 3 (sum. 2020): 3-26. Puede acceder en: <https://doi.org/10.1257/jep.34.3.3>
- DURANTON, Gilles y Matthew A. TURNER. «Urban form and driving: evidence from US cities». *Journal of Urban Economics* 108 (nov. 2018): 170-191. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2018.10.003>
- EICHER, Cory L. y Cynthia A. BREWER. «Dasymetric mapping and areal interpolation: Implementation and evaluation». *Cartography and Geographic Information Science* 28 n.º 2 (2001): 125-138. <https://doi.org/10.1559/152304001782173727>
- ESPAÑA. «Resolución de 29 de abril de 2020, de la Subsecretaría, por la que se publica la Resolución de 17 de febrero de 2020, de la Presidencia del Instituto Nacional de Estadística y de la Dirección General de Cooperación Autonómica y Local, por la que se dictan instrucciones técnicas a los Ayuntamientos sobre la gestión del Padrón municipal». Boletín Oficial del Estado n.º 122, de 2 de mayo de 2020. [https://www.boe.es/eli/es/res/2020/04/29/\(5\)/con](https://www.boe.es/eli/es/res/2020/04/29/(5)/con)
- ESPON (European Spatial Planning Observation Network). *ESPON 3.4.3. The modifiable areas unit problem. Final report*. Luxemburgo. Comisión Europea, nov. 2006. Puede acceder en: https://archive.espon.eu/sites/default/files/attachments/espon343_maup_final_version2_nov_2006.pdf
- EUROSTAT. *Recommendations for a harmonized definition of calculation of surface area of territorial units. Methods and Nomenclature. Theme I*. Luxemburgo. Comisión Europea, 1999. Puede acceder en: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/ca-22-99-886-3a>
- . *Methodological manual on territorial typologies: 2018 edition*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2019. <https://data.europa.eu/doi/10.2785/930137>

- . *GridMaker*. Version 1.3. Luxemburgo: Comisión Europea, 2021a. Puede acceder en: <https://github.com/eurostat/GridMaker>
- . GISCO. GEOSTAT. Census *grid* 2021. Luxemburgo: Comisión Europea. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/population-distribution/geostat> [consulta: sep. 2024a].
- . GISCO. Geodata. *Grids*. Luxemburgo: Comisión Europea. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/grids> [consulta: sep. 2024b].
- . GISCO. Population distribution. Luxemburgo: Comisión Europea. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/population-distribution#-GEOSTAT%202006%20grid%20dataset> [consulta: sep. 2024c].
- FLOW Project. *The role of walking and cycling in reducing congestion: a portfolio of measures*. Bruselas, 2016. Puede acceder en: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5aad3a7c&appId=PPGMS>
- FREIRE, Sergio y Stamatia Halkia. «Towards a 100-m, GHSL-based population *grid* in Europe» [ponencia]. En *European Forum for Geography and Statistics (EFGS) Conference 2015*. Viena, 10-12 de nov. 2015.
- FREIRE, Sergio, Stamatia Halkia, Martino Pesaresi y Daniele Ehrlich. *Urban and Regional Built-up Analysis (URBA) Production of a population grid in Europe (1km of resolution)*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2015 (JRC Technical Report EUR n.º 27482). Puede acceder en: <https://dx.doi.org/10.2788/68127>
- FREIRE, Sergio, Kytt MACMANUS, Martino PESARESI, Erin DOXSEY y Jane MILLS. «Development of new open and free multi-temporal global population *grids* at 250m resolution» [ponencia]. En *19th AGILE Conference on Geographic Information Science*. Helsinki, 14-17 de junio de 2016. Puede acceder en: https://agile-gi.eu/images/conferences/2016/documents/shortpapers/152_Paper_in_PDF.pdf
- GALLEGO, Francisco Javier y Steve Peedell. «Using CORINE land cover to map population density». En *Towards agri-environmental indicators. Integrating statistical and administrative data with land cover information*. Luxemburgo: Office for Official Publications of the European Communities (2001): capítulo 6. Puede acceder en: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3888793/5811521/KS-AZ-01-001-EN.PDF.pdf/76131917-bdde-461a-a760-5ed6201dfcbb?t=1414778669000>
- GALLEGO, Francisco Javier. «A population density *grid* of the European Union». *Population & Environment* 31, n.º 6, (jul. 2010): 460-473. Puede acceder en: <https://doi.org/10.1007/s11111-010-0108-y>
- GEORGATI, Marina, João MONTEIRO, Bruno MARTINS y Carsten KEBLER. «Spatial Disaggregation of Population Subgroups Leveraging Self-Trained Multi-Output Gradient Boosting Regression Trees». *AGILE: GIScience Series*, 3 (oct.2019): 5. Puede acceder en: <https://doi.org/10.5194/agile-giss-3-5-2022>
- GEORGATI, Marina, João MONTEIRO, Bruno MARTINS, Carsten KEBLER y Henning S. HANSEN. «Modeling population distribution: a visual and quantitative analysis of gradient boosting and deep learning models for multi-output spatial disaggregation». *Transactions in GIS* 28, n.º 2 (abr. 2024): 130-153. <https://doi.org/10.1111/tgis.13130>
- GOERLICH GISBERT, Francisco José. *Distribución de la renta, crisis económica y políticas redistributivas*. Bilbao: Fundación BBVA, 2016a. Puede acceder en: <https://www.fbbva.es/publicaciones/distribucion-de-la-renta-crisis-economica-y-politicas-redistributivas/>
- . «Una aproximación volumétrica a la desagregación espacial de la población combinando cartografía temática y datos LIDAR». *Revista de Teledetección* 46 (jun. 2016b): 147-163. Puede acceder en: <https://doi.org/10.4995/raet.2016.4710>

- «Superficie planimétrica versus superficie del paisaje en España. Superficie 2D versus superficie 3D». Working Papers Ivie n.º 2022-7. València: Ivie (Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas), 2022. Puede acceder en: http://doi.org/10.12842/WPIVIE_0722
 - «¿Dónde está Wally? –Como y donde situar a la población–» [post de un blog]. València, 30 mar. 2023a. Puede acceder en: <https://go.uv.es/goerlich/Wally>
 - «A system of built-up, building height and built-up volume layers for Spain –with regional, provincial and municipal statistics–». Working Papers Ivie n.º 2023-1. València: Ivie (Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas), 2023b. Puede acceder en: http://doi.org/10.12842/WPIVIE_0123
 - «Acceso a los servicios: La dicotomía rural-urbano». *Papeles de Economía Española* n.º 176 (2023c): 162-180. Puede acceder en: https://www.funcas.es/wp-content/uploads/2023/06/PEE-176_Goerlich.pdf
 - «Catastro INSPIRE –Haciendo fácil lo que las instituciones hacen difícil–» [post de un blog]. València, 27 de noviembre de 2023d. Puede acceder en: <https://www.uv.es/goerlich/Ivie/CatastroINSPIRE.html>
 - «*Grid Statistics –Estadísticas en formato grid–*». Working Papers Ivie n.º 2024-5. València: Ivie, 2024a. Puede acceder en: http://doi.org/10.12842/WPIVIE_0524
 - «Censo 2021 versus Padrón 2021 –¡Y algunas otras cuestiones censales!–». Working Papers Ivie n.º 2024-1. València: Ivie, 2024b. Puede acceder en: http://doi.org/10.12842/WPIVIE_0124
 - «HIPGDAC-ES: Historical Population *Grid* Data Compilation for Spain (1900-2021) –Version 0 (beta)–». Working Papers Ivie n.º 2024-2. València: Ivie, 2024c. Puede acceder en: http://doi.org/10.12842/WPIVIE_0224
- GOERLICH GISBERT, FRANCISCO JOSÉ e ISIDRO CANTARINO MARTÍ. *Una grid de densidad de población para España*. Bilbao: Fundación BBVA, 2012. Puede acceder en: <https://www.fbbva.es/publicaciones/una-grid-de-densidad-de-poblacion-para-espana/>
- «A population density *grid* for Spain». *International Journal of Geographical Information Science* 27, n.º 12 (jun. 2013a): 2247-2263. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.799283>
 - «Geodemografía: coberturas del suelo, sistemas de información geográfica y distribución de la población». *Investigaciones Regionales* 25 (primavera 2013b): 165-191. Puede acceder en: <https://investigacionesregionales.org/es/article/geodemografia-coberturas-del-suelo-sistemas-de-informacion-geografica-y-distribucion-de-la-poblacion/>
 - «Comparing bottom-up and top-down population density *grids*: The Spanish census 2011» [ponencia]. En *European Forum for Geography and Statistics (EFGS) Conference 2014*. Cracovia, 22-24 oct. 2014.
 - «Census *Grid* 2011. Una evaluación metodológica». Working Papers Serie EC n.º 2015-02. València: Ivie, 2015. Puede acceder en: <https://doi.org/10.12842/wpasec-2015-02>
 - «*Grid* poblacional 2011 para España. Evaluación metodológica de diversas posibilidades de elaboración». *Estudios Geográficos* 78, n.º 282 (2017): 135-163. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201705>
 - «Un índice de rugosidad del terreno a escala municipal –updated– Superficie 2D versus superficie 3D y rugosidad». Working Papers Ivie n.º 2022-8. València: Ivie, 2022. Puede acceder en: http://doi.org/10.12842/WPIVIE_0822
- GOERLICH GISBERT, FRANCISCO JOSÉ y ANTONIO VILLAR NOTARIO. *Desigualdad y bienestar social. De la teoría a la práctica*. Bilbao: Fundación BBVA, 2009. Puede acceder en: <https://www.fbbva.es/publicaciones/desigualdad-y-bienestar-social-de-la-teoria-a-la-practica/>

- GOERLICH GISBERT, Francisco José y Pedro José PÉREZ VÁZQUEZ. «LAU2boundaries4spain: R package providing LAU2 (municipalities) data geometries for Spain for 2002-2021». ROpenSpain [repositorio], 2021. Puede acceder en: <https://ropenspain.github.io/LAU2boundaries4spain/>
- GOERLICH GISBERT, Francisco José y Silvia MOLLÁ MARTÍNEZ. «Desequilibrios demográficos en España: evolución histórica y situación actual». *Presupuesto y Gasto Público* 102 (2021): 31-54. Puede acceder en: <https://www.ief.es/docs/destacados/publicaciones/revistas/pgp/102.pdf#page=31>
- GOERLICH GISBERT, Francisco José y Ernest REIG MARTÍNEZ (dirs.). *Las áreas urbanas funcionales en España. Economía y calidad de vida*. Bilbao: Fundación BBVA, 2020. Puede acceder en: <https://www.fbbva.es/publicaciones/las-areas-urbanas-funcionales-en-espana-economia-y-calidad-de-vida/>
- GOERLICH GISBERT, Francisco José, Francisco RUIZ, Pilar CHORÉN RODRÍGUEZ y Carlos ALBERT PÉREZ. *Cambios en la estructura y localización de la población. Una visión de largo plazo (1842-2011)*. Bilbao: Fundación BBVA, 2015. Puede acceder en: <https://www.fbbva.es/publicaciones/cambios-en-la-estructura-y-localizacion-de-la-poblacion-una-vision-de-largo-plazo-1842-2011/>
- GOERLICH GISBERT, Francisco José, Joaquín MAUDOS VILLARROYA y Silvia MOLLÁ MARTÍNEZ. *Distribución de la población y acceso a los servicios públicos*. Madrid: Fundación Ramón Areces, 2021. Puede acceder en: <https://www.fundacionareces.es/fundacion-areces/es/publicaciones/distribucion-de-la-poblacion-y-accesibilidad-a-los-servicios-en-espana.html>
- GONZÁLEZ Leonardo, Miguel, Niall NEWSHAM y Francisco ROWE. «Understanding population decline trajectories in Spain using sequence analysis». *Geographical Analysis* 55, n.º 4 (oct. 2023): 495-516. Puede acceder en: <https://doi.org/10.1111/gean.12357>
- GOODCHILD, Michael F. y N. Siu-Ngan LAM. «Areal interpolation: a variant of the traditional spatial problem». *Geo-Processing* 1, n.º 3 (1980): 297-312.
- GRIPPA, Taïs, Catherine Linard, Moritz Lennert, Stefanos Georganos, Nicholas Mboga, Sabine Vanhuyse, Assane Gadiana y Eléonore Wolff. «Improving urban population distribution models with very-high resolution satellite information». *Data* 4, n.º 1 (ene. 2019): 13. Puede acceder en: <https://doi.org/10.3390/data4010013>
- GUTIÉRREZ, Eduardo, Enrique MORAL, Daniel OTO y Roberto RAMOS. «The spatial distribution of population in Spain: an anomaly in European perspective». *Journal of Regional Science* 63, n.º 3 (junio de 2023): 728-750. <https://doi.org/10.1111/jors.12638>
- HENDERSON, J. Vernon, Dzhamilya NIGMATULINA y Sebastian KRITICOS. «Measuring urban economic density». *Journal of Urban Economics* 125, n.º 3 (sep. 2021): 103188. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2019.103188>
- HIJMANS, Robert J., Roger BIVAND, Emanuele CORDANO, Krzysztof DYBA, Edzer Pebesma y Michael D. Sumner. terra: Spatial Data Analysis. R package version 1.7-71. Disponible en: <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.terra> [consulta: sep. 2024].
- HUANG, Xiao, Cuizhen WANG, Zhenlong LI y Huan NING. «A 100 m population grid in the CONUS by disaggregating census data with open-source Microsoft building footprints». *Big Earth Data* 5, n.º 1 (2021): 112-133. Puede acceder en: <https://doi.org/10.1080/20964471.2020.1776200>
- IDEE (Infraestructura de Datos Espaciales de España). Modelo Digital del Terreno con paso de malla de 5 metros (MDT05) de España. Madrid: Ministerio de Transportes,

- Movilidad y Agenda Urbana. Disponible en: <https://www.idee.es/csw-inspire-idee/srv/spa/catalog.search?#/metadata/spainMDT05> [consulta: sep. 2024]
- INE (Instituto Nacional de Estadística). *Densidad de población de los municipios españoles. Mapas Provinciales. Censos de Población y Viviendas 1991*. Madrid, 1994.
- . Atlas de distribución de renta de los hogares. Año 2021 (ADRH). Madrid, oct. 2023. Disponible en: <https://www.ine.es/censos2021/>
- . *Censos de Población y Viviendas 2021. Metodología. Versión provisional*. Madrid: Subdirección General de Estadísticas Demográficas, junio de 2023. https://www.ine.es/censos2021/censos2021_meto.pdf
- . Censo de Población y Viviendas 2021. Población en celdas de 1 km. Madrid. Disponible en: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176992&menu=resultados&idp=1254735572981#_tabs-1254736195813 [consulta: septiembre de 2024].
- INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe). *D2.8.II.2 Data Specification on Land Cover – Technical Guidelines v3.1.0*. Bruselas: Comisión Europea, 2013. https://knowledge-base.inspire.ec.europa.eu/publications/inspire-data-specification-land-cover-technical-guidelines_en
- . *D2.8.I.2 Data Specification on Geographical Grid Systems – Technical Guidelines v3.2.0*. Bruselas: Comisión Europea, 2023a. https://knowledge-base.inspire.ec.europa.eu/publications/inspire-data-specification-geographical-grid-systems-technical-guidelines_en
- . *D2.8.III.4 Data Specification on Land Use – Technical Guidelines v3.1.0*. Bruselas: Comisión Europea, 2023b. https://knowledge-base.inspire.ec.europa.eu/publications/inspire-data-specification-land-use-technical-guidelines_en
- ITF (International Transport Forum). «Benchmarking accessibility in cities: measuring the impact of proximity and transport performance». International Transport Forum Policy Papers n.º 68. París: OECD Publishing, 2019a. <https://doi.org/10.1787/4b1f722b-en>
- . «Improving transport planning and investment through the use of accessibility indicators». International Transport Forum Policy Papers n.º 66. París: OECD Publishing, 2019b. <https://doi.org/10.1787/46ddbcae-en>
- JABLONSKI, Radoslaw. «Lessons learned from disaggregating population data by using different data sources». En. *European Forum for Geography and Statistics (EFGS) Conference 2011*. Lisboa, 12-14 de oct. 2011. Puede acceder en: http://www.efgs.info/wp-content/uploads/conferences/efgs/2011/radoslaw_jablonski_poland.ppt
- JENNESS, Jeff S. «Calculating landscape surface area from digital elevation models». *Wildlife Society Bulletin* 32, n.º 3 (sep. 2004): 829-39. [https://doi.org/10.2193/0091-7648\(2004\)032\[0829:CLSAFD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2193/0091-7648(2004)032[0829:CLSAFD]2.0.CO;2)
- JRC (Joint Research Centre). GHS-DEGURBA Toolkit (v2.7). Ispra: Comisión Europea. Disponible en: <https://human-settlement.emergency.copernicus.eu/tools.php> [consulta: sep 2024a].
- . GHSL - Global Human Settlement Layer. Open and free data and tools for assessing the human presence on the planet. Isora: Comisión Europea. Disponible en: <https://human-settlement.emergency.copernicus.eu/> [consulta: sep 2024b].
- LANGFORD, Mitchel y David J. UNWIN. «Generating and mapping population density surfaces within a geographical information system». *The Cartographic Journal* 31, n.º 1 (1994): 21-26. <https://doi.org/10.1179/000870494787073718>

- LANGFORD, Mitchel. «Obtaining population estimates in non-census reporting zones: An evaluation of the 3-class dasymetric method». *Computers, Environment and Urban Systems* 30, n.º 2 (2006): 161-180. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2004.07.001>
- . «Rapid facilitation of dasymetric-based population interpolation by means of raster pixel maps». *Computers, Environment and Urban Systems* 31, n.º 1, (ene. 2007): 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2005.07.005>
- LEYK, Stefan, Andrea E. GAUGHAN, Susana B. ADAMO, Alex de SHERBININ, Deborah BALK, Sergio FREIRE, Amy ROSE et al. «The spatial allocation of population: a review of large-scale gridded population data products and their fitness for use». *Earth System Science Data* 11, n.º 3 (sep. 2019): 1385-1409. Puede acceder en: <https://essd.copernicus.org/articles/11/1385/2019/>
- LOVELACE, Robin, Jakub NOWOSAD y Jannes MUENCHOW. *Geocomputation with R*. Boca Ratón: CRC Press, 2019 <https://r.geocompx.org/>
- LUXEN, Dennis y Christian VETTER. «Real-Time Routing with OpenStreetMap Data». En D. Agrawal et al. (eds.). *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. Nueva York: ACM (Association for Computing Machinery) (2011): 513-516. <https://doi.org/10.1145/2093973.2094062>
- LWIN, KoKo y Yuji MURAYAMA. «A GIS approach to estimation of building population for micro-spatial analysis». *Transactions in GIS* 13, n.º 4 (ago. 2009): 401-414. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2009.01171.x>
- . «Estimation of building population from LIDAR derived digital volume model». En Y. Murayama y R. B. Thapa (eds.). *Spatial analysis and modeling in geographical transformation process: GIS-Based applications*. Dordrecht (Países Bajos): Springer (2011): 87-98. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0671-2_6
- MAFFENINI, Luca, Marcello SCHIAVINA, Michele MELCHIORI, Martino PESARESI y Thomas KEMPER. *GHS-DUG user guide: degree of urbanisation grid user guide. Version 6*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2023a. Puede acceder en: <https://doi.org/10.2760/092009>
- . *GHS-DUG user guide: degree of urbanisation territorial units classifier user guide. Version 3*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2023b. Puede acceder en: <https://doi.org/10.2760/615330>
- MATAS, Anna, Javier ASENSIO, Javier GUTIÉRREZ PUEBLA y Juan Carlos GARCÍA PALOMARES. «Accesibilidad e impacto de las infraestructuras en la cohesión territorial y social». En. *Infraestructuras de Transporte en España: anexo I. La inversión y el stock de infraestructuras de transporte en España*. Madrid: AIREF (Autoridad Independiente de Responsabilidad Fiscal (may.2020): capítulo 9. Puede acceder en: https://www.airef.es/wp-content/uploads/2020/07/INFRAESTRUCTURAS/Anexo-1_La-inversion-y-el-stock-de-infraestructuras-de-transporte-en-Espa%C3%B1a.pdf
- MENNIS, Jeremy y Torrin HULTGREN. «Intelligent dasymetric mapping and its application to areal interpolation». *Cartography and Geographic Information Science* 33, n.º 3 (ene. 2006): 179-194. <https://doi.org/10.1559/152304006779077309>
- MENNIS, Jeremy. «Dasymetric mapping for estimating population in small areas». *Geography Compass* 3, n.º 2 (mar. 2009): 727-745. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2009.00220.x>
- MICROSOFT. GlobalMLBuildingFootprints. Disponible en: <https://github.com/microsoft/GlobalMLBuildingFootprints> [consulta: sep. de 2024].

- MUGURUZA CAÑAS, Carmen y José Miguel SANTOS PRECIADO. «La importancia de las unidades de análisis en el modelo de ecología factorial». *Espacio, tiempo y forma. Serie VI, Geografía* n.º 2 (1989): 87-101. Puede acceder en: <https://doi.org/10.5944/etfvi.2.1989.2456>
- O'SULLIVAN, David, y David W. S. WONG. «A surface-based approach to measuring spatial segregation». *Geographical Analysis* 39, n.º 2 (abr. 2007): 147-68. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2007.00699.x>
- OPENSHAW, Stan. *The modifiable areal unit problem*. Norwick: Geo Books, 1983.
- OSM Foundation. OpenStreetMap. Cambridge. Disponible en: <https://www.openstreetmap.org/> [consulta: sep. 2024a].
- . OSRM API Documentation. Cambridge. Disponible en: <https://project-osrm.org/docs/v5.24.0/api/#> [consulta: sep. 2024b].
- . Project OSRM. Cambridge. Disponible en: <https://project-osrm.org/> [consulta: sep. 2024c].
- . Project OSRM. Open Source Routing Machine: The OpenStreetMap Data Routing Engine. Luxemburgo: Comisión Europea. Disponible en: <https://github.com/Project-OSRM> [consulta: sep. 2024d].
- OSM Foundation y Geofabrik. OpenStreetMap Data Extracts. Cambridge (Reino Unido): Karlsruhe (Alemania). Disponible en: <https://download.geofabrik.de/> [consulta: septiembre de 2024].
- PAJARES, Elias, Rafael MUÑOZ NIETO, Liqiu MENG y Gebhard WUFHORST. «Population Disaggregation on the Building Level Based on Outdated Census Data». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 10, n.º 10 (oct. 2021): 662. Puede acceder en: <https://doi.org/10.3390/ijgi10100662>
- PALACIOS, Daniela, Felix BACHOFER, Thomas ESCH, Wieke HELDENS, Andreas HIRNER, Mattia MARCONCINI, Alessandro SORICETTA et al. «New perspectives for mapping global population distribution using world settlement footprint products». *Sustainability* 11, n.º 21 (oct. 2019): 6056. Puede acceder en: <https://doi.org/10.3390/su11216056>
- PAPADOPOULOS, Efthymis, Alexandros SDOUKOPOULOS e Ioannis POLITIS. «Measuring compliance with the 15-minute city concept: state-of-the-art, major components and further requirements». *Sustainable Cities and Society* 99 (dic. 2023): 104875. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104875>
- PEBESMA, Edzer. «Simple features for R: standardized support for spatial vector data». *The R Journal* 10, n.º 1 (2018): 439. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- PEBESMA, Edzer, y Roger BIVAND. *Spatial data science: with applications in R*. 1.a ed. Boca Ratón (EE. UU.): CRC Press, 2023. <https://doi.org/10.1201/9780429459016>
- PESARESI, Martino, Michele MELCHIORRI, Alice SIRAGUSA y Thomas KEMPER (eds.). *Atlas of the Human Planet 2016. Mapping Human Presence on Earth with the Global Human Settlement Layer*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2016. Puede acceder en: <https://dx.doi.org/10.2788/889483>
- POELMAN, Hugo. «A walk to the park? Assessing access to green areas in Europe's Cities». Working Paper n.º 01/2016. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2016. Puede acceder en: https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/work/2016_03_green_urban_area.pdf
- . «A walk to the park? Assessing access to green areas in Europe's Cities. Update using completed Copernicus Urban Atlas Data. Update Using Completed Copernicus Urban Atlas Data». Working Paper n.º 01/2018. Luxemburgo: Oficina

- de Publicaciones de la Unión Europea, 2018. Puede acceder en: https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/work/2018_01_green_urban_area.pdf
- POELMAN, Hugo y Lewis DIJKSTRA «Measuring access to public transport in European cities». Working Paper n.º 01/2015. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2015. Puede acceder en: https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/work/2015_01_publ_transp.pdf
- . «Access to universities in the EU: a regional and territorial analysis». Regional Focus n.º 01/2018. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, diciembre de 2018. Puede acceder en: <https://doi.org/10.2776/396311>
- POELMAN, Hugo, Lewis DIJKSTRA y Linde ACKERMANS. «Rail transport performance in Europe: developing a new set of regional and territorial accessibility indicators for rail». Working Paper n.º 03/2020. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2020a. Puede acceder en: <https://data.europa.eu/doi/10.2776/450392>
- . *How many people can you reach by public transport bicycle or on foot in european cities? Measuring urban accessibility for low-carbon modes*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2020b. Puede acceder en: <https://data.europa.eu/doi/10.2776/021137>
- POZOUKIDOU, Georgia y Zoi CHATZIYIANNAKI. «15-Minute City: Decomposing the New Urban Planning Eutopia». *Sustainability* 13, n.º 2 (ene. 2021): 928. Puede acceder en: <https://doi.org/10.3390/su13020928>
- R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2023.
- RASE, D. «Dealing with the modifiable areal unit problem. Spatial transformation methods for the analysis of geographic data». En. *Towards agri-environmental indicators. Integrating statistical and administrative data with land cover information*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas (2001): capítulo 2. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3888793/5811521/KS-AZ-01-001-EN.PDF.pdf/76131917-bdde-461a-a760-5ed6201dfcbb?t=1414778669000>
- REED, Fennis J., Andrea E. GAUGHAN, Forrest R. STEVENS, Greg YETMAN, Alessandro SORICETTA y Andrew J. TATEM. «Gridded population maps informed by different built settlement products». *Data* 3, n.º 3 (sep. 2018): 33. Puede acceder en: <https://doi.org/10.3390/data3030033>
- REHER SULLIVAN, David Seven «Perfiles regionales de la población española en tiempos históricos». En J. A. Fernández y J. Leal (eds.). *Análisis territorial de la demografía española: 2006*. Madrid: Fundación Fernando Abril Martorell. (jul. 2016): 53-83. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2525052>
- REIG MARTÍNEZ, Ernest, Francisco José GOERLICH GISBERT e Isidro CANTARINO MARTÍ. *Delimitación de áreas rurales y urbanas a nivel local. Demografía, coberturas del suelo y accesibilidad*. Bilbao: Fundación BBVA, 2016. Puede acceder en: <https://www.fbbva.es/publicaciones/delimitacion-de-areas-rurales-y-urbanas-a-nivel-local-demografia-coberturas-del-suelo-y-accesibilidad/>
- REPM (Red Española del Pacto Mundial de Naciones Unidas). «ODS 11 Ciudades y comunidades sostenibles». Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Madrid: Naciones Unidas. Disponible en: <https://www.pactomundial.org/ods/11-ciudades-y-comunidades-sostenibles/> [consulta: sep. 2024].
- ROCA, Jorge de la y Diego PUGA. «Learning by working in big cities». *The Review of Economic Studies* 84, n.º 1 (ene. 2017): 106-142. Puede acceder en: <https://doi.org/10.1093/restud/rdw031>

- RODRÍGUEZ, Antonio F., Beatriz ASTUDILLO y Gema MARTÍN-ASÍN. «La base cartográfica numérica 1:25.000 (BCN25)». *Mapping*. n.º 38. (abr./may. 1997): 76-82. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=656755>
- RUIZ-APILÁNEZ CORROCHANO, Borja y Eloy SOLÍS (eds.). *A pie o en bici. Perspectivas y experiencias en torno a la movilidad activa*. Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, 2021. Puede acceder en: http://doi.org/10.18239/atenea_2021.25.00
- SAPENA, Marta, Marlene KÜHNLI, Michael WURM, Jorge E. PATINO, Juan C. DUQUE y Hannes TAUBENBÖCK. «Empiric recommendations for population disaggregation under different data scenarios». *PLoS ONE* 17, n.º 9 (2022): e0274504. Puede acceder en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274504>
- SCHMID, Calvin F. y Earle H. MACCANNELL. «Basic problems, techniques and theory of isopleth mappings». *Journal of the American Statistical Association* 50, n.º 269 (1955): 220-239. <https://doi.org/10.1080/01621459.1955.10501260>
- SCHUG, Franz, David FRANTZ, Sebastian VAN DER LINDEN y Patrick HOSTERT. «Gridded population mapping for Germany based on building density, height and type from Earth Observation data using census disaggregation and bottom-up estimates». *PLoS ONE* 16, n.º 3 (2021): e0249044. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249044>
- SIOSE (Equipo Técnico Nacional del Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España). *Estructura de la Base de Datos SIOSE – MF2. Versión 2.3*. Madrid: D.G. Instituto Geográfico Nacional, 29 de mar. de 2011a. Puede acceder en: http://www.siose.es/SIOSEtheme-theme/documentos/pdf/Base_de_datos_SIOSE_MF2_v2.2.pdf
- . *Ejemplos de salidas gráficas de consultas sobre T_VALORES. Versión 2.0*. Madrid: D.G. Instituto Geográfico Nacional, 1 de feb. 2011b. Puede acceder en: https://www.siose.es/SIOSEtheme-theme/documentos/pdf/Ejemplos_salidas_graficas_consultas_T_VALORES_v2.pdf
- . *Descripción del Modelo de Datos y Rótulo SIOSE2005. Versión 2.2*. Madrid: D.G. Instituto Geográfico Nacional, 1 de feb. 2011c. Puede acceder en: http://www.siose.es/SIOSEtheme-theme/documentos/pdf/ModeloDatos_Rotulo_SIOSE_v2.1.pdf
- . *Documento Técnico SIOSE 2005. Versión 3*. Madrid: D.G. Instituto Geográfico Nacional, 5 mar. 2015. Puede acceder en: https://www.siose.es/SIOSEtheme-theme/documentos/pdf/Doc_tec_SIOSE2005_v3.pdf
- . *Documento Técnico SIOSE AR. Versión 1.3*. Madrid: D.G. Instituto Geográfico Nacional, 23 mar. 2022a. Puede acceder en: https://www.siose.es/SIOSEtheme-theme/documentos/pdf/Doc_tec_SIOSE2005_v3.pdf
- . *Tablas de usos, coberturas y atributos. Versión 1.0*. Madrid: D.G. Instituto Geográfico Nacional, 24 mar. 2022b. Puede acceder en: https://www.siose.es/SIOSEtheme-theme/documentos/pdf/Tablas_Coberturas_Usos_Atributos.pdf
- . *Cubierta Terrestre*. Madrid: D.G. Instituto Geográfico Nacional. Disponible en: <https://www.siose.es/cubierta-terrestre> [consulta: sep. 2024].
- STEINNOCHER, Klaus, Andrea DE BONO, Bruno CHATENOUX, Dirk TIEDE y Lorenz WENDT. «Estimating urban population patterns from stereo-satellite imagery». *European Journal of Remote Sensing* 52, n.º sup2 (ago. 2019): 12-25. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1604081>
- STEVENS, Forrest R., Andrea E. GAUGHAN, Catherine LINARD y Andrew J. TATEM. «Disaggregating census data for population mapping using random forests with remotely-sensed and ancillary data». *PLoS ONE* 10, n.º 2 (feb. 2015): e0107042. Puede acceder en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107042>
- TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN. EUBUCCO (European building stock characteristics in a common and open database for 200+ million individual buildings). Berlín: Centro

- de Cambio Climático de Berlín Brandeburgo; Proyecto CircEular de Horizonte Europa de la Unión Europea. Disponible en: <https://eubucco.com/> [consulta: sep. 2024].
- THEIL, Henri. *Economics and information theory*. Amsterdam: North-Holland; Chicago: Rand McNally, 1967.
- TOBLER, Waldo R. «Smooth pycnophylactic interpolation for geographical regions». *Journal of the American Statistical Association* 74, n.º 367 (1979): 519-530. <https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10481647>
- UHL, Johannes H., Dominic ROYÉ, Keith BURGHARDT, José A. ALDREY VÁZQUEZ, Manuel BOROBIO SANCHIZ y Stefan LEYK. «HISDAC-ES: Historical Settlement Data Compilation for Spain (1900–2020)». *Earth System Science Data* 15, n.º 10 (oct. 2023): 4713-47. Puede acceder en: <https://doi.org/10.5194/essd-15-4713-2023>
- UNIÓN EUROPEA. «Reglamento de ejecución (UE) 2018/1799 de la Comisión de 21 de noviembre de 2018 relativo al establecimiento de una medida estadística directa temporal para la difusión de temas seleccionados del censo de población y vivienda de 2021 geocodificados en una malla de 1 km²». Diario Oficial de la Unión Europea, n.º L 296, de 22 de noviembre de 2018. Puede acceder en: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2018/1799/oj
- VIDAL, Claude, Francisco Javier GALLEGO y Maxime KAYADJANIAN. «Geographical use of statistical data. Methodological overview». En. *Towards agri-environmental indicators. Integrating statistical and administrative data with land cover information*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas (2001): capítulo 1. Puede acceder en: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3888793/5811521/KS-AZ-01-001-EN.PDF.pdf/76131917-bdde-461a-a760-5ed-6201dfcbb?t=1414778669000>
- WAN, Heng, Jim YOON, Vivek SRIKRISHNAN y David JUDI. «Population downscaling using high-resolution, temporally-rich U.S. property data». *Cartography and Geographical Information Science* 49, n.º 1 (ene. 2022): 18-31. Puede acceder en: <https://doi.org/10.1080/15230406.2021.1991479>
- WANG, Xinyu, Xiangfeng MENG y Ying LONG. «Projecting 1 km-grid population distributions from 2020 to 2100 globally under shared socioeconomic pathways». *Scientific Data* 9, n.º 1 (2022): 563. Puede acceder en: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01675-x>
- WICKHAM, Hadley, Mara AVERICK, Jennifer BRYAN, Winston CHANG, Lucy D'AGOSTINO, Romain FRANÇOIS, Garrett GROLEMUND et al. «Welcome to the Tidyverse». *JOSS Journal of Open Source Software* 4, n.º 43 (nov. 2019): 1686. Puede acceder en: <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- WONG, David W. «The Modifiable Areal Unit Problem (MAUP)». En J. Janelle, B. Warf y K. Hansen (eds.). *WorldMinds: geographical perspectives on 100 problems: commemorating the 100th anniversary of the Association of American Geographers 1904-2004: celebrating geography - the next 100 years*. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic (2004): 571-575. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2352-1>
- WU, Shuo-sheng, Xiaomin QIU y Le WANG. «Population estimation methods in GIS and remote sensing: a review». *GIScience & Remote Sensing* 42, n.º 1 (2005): 80-96. Puede acceder en: <https://doi.org/10.2747/1548-1603.42.1.80>
- XIE, Yichun. «The overlaid network algorithms for areal interpolation problem». *Computers, Environment and Urban Systems* 19, n.º 4 (jul./ago. 1995): 287-306. [https://doi.org/10.1016/0198-9715\(95\)00028-3](https://doi.org/10.1016/0198-9715(95)00028-3)
- ZHAO, Song, Yanxu LIU, Rui ZHANG y Bojie FU. «China's population spatialization based on three machine learning models». *Journal of Cleaner Production* 256 (may. 2020): 120644. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120644>

Índice de cuadros

CUADRO 1.1:	Número de polígonos en las tablas básicas de SIOSEAR2017 ...	25
CUADRO 1.2:	Distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las coordenadas del IEM. Madrid	34
CUADRO 1.3:	Resumen sintético de las fuentes de datos utilizadas	40
CUADRO 2.1:	Distribución por tamaños de celda. España, 2021	49
CUADRO 2.2:	Celdas habitadas y densidad. Comunidades autónomas, 2021 ...	50
CUADRO 2.3:	Celdas habitadas, población, altitud y pendiente por intervalos de distancia a la costa más cercana. España, 2021	54
CUADRO 2.4:	Celdas habitadas, población, distancia a la costa y pendiente por intervalos de altitud. España, 2021	56
CUADRO 2.5:	Celdas habitadas, población, altitud y distancia a la costa por intervalos de pendiente (rugosidad) del terreno. España, 2021	57
CUADRO 2.6:	Distribución bivariante de la población por intervalos de altitud y pendiente (rugosidad) del terreno. España, 2021	58
CUADRO 2.7:	Indicadores de desigualdad y concentración de la población. Comunidades autónomas, 2021	61
CUADRO 2.8:	Densidad de población personal y densidad experimentada. Comunidades autónomas, 2021	67
CUADRO 3.1:	Categorías de la clasificación del grado de urbanización de las celdas del nivel 1 y 2	75
CUADRO 3.2:	Categorías de la clasificación del grado de urbanización de las unidades territoriales de los niveles 1 y 2.....	78
CUADRO 3.3:	Distribución de las celdas habitadas y población según tipo de celda. España, 2021.....	82
CUADRO 3.4:	Distribución de los centros urbanos por tamaño de población. España, 2021.....	84
CUADRO 3.5:	Grado de urbanización a nivel municipal. España, 2021	89
CUADRO 3.6:	Distribución de la población según grado de urbanización a nivel municipal. Comunidades autónomas, 2021	92
CUADRO 3.7:	Indicadores sociodemográficos según grado de urbanización. España, 2021.....	95
CUADRO 3.8:	Densidad experimentada según grado de urbanización de la celda por CC. AA: Población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio, 2021	98
CUADRO 5.1:	Número de polígonos en las tablas básicas de SIOSEAR2017 con intersección no nula con GEOSTAT2021. Comunidades autónomas.....	154

CUADRO 5.2:	Características de las celdas de GEOSTAT2021 según cobertura de Edificación y uso Residencial en SIOSEAR2017.....	157
CUADRO 5.3:	Población en las celdas de GEOSTAT2021 según cobertura de Edificación y uso Residencial en SIOSEAR2017	158
CUADRO 5.4:	Celdas habitadas en la <i>grid</i> de 100 m × 100 m y error de validación (%) a diversas resoluciones.....	177
CUADRO 5.5:	Coefficiente de correlación (%) entre las celdas estimadas y las del conjunto de validación a diferentes resoluciones.....	178
CUADRO 5.6:	Celdas habitadas en la <i>grid</i> de 100 m × 100 m, error de validación (%) y coeficiente de correlación (%) entre las celdas estimadas y las del conjunto de validación a diferentes resoluciones para el método seleccionado	184
CUADRO 6.1:	Ciudades seleccionadas. Estadísticos descriptivos	191
CUADRO 6.2:	Accesibilidad a zonas verdes urbanas en ciudades seleccionadas en un tiempo de 10 minutos andando	197
CUADRO 7.1:	Densidad de población y población próxima. Ciudades seleccionadas	215
CUADRO 8.1:	Distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las celdas en la <i>grid</i> estimada de 100 m × 100 m	233
CUADRO A.1.1:	Coberturas de SIOSE AR.....	241
CUADRO A.1.2:	Atributos de las coberturas de SIOSE AR.....	243
CUADRO A.1.3:	Usos de SIOSE AR	243
CUADRO A.2.1:	Distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las celdas en la <i>grid</i> de 1 km × 1 km del IEM. Madrid	246
CUADRO A.2.2:	Distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las celdas en la <i>grid</i> de 100 m × 100 m del IEM. Madrid	248
CUADRO A.2.3:	Distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las celdas en la <i>grid</i> de 500 m × 500 m.....	249
CUADRO A.2.4:	Distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las celdas en la <i>grid</i> de 200 m × 200 m.....	251
CUADRO A.2.5:	Distribución de frecuencias de los tamaños poblacionales de las celdas en la <i>grid</i> de 1 km × 1 km del INE. Madrid.....	252
CUADRO A.2.6:	Matriz de confusión de la <i>grid</i> de 1 km × 1 km: IEM versus INE. Madrid	254
CUADRO A.3.1:	Celdas habitadas y densidad. Provincia	256
CUADRO A.3.2:	Indicadores de desigualdad y concentración de la población ..	257
CUADRO A.3.3:	Densidad de población personal y densidad experimentada: Población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio	259
CUADRO A.4.1:	Distribución de la población según grado de urbanización a nivel municipal a partir de la <i>grid</i> censal 2021. Provincias	261
CUADRO A.4.2:	Indicadores sociodemográficos según grado de urbanización. Provincias, 2021.....	264
CUADRO A.4.3:	Densidad experimentada según grado de urbanización de la celda por provincias: población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio, 2021	271
CUADRO A.5.1:	Análisis de sensibilidad de los cálculos de accesibilidad de la población a zonas verdes. Bilbao	275

Índice de gráficos, esquemas y figuras

GRÁFICO 2.1:	Población en el 1% de las celdas más pobladas. Provincias, 2021...	62
GRÁFICO 2.2:	Densidad experimentada versus población. Provincias, 2021.....	68
GRÁFICO 3.1:	Porcentaje de población que reside en ciudades. Provincias, 2021.....	94
GRÁFICO 3.2:	Densidad experimentada según grado de urbanización de la celda por provincias: población próxima en un radio de 10 km alrededor del residente promedio, 2021	101
GRÁFICO 4.1:	Población accesible, población próxima y desempeño de la red de transporte por carretera. Comunidades autónomas y España.....	122
GRÁFICO 4.2:	Concentración de la población, desempeño de la red de transporte por carretera y población. Provincias	124
GRÁFICO 4.3:	Desempeño de la red de transporte por carretera y grado de urbanización (DEGURBA). Comunidades autónomas.....	126
GRÁFICO 4.4:	Desempeño de la red de transporte por carretera por cortes altimétricos.....	127
GRÁFICO 4.5:	Desempeño de la red de transporte por carretera por intervalos de rugosidad expresada en pendiente del terreno.....	128
GRÁFICO 4.6:	Desempeño de la red de transporte por carretera por intervalos de altitud y rugosidad expresada en pendiente del terreno.....	129
GRÁFICO 5.1:	Error de validación en la <i>grid</i> de 100 m × 100 m según porcentaje de ocupación supuesto en los edificios no residenciales	180
GRÁFICO 5.2:	Celdas habitadas en la <i>grid</i> de 100 m × 100 m según porcentaje de ocupación supuesto en los edificios no residenciales	181
GRÁFICO 6.1:	Distribución de la población de acuerdo con la superficie accesible a zonas verdes urbanas en ciudades seleccionadas en un tiempo de 10 minutos andando	201
GRÁFICO 6.2:	Distribución de la población relativa —histogramas— de la superficie accesible a zonas verdes urbanas en ciudades seleccionadas en un tiempo de 10 minutos andando	202
GRÁFICO 7.1:	Rendimiento de los desplazamientos a pie en 15 y 30 minutos..	227
GRÁFICO 7.2:	Rendimiento de los desplazamientos en bicicleta en 15, 30 y 45 minutos.....	228
ESQUEMA 1:	Estructura y contenido de la monografía	19
ESQUEMA 2.1:	Objetivo y contenido del capítulo 2.....	44
ESQUEMA 3.1:	Objetivo y contenido del capítulo 3.....	73
ESQUEMA 4.1:	Objetivo y contenido del capítulo 4.....	109

ESQUEMA 5.1:	Objetivo y contenido del capítulo 5.....	135
ESQUEMA 6.1:	Objetivo y contenido del capítulo 6.....	189
ESQUEMA 7.1:	Objetivo y contenido del capítulo 7.....	208
FIGURA 1.1:	Representación espacial de la capa de coberturas del suelo en un contexto urbano. Municipio de Madrid	29
FIGURA 1.2:	Representación espacial de la capa de coberturas del suelo en un contexto rural. Municipio de Villavieja del Lozoya (Madrid)	29
FIGURA 1.3:	Representación espacial de la capa de usos del suelo en un contexto urbano. Municipio de Madrid.....	31
FIGURA 1.4:	Representación espacial de la capa de usos del suelo en un contexto rural. Municipio Villavieja del Lozoya (Madrid).....	32
FIGURA 3.1:	Comprensión de celdas contiguas	76
FIGURA 3.2:	Nivel 1 de la clasificación del grado de urbanización: primera y segunda fase.....	79
FIGURA 5.1:	<i>Grid bottom-up</i>	137
FIGURA 5.2:	<i>Grid top-down</i>	137
FIGURA 5.3:	Transferencia de datos entre sistemas zonales incompatibles. Interpolación ponderada por áreas.....	139
FIGURA 5.4:	Acotando espacialmente la población con información auxiliar...	140
FIGURA 5.5:	Transferencia de datos entre sistemas zonales incompatibles. Interpolación ponderada por áreas con información auxiliar ..	141
FIGURA 5.6:	Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con la <i>grid</i> censal 2021 en un contexto urbano. Municipio de Madrid.....	146
FIGURA 5.7:	Representación espacial de la superposición de la capa de usos del suelo con la <i>grid</i> censal 2021 en un contexto urbano. Municipio de Madrid.....	146
FIGURA 5.8:	Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con la <i>grid</i> censal 2021 y la <i>grid</i> 100 m × 100 m en un contexto urbano. Municipio de Madrid.....	147
FIGURA 5.9:	Representación espacial de la superposición de la capa de usos del suelo con la <i>grid</i> censal 2021 y la <i>grid</i> 100 m × 100 m en un contexto urbano. Municipio de Madrid	148
FIGURA 5.10:	Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la <i>grid</i> censal 2021. Municipio Pozuelo del Rey (Madrid).....	149
FIGURA 5.11:	Representación espacial de la superposición de la capa de usos del suelo con las celdas habitadas de la <i>grid</i> censal 2021. Municipio Pozuelo del Rey (Madrid)	149
FIGURA 5.12:	Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la <i>grid</i> censal 2021 y con la <i>grid</i> 100 m × 100 m. Municipio Pozuelo del Rey (Madrid).....	150
FIGURA 5.13:	Representación espacial de la superposición de la capa de usos del suelo con las celdas habitadas de la <i>grid</i> censal 2021 y con la <i>grid</i> 100 m × 100 m. Municipio Pozuelo del Rey (Madrid).....	150

FIGURA 5.14:	Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la <i>grid</i> censal 2021 en un contexto rural. Municipio Villavieja del Lozoya (Madrid)	152
FIGURA 5.15:	Representación espacial de la superposición de la capa de usos del suelo con las celdas habitadas de la <i>grid</i> censal 2021 en un contexto rural. Municipio Villavieja del Lozoya (Madrid)	152
FIGURA 5.16:	Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la <i>grid</i> censal 2021 y con la <i>grid</i> 100 m × 100 m en un contexto rural. Municipio Villavieja del Lozoya (Madrid).....	153
FIGURA 5.17:	Representación espacial de la superposición de la capa de usos del suelo con las celdas habitadas de la <i>grid</i> censal 2021 y con la <i>grid</i> 100 m × 100 m en un contexto rural. Municipio Villavieja del Lozoya (Madrid).....	153
FIGURA 5.18:	Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con la <i>grid</i> censal 2021 en un contexto urbano con viviendas unifamiliares. Municipio Nuevo Baztán (Madrid)	155
FIGURA 5.19:	Representación espacial de la superposición de la capa de usos del suelo con la <i>grid</i> censal 2021 en un contexto urbano con viviendas unifamiliares. Municipio Nuevo Baztán (Madrid)	156
FIGURA 5.20:	Representación espacial de la superposición de la capa de coberturas del suelo con la <i>grid</i> censal 2021. Municipio Pozuelo del Rey (Madrid)	156
FIGURA 5.21:	Representación espacial de la superposición de los polígonos con cobertura Edificación de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la <i>grid</i> censal 2021 en un contexto urbano. Municipio de Madrid.....	159
FIGURA 5.22:	Representación espacial de la superposición de los polígonos con cobertura Edificación de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la <i>grid</i> censal 2021. Municipio Pozuelo del Rey (Madrid)	160
FIGURA 5.23:	Representación espacial de la superposición de los polígonos con cobertura Edificación de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la <i>grid</i> censal 2021 en un contexto rural. Municipio Villavieja del Lozoya (Madrid).....	160
FIGURA 5.24:	Representación espacial de la superposición de los polígonos con cobertura Edificación de la capa de coberturas del suelo con celdas habitadas de la <i>grid</i> censal 2021 en un contexto urbano con viviendas unifamiliares. Municipio Nuevo Baztán (Madrid)	161
FIGURA 5.25:	SIOSE AR: Relación entre las geometrías de usos y de coberturas	162

FIGURA 5.26:	Representación espacial de la superposición de los polígonos con cobertura Edificación de la capa de coberturas del suelo con las celdas habitadas de la <i>grid</i> censal 2021 y la <i>grid</i> 100 m × 100 m en un contexto urbano. Municipio de Madrid	171
FIGURA 5.27:	Determinación de los pesos de distribución a partir de la geometría transicional.....	173
FIGURA 5.28:	Distribución de la población sobre una <i>grid</i> de 1 km × 1 km, GEOSTAT2021. Madrid y alrededores	185
FIGURA 5.29:	Ganancia de resolución de la <i>grid</i> de 100 m × 100 m versus la <i>grid</i> de 1 km × 1 km. Madrid y alrededores	185
FIGURA 5.30:	Distribución de la población sobre una <i>grid</i> de 100 m × 100 m. Madrid y alrededores.....	186
FIGURA 6.1:	Distribución espacial de la población de acuerdo con la superficie accesible a zonas verdes urbanas en un tiempo de 10 minutos andando. Madrid	203
FIGURA 6.2:	Distribución espacial de la población de acuerdo con la superficie accesible a zonas verdes urbanas en un tiempo de 10 minutos andando. Barcelona.....	204
FIGURA 6.3:	Distribución espacial de la población de acuerdo con la superficie accesible a zonas verdes urbanas en un tiempo de 10 minutos andando. Valencia.....	204
FIGURA 6.4:	Distribución espacial de la población de acuerdo con la superficie accesible a zonas verdes urbanas en un tiempo de 10 minutos andando. Palma	205
FIGURA 6.5:	Distribución espacial de la población de acuerdo con la superficie accesible a zonas verdes urbanas en un tiempo de 10 minutos andando. Bilbao	205

Índice de mapas

MAPA 2.1:	Densidad de población a nivel municipal. Censo 2021	45
MAPA 2.2:	<i>Grid</i> de población de 1 km × 1 km. Censo 2021.....	46
MAPA 2.3:	Densidad de población en celdas de 2km × 2km. Censo 2021 ...	47
MAPA 2.4:	Altitud versus Rugosidad: Celdas de 1km × 1km	55
MAPA 3.1:	Centros urbanos y agrupaciones urbanas densas en España a partir de la <i>grid</i> censal 2021: GEOSTAT2021	83
MAPA 3.2:	Centros urbanos y agrupaciones urbanas densas en los municipios de Madrid, Barcelona, València y Bilbao a partir de la <i>grid</i> censal 2021	85
MAPA 3.3:	Clasificación del grado de urbanización de las celdas del municipio de Lorca (30024) a partir de la <i>grid</i> censal 2021	89
MAPA 3.4:	Grado de urbanización a nivel municipal. España, 2021	91
MAPA 4.1:	Áreas accesibles en una isócrona de 90 m y en un radio de 120 km alrededor de una celda dada	113
MAPA 4.2:	Áreas accesibles en una isócrona de 90m truncada al umbral de 120 km y en un radio de 120 km alrededor de una celda dada	114
MAPA 4.3:	Accesibilidad de la población en un tiempo de viaje de 90 m en transporte por carretera	117
MAPA 4.4:	Proximidad de la población en un radio de 120 km alrededor de la celda de referencia	119
MAPA 4.5:	Desempeño de la red de carreteras para el transporte privado.....	120
MAPA 4.6:	Desempeño de la red de carreteras para el transporte privado a nivel provincial.....	123
MAPA 7.1:	<i>Grid</i> de población 100 m × 100 m. Madrid.....	216
MAPA 7.2:	<i>Grid</i> de población 100 m × 100 m. Barcelona	218
MAPA 7.3:	<i>Grid</i> de población 100 m × 100 m. Málaga	220
MAPA 7.4:	<i>Grid</i> de población 100 m × 100 m. Las Palmas de Gran Canaria...	222
MAPA 7.5:	<i>Grid</i> de población 100 m × 100 m. Bilbao	224
MAPA A.2.1:	<i>Grid</i> de población 1 km × 1 km. Madrid.....	247
MAPA A.2.2:	<i>Grid</i> de población 100 m × 100 m. Madrid.....	248
MAPA A.2.3:	<i>Grid</i> de población 500 m × 500 m. Madrid.....	250
MAPA A.2.4:	<i>Grid</i> de población 200 m × 200 m. Madrid.....	251
MAPA A.2.5:	<i>Grid</i> de población 1km × 1km del IEM —Padrón 2021— versus la del INE —Censo 2021—. Celdas con población en una <i>grid</i> pero no en la otra. Madrid.....	255

Índice alfabético

- accesibilidad
a los servicios, 54, 135, 231
de la población a zonas verdes, 18,
187-188, 192-193, 195-196, 197c,
198-199, 199n, 200, 201g-202g,
203, 203f-205f, 206, 230, 235-236,
274-275, 275c
indicadores de, 18, 107, 188, 195,
207, 209, 235
medición de la, 108, 208-209
- ACKERMANS, Linde, 73, 108, 108n,
111n, 121n, 208, 227n, 229n
- Agenda 2030, 187
- aglomeración urbana. 55, 57, 66, 69,
97, 100, 118, 213
- agrupación
rural, 74, 77, 80, 100
urbana, 74-76, 74n, 77n, 82, 104, 234
densa, 74, 76, 83, 83m, 85m-86m. *V.*
t. localidades densas.
semidensa, 74, 76, 80. *V. t.*
localidades semidensas.
- Ajuntament de València, 187
- Alcañiz (Teruel), 123
- Alcobendas (Madrid), 84
- Alcorcón (Madrid), 84
- ALDÁS, Joaquín, 60
- aldea, 80, 88, 90, 93, 95, 125
- Alicante, provincia, 96, 118
- Almería, provincia, 26
- Almonte (Huelva), 83
- altitud, 38, 44, 52-57, 54c, 55m,
56c-58c, 69, 127-129, 129g
- análisis
de sensibilidad, 110, 195n, 274, 275c
regional, 64, 108
urbano, 108, 133
- Andalucía, 15n
- API (interfaz de programación de
aplicaciones), 38
- Aragón, 49, 126, 130
- ArcGIS, 39
- areal weighting interpolation. V.*
interpolación ponderada por áreas
- áreas
de densidad intermedia. *V.*
localidades semidensas.
densamente pobladas. *V.* localidades
densas.
rurales o escasamente pobladas,
78, 104
rurales dispersas, 80, 88, 90, 93, 125
rurales mayormente deshabitadas,
125-126, 130
semidensas. *V.* localidades
semidensas.
suburbanas o periurbanas, 80,
88, 96, 125-126
- ASTUDILLO, Beatriz, 12, 45
- Asturias, Principado de, 46, 51, 57,
60-61, 66
- Autovía Mudéjar, 123
- Ávila, 93, 100, 118
- Azón, Vanessa, 43
- Badalona (Barcelona), 87
- BALINSKI, Michel L., 167, 173
- Banco Mundial, 73
- BANDRÉS, Eduardo, 43
- Barakaldo (Vizcaya), 87
- Barcelona,
ciudad, 48, 84, 85m-86m, 87, 105,
190, 198, 203, 204f, 213-214,
218m-219m, 226m 228,-229n, 229

- provincia, 51, 67, 93, 100, 104, 118, 122, 130
- barreras naturales, 121
- barrios, 134, 196, 214, 230, 236
- marginales, 187
- Base de Datos de Líneas Límite, 38, 81
- BATISTA E SILVA, Filipe, 14, 16n, 136, 144-145, 166
- Benetússer (Valencia), 87
- BIA (*building indoor area*). V. superficie total construida.
- Bilbao, 84, 85m-86m, 87, 190, 195n, 200, 203, 205f, 212-214, 224m-225m, 226-227, 274, 275c
- biodiversidad, 187
- BIVAND, Roger, 39
- BREWER, Cynthia A., 14, 139, 144
- BRONS, Martijn, 108, 108n
- BRUNO, Matteo, 208
- BUFA (*building footprint area*). V. distribución proporcional por áreas de la huella de los edificios, 165, 174-176
- Burgos, provincia, 61-62
- Burjassot (Valencia), 87
- Cáceres, provincia, 96
- calidad de vida, 187, 206-207
- Canarias, 57, 90, 115n, 121
- Cantabria, 57, 126
- CANTARINO, Isidro, 13-14, 22-23, 24n, 38, 43, 53-54, 53n, 71-72, 74, 136, 142, 148, 157, 166-167
- capa
- de destino, 134, 137-138, 142-44, 147, 147n, 149, 151, 166, 169-174, 176, 182
- de origen, 136, 139, 142-143, 147-148, 151, 166, 169-170, 172-173, 183
- CAPDEVILA I SUBIRANA, Joan, 12
- Capital Verde Europea (Valencia), 187
- carga computacional, 65n, 111n, 173, 184, 190
- Casa de Campo (Madrid), 194
- Castellón, provincia, 123
- Castilla y León, 57, 60, 66, 90, 97, 122, 126
- Castilla-La Mancha, 37, 49, 126
- Castillo de Bellver (Palma), 203
- Cataluña, 57, 60, 66, 90, 97, 122, 126
- Catastro, 24, 27, 30, 32, 144-145, 163, 163n, 165, 254
- temático, 145, 232
- celda
- contigua, 75-77, 76f, 87, 167, 194n, 254
- potencialmente habitables, 134, 147, 147n
- rural, 74
- de baja densidad, 74, 77
- de muy baja densidad, 74, 77, 77n, 80, 83
- suburbana o periurbana, 74, 76, 80
- censo 2021, 15n, 16, 21, 21n-22n, 35-38, 36n, 45m-47m, 59, 71-72, 81-82, 109, 134, 183, 189, 212, 231, 237, 255m
- centro urbano, 74-76, 74n, 77n, 81, 83, 85, 87, 105, 193
- Ceuta, 49, 60, 65, 68, 100, 115, 121, 130
- CHATZIYIANNAKI, Zoi,
- CICCONE, Antonio, 64
- ciudades densamente pobladas. V. localidades densas.
- CLC (Corine Land Cover), 23
- CNE (cobertura de coníferas), 27, 274
- cobertura
- compuesta, 24-25
- de agua, 50, 50n-51n
- del suelo, 12, 23-24, 26, 144, 148, 151, 162, 194n, 198, 232. V. *t.* usos del suelo.
- capa de, 29f, 146f-147f, 149f-150f, 152f-153f, 155f-156f, 159f-161f, 171f
- terrestre, 81, 81n
- CODIIGE, 82n
- coeficiente de correlación, 168, 178, 178c, 183-184, 184c, 199, 229, 252
- Comisión Europea, 14, 39, 52, 72-74, 75n, 77-78, 80, 104, 133, 143n, 187, 234
- CONSTRU_BR, 32, 163n
- CONSTRU_SR, 32, 163, 163n
- contigüidad, 74, 194n-195n, 274, 274n, 276
- contornos administrativos, 37-38, 147n
- Coruña, A, provincia, 49
- Cos, Olga de, 138n

- Coslada (Madrid), 84, 87
- Cox, Lawrence H., 167, 173
- CRS (sistema de referencia de coordenadas), 22n, 65, 211
- Cuenca,
ciudad, 68
provincia, 49, 83, 93, 105, 123
- curva de Lorenz, 60
- DEGURBA (clasificación del grado de urbanización), 17, 72-74, 75c, 77-78, 78c, 79f, 80-82, 89m, 95, 97, 100, 105, 125, 126g, 193, 234
- densidad
económica, 18, 44, 208
indicador de, 64, 96, 210
experimentada, 44, 65-66, 67c, 68, 68g, 70, 72, 96-97, 98c-99c, 100, 101g-103g, 104, 112, 212-213, 230, 259c-260c, 271c-273c
indicador de, 72, 94, 97n, 105
- desempeño
de la red de transporte por carretera, 64, 107-108, 112, 115, 115n, 119, 120m, 120-123, 122g, 123m, 124g, 125-131, 126g-129g, 133, 189, 207, 210, 235, 237
índice de, 15, 122-125, 123n, 128, 130
- desigualdad, 44, 58-61, 61c, 257c-259c
- desplazamiento
a pie, 18, 109, 193, 195, 206-208, 210-211, 226-230, 227g, 228n-229n, 235-236, 274, 276
en bicicleta, 18, 207-208, 210-211, 226, 228-230, 228g, 229n, 230, 236
- DÍEZ, Alfonso, 43n
- DIJKSTRA, Lewis, 16n, 73, 108, 108n, 111n, 121n, 208, 227n, 229n
- dirección postal, 33, 36, 37n, 133, 254
- distribución
dasimétrica binaria, 174, 177
proporcional, 141, 174-176, 180, 182
por áreas de la huella de los edificios residenciales, 165, 175-176
por volúmenes edificados, 175-176, 180, 182. *V. t.* superficie total construida.
uniforme, 59, 140, 169-170, 174, 177
- DMOWSKA, Anna, 136
- DURANTON, Gilles, 63-65, 68, 213, 230
- EDF (cobertura de Edificación), 26-27, 32, 151, 154, 157-159, 157c-158c, 159f-161f, 161n, 162, 164, 170-173, 171f, 182-183
- EDFEC (edificación en construcción), 26, 183
- edificios
de uso residencial (residenciales), 14-15, 144, 157-159, 175-176, 179, 181-182, 183n
no residenciales, 142, 157-158, 175-176, 179-182, 180g-181g
vacíos, 155, 179. *V. t.* vivienda vacía.
- EICHER, Cory L., 14, 139, 144
- emisiones
de carbono, 18, 210
de efecto invernadero, 207
- enfoque dasimétrico, 142
- espacios verdes, 188-189, 192-194, 196, 198, 203, 206, 235, 274. *V. t.* zonas verdes.
urbanos, 187-188, 193-194, 203, 230, 235-236, 274. *V. t.* zonas verdes urbanas.
- ESPON (European Spatial Planning Observation Network), 47
- ETRS89-LAEA, 22n, 52n, 65, 165, 211
- ETRS89-UTM30N, 22n
- ETXEBARRIA Parkea (Bilbao), 203
- EUBUCCO, 144n
- Eurostat, 13-16, 13n, 15n, 21, 21n-22n, 37n, 39, 43, 50, 51n, 73, 74n, 231, 236
- Extremadura, 49, 90, 97, 100, 126, 130
- factores de elevación, 117n
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), 73
- FLOW Project, 207
- Formentera, 115n
- FREIRE, Sergio, 16n, 166
- Fuenlabrada (Madrid), 85
- Fuerteventura, 115n
- Galicia, 46, 49, 51, 66-67, 90, 126
- GALLEGO, F. Javier, 12-13, 136, 144, 148

Geofabrik, 38
geographically weighted regression (regresión geográfica ponderada), 142
 GEORGATI, Marina, 136, 142
 Getafe (Madrid), 85
 Getxo (Vizcaya), 87
 GHSDUG (Degree of Urbanisation Grid), 39, 72, 77n, 80-81
 GHS-DU-TUC (Degree of Urbanisation Territorial Units Classifier), 39, 72, 80-81
 GHSL (Global Human Settlement Layer), 43n, 72, 80, 143n, 166
 Girona, provincia, 118
 GlobalMLBuildingFootprints, 143n
 GOERLICH, Francisco J., 13-14, 15n, 17, 22-23, 22n, 24n, 27, 35-38, 43, 43n, 49n, 51, 51n, 53-54, 53n, 58-60, 65n, 69, 70n, 71-72, 74, 81, 81n, 107, 121n, 136, 141-142, 144, 144n, 147n, 148, 157, 163-164, 165n, 166-167, 177, 187, 190n, 242, 252
 Gomera, La, 115n
 GONZÁLEZ, Miguel, 43
 GOODCHILD, Michael F., 136
 Google Maps, 14
gradient boosting (métodos de potenciación del gradiente), 142
 Gran Canaria, 115n
 granularidad, 69, 109, 142, 190, 206, 209, 211, 226, 230-231, 236
 grid
 100 m × 100 m, 18, 21, 21n, 33, 35, 147, 147f-148f, 147n, 149, 150f, 151, 153f, 165, 167, 171, 171f, 174-177, 177c, 180g-181g, 181, 184, 184c, 185f-186f, 206, 212-213, 230, 233, 235-236, 247, 248c, 254
 bottom-up, 14-15, 36, 43n, 135, 137f, 148, 167
 censal 2021, 17, 21-23, 36, 43, 45, 72, 82, 83m, 85m-86m, 89m, 104, 133-135, 145, 146f-150f, 152f-153f, 155f-156f, 159f-161f, 171f, 232, 261c-263c
 con resolución de celdas de 100 m × 100 m. V. grid 100 m × 100 m.
 de padrón (del IEM), 253-254
 top-down, 13, 136, 137f, 167
 GridMaker, 39
 GRIPPA, Tais, 144
 Guadalajara, provincia, 118, 123
 Guipúzcoa, provincia, 96
 GUTIÉRREZ, Eduardo, 43, 58
 habitantes/km², 44, 46, 51, 119, 212
 HALKIA, Stamatia, 16n
 HALL, Robert E., 64
heatmap, 129
 HENDERSON, J. Vernon, 63, 65-66, 116, 212
 Heterogeneidad, 12, 60-61, 70, 90, 96, 130, 199-200, 206, 214
 HIERRO, El, 115n
 HIJMANS, Robert J., 39
 histogramas, 200, 202g
 Hospitalet de Llobregat, L' (Barcelona), 48, 87
 HUANG, Xiao, 136
 huella de los edificios, 144, 164-165, 174-176
 Huelva, provincia, 83
 Huesca, ciudad, 68, 100, 104 provincia, 100
 HULTGREN, Torrin, 136
 IBIZA, 115n
 IEM (Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid), 33n, 34c, 37, 37n, 246c, 248c, 252-254, 254c-255c
 IGN (Instituto Geográfico Nacional), 23, 38, 81, 164
 ILLES Balears, 49, 57, 66, 96, 115n, 121
 índice de Gini, 59-61
 INE (Instituto Nacional de Estadística), 11, 13n, 14-17, 15n, 21-22, 22n, 26n, 28, 35, 37-38, 43, 45, 133-135, 145, 148, 231, 233, 236-237, 252-254, 254c, 255m
 INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe), 13-14, 16-17, 21-22, 22n, 26, 37, 59n, 134, 165, 165n, 232
 insularidad, 214
 interacción económica, 105

- potencial, 104
social, 105
- isócrona, 111-112, 113m-114m, 114, 116, 116n, 195, 195n, 211
- ITF (International Transport Forum), 18, 108-110, 207, 209, 230
- Jardín Real de Viveros (Valencia), 203
- JENNESS, Jeff S., 53
- JRC (Joint Research Centre), 14, 16n, 72, 80
- KAYADJANIAN, Maxime, 12
- KRITICOS, Sebastian, 63, 65-66, 116, 212
- LAM, N. Siu-Ngan, 136
- LANGFORD, Michel, 135-136
- Lanzarote, 115
- Lardero (La Rioja), 83
- LAVALLE, Carlo, 136
- León, provincia, 123
- Leganés (Madrid), 85
- LEYK, Stefan, 143
- LIDAR, 27, 81, 145, 163, 164n, 242
- LIDAR_HMEAN_EDF, 27, 163, 163n
- límites
administrativos, 51, 71, 226n, 231
de proximidad, 116, 211
- localidades
densas, 78, 80, 88, 96, 125. *V. t.*
agrupaciones urbanas densas.
semidensas, 78, 80, 88, 90, 93, 95-96, 125, 234. *V. t.* agrupaciones urbanas semidensas.
- Logroño, 83
- LONG, Ying, 136
- Lorca, 88, 89m
- LOVELACE, Robin, 49n, 64n
- Lugo, provincia, 51, 61, 93
- LUXEN, Dennis, 38, 116, 211
- LWIN, KoKo, 136
- MACCANNELL, Earle H., 12
- Madrid,
ciudad, 29f, 31f, 48, 51-52, 55-57, 83-84, 85m-86m, 100, 104-105, 118, 123-124, 128, 146f-148f, 159f, 168, 171f, 175, 184, 185f-186f, 190, 193, 193, 198-200, 203, 203f, 212-214, 216m-217m, 226, 228n, 229, 229n-230n, 234, 246c, 247f, 248c, 250m-251m, 252c, 254c, 255m
- Comunidad de, 27, 33, 33n, 34c, 35-38, 51-52, 60-61, 66-67, 69-70, 90, 93, 96-97, 100, 122, 130-131, 133, 167, 178n, 246, 252
- MAFFENINI, Luca, 39
- Málaga, ciudad, 84, 214, 220m-221m, 226
- Mallorca, 115n
- MARTÍN-ASÍN, Gema, 12, 45
- MAS, Matilde, 60
- MATAS, Anna, 107
- MAUDOS, Joaquín, 54, 69, 107
- MAUP (Modifiable Areal Unit Problem), 46, 47
- MDSnE2,5 (Modelo Digital de Superficies de Edificación), 38, 164
- Melilla, 49, 60, 65, 68, 96, 100, 115, 121, 130
- MENG, Xiangfeng, 136
- MENNIS, Jeremy, 136
- Menorca, 115n
- método
dasimétrico, 14, 139-140, 142, 144, 151, 170, 179
de los restos mayores, 163, 173
metodología Poelman. *V.* Poelman, Hugo,
Microsoft, 143n
Mislata, 87
modelización estadística, 142, 144
modelo digital de superficies. *V.* MDSnE2,5
- MOLLÁ, Silvia, 17, 43, 51, 54, 69, 107
- Móstoles (Madrid), 85
- movilidad, 16, 107, 236
activa, 18, 207, 226
saludable, 207
urbana, 207
- MUENCHOW, Jannes, 49n, 69n
- MUGURUZA, Carmen, 13
- MURAYAMA, Yuji, 136
- Murcia,
ciudad, 190, 192-193, 198-199, 213
Región de, 88, 90, 122-123
Naciones Unidas, 187

Navarra, Comunidad Foral de, 83, 164n
 Nervión, río, 203
 NEWSHAM, Niall, 43
 NIGMATULINA, Dzhamilya, 63, 65-66,
 116, 212
 NOWOSAD, Jakub, 49n, 64n
 Nuevo Baztán (Madrid), 155f-156f,
 161f

 O'SULLIVAN, David, 167
 OCDE (Organización para la
 Cooperación y el Desarrollo
 Económicos), 73
 ODS (Objetivos de Desarrollo
 Sostenible), 187
 objetivo 11, 187, 187n
 OIT (Organización Internacional del
 Trabajo), 73
 ONU-HÁBITAT (Programa de
 las Naciones Unidas para los
 Asentamientos Humanos), 73
 OPENSHAW, Stan, 47
 OPENSTREETMAPS, 38, 116, 121n,
 144n, 211
 OSRM (Open Source Routing
 Machine), 38, 116, 211
 Ourense, provincia, 93

 padrón georreferenciado, 33-34, 43n,
 168, 254
 País Vasco, 49, 57, 67, 90, 122
 PAJARES, Elias, 143
 PALACIOS, Daniela, 136
 Palma, 199, 203, 205f, 213-214, 227, 229
 Palma, La, 115n
 Palmas de Gran Canaria, Las, 96, 196,
 198-199, 213-214, 222m-223m, 226-
 227
 PAPAPOPOULOS, Efthymis, 208
 parcela catastral, 24, 28, 161-162, 173,
 194n, 232
 Parque del Guinardó (Barcelona), 203
 Parque del Retiro (Madrid), 27
 Parque Güell (Barcelona), 203
 parque urbano, 203, 206
 Paseo del Prado (Madrid), 27
 Paterna (Valencia), 87
 PEBESMA, Edzer, 39
 PEEDELL, Steve, 13

 pendiente del terreno, 121, 128g-129g
 PÉREZ, Pedro J., 38, 81
 perfil sociodemográfico
 periferia, 194-195, 203, 207, 214, 226
 PESARES, Martino, 136
 picnofiláctica,
 interpolación, 138
 restricción, 36, 138, 141-142
 PNOT (Plan Nacional de Observación
 del Territorio), 23
 población,
 accesible, 111-113, 115-119, 115n,
 122, 122g, 129, 211, 230
 concentración de la, 58-59, 61, 66,
 69, 82, 85, 104-105, 118, 124-125,
 124g, 130, 200, 212, 232-233,
 234n, 235
 grado, 58, 60
 indicador, 48, 61c, 257c-259c
 índice, 125, 213
 de 65 años o más, 93
 densidad de, 11, 44, 45m, 47m, 66,
 67c, 74-75, 81, 127, 142, 192, 212-
 213, 215c, 259c-260c
 estándar, 212
 personal, 44, 66, 67c, 212-213,
 259c-260c
 desagregación espacial, 36, 134-135,
 139, 143-144, 148, 166, 174, 177,
 231-232, 234, 253
 dispersión de la, 46, 60-61, 66, 100,
 107, 124, 130, 144, 166, 169-170,
 179-180, 196, 199, 229, 233, 234n,
 253
 distribución de la, 11-13, 17, 21, 33-
 34, 36, 37n, 43-45, 51-52, 54-56,
 59-60, 64, 69, 71, 73, 95-96, 109,
 115, 118, 125, 133-134, 140, 142,
 144, 144n, 182, 184, 185f-186f,
 188, 190, 192, 194, 196, 199,
 201g-202g, 233, 261c-263c
 bivalente de la, 57, 58c
 espacial, 11-12, 17, 35, 43, 52,
 107-108, 110-111, 133, 150,
 167, 192, 200, 203f-205f, 209,
 232, 236, 247, 249, 252, 254
 diurna, 145
 estacional, 145
 georreferenciada, 133

- menor de 16 años, 93, 95
nocturna, 145
próxima, 63-67, 70, 96, 98c-99c, 100, 101g-103g, 105, 111-113, 115-120, 115n, 122, 122g, 125, 129, 210-214, 215c, 226-228, 226n, 230, 236, 259c-260c, 271c-272c
residente, 11-12, 22, 36, 56, 59-60, 84, 111, 139, 144-145, 147, 154-155, 163n, 17, 175-176, 178-179, 188, 203, 231, 234
urbana, 188, 196, 199, 235
volumen de, 35, 57, 84, 214, 254
POELMAN, Hugo, 16n, 73, 108, 108n, 111n, 121, 166-167, 193, 198, 208, 227n, 229n, 276
polígonos
 capa de destino, 138, 140-142
 capa de origen, 138, 140
POLITIS, Ioannis, 208
PONTEVEDRA, provincia, 49, 161n
posesiones africanas, 26, 26n
POZOUKIDOU, Georgia, 208
Pozuelo de Alarcón (Madrid), 85
Pozuelo del Rey (Madrid), 149f-150f, 156f, 160f
PPA (pasto arbolado), 274
PUGA, Diego, 63, 65, 68, 213, 230

R Core Team, 38-39
RACHEV, Svetlozar T., 167, 173
radio de proximidad, 65, 114-115, 121, 211, 213-214, 226
random forest regression (regresión de bosques aleatorios), 142
rango intercuartílico, 199
RASE, D., 47
ráster,
 formato, 13, 81, 165
 información, 39, 49n, 64n, 165n
red
 ciclista, 210, 229n, 230
 de carreteras, 107-108, 112, 115, 119-123, 120m, 121n, 123m. 125, 130, 133, 207, 210, 235, 237
 de transporte por carretera, 124-125, 129-131, 189, 235
 viaria, 38, 65, 193-195, 210, 228n-229n, 230

REED, Fennis J., 143
regla iterativa de la mayoría, 75
regresión lineal, 125, 142
regression trees (árboles de decisión), 142
REHER, David S., 11
REIG, Ernest, 71-72, 74, 187
rendimiento de los desplazamientos, 209, 226-229, 227g-228g, 230
renta
 intraciudad, 206
 neta por hogar, 93, 95-96
REPM (Red Española del Pacto Mundial de Naciones Unidas), 187n
RESBIA (*residential building indoor area*), 165, 176
RESBUFA (*residential building footprint area*). V. distribución proporcional por áreas de la huella de los edificios residenciales.
RESID (uso residencial), 29-30, 158, 161n, 162, 164
resolución espacial, 16, 24-25, 133, 212-213
Retiro (Madrid), 203
Rioja, La, 83, 122-123, 126
Rivas-Vaciamadrid (Madrid), 86-87
ROCA, Jorge de la, 64
RODRÍGUEZ, Antonio F., 12, 45
ROWE, Francisco, 43
rugosidad, 38, 44, 52-57, 53n, 55m, 57c-58c, 121, 127-129, 128g-129g
 índice de, 52-55
RUIZ-APILÁNEZ, Borja, 207

Salamanca, provincia, 96
salud pública, 187
San Fernando de Henares (Madrid), 87
San Sebastián de los Reyes (Madrid), 85
Sanlúcar de Barrameda (Cádiz), 83
Santa Coloma de Gramenet (Barcelona), 87
Santa Cruz de Tenerife, 115n
SANTOS, José M., 13
SAPENA, Marta, 143-144, 151, 177, 178, 181
SCHMID, Calvin F., 12
SCHUG, Franz, 136, 144, 151, 177

- SDOUKOPOULOS, Alexandros, 208
secciones censales, 11, 13, 22, 34, 37,
138, 142, 148, 190, 231-232, 237
Segovia, provincia, 83, 93, 105, 118
servicios
privados, 54, 69, 70n, 107, 135, 231
públicos, 54, 69, 70n, 107, 135, 231
Sevilla,
ciudad, 84
provincia, 67
sf, 39. *V. t.* Pebesma, Edzer.
SIGPAC, 26n
SIOSE (Sistema de Información de
Ocupación del Suelo), 13, 23-24,
24n, 26, 28, 31, 33n, 81, 232
rótulo, 24, 26, 33, 183, 195, 195n,
274, 274n, 276
AR, 182
SIOSE AR, base de datos, 23-26, 25c,
26n, 31, 38, 145, 148, 151, 154c, 155-
157, 157c, 161-162, 161n, 162f, 164-
165, 164n, 170-171, 178, 182-183,
188, 190, 192, 194-195, 194n-195n,
232, 241c-245c, 242, 274, 274n, 276
sistemas zonales incompatibles, 136,
139f, 141f
SOLís, Eloy, 207
source-zone. *V.* capa de origen.
STEINNOCHER, Klaus, 144
STEPINSKI, Tomasz F., 136
STEVENS, Forrest R., 142
superficie
2D, 30n, 53, 53n, 55
3D, 30n, 53, 53n, 55
accesible, 195, 201g-202g, 203f-205f,
276
construida, 30, 30n
edificada, 81, 242
media accesible, 196, 274
municipal, 190, 212
ocupada, 29, 35, 84
terrestre, 50-51, 50n-51n, 65
total construida, 165, 175
verde, 188, 190, 192, 194-196, 195n,
206, 235, 276

T_COMBINADA, 26, 31
T_POLIGONOS, 26-28, 31-32, 151,
159, 161-164, 161n, 163n

T_USOS, 26, 28, 30-31, 33, 161-162,
161n
T_VALORES, 26, 32-33, 33n, 161n,
163, 163n
target-zone. *V.* capa de destino.
TARRAGONA, provincia, 118
Technische Universität Berlin, 144n
territorio vacío, 35, 45, 48, 59, 69, 147,
183-184, 253
Teruel,
ciudad, 68, 123
provincia, 49, 70, 83, 93, 104-105,
123, 130
THEIL, Henri, 60, 63
índice de. *V.* Theil, Henri.
TIRADO, Daniel, 43n
TOBLER, Waldo R., 36, 138, 141-142
Toledo, provincia, 118
Torrent (Valencia), 87
transferencia de datos, 136, 139f, 141f
transporte
por carretera, 64, 107, 111, 117m,
119, 122-123, 122g, 124g, 124-
127, 126g-129g, 129-131, 189,
235, 237
privado, 108-109, 112, 115, 119,
120m, 121, 123m, 130
público, 108n, 109-110, 207-208,
230, 237
saludable, 207
Turia, río, 203
TURNER, Matthew A., 64

UHL, Johannes H., 144n, 165
umbral
de distancia, 114m, 210
de tiempo, 110, 193, 206, 209, 211,
227, 229, 236, 274-276
Unión Europea, 21, 22n
UNWIN, David J., 135
urbanismo sostenible, 187
usos del suelo, 23-24, 26, 31f-32f, 74, 143,
146f, 148f-150f, 152f-153f, 156f, 194n,
198, 232. *V. t.* cobertura del suelo.

Valencia,
ciudad, 84, 85m-86m, 87, 100, 105,
123, 187, 192, 200, 203, 204f,
213-214, 229

- provincia, 67, 97, 118
- Valenciana, Comunitat, 57
- validación,
- conjunto de [datos], 33-34, 36-37, 134-135, 143, 167, 178c, 178n, 183, 184c, 234n, 246
 - error de, 174-177, 177c, 179-181, 180g, 183, 184c
- vectorial,
- formato, 49n, 64n, 81, 165
 - información, 39, 49n, 64n
- Velilla de San Antonio (Madrid), 87-88
- VETTER, Christian, 38, 116, 211
- Viana (Navarra), 83
- VIDAL, Claude, 12
- Villamediana de Iregua (La Rioja), 83
- Villavieja del Lozoya (Madrid), 29f, 32f, 152f-153f, 160f
- vivienda,
- coste de la, 94
 - principales, 22n, 145
 - secundarias, 145
 - unifamiliares, 151, 155f-156f, 161f
 - vacía, 145, 232. *V. t.* edificios vacíos.
- VIZCAYA, 67, 93, 96, 104, 161n
- WAN, Heng, 143
- WANG, Xinyu, 136
- WICKHAM, Hadley, 39
- WONG, David W. S., 47, 167
- Wu, Shuo-S., 136
- XIE, Yichun, 136
- XIRIVELLA (Valencia), 87
- Zamora, provincia, 93, 100
- Zaragoza,
- ciudad, 84, 190, 193, 200, 213, 229
 - provincia, 67, 93
- ZAU. *V.* zonas verdes artificiales y arbolado urbano (ZAU)
- ZHAO, Song, 142
- zonas verdes, 187-188, 190, 192-193, 195-196, 195n, 198-200, 199n, 206, 274-276, 275c
- accesibles, 198, 200. *V. t.*
 - accesibilidad de la población a zonas verdes.
 - artificiales y arbolado urbano (ZAU), 192, 194, 195n, 274
 - urbanas, 18, 188, 193, 195-196, 197c, 199, 201g-202g, 203f-205f, 206. *V. t.* espacios verdes urbanos.

Nota sobre los autores

EQUIPO INVESTIGADOR

Investigadores

Francisco J. Goerlich Gisbert

(Universidad de Valencia e Ivie)

Silvia Mollá Martínez

(Ivie)

Edición

Susana Sabater Millares

(Ivie)

Documentación

Belén Miravalles Pérez

(Ivie)

FRANCISCO J. GOERLICH GISBERT es licenciado en Ciencias Económicas por la Universidad de Valencia, además de doctor y catedrático del Departamento de Análisis Económico en dicha universidad. También es máster en Económicas por la London School of Economics y profesor investigador del Ivie. Coautor de más de diez libros, ha publicado medio centenar de artículos sobre temas de macroeconomía, econometría, economía regional, distribución de la renta y demografía en diversas revistas nacionales e internacionales, tales como *Applied Economics*, *Econometric Theory*, *Economics Letters*, *Social Indicators Research*, *Empirical Economics*, *Regional Studies* y *Review of Income and Wealth*.

SILVIA MOLLÁ MARTÍNEZ es graduada en Economía por la Universidad de Valencia (2014) con Premio Extraordinario, y Premio al Mejor Expediente Académico y máster en Análisis Económico (IDEA Program) por la Universidad Autónoma de Barcelona (2016). Durante sus estudios fue ayudante de investigación en el Ivie y de profesorado en la Universidad Autónoma de Barcelona. Desde 2016 ejerce como técnica de investigación en el Ivie. Sus áreas de especialización son la economía pública, la evaluación de políticas públicas y demografía y territorio.

Disponer de datos de población con altísima resolución facilita la planificación de políticas públicas, permite evaluar con precisión la accesibilidad a servicios esenciales, analizar desigualdades espaciales a las escalas en las que realmente se producen y mejorar la planificación de emergencias. Frente a las limitaciones de las estadísticas basadas en unidades administrativas, Francisco Goerlich y Silvia Mollá proponen un enfoque basado en *grids* regulares de alta resolución, capaces de reflejar con mayor fidelidad cómo se asienta la población sobre el territorio.

La obra parte de la *grid* censal oficial para España, GEOSTAT2021, producida por el Instituto Nacional de Estadística (INE), un producto de gran calidad, pero cuya resolución de 1 km × 1 km resulta insuficiente para numerosas aplicaciones clave. Mediante el uso de información auxiliar de cobertura y uso del suelo a nivel de parcela y una metodología rigurosa e innovadora, los autores logran multiplicar por cien la resolución espacial hasta alcanzar celdas de 100 m × 100 m plenamente consistentes con la información oficial. La validación del producto y la presentación de diversas aplicaciones ilustrativas refuerzan el valor de esta contribución.

Rigurosa, innovadora y aplicada, esta obra se consolida como una referencia imprescindible para investigadores, técnicos y responsables públicos interesados en el análisis territorial avanzado y como guía esencial para el desarrollo de *grids* de población de alta resolución.

Diego Puga Pequeño

Profesor de Economía
CEMFI

Francisco Goerlich y Silvia Mollá, reconocidos por su sólida trayectoria en el análisis demográfico y territorial, nos ofrecen una mirada de extraordinaria precisión sobre la población y el poblamiento de España a partir de la explotación de los datos del INE a escala de 1 km². Y, fieles al «más difícil todavía», los autores dan un paso adicional desarrollando una metodología innovadora que permite descender hasta una resolución de 100 × 100 metros. Como en la fotografía, mayor resolución implica más detalle y, por tanto, mejores herramientas para la planificación territorial y para comprender la geografía de la población, desde las áreas más despobladas hasta las más densamente habitadas. Los autores investigan también las implicaciones de estos datos sobre la accesibilidad, tanto a grandes distancias (capitales o núcleos urbanos), como a entornos cercanos (zonas verdes).

El resultado es una obra de referencia, rigurosa y cuidadosamente elaborada, especialmente valiosa para especialistas en geografía de la población y en planeamiento urbano. A pesar de su carácter técnico, los autores logran presentar los contenidos con claridad y buen pulso divulgativo, haciendo que incluso un público general interesado pueda apreciar su alcance y relevancia.

Albert Esteve Palós

Director
Centro de Estudios Demográficos (CED)
Director de Investigación

Departamento de Sociología, Universidad Autónoma de Barcelona



ISBN 978-84-19751-12-6



www.fbbva.es