

Estudio de Accesibilidad urbana en Madrid

Preproceso, Recolección y Visualización de Datos

Sergio Manrique Mendiola Arraez

Aitana Morote Martínez

Natallia Tsuranava

Lucila Vázquez Soriano

Índice

1. Introducción	2
1.1. Objetivos	2
1.2. Alcance	2
2. Metodología	3
2.1. Selección del área de estudio	3
2.2. Obtención de datos geoespaciales	3
2.2.1. Cálculo de rutas y tiempos mínimos	3
2.3. Selección y extracción de destinos	4
2.4. Construcción de isócronas de accesibilidad	4
2.5. Indicador de accesibilidad por barrio	5
2.5.1. Normalización e índice combinado	5
3. Visualización e interpretación de resultados	6
3.1. Visualización de la red viaria por modo de transporte	6
3.2. Distribución espacial de destinos	12
3.3. Mapas de accesibilidad por barrio	13
3.4. Comparación normalizada e índice combinado	13
3.5. Análisis comparativo: distribución, ranking y relación entre modos de transporte	17
3.6. Visualizaciones interactivas	17
4. Conclusiones finales	19
4.1. Principales hallazgos	19
4.2. Limitaciones del estudio	19
4.3. Trabajo futuro	19

1. Introducción

La accesibilidad urbana es un indicador clave de la calidad de vida en las ciudades, ya que refleja la facilidad con la que la población puede acceder a servicios esenciales como comercio, sanidad, educación u ocio en tiempos razonables de viaje.

El concepto de “ciudad de 15 minutos” propone que la mayoría de las necesidades diarias puedan satisfacerse a menos de 15 minutos a pie, en bicicleta o en transporte público, reduciendo la dependencia del automóvil y fomentando un modelo urbano más sostenible.

En este proyecto estudiamos la accesibilidad urbana en Madrid a partir de redes de calles obtenidas de OpenStreetMap mediante la librería OSMnx, que permite descargar, modelar y analizar redes viarias y otros elementos geoespaciales de manera automatizada.

Para ello, calculamos áreas de alcance (isócronas) de 15 minutos sobre la red urbana en distintos modos de transporte y evaluamos cuántos servicios esenciales quedan accesibles dentro de ese umbral temporal. Finalmente, representamos los resultados sobre mapas por barrios para facilitar la interpretación de los patrones espaciales de accesibilidad.

1.1. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la accesibilidad urbana en Madrid bajo el paradigma de la “ciudad de 15 minutos”, identificando las zonas con mejor provisión de servicios esenciales a distancias caminables. Para ello, se analizan las redes viarias mediante técnicas de grafos y visualización geoespacial avanzada. A continuación, se detallan los objetivos principales:

- Familiarizarse con el funcionamiento de la librería OSMnx de Python para su posterior uso en todo el proyecto.
- Identificar las zonas de Madrid con mejor accesibilidad a servicios básicos (supermercados, sanidad, educación, etc.) bajo la perspectiva de la “ciudad de 15 minutos”.
- Descargar y modelar la red viaria urbana utilizando OSMnx a partir de datos de OpenStreetMap.
- Calcular métricas de grafos (grado, betweenness centrality, etc.) para evaluar la importancia estructural de nodos y ejes en la conectividad urbana.
- Generar visualizaciones estáticas e interactivas de la red y los indicadores de accesibilidad mediante librerías como folium, cartopy o ipyleaflet.

1.2. Alcance

Este estudio se centra en el municipio de Madrid, analizando la accesibilidad urbana desde la perspectiva de la “ciudad de 15 minutos”. Se consideran tres modos de transporte principales: a pie (walk), en bicicleta (bike) y en vehículo particular (drive), priorizando el modo peatonal como referencia principal del concepto.

Los servicios evaluados en esta fase del proyecto incluyen supermercados, centros educativos y centros de salud siendo todos estos datos accesibles gracias a OpenStreetMap, seleccionados por su relevancia en necesidades cotidianas y por su disponibilidad en la base de datos.

Desde el punto de vista técnico, se emplea Python con OSMnx para la descarga y modelado de redes viarias y puntos de interés, y NetworkX para el cálculo de tiempos mínimos de desplazamiento sobre la red. Los resultados se agregan a nivel de barrios y se representan mediante mapas estáticos. Los datos corresponden al snapshot más reciente disponible de OpenStreetMap (enero 2026).

2. Metodología

2.1. Selección del área de estudio

Para la realización del proyecto, hemos escogido la ciudad de Madrid como área de estudio, principalmente debido a su tamaño, ya que de esta forma podemos obtener una gran cantidad y diversidad de datos de interés. El análisis se centra en su red viaria y en el acceso a servicios esenciales y puntos de interés dentro del entorno urbano.

Con respecto a la red viaria, consideraremos tres modos de desplazamiento: a pie, en bicicleta y en automóvil.

Como puntos de interés, estudiaremos la conexión con supermercados, centros educativos y centros de salud.

2.2. Obtención de datos geoespaciales

En primer lugar, como se nos pedía, utilizamos la librería OSMnx de Python para obtener los datos de la red urbana de la ciudad. Esta librería nos permite descargar las redes viarias clasificadas por tipo de movilidad. Para cada modo de desplazamiento se genera un grafo independiente, mediante la función `graph_from_place`, donde los nodos representan intersecciones o cambios en la geometría de la vía, y las aristas representan tramos de calle.

Las aristas del grafo incluyen atributos que nos aportan más información sobre cada tramo de calle. En particular, el atributo `length` indica la longitud de cada tramo en metros, lo que permite trabajar con distancias reales. Con el objetivo de modelar tiempos de desplazamiento, se asigna a cada arista una velocidad estimada mediante la función `add_edge_speeds`, utilizando la información de velocidad máxima (`maxspeed`) cuando está disponible o valores por defecto según el tipo de vía.

```
1 city_name = 'Madrid, Spain'
2
3 G_walk = ox.graph_from_place(city_name, network_type='walk')
4 G_walk = ox.add_edge_speeds(G_walk)
5 G_walk = ox.add_edge_travel_times(G_walk)
```

2.2.1. Cálculo de rutas y tiempos mínimos

El análisis de accesibilidad requiere la obtención de rutas realistas sobre la red urbana, evitando aproximaciones basadas en distancias euclídeas. Para ello, los desplazamientos los modelamos sobre la red viaria real, de forma que las rutas calculadas corresponden a caminos existentes en la ciudad. Con este objetivo empleamos un algoritmo de caminos mínimos, concretamente el algoritmo de Dijkstra. Este algoritmo permite calcular, a partir de un nodo de origen, el coste mínimo acumulado para alcanzar el resto de nodos del grafo.

En nuestro caso, el coste de cada tramo se define mediante el atributo `travel_time`. Es decir, a cada arista se le asigna un peso igual al tiempo estimado que se tardaría en recorrerlo. De este modo, el algoritmo busca el conjunto de nodos que pueden alcanzarse desde un punto de origen minimizando el tiempo total de desplazamiento.

A partir de los tiempos mínimos obtenidos, se construyen las isócronas temporales, definidas como las áreas que pueden alcanzarse dentro de un umbral de tiempo predefinido. En este estudio se adopta un umbral de 15 minutos, criterio frecuentemente utilizado en el análisis de accesibilidad urbana.

Por último, la librería también nos permite obtener delimitaciones espaciales. Obtenemos los barrios de la ciudad de Madrid a partir de los límites administrativos de OpenStreetMap. Para ello, utilizamos las entidades etiquetadas como fronteras administrativas, seleccionando aquellas correspondientes al nivel administrativo `admin_level = 10`, que en el caso de Madrid se asocia a la división en barrios.

```

1 neighborhoods = ox.features_from_place(
2     city_name,
3     tags={'boundary': 'administrative', 'admin_level': '10'}
4 )

```

Tras la descarga de las entidades administrativas, realizamos un proceso de filtrado geométrico para conservar únicamente aquellas representadas mediante geometrías poligonales o multipolygonales, descartando puntos u otras geometrías no adecuadas para el análisis espacial por áreas.

Cada barrio se representa por su centroide geométrico, que actúa como punto de origen en el cálculo posterior de accesibilidad.

2.3. Selección y extracción de destinos

Para evaluar la accesibilidad urbana necesitamos definir qué servicios vamos a considerar, además de tener en cuenta si tenemos a nuestra disposición la posición de esos lugares. En este trabajo usamos como destinos una selección de lugares que representan necesidades cotidianas: supermercados, centros educativos y centros de salud. Estos puntos se obtienen a partir de la información disponible en OpenStreetMap, que proporciona datos georreferenciados sobre una amplia variedad de equipamientos urbanos. Los destinos se extraen mediante sus etiquetas funcionales, lo que permite identificar de forma sistemática cada tipo de servicio dentro del área de estudio. A modo ilustrativo, la extracción de centros de salud se realiza mediante la siguiente consulta:

```

1 health = ox.features_from_place(
2     city_name,
3     tags={'amenity': ['hospital', 'clinic', 'doctors']}
4 )

```

Una vez descargados, unificamos su representación para poder analizarlos de forma consistente. En algunos casos un servicio aparece marcado como un punto, y en otros aparece como un área (por ejemplo, el recinto de un centro educativo o sanitario). Para tratar todos los casos por igual, representamos cada destino mediante un único punto: cuando el destino está definido como un área, seguimos la misma norma que con los barrios y utilizamos su centro (centroide) como ubicación representativa.

2.4. Construcción de isócronas de accesibilidad

Una isócrona es una zona del mapa que representa todo lo que se puede alcanzar desde un punto de partida en un tiempo máximo determinado. En otras palabras, dibuja el alcance realista de una persona moviéndose por las calles, no en línea recta, sino siguiendo la red viaria.

En nuestro caso, construimos isócronas de 15 minutos para cada barrio de Madrid y para distintos modos de transporte. Para ello seguimos estos pasos:

1. **Elegir el punto de salida del barrio:** representamos cada barrio mediante su centroide (un punto que actúa como ubicación representativa del barrio).
2. **Conectar ese punto a la red de calles:** buscamos el **nodo más cercano** de la red viaria (la intersección o punto de la red más próximo al centroide).
3. **Definir el umbral temporal:** fijamos un tiempo máximo de desplazamiento de 15 minutos. Para trabajar de forma homogénea, convertimos este valor a segundos:

$$t_{\max} = 15 \cdot 60$$

4. **Calcular qué partes de la red son alcanzables:** desde el nodo de origen calculamos el tiempo mínimo hasta el resto de nodos siguiendo la red de calles. Para ello usamos el algoritmo de caminos mínimos (Dijkstra), considerando como coste de cada tramo el atributo `travel_time`. Finalmente, nos quedamos con los nodos cuyo tiempo mínimo acumulado es menor o igual que t_{\max} .
5. **Dibujar el área de la isócrona:** con las coordenadas de los nodos alcanzables construimos un polígono que aproxima el área accesible. Este polígono es la isócrona del barrio para el umbral de 15 minutos.

Este procedimiento permite aproximar de forma sencilla el área real de accesibilidad desde cada barrio, teniendo en cuenta la forma de la red urbana y el tiempo estimado de desplazamiento sobre calles reales, no solo juntando dos puntos en línea recta.

2.5. Indicador de accesibilidad por barrio

Una vez obtenida la isócrona de cada barrio, medimos su accesibilidad observando cuántos servicios esenciales quedan dentro de esa zona alcanzable.

El indicador que utilizamos es:

- **Accesibilidad del barrio (por cada modo) = número de destinos dentro de la isócrona de 15 minutos.**

Los destinos considerados en este trabajo son supermercados, centros educativos y centros de salud. Para cada barrio comprobamos qué destinos caen dentro del polígono de su isócrona y realizamos el recuento total. El resultado es un valor numérico por barrio y por modo de transporte que permite comparar qué zonas tienen una mayor provisión de servicios dentro del umbral temporal considerado.

2.5.1. Normalización e índice combinado

Dado que los valores de accesibilidad pueden variar entre modos, aplicamos una normalización para facilitar la comparación. En particular, empleamos una normalización min–max que transforma los valores a un rango común [0, 1], donde 0 representa el barrio con menor accesibilidad y 1 el de mayor accesibilidad dentro de cada modo.

A partir de estas accesibilidades normalizadas definimos un índice combinado de accesibilidad como la media de los tres modos (peatonal, bicicleta y automóvil). Este índice resume en un único valor la accesibilidad global del barrio en 15 minutos y permite realizar comparaciones más directas entre zonas.



Figura 1: Red peatonal (walk) descargada con OSMnx para el municipio de Madrid.

3. Visualización e interpretación de resultados

El objetivo de la visualización es representar de forma clara los resultados del análisis de accesibilidad y facilitar su interpretación. Para ello generamos mapas que muestran: la red viaria descargada desde OpenStreetMap para cada modo de transporte, la distribución de los destinos considerados, y el indicador de accesibilidad agregado por barrios para un umbral temporal de 15 minutos.

3.1. Visualización de la red viaria por modo de transporte

En primer lugar, representamos las redes viarias generadas para cada modo de transporte (Figuras 1, 2 y 3). Estas visualizaciones son útiles para entender la estructura de la ciudad desde el punto de vista de la movilidad: densidad de calles, continuidad de la red y diferencias entre zonas centrales y periféricas.

Además, para facilitar la lectura de resultados, superponemos la red correspondiente a cada modo con la delimitación de barrios (Figuras 4, 5 y 6). Esto permite relacionar la complejidad/densidad de la red con los patrones de accesibilidad observados posteriormente.

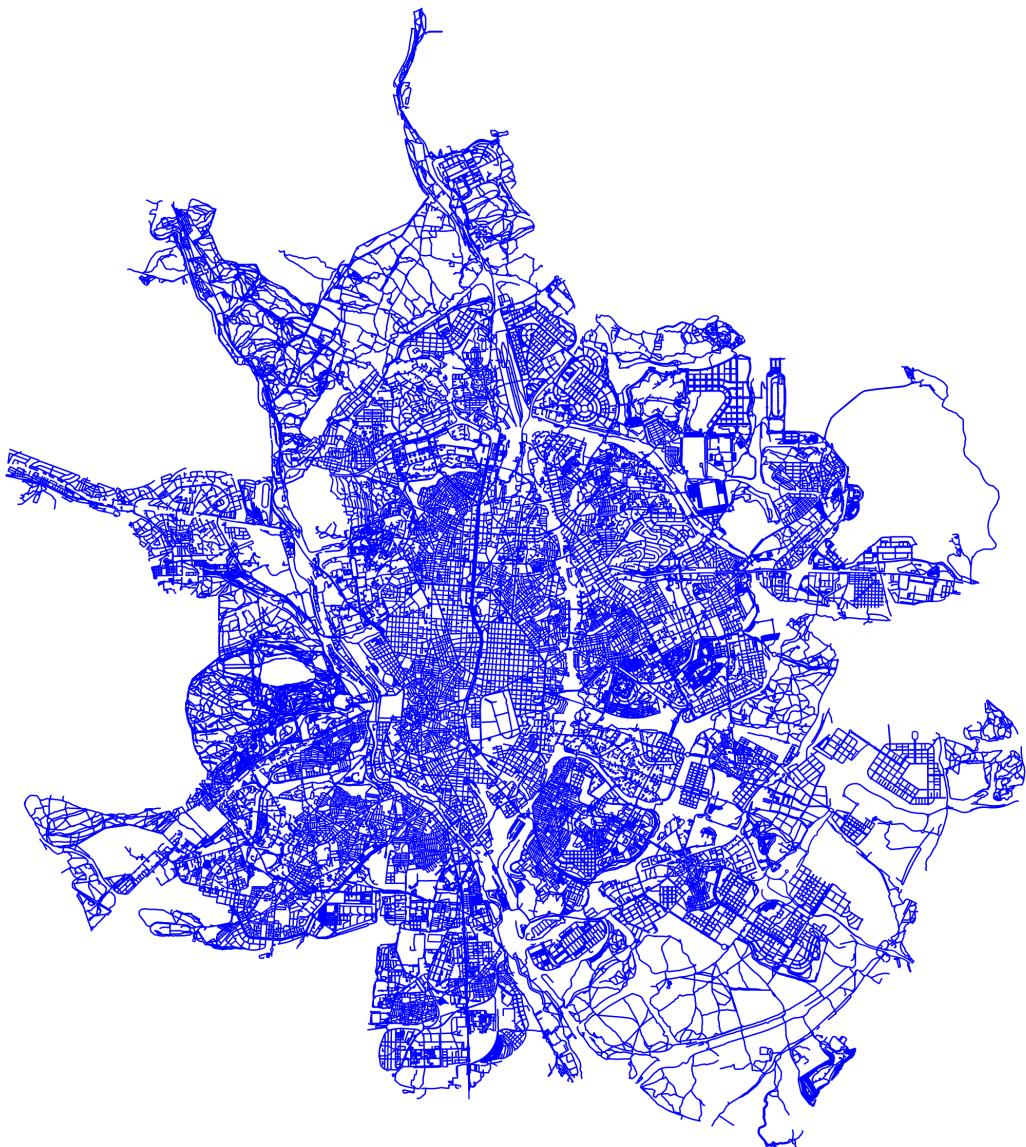


Figura 2: Red ciclista (bike) descargada con OSMnx para el municipio de Madrid.



Figura 3: Red de automóvil (drive) descargada con OSMnx para el municipio de Madrid.



Figura 4: Red peatonal superpuesta con la delimitación de barrios.

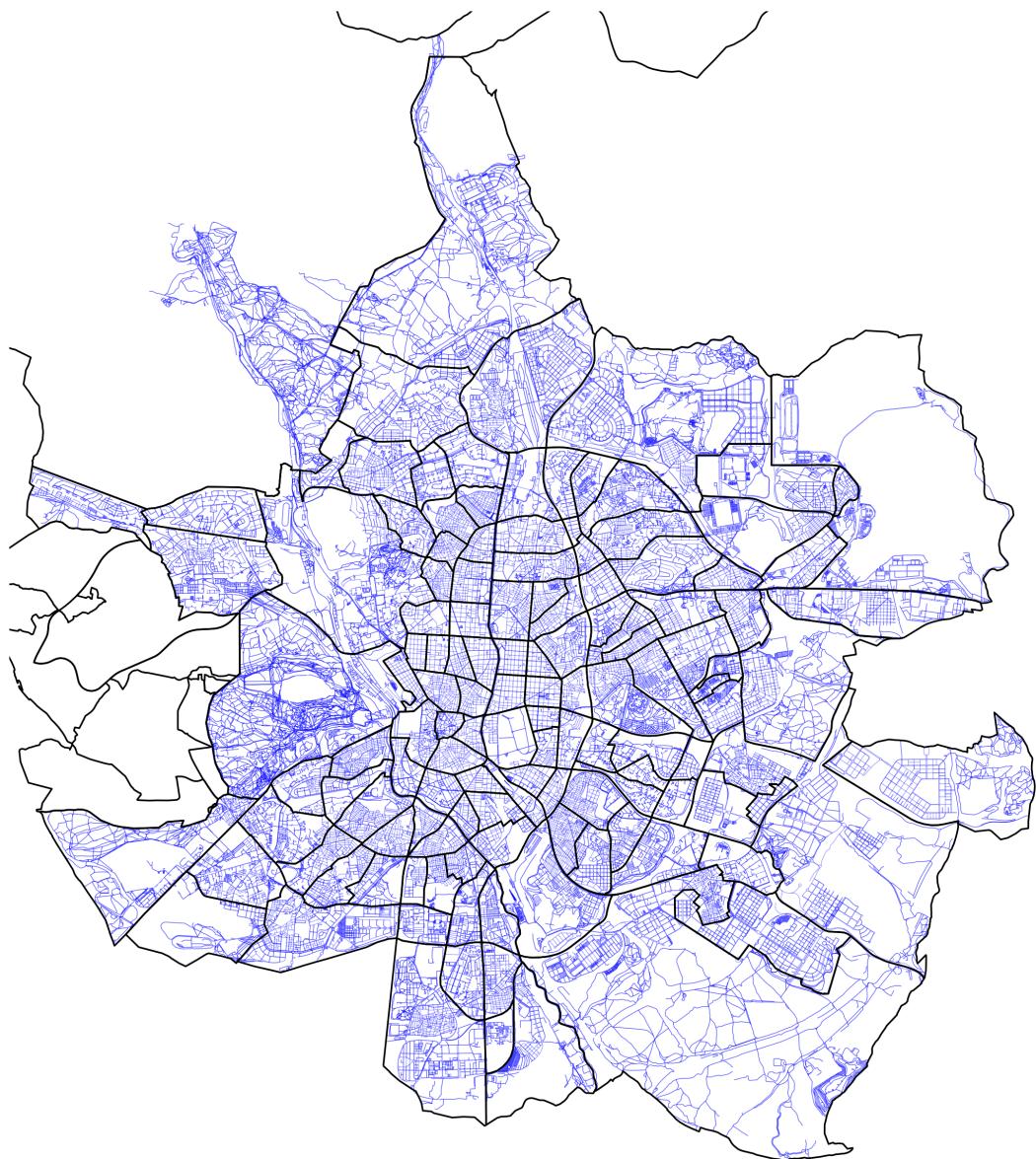


Figura 5: Red ciclista superpuesta con la delimitación de barrios.

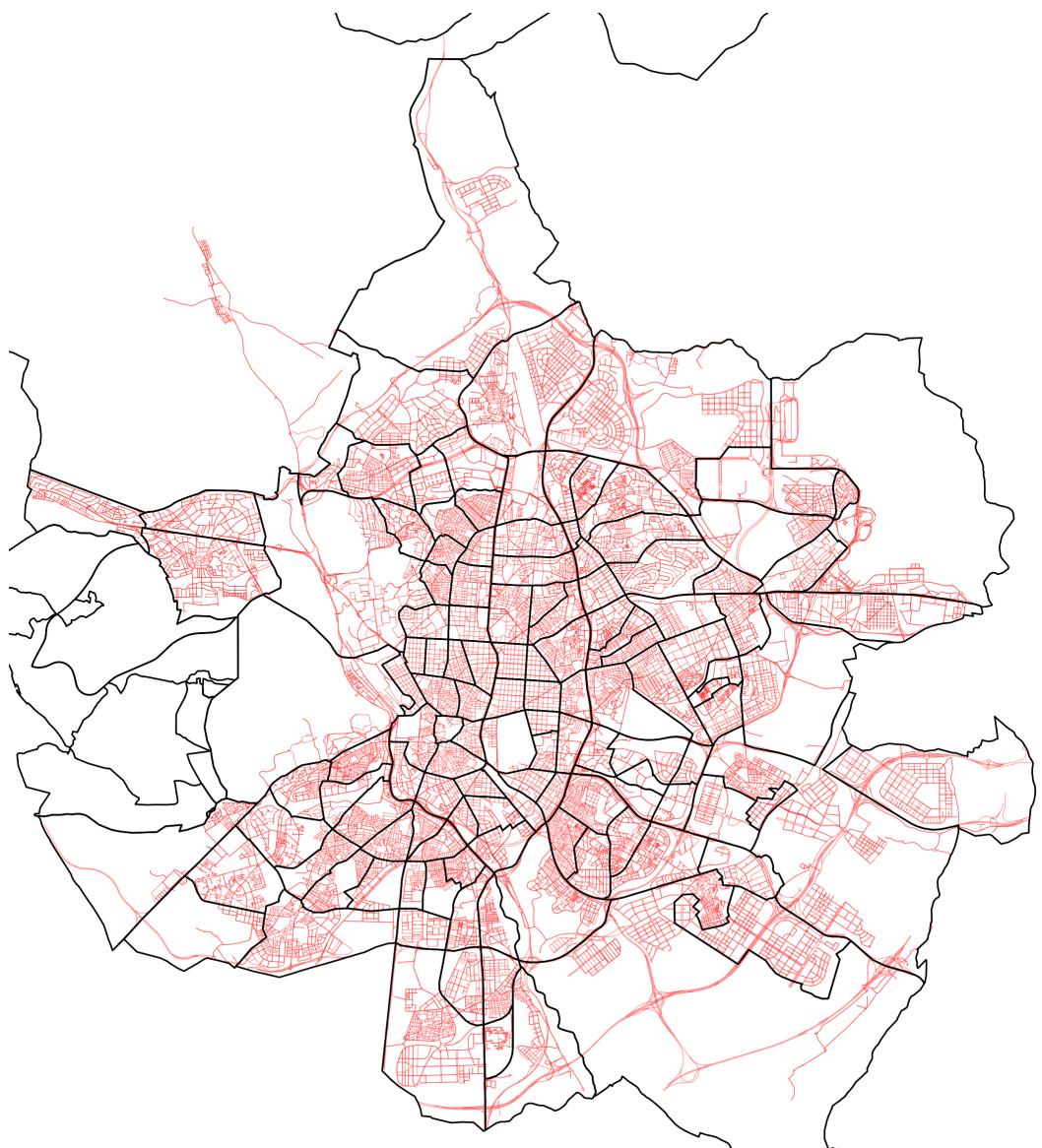


Figura 6: Red de automóvil superpuesta con la delimitación de barrios.

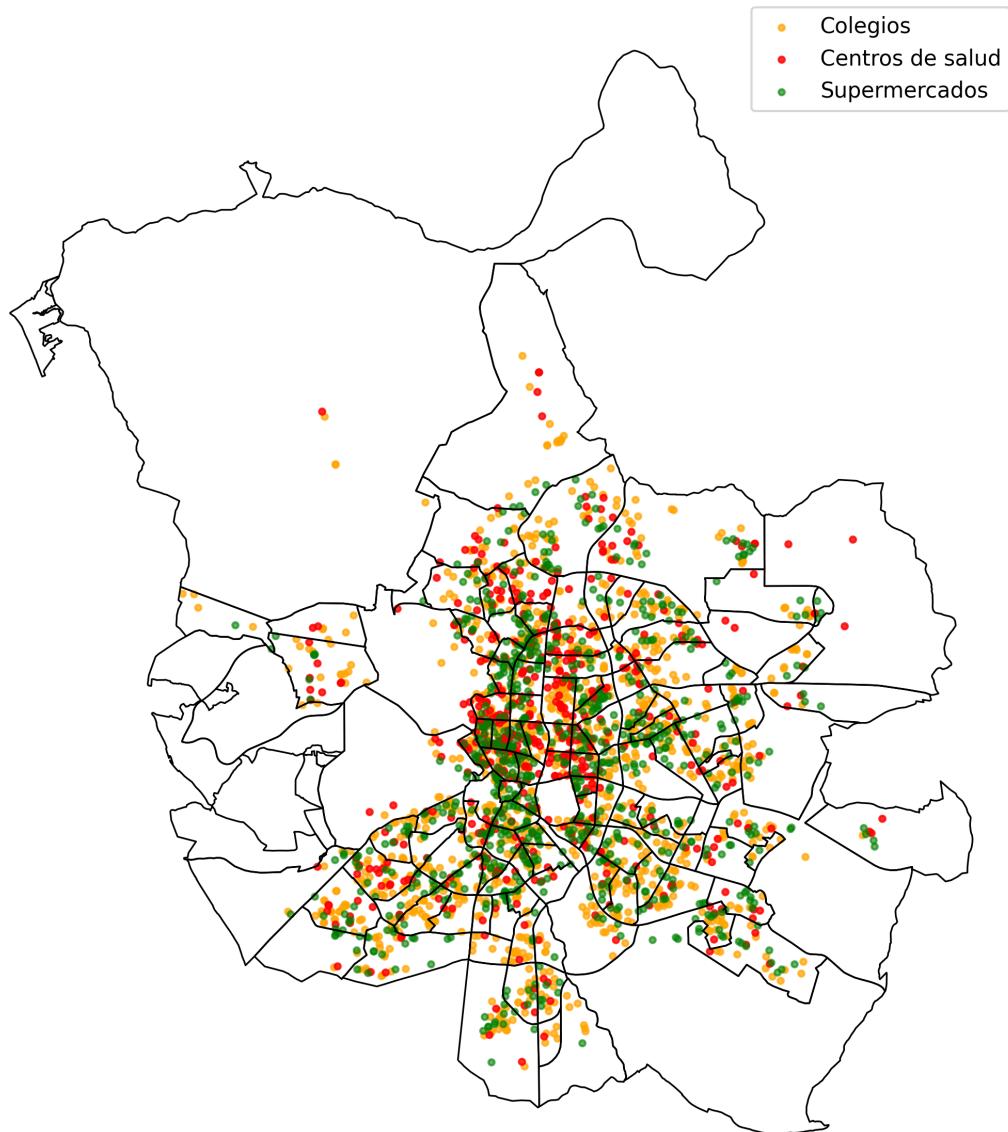


Figura 7: Distribución de destinos considerados: colegios, centros de salud y supermercados.

De forma general, como cabría esperar, estas figuras permiten observar que la red es mucho más densa en el núcleo urbano central y se vuelve más dispersa hacia el exterior. Este hecho es el hecho condicionante acerca del área que puede alcanzarse en 15 minutos en cada modo de transporte y, por tanto, influye directamente en el indicador de accesibilidad.

3.2. Distribución espacial de destinos

El siguiente paso consiste en visualizar los destinos o servicios esenciales utilizados para medir la accesibilidad: colegios, centros de salud y supermercados. Este mapa permite interpretar el indicador de accesibilidad: un barrio puede tener buena accesibilidad porque existen muchos destinos en su entorno cercano, o porque el modo de transporte permite alcanzarlos en el tiempo definido.

En la figura 7 observamos una mayor concentración de destinos en el área central y una menor densidad en zonas periféricas. Este patrón es coherente con los resultados de accesibilidad (Figuras 8, 9 y 10): allí donde hay mayor concentración de destinos es más probable que el recuento dentro del umbral temporal sea mayor.

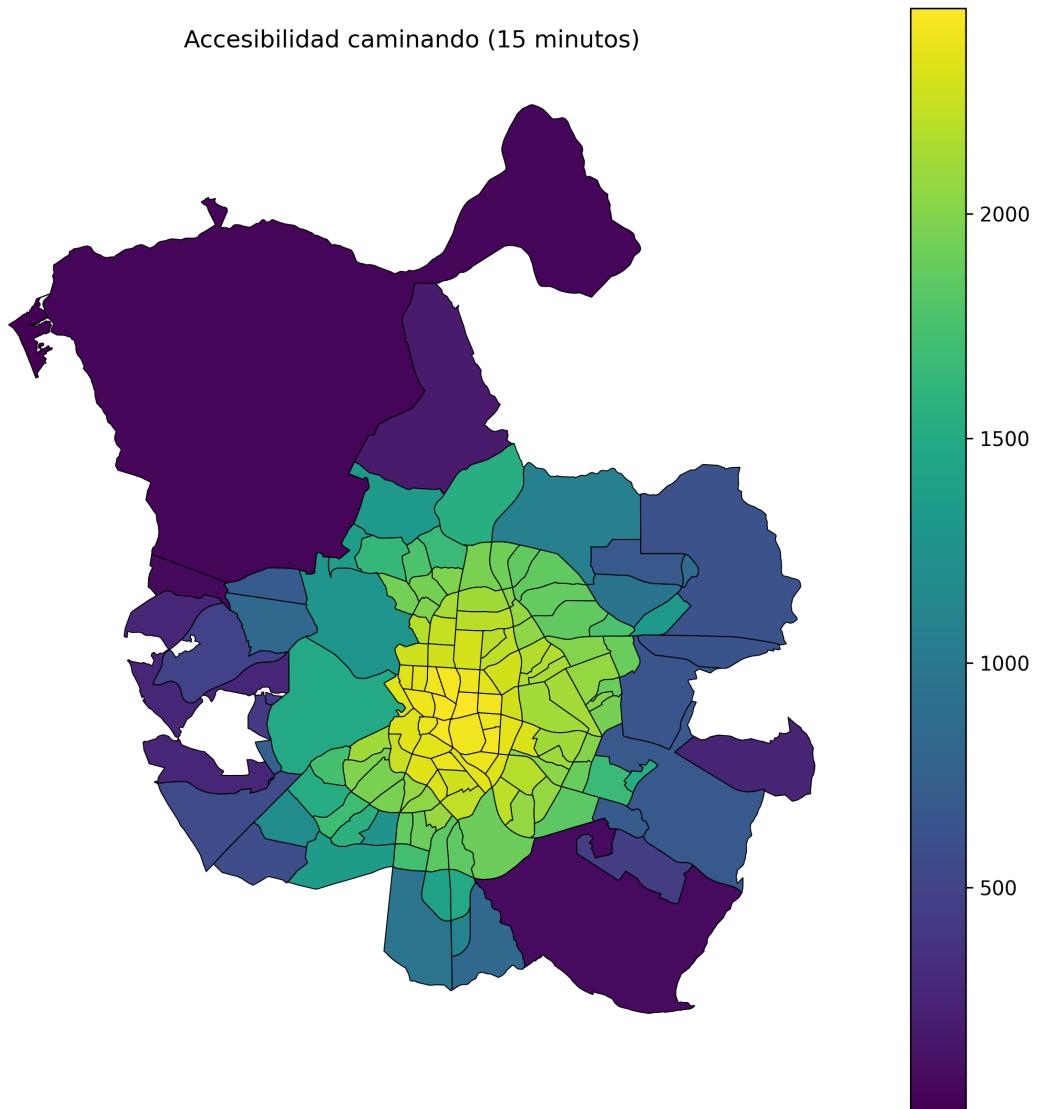


Figura 8: Accesibilidad caminando (15 minutos): número de destinos accesibles por barrio.

3.3. Mapas de accesibilidad por barrio

Una vez calculadas las isócronas de 15 minutos sobre la red y contado el número de destinos alcanzables desde cada barrio, representamos el resultado en un mapa temático por barrios, asignando un color a cada barrio en función de su accesibilidad (Figuras 8, 9 y 10). En este primer acercamiento, el valor mostrado corresponde al recuento de destinos accesibles dentro del umbral temporal.

3.4. Comparación normalizada e índice combinado

Para comparar de manera directa la accesibilidad entre modos de transporte, aplicamos una normalización que transforma la accesibilidad a un rango común $[0, 1]$ en cada modo de transporte. De este modo, los mapas normalizados (Figura 11) muestran el rendimiento relativo de cada barrio dentro de cada modo de transporte.

A partir de las accesibilidades normalizadas, construimos un índice combinado como la media de los tres modos de transporte. Este índice resume en un único valor la accesibilidad global del barrio en 15 minutos.

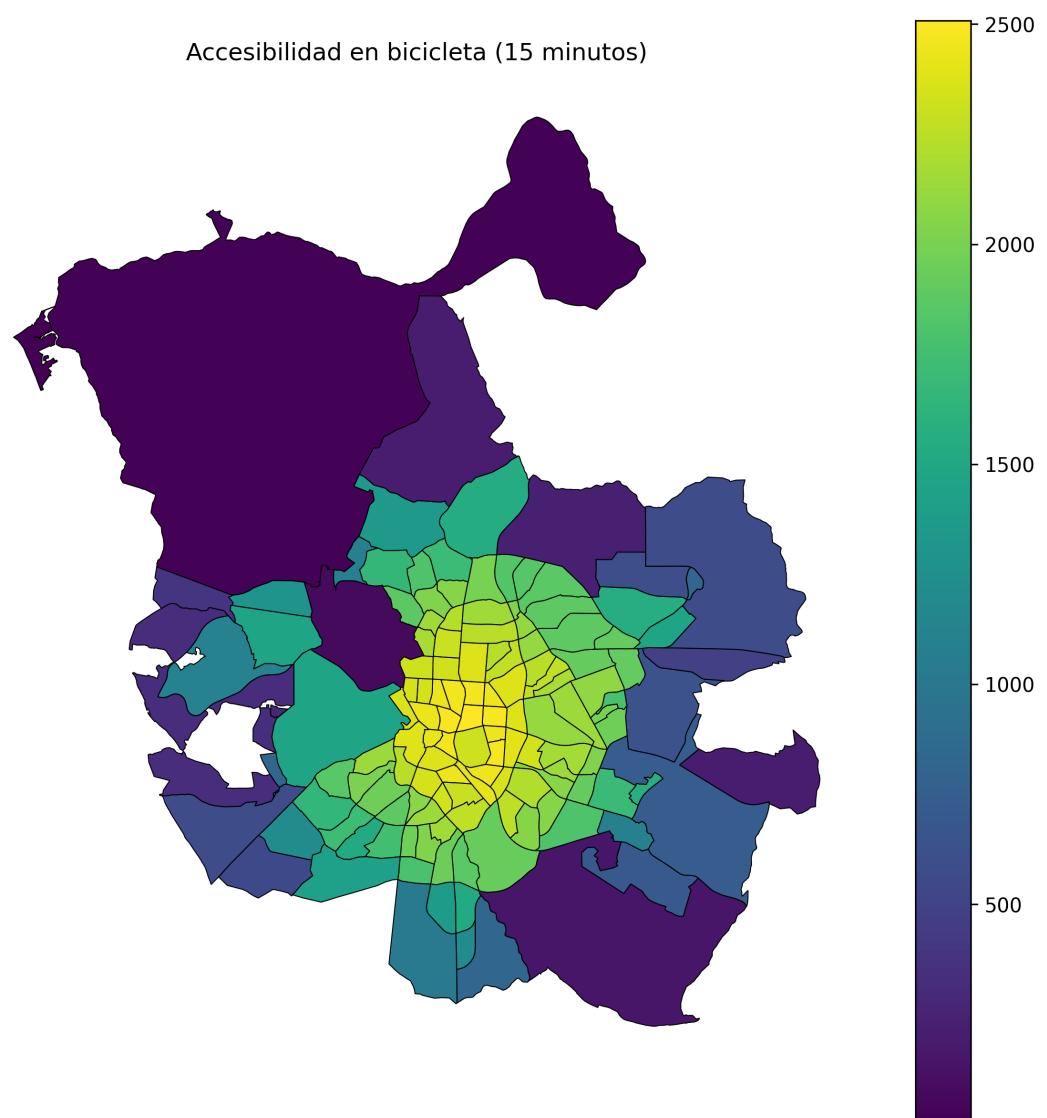


Figura 9: Accesibilidad en bicicleta (15 minutos): número de destinos accesibles por barrio.

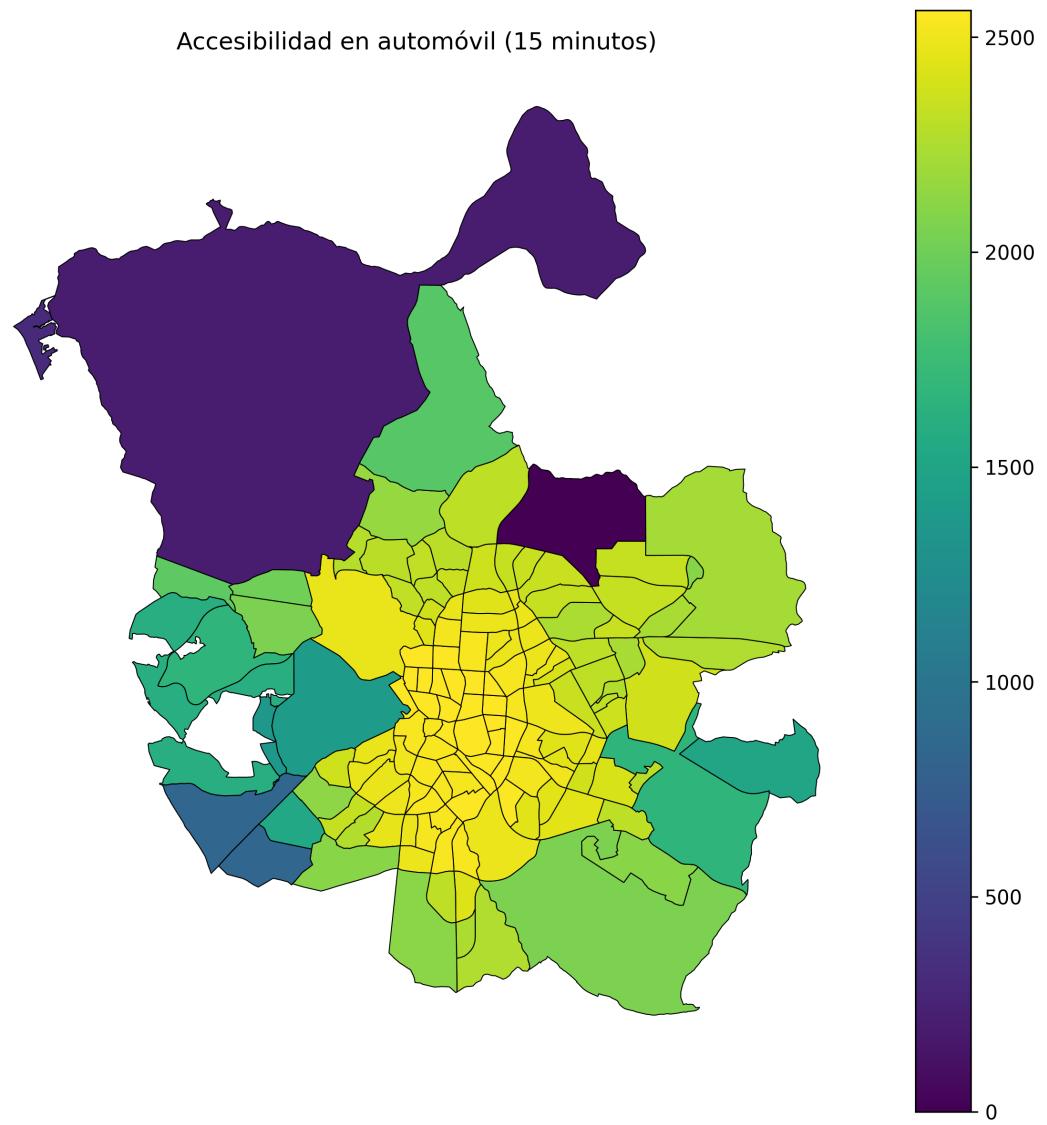


Figura 10: Accesibilidad en automóvil (15 minutos): número de destinos accesibles por barrio.

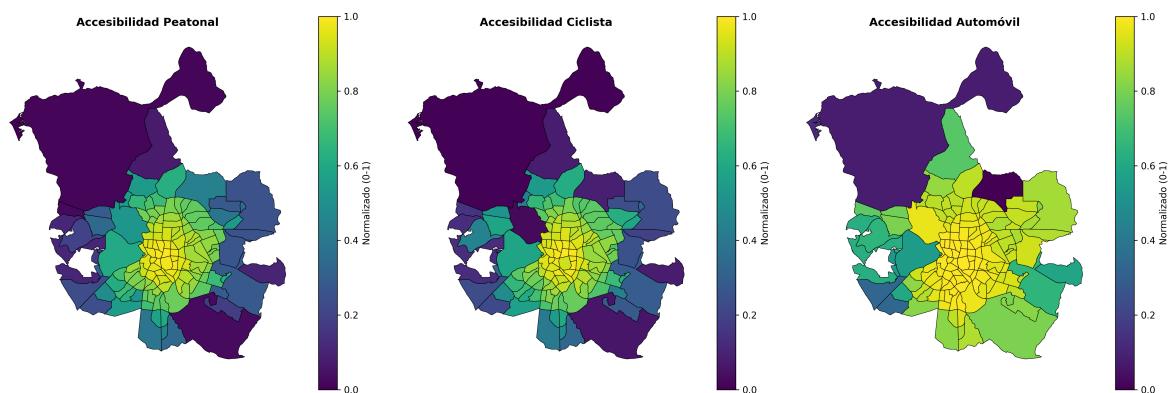


Figura 11: Accesibilidad normalizada (0,1) por barrio para los tres modos de transporte.

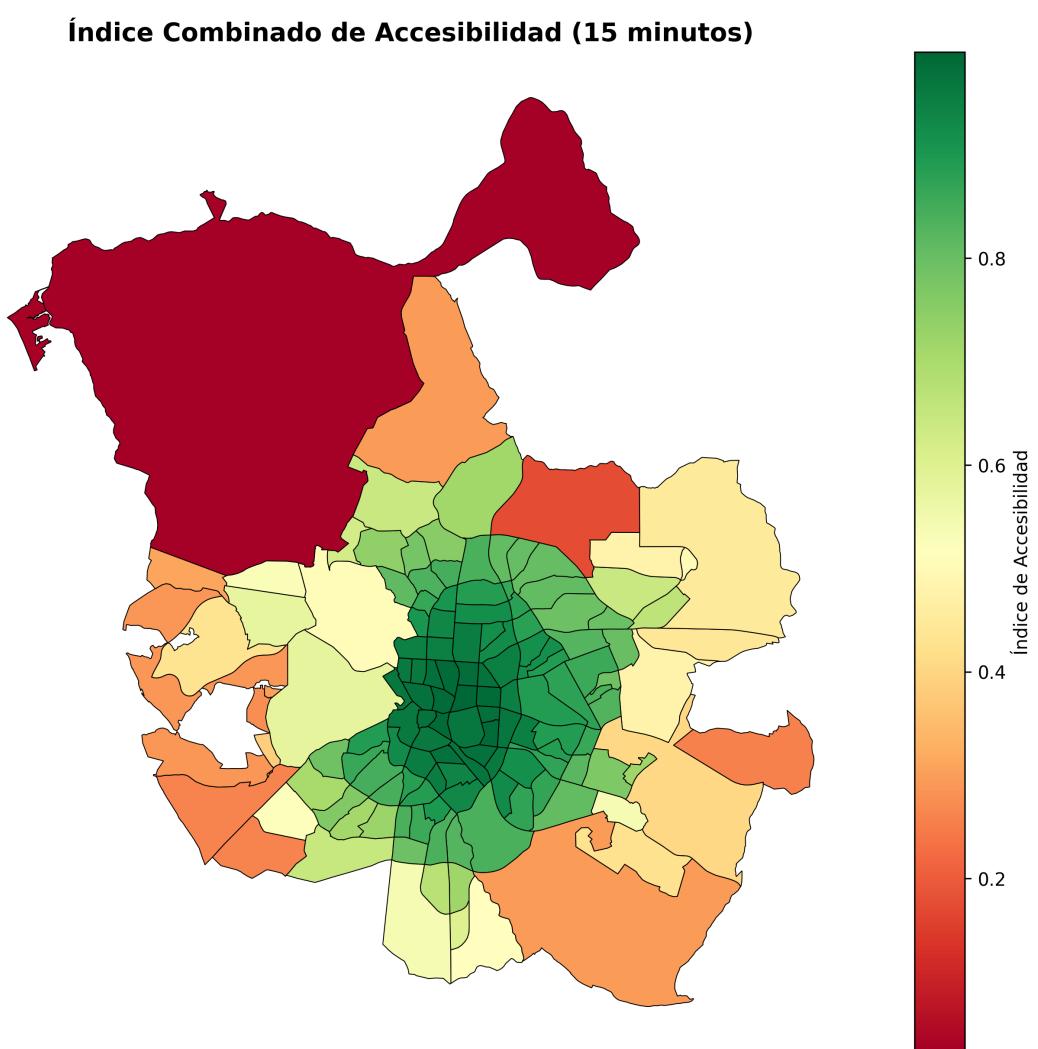


Figura 12: Índice combinado de accesibilidad (15 minutos) por barrio.

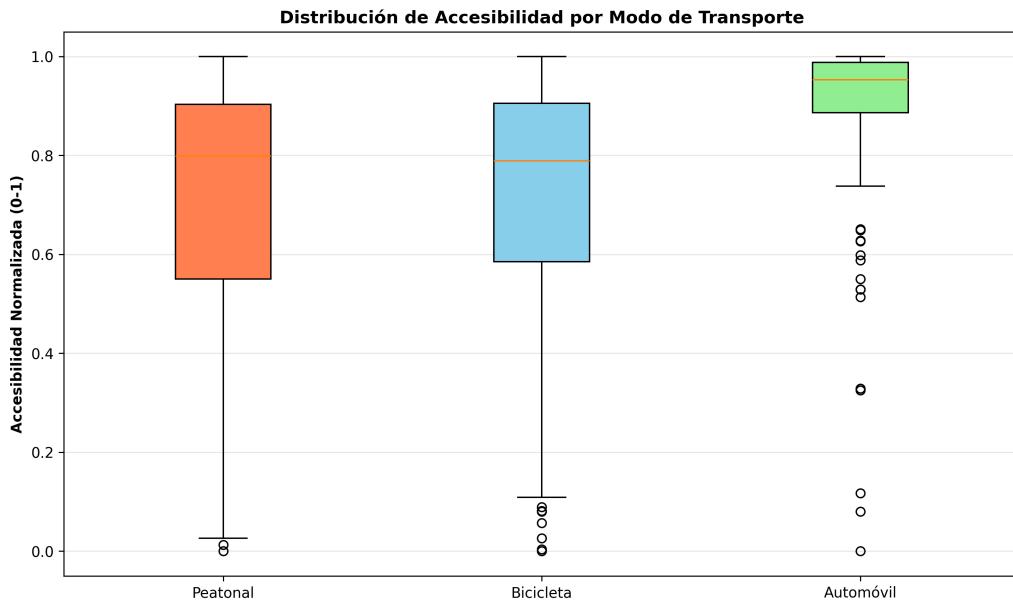


Figura 13: Distribución de la accesibilidad normalizada por modo de transporte (boxplot).

3.5. Análisis comparativo: distribución, ranking y relación entre modos de transporte

Además de los mapas, incorporamos gráficos que permiten comparar los modos de transporte desde un punto de vista estadístico (Figura 13):

El diagrama de cajas en la figura 13 resume la dispersión de la accesibilidad normalizada por modo de transporte. Esta visualización permite comparar los valores de la mediana, la variabilidad y la presencia de valores extremos entre medios de transporte.

El ranking identifica los barrios con mayor accesibilidad global en el umbral de 15 minutos, de acuerdo con el índice combinado.

Los diagramas de dispersión permiten analizar hasta qué punto los barrios mantienen un comportamiento similar entre modos (puntos cercanos a la diagonal) o, por el contrario, muestran mejoras notables al cambiar de modo de transporte.

3.6. Visualizaciones interactivas

Como extensión, se plantea incorporar visualizaciones interactivas (por ejemplo con Plotly) para explorar los resultados con más detalle. La interactividad permitiría activar y desactivar capas (red, barrios, destinos), consultar valores concretos al seleccionar un barrio, y comparar modos de transporte mediante filtros.

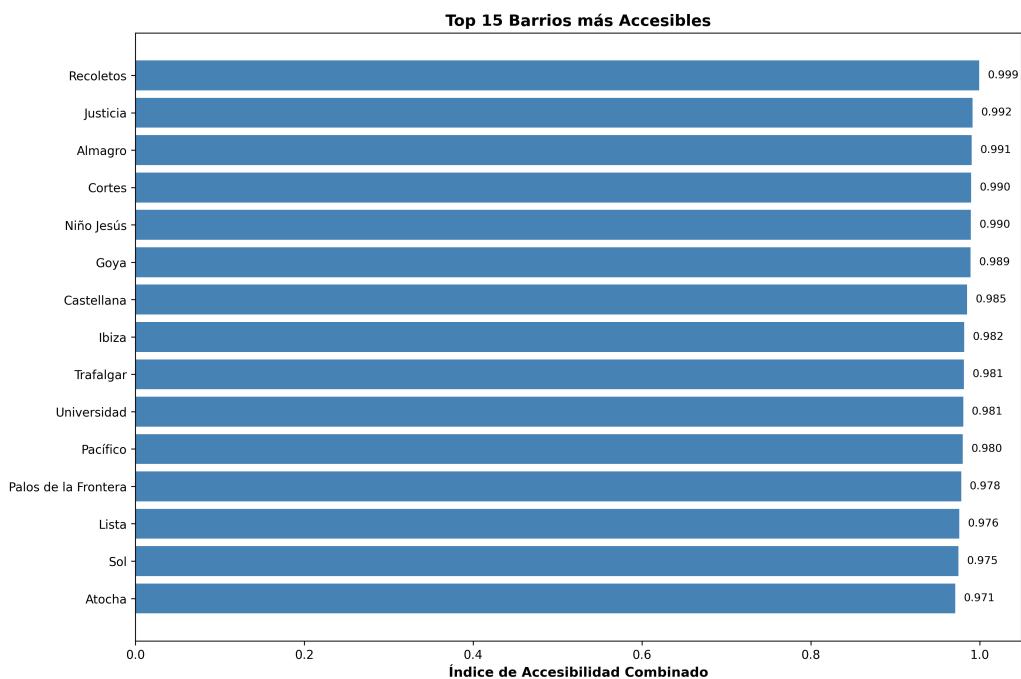


Figura 14: Top 15 barrios más accesibles según el índice combinado (15 minutos).

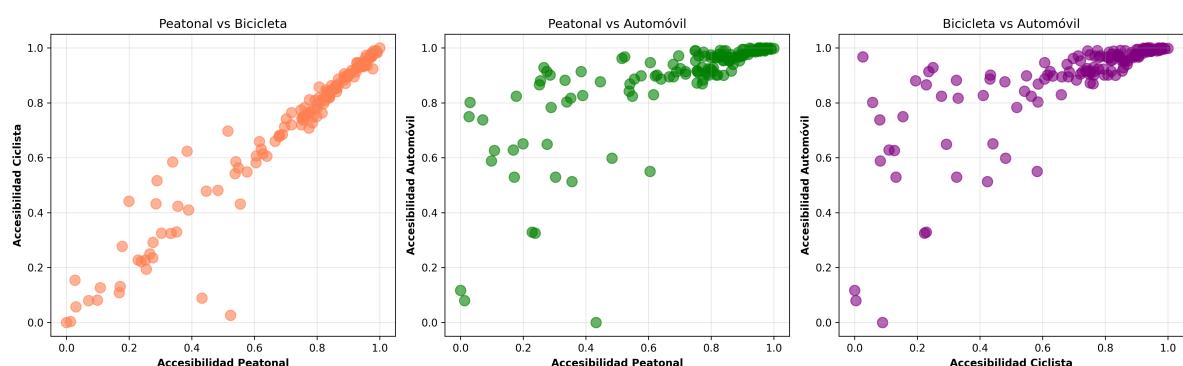


Figura 15: Relación entre accesibilidades normalizadas: peatonal vs bicicleta, peatonal vs automóvil y bicicleta vs automóvil.

4. Conclusiones finales

En este proyecto hemos evaluado la accesibilidad urbana en Madrid bajo el enfoque de la ciudad de 15 minutos, utilizando redes viarias de OpenStreetMap y un indicador basado en el número de destinos esenciales accesibles en un umbral temporal fijo predefinido. Hemos considerado tres modos de transporte (a pie, bicicleta y automóvil) y hemos estudiado los resultados a nivel de barrio para su comparación.

4.1. Principales hallazgos

A partir de los mapas y gráficos obtenidos se observan los siguientes patrones generales:

- Existe un gradiente centro-periferia en la accesibilidad: los barrios centrales tienden a concentrar mayor accesibilidad, mientras que en zonas periféricas los valores disminuyen.
- El modo de transporte influye claramente en los resultados: la bicicleta mejora la accesibilidad respecto a caminar y el automóvil tiende a alcanzar valores mucho más altos en un mayor número de barrios.
- La normalización (0, 1) permite comparar de forma directa los tres modos y muestra que algunos barrios mantienen buena accesibilidad independientemente del modo, mientras que otros dependen fuertemente del medio de transporte escogido.
- El índice combinado resume la accesibilidad global y permite identificar las zonas con mejor desempeño general, además de construir rankings de barrios más accesibles.
- Los gráficos comparativos de boxplot y dispersión ayudan a evaluar diferencias de dispersión entre modos y la relación entre accesibilidades: en muchos barrios existe coherencia entre ir a pie e ir en bicicleta, mientras que el automóvil puede aumentar notablemente la accesibilidad en barrios con menor desempeño a pie.

En conjunto, los resultados indican que la compatibilidad con el modelo de “15 minutos” es mayor en áreas con alta densidad de servicios y red viaria más conectada, mientras que en áreas más alejadas o con menor oferta de destinos se requiere mayor dependencia del modo de transporte para cubrir necesidades cotidianas.

4.2. Limitaciones del estudio

Los resultados deben interpretarse como una aproximación basada en los datos disponibles y en las simplificaciones necesarias para el análisis. Nuestra información depende de la completitud de OpenStreetMap y del etiquetado de destinos. Además, de forma más realista, faltaría tener en cuenta posibles motivos que afecten la velocidad de movimiento, muy presentes en ciudades grandes, como atascos, semáforos, etc.

4.3. Trabajo futuro

Como líneas de ampliación se propone:

- Incluir más categorías de destinos, como por ejemplo, transporte público, zonas verdes u otros servicios y comparar resultados.
- Incorporar métricas de grafo (centralidades, nodos críticos) para relacionar accesibilidad con conectividad estructural.