

Máster en Ciudades Inteligentes y Sostenibles (Smart Cities)

Trabajo Fin de Máster

Zonas de Bajas Emisiones: analizando la vulnerabilidad sociodemográfica y la accesibilidad a modos más sostenibles frente a su implementación en Madrid

Low emission zones: analysing social vulnerability and accessibility to more sustainable modes given its implementation in Madrid

Convocatoria: septiembre de 2022

Autor/a: Keren Sol Bacman

Tutor/a/es:

- Juan Carlos García Palomares. Departamento de Geografía. Facultad de Geografía e Historia
- Javier Burrieza Galán. Nommon Solutions and Technologies



MÁSTER EN CIUDADES INTELIGENTES
Y SOSTENIBLES / SMART CITIES
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

Resumen

En línea con la estrategia de descarbonización 2050 y con el objetivo de reducir el impacto medioambiental y en la salud humana de los vehículos contaminantes, todas las ciudades españolas con más de 50.000 habitantes deberán establecer una zona de bajas emisiones (ZBE) antes de 2023. Actualmente, Madrid cuenta con dos zonas de bajas emisiones ‘de especial protección’ (ZBEDEP), en el Distrito Centro y Plaza Elíptica. En el caso de la primera, se ha planificado una expansión progresiva del área geográfica y de restricciones cada vez más amplias. Si bien los efectos medioambientales y de calidad del aire son indudablemente beneficiosos en el largo plazo, en el corto plazo estas medidas implican que cientos de miles de viajeros deban adaptarse a nuevos modos de moverse, lo que supone un reto para todos ellos, especialmente para quienes presentan características de vulnerabilidad sociodemográfica y además no poseen una buena accesibilidad al transporte público, que es la alternativa principal para este cambio modal. A partir de esta preocupación, el presente trabajo tiene por objetivo identificar las zonas que, presentando características sociodemográficas vulnerables y niveles de accesibilidad limitados en transporte público, registran un volumen elevado de viajes (“viajes vulnerables”) hacia las zonas susceptibles de formar parte de la ZBEDEP de Madrid. Para resolver esta incógnita, se llevó a cabo una caracterización de la movilidad diaria, el perfil sociodemográfico y las condiciones de accesibilidad de las zonas de la ciudad mediante el uso de datos geolocalizados; así como un análisis de estadística espacial para estudiar posibles correlaciones entre altos niveles de vulnerabilidad y mala accesibilidad en transporte público al ámbito de la actual ZBEDEP y futura ZBE ampliada. Los resultados demuestran que las zonas con más cantidad de “viajes vulnerables” y peor accesibilidad se encuentran en el sur más periférico de la Comunidad Autónoma y en municipios metropolitanos del este. Las zonas con los mayores volúmenes de “viajes vulnerables” corresponden a los distritos del sur a la almendra central, pero cuentan con una accesibilidad por transporte público muy buena. Por último, se demuestra que la gran mayoría de zonas del norte y oeste de la Comunidad Autónoma tienen una mala accesibilidad en transporte público, con tiempos de viaje muy elevados, pero no presentan grandes volúmenes de “viajes vulnerables”.

Palabras clave: zonas de bajas emisiones, vulnerabilidad sociodemográfica, accesibilidad, transporte público, matrices OD, movilidad urbana, Madrid

Abstract

In line with the 2050 decarbonization strategy and with the aim of reducing the environmental and human health impact of polluting vehicles, all Spanish cities with more than 50,000 inhabitants must establish a low-emission zone before 2023. Currently, Madrid has two 'special protection' low emission zones (ZBEDEP) in Distrito Centro and Plaza Elíptica. In the case of the former, a progressive expansion of the geographical area and increasingly extensive restrictions has been planned. Although the environmental and air quality effects are undoubtedly beneficial in the long term, in the short term these measures imply that hundreds of thousands of travellers must adapt to new ways of commuting, which is a challenge to all of them, especially for those who present characteristics of sociodemographic vulnerability and also do not have good accessibility to public transport, which is the main alternative for this modal change. Based on this concern, the present study aims to identify the areas that, presenting vulnerable sociodemographic characteristics and limited levels of accessibility in public transport, register a high volume of trips ("vulnerable trips") to the areas likely to be part of Madrid's ZBEDEP. To solve this question, a characterization of daily mobility, the sociodemographic profile and the accessibility conditions of each city area was carried out through the use of geolocated data; as well as an analysis of spatial statistics to study possible correlations between high levels of vulnerability and poor accessibility in public transport to the area of the current ZBEDEP and future expanded ZBE. The results show that the areas with the highest number of "vulnerable trips" and the worst accessibility are found in the peripheral south of the Autonomous Community and in eastern metropolitan municipalities. The areas with the highest volumes of "vulnerable trips" correspond to the districts of the south to the central almond, although they have very good accessibility by public transport. Finally, it is shown that most areas in the north and west of the Autonomous Community have poor accessibility in public transport, with very long travel times, but do not present large volumes of "vulnerable trips".

Keywords: low emission zones, sociodemographic vulnerability, accessibility, public transport, OD matrices, urban mobility, Madrid

Índice

1.	Introducción.....	12
1.1	Las zonas de bajas emisiones y sus desafíos.....	12
1.2	Justificación y objetivos del trabajo.....	13
2.	Área de estudio.....	15
2.1	Descripción y características generales.....	15
2.2	Contaminación e iniciativas de ZBE en Madrid.....	15
2.3	Vulnerabilidad urbana en Madrid.....	17
3.	Fuentes de datos.....	18
3.1	Matrices OD provenientes de datos de telefonía móvil.....	18
3.2	Datos GTFS.....	20
4.	Metodología.....	22
4.1	Preparación de los datos de matrices OD.....	22
4.2	Definición de alcance e indicadores para el análisis de movilidad.....	22
4.3	Cálculo de indicadores de movilidad.....	23
4.4	Análisis sociodemográficos de la movilidad.....	24
4.5	Análisis multicriterio de vulnerabilidad.....	25
4.6	Análisis de matriz de coste OD para cálculo de tiempos de viaje.....	27
4.7	Análisis de correlación espacial entre las características sociodemográficas de los viajeros y su nivel de accesibilidad.....	29
5.	Resultados.....	31
5.1	Indicadores de movilidad.....	31
5.1.1.	Escenario 1 - viajes con destino a la ZBEDEP Distrito Centro.....	31
5.1.2.	Escenario 2: viajes con destino a toda la almendra central.....	34
5.2	Análisis de movilidad en función de características sociodemográficas.....	38
5.2.1.	Movilidad General.....	38
5.2.1.	Movilidad diferenciada por propósito de viaje.....	47
5.3	Análisis multicriterio de vulnerabilidad.....	59
5.3.1.	Movilidad General.....	59
5.3.2.	Movilidad diferenciada por propósito de viaje.....	61
5.4	Nivel de accesibilidad: cálculos de tiempos de viaje a partir de GTFS.....	65
5.5	Análisis de correlaciones entre accesibilidad-vulnerabilidad.....	67
5.5.1.	Análisis de Relaciones Bivariantes Locales.....	68
5.5.2.	Análisis de suma ponderada.....	69
5.5.3.	Análisis de correlación espacial: Global Moran's I y Anselin local Moran's I.....	71
6.	Conclusiones.....	73

7.	Limitaciones y perspectivas a futuro	75
7.1	Tiempos de implementación de la ZBE de Madrid	75
7.2	Matrices OD: propósitos de viaje.....	75
7.3	Segmentación por modo de transporte.....	75
7.4	Análisis multicriterio y de correlación.....	76
8.	Referencias	77
9.	Anexos	79
9.1	Mapas del Atlas de Vulnerabilidad Urbana del MITMA	79
9.2	Modelbuilder para análisis multicriterio.....	81
9.3	Resultados de Encuesta de Movilidad de la Comunidad Autónoma de Madrid 2018, sección tiempos y distancia de viajes	81

Figuras

Figura 1. Mapa de los siete distritos de la Almendra de Madrid y del del área de estudio total, con división territorial de la Comunidad de Madrid por 1259 zonas de transporte. Elaboración propia a partir de los datos del CRTM y NOMECALLES.

Figura 2. Evolución de las emisiones de GEI por grupo SNAP (kt CO2 equivalente). Elaborado por el Inventario de Emisiones Contaminantes a la Atmósfera de 2019.

Figura 3. Recorte de matriz OD obtenida a partir de los datos de Nommon

Figura 4. Volúmen de viajes por día de la semana de estudio. Elaborado a partir de los datos de la matriz OD

Figura 5. Volumen de viajes del martes 15 de marzo, por hora. Elaborado a partir de los datos de la matriz OD

Figura 6. Mapa de las redes y paradas del Metro Madrid, Autobuses Interurbanos y Cercanías de la Comunidad Autónoma de Madrid. Elaboración propia en ArcGIS PRO a partir de los GTFS del CRTM.

Figura 7. Cálculo de Suma Ponderada realizado en ArcGIS PRO.

Figura 8. Ejemplo de ráster único de cantidad de viajes vulnerables para cada escenario de ZBE, creado a partir de la Suma Ponderada de los rásteres de entrada. Elaboración propia con ArcGIS PRO.

Figura 9. Cálculos de Matriz de Coste OD en ArcMap a partir de las redes de GTFS.

Figura 10. Matrices de coste OD exportadas al ArcGIS PRO.

Figura 11. Movilidad general diaria con destino el Distrito Centro

Figura 12. Volumen viajes hacia el Distrito Centro. Elaboración propia a partir de los datos de la matriz OD

Figura 13. Movilidad con propósito trabajo diaria con destino el Distrito Centro

Figura 14. Movilidad con propósito trabajo diaria con destino el Distrito Centro

Figura 15. Volumen de viajes hacia Distrito Centro, diferenciado por propósitos de viaje. Elaboración propia a partir de los datos de la matriz OD

Figura 16. Movilidad diaria con destino la almendra central de Madrid.

Figura 17. Distribución de viajes con destino a la almendra central de Madrid. Elaboración propia a partir de los datos de la matriz OD.

Figura 18. Movilidad diaria con propósito trabajo con destino la almendra central de Madrid.

Figura 19. Movilidad diaria con propósito distinto a trabajo con destino la almendra central de Madrid.

Figura 20. Volumen de viajes hacia la almendra central, diferenciando propósitos de viaje. Elaboración propia a partir de los datos de la matriz OD

Figura 21. Cantidad de viajes hacia el Distrito Centro en función del nivel de renta. Elaboración a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 22. Volumen de viajes hacia Distrito Centro por franjas etarias. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 23. Volumen de viajes hacia Distrito Centro por género. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 24. Viajes hacia la almendra central en función del nivel de renta. Elaboración a partir de datos

sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 25. Volumen de viajes hacia la almendra central por franjas etarias. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 26. Mapa de calor de volumen de viajes hacia la almendra central, por género. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 27. Variación de volumen de viajes hacia el Distrito Centro realizados por mujeres, en relación al volumen de viajes para aquellas edades más vulnerables. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 28. Variación de volumen de viajes hacia la almendra central realizados por mujeres, en relación al volumen de viajes para aquellas edades más vulnerables. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 29. Mapas de correlaciones entre volúmenes de viajes por mujeres y nivel de renta más vulnerable hacia Distrito Centro y la almendra central. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 30. Mapa de correlaciones entre volúmenes de viajes por renta y edades más vulnerables hacia Distrito Centro. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 31. Mapa de correlaciones entre volúmenes de viajes por renta y edades más vulnerables hacia la almendra central. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 32. Volumen de viajes de nivel 1 de renta y diferenciados por propósito, con destino el Distrito Centro de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 33. Volumen de viajes de nivel 1 de renta y diferenciados por propósito, con destino la almendra central de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 34. Volumen de viajes por mujeres con nivel 1 de renta y diferenciados por propósito, con destino el Distrito Centro de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 35. Volumen de viajes por mujeres con nivel 1 de renta y diferenciados por propósito, con destino la almendra central de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 36. Volumen de viajes de personas entre 0 y 25 años con nivel 1 de renta y diferenciados por propósito, con destino el Distrito Centro de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 37. Mapa de volumen de viajes de personas entre 0 y 25 años con nivel 1 de renta y diferenciados por propósito, con destino la almendra central de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la Matriz OD.

Figura 38. Volúmenes de viajes de personas entre 65 y 100 años con nivel 1 de renta y diferenciados por propósito, para cada escenario de ZBE. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 39. Volumen de viajes por mujeres de entre 0 y 25 años diferenciados por propósito, con destino el Distrito Centro de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Figura 40. Volumen de viajes por mujeres de entre 0 y 25 años diferenciados por propósito, con destino la

almendra central de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

Figura 41. Volumen de viajes por mujeres de entre 65 y 100 años diferenciados por propósito, con destino el Distrito Centro de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

Figura 42. Volumen de viajes por mujeres de entre 65 y 100 años diferenciados por propósito, con destino el Distrito Centro de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

Figura 43. Volumen de viajes con mayor vulnerabilidad con destino el Distrito Centro y la almendra central de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

Figura 44. Proporción de volúmenes de viajes vulnerables por sobre el total de viajes para cada zona. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos y de movilidad general de la matriz OD

Figura 45. Volumen de viajes con mayor vulnerabilidad con destino el Distrito Centro de Madrid, diferenciados por propósito de viaje. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

Figura 46. Volumen de viajes con mayor vulnerabilidad con destino la almendra central de Madrid, diferenciados por propósito de viaje. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

Figura 47. Proporción de volúmenes de viajes vulnerables por sobre el total de viajes, diferenciados por propósito de viaje, para cada zona. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos y de movilidad general de la matriz OD

Figura 48. Tiempos de viaje en transporte público desde cada origen para cada escenario de ZBE. Elaboración propia con ArcGIS PRO

Figura 49. Relación entre volúmenes de viajes y tiempos de viaje desde cada origen hacia cada escenario de ZBE. Elaboración propia con ArcGIS PRO

Figura 50. Mapas de relaciones bivariantes locales entre vulnerabilidad y accesibilidad, para cada escenario de movilidad diferenciado por destino de ZBE y por propósito de viaje. Elaboración propia a partir de ArcGIS PRO.

Figura 51. Mapas de calor de orígenes con mayor volumen de viajes vulnerables y menor accesibilidad con destino ambos escenarios de ZBE. Elaboración propia con ArcGIS PRO

Figura 52. Resultados del análisis de correlación espacial Global Moran's I. Reporte generado por ArcGIS PRO.

Figura 53. Resultados del análisis de correlación espacial Global Moran's I. Elaboración propia con ArcGIS PRO.

Tablas

Tabla 1. Campos de la matriz OD utilizados en el análisis con Tablas Dinámicas. Elaboración propia.

Tabla 2. Variables y pesos relativos para el cálculo del indicador de vulnerabilidad. Elaboración propia

Tabla 3. Resumen de viajes registrados para cada escenario y la variación porcentual entre ambos

Tabla 4. Resumen de resultados del análisis de correlación espacial Global Moran's I

Lista de acrónimos

ZBE	Zona de Bajas Emisiones
ZBEDEP	Zonas de Bajas Emisiones de Especial Protección
GEI	Gases de Efecto Invernadero
UVAR	Urban Vehicle Access Regulation
CRTM	Consortio Regional de Transportes de Madrid
OD	Origen-destino (para referirse a las matrices de viajes)
INE	Instituto Nacional de Estadística
GTFS	General Transit Feed Specification
OMS	Organización Mundial de la Salud
EDM 2018	Encuesta de Movilidad de la Comunidad de Madrid 2018

1. Introducción

El contexto de pandemia ha puesto en evidencia la importancia de tener ciudades sostenibles a nivel social, económico y medioambiental en España y el resto del mundo. El informe de Mitigación del Cambio Climático 2022 creado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de la Organización de Naciones Unidas advierte que, entre 2010 y 2019, el promedio anual de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial alcanzó los niveles más altos de la historia. Además, advierten que es necesario que las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero se reduzcan en un 43% para 2030 (IPCC, 2022). Un gran porcentaje de esta responsabilidad corresponde a la planificación y gestión de la movilidad en las ciudades, puesto que hoy en día el acceso al transporte es fundamental para el desarrollo productivo de todos los ciudadanos.

Si bien existen numerosos esfuerzos para lograr una movilidad sostenible, el transporte sigue siendo una inmensa fuente de emisiones de GEI y contaminantes de la calidad del aire, en especial el automóvil, el medio de transporte con mayores emisiones por viajero transportado (Ecologistas en Acción, 2020).

El 98% de las ciudades en países de ingresos bajos y medios y el 56% de las ciudades en países de ingresos altos no cumplen con los niveles seguros de calidad del aire de la OMS (IS Global, 2018). En el caso de España, el sector transporte representa el 25% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero y casi el 40% de las emisiones de los sectores difusos¹, y en Madrid únicamente el transporte por carretera supera el 35% del total de emisiones directas de GEI. Pese a distintos esfuerzos por reducir el tráfico, en 2019 las grandes ciudades como Madrid y Barcelona superaron los límites de protección a la salud humana dictados por la Comisión Europea del Medio Ambiente (Inventario de Emisiones, 2019).

1.1 Las zonas de bajas emisiones y sus desafíos

La problemática de las emisiones por el transporte rodado supone transformar radicalmente este sector en particular y las ciudades en general; desde crear nuevas políticas de movilidad compartida y micro movilidad, hasta impulsar el uso del transporte público y concientizar a los ciudadanos sobre la importancia de reducir el uso del vehículo privado. Una de éstas, y con una alta aceptación en los planes de movilidad urbana alrededor del globo, es la necesidad de implementar zonas de bajas emisiones (ZBE) en las ciudades.

Según la Comisión Europea de Medio Ambiente, los reglamentos de acceso de vehículos a los núcleos urbanos (UVAR) y ZBE son de los instrumentos más efectivos a la hora de reducir las emisiones de tráfico rodado y, por ende, los niveles de contaminación peligrosos para la salud humana.

Las ZBE pueden definirse como un “ámbito delimitado por una administración pública, en ejercicio de sus competencias, dentro de su territorio, de carácter continuo, y en el que se aplican restricciones de acceso, circulación y estacionamiento de vehículos para mejorar la calidad del aire y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero” (Ley de Cambio Climático y Transición Ecológica, 2021). Éstas se basan en que los vehículos matriculados en la Unión Europea cumplan con ciertos criterios de homologación de emisiones (Normas Euro) cada vez más estrictas para circular, lo que ayuda a reducir las emisiones de los vehículos más antiguos y, en teoría, más contaminantes.

¹ Más información disponible en el portal de MITECO, en <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/transporte.aspx>

Ya implantadas o por implantarse en varias ciudades europeas, ha habido críticas respecto a su naturaleza actual, argumentando que éstas deben evolucionar conceptualmente y ser mucho más ambiciosas. En primer lugar, porque no existe una regulación legal a nivel europeo sobre su alcance, lo que ha generado una gran variedad de esquemas más o menos permisivos. En segundo lugar, porque desde el punto de vista de la calidad del aire, es un problema basar las restricciones de circulación en las Normas Euro puesto que los vehículos contaminan mucho más de lo que indican sus correspondientes homologaciones (Ecologistas en Acción, 2019).

1.2 Justificación y objetivos del trabajo

Cómo se ha mencionado en el apartado anterior, hay un consenso generalizado sobre los efectos positivos que puede tener la implementación de ZBE en las ciudades, no sólo a nivel medioambiental sino también trayendo beneficios para la salud humana por una mejora en la calidad del aire y para una mejor convivencia. No obstante, las ciudades poseen millones de entradas y salidas de viajeros por día - ya sea por trabajo, estudio, turismo u otras actividades frecuentes y no frecuentes -, y una buena parte de estos viajes se realizan en vehículo privado. Por ende, ante la implementación de las restricciones de circulación, estos viajes se ven afectados.

A su vez, estos viajeros afectados tienen distintas residencias, distinto perfil socioeconómico y distinto nivel de conexión o comunicación con la ciudad, dado en gran parte por el nivel de accesibilidad a modos alternativos de transporte, particularmente al servicio de transporte público. Si bien las ZBE son todavía novedosas y no se cuenta con la suficiente información sobre los efectos que pueden tener sobre la movilidad general en las ciudades y sus alrededores, los factores sociodemográficos mencionados pueden tener un efecto en el poder de adaptación de estas personas a estas medidas de circulación. Teniendo en cuenta esto, ¿alcanza con implantar ZBE y hablar de mejoras en la calidad del aire si estos efectos no se pueden disfrutar por todos los ciudadanos? ¿Es suficiente acaso promover modos más saludables y sostenibles de transporte si no toda la población, independiente de su situación socioeconómica y ubicación geográfica, puede acceder a los mismos? Estas son algunas preguntas que han motivado la siguiente investigación.

A partir de estas inquietudes y necesidad de aumentar las investigaciones sobre el tema realizadas hasta ahora, este trabajo se plantea la siguiente hipótesis:

Los espacios con poblaciones más vulnerables tienen mayores limitaciones para adaptarse a la expansión del área de ZBE, ya que tienen una peor accesibilidad a modos de transporte alternativos al vehículo privado, particularmente al transporte público.

Es de conocimiento general los enormes beneficios que generan estas medidas para la reducción de la contaminación atmosférica, la mejora de la calidad del aire, la reducción del tráfico en las urbes y la promoción y progresiva adopción de una movilidad urbana más sostenible. Esto es, el impacto final es indudablemente positivo para una mejor calidad de vida. No obstante, en el proceso de adaptarse a estos cambios, pueden existir algunas zonas geográficas para las cuáles no sea tan sencillo la adopción de modos alternativos de movilidad, ya sea por cuestiones socioeconómicas y de vulnerabilidad, como por una falta de accesibilidad o de una infraestructura sólida que haga atractivo el uso de otros modos alternativos al vehículo privado. Esto debe garantizarse para todos los habitantes y visitantes de las ciudades, con un especial foco a aquellos viajeros que no tienen alternativa y deben acceder a los centros urbanos para desarrollar sus actividades profesionales.

La ciudad de Madrid como caso de estudio es de especial interés por su heterogeneidad territorial y social. Si bien se puede generalizar que las zonas sur y sureste de Madrid por fuera de la M-30 son las más propensas

a tener distritos y barrios vulnerables (Área De Coordinación Territorial y Cooperación Público Social de Madrid, 2018), esto no significa que necesariamente sean las peores conectadas y con menos accesibilidad a la red de transporte público. Tampoco implica que sean las más afectadas por la implementación de la ZBE de Madrid, cuya reciente redefinición presenta tanto una oportunidad como una incógnita sobre qué efectos tendrá en la población, la calidad del aire y el tráfico de la ciudad.

La hipótesis planteada se estudiará mediante el caso de uso de Madrid, contemplando dos escenarios; el primero involucra la actual ZBEDEP de Distrito Centro, y el segundo un escenario más ambicioso de expansión – con formato de ZBE – a una de las primeras zonas susceptibles de ser incluidas en las restricciones vehiculares: la almendra central. La diferencia entre ZBE y ZBEDEP es que la última tiene una serie de normas especiales de acceso y circulación, usualmente más restrictivas y con un área delimitada de manera muy específica. Si bien la futura ZBE de Madrid planificada comprendería la totalidad del término municipal, se ha definido estudiar particularmente la zona de la almendra central puesto que se considera la zona más concurrida, y por ende la más problemática para aquellas personas que hoy en día se desplazan en coche privado y que a medida que avanzan las restricciones de circulación deban buscar modos alternativos de transporte para acceder a la misma.

En definitiva en este trabajo de fin de máster se plantean los siguientes objetivos específicos:

- **Realizar un análisis descriptivo sobre la movilidad** mediante el análisis de matrices origen-destino procedentes de datos provenientes de telefonía móvil; específicamente estudiando viajes con origen cualquier zona de la Comunidad Autónoma de Madrid y destino cada uno de los dos escenarios planteados de ZBEDEP (Distrito Centro) y ZBE (almendra central).
- **Estudiar las características sociodemográficas de aquellas poblaciones que realizan esos viajes objeto de estudio**, tanto para la movilidad general como para la movilidad diferenciada por motivo de viaje.
- **Estudiar la accesibilidad en transporte público hacia los dos escenarios de destino**, mediante el análisis de los tiempos de viaje en transporte público (autobús, metro y ferrocarril de cercanías) basado en los datos GTFS de oferta de transporte en la región.
- **Realizar un análisis de correlación espacial entre las características sociodemográficas de los viajeros y su nivel de accesibilidad**, diferenciando la movilidad por propósito de viaje.
- **Evaluar los distintos escenarios de ZBE** sobre cómo y a quién puede afectar más directamente - por limitaciones en el acceso a modos de transporte público alternativos al coche privado y la situación de vulnerabilidad - la progresiva expansión de las restricciones de circulación en Madrid.

La estructura del documento responde a los objetivos específicos mencionados anteriormente.

En primer lugar, se presentará el área de estudio y sus características más relevantes en cuanto a los objetivos del trabajo, incluyendo los antecedentes a la implementación de la nueva ZBE. En segundo lugar, se describirán y justificarán las principales fuentes de datos utilizadas: matrices origen-destino con características sociodemográficas y redes GTFS. A continuación, se profundizará en la metodología empleada para responder a los distintos objetivos del trabajo, para luego presentar en la sección de resultados los principales hallazgos del estudio. Seguidamente, se abordarán las principales limitaciones de la investigación y una reflexión sobre futuros enfoques a abordar. Finalmente, se presentarán las principales conclusiones del trabajo.

2. Área de estudio

2.1 Descripción y características generales

El área de estudio de la presente investigación comprende el ámbito de la Comunidad Autónoma de Madrid, dividida en 179 municipios, que alojan aproximadamente un total de 6.751.251 habitantes empadronados². Dentro del área de estudio, se coloca el foco la zona de la almendra central de Madrid (Figura 1), que comprende 7 distritos - Centro, Arganzuela, Retiro, Salamanca, Chamartín, Tetuán y Chamberí - con aproximadamente un total de 1.004.268 habitantes³. La zonificación utilizada para el análisis de toda el área de estudio es la construida por el CRTM, que tiene 1259 zonas de transporte con una escala aproximada de división territorial entre barrios y secciones censales⁴. Esta es de especial interés puesto que refleja el mismo criterio de zonificación que la última EDM de 2018, por lo que los resultados de este estudio pueden ser comparables a los resultados de la encuesta.

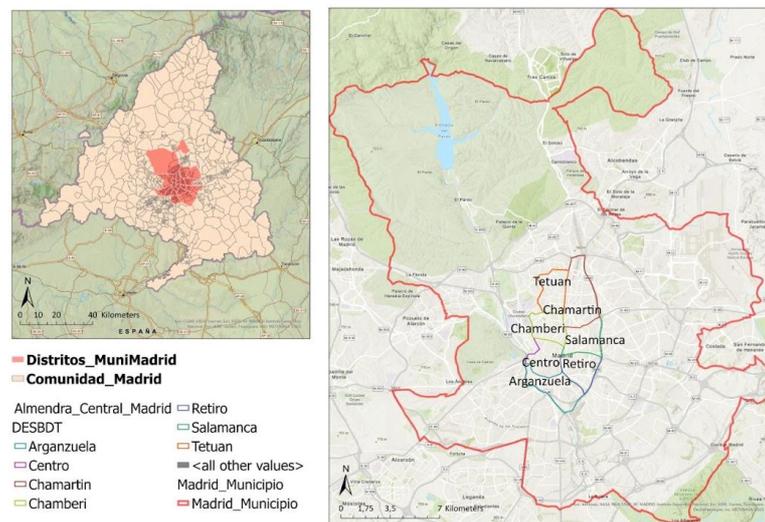


Figura 1. Mapa de los siete distritos de la Almendra de Madrid y del del área de estudio total, con división territorial de la Comunidad de Madrid por 1259 zonas de transporte. Elaboración propia a partir de los datos del CRTM y NOMEALLES.

2.2 Contaminación e iniciativas de ZBE en Madrid

En cuanto a la contaminación de Madrid, según el Inventario de Emisiones Contaminantes a la Atmósfera 2019, el transporte por carretera (Figura 2 - ilustrado con el valor G_07 en color naranja) es la principal fuente de emisiones de GEI. Es especialmente relevante en cuanto a las emisiones de CO, NOX, CO2 y material particulado, contribuyendo de forma notable a la concentración de los principales contaminantes atmosféricos responsables de la calidad del aire urbano, tales como NO2, PM10 y PM2,5. Si bien a partir de 2008 se registra una disminución de las emisiones con variaciones entre 2015 y 2019, aún queda un largo recorrido para reducirlas aún más.

² Dato obtenido de las Cifras Oficiales de Población de los Municipios Españoles del INE. Disponible en: <https://www.ine.es/>

³ Dato obtenido del Portal web del Ayuntamiento de Madrid, sección Estadística > Distritos en cifras. Disponible en: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/El-Ayuntamiento/Estadistica/Distritos-en-cifras/>

⁴ Dato obtenido de la Encuesta de Movilidad de la Comunidad de Madrid 2018. Disponible en: https://www.crtm.es/media/712934/edm18_sintesis.pdf

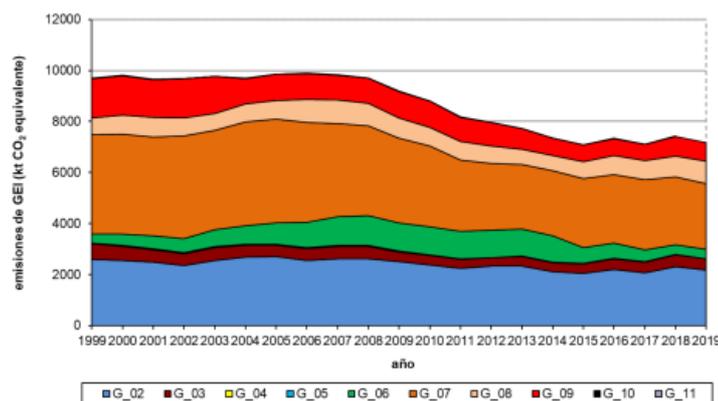


Figura 2. Evolución de las emisiones de GEI por grupo SNAP (kt CO₂ equivalente). Elaborado por el Inventario de Emisiones Contaminantes a la Atmósfera de 2019.

Las ZBE de Madrid y ZBEDEP de Distrito Centro y Plaza Elíptica que actualmente se están implementando no son el primer intento para hacer frente a la problemática de las emisiones contaminantes por transporte rodado. En los últimos años, la preocupación por transformar la circulación y la calidad del aire en Madrid ha tenido un espacio de relevancia en la planificación de la gestión gubernamental.

El 21 de septiembre de 2017, se aprobó el “Plan de Calidad del Aire de la Ciudad de Madrid y Cambio Climático (Plan A)” que incluyó un conjunto de medidas organizadas en cuatro líneas de acción: movilidad sostenible, regeneración urbana, adaptación al cambio climático y sensibilización y comunicación. (Plan A, 2017). Esta medida, que delimitaba un Área Central (zona UVAR) de perímetro continuo y de acceso restringido, se acompañó de una restricción de la capacidad vehicular de la Gran Vía en diciembre de 2017. Posteriormente, el 5 de octubre de 2018 se publicó una Ordenanza municipal de Movilidad Sostenible que creaba la primera Zona de Bajas Emisiones para Madrid Central, hoy en día conocida como Distrito Centro, y los criterios de acceso a la misma. Sin embargo, para julio de 2020 el Tribunal Superior de Justicia de Madrid anula los artículos relacionados con Madrid Central por defectos formales, lo que obliga al Ayuntamiento de Madrid a trabajar en una nueva ordenanza de movilidad sostenible. Luego, el 20 mayo de 2021, sale la Ley 7/2021 de Cambio Climático y Transición Energética, que obliga a todos los municipios con más de 50.000 habitantes⁵ a implementar ZBE antes de 2023. Con esta ley de contexto, en septiembre de 2021 finalmente se aprueba la iniciativa Madrid 360, y con ella la nueva ZBE de los 21 distritos de Madrid y las dos ZBEDEP de Distrito Centro y Plaza Elíptica (Madrid 360).

Si bien los 21 distritos del término municipal han sido declarados ZBE, las restricciones circulatorias se están aplicando de manera progresiva desde el 1 de enero de 2022 hasta 2025. Esta iniciativa es de especial relevancia dado los altos niveles de contaminación del tráfico rodado (53,3% del NO₂ total y del 74,4% considerando únicamente las fuentes locales sobre las que el gobierno tiene capacidad de regular). Con las medidas implementadas, se estima que las medidas restrictivas de circulación y los cambios a tecnologías que contaminen menos rebajen 1.147 toneladas de óxidos de nitrógeno (NO_x) anuales⁶.

⁵ Aplicando también a los municipios con más de 20.000 habitantes cuando se superen los valores límite de los contaminantes regulados en Real Decreto 102/2011 relativo a la mejora de calidad del aire. Enlace: <https://www.boe.es/eli/es/l/2021/05/20/7>

⁶ Más información en Madrid 360, disponible en: <https://www.madrid360.es/medio-ambiente/zonas-de-bajas-emisiones/>

2.3 Vulnerabilidad urbana en Madrid

Si bien el término vulnerabilidad es amplio y puede variar de enfoque según los indicadores considerados y el campo de estudio, la conceptualización que da el informe “Metodología Para La Elaboración Del Índice De Vulnerabilidad Territorial De Barrios Y Distritos De Madrid Y Ranking De Vulnerabilidad” del Ayuntamiento de Madrid es especialmente interesante porque habla de territorios vulnerables. Éstos se definen cómo aquellos donde la potencialidad de que la población sea afectada por alguna circunstancia adversa es alta; donde por condiciones de riesgo, fragilidad y desventaja, los habitantes pueden estar altamente desfavorecidos e inclusive excluidos (Área De Coordinación Territorial y Cooperación Público Social de Madrid, 2018). Esta aproximación permite poner el foco en la ubicación geográfica, elemento fundamental para conocer la movilidad de las personas que viajan hacia la almendra central de Madrid.

Otra aproximación considerada interesante a los efectos de este estudio es la de entender la vulnerabilidad como una condición multidimensional, donde hay un conjunto amplio de aspectos de la vida social, materiales, ambientales y relacionales que pueden hacer que una persona sea más o menos vulnerable. Esto se asocia a la idea de que un grupo o región es más o menos vulnerable según las posibilidades que tiene de cumplir con un conjunto de condiciones sociales, económicas y espaciales que se asocian al bienestar (Ruiz, 2011). Por ejemplo, la implementación de las ZBE es algo positivo en términos medioambientales y de salud pública, no es un evento que pueda implicar algún tipo de peligro o riesgo hacia una persona. Sin embargo, una persona que vive en una zona muy desconectada de la ciudad, que tiene un poder adquisitivo bajo como para comprar un vehículo eléctrico o similar para acceder al centro libremente, o que se ve limitada por su edad se encontrará en una situación de mayor vulnerabilidad frente a esa nueva política de movilidad.

Un concepto que ilustra adecuadamente esta desventaja de algunos ciudadanos frente a decisiones de política pública es la vulnerabilidad urbana, entendida como la potencialidad de que la población en un espacio urbano concreto se vea afectada por alguna circunstancia adversa - como es un cambio en la política de su movilidad diaria - y que por no poder adaptarse fácilmente se consolide una situación de exclusión social o de extremo desfavorecimiento. (Bruquetas, Moreno, Walliser, 2005). Una vez más, la facilidad de adaptación está directamente ligada a las condiciones de vida de esa población, que puede medirse por múltiples factores.

El Atlas de Vulnerabilidad Urbana del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA), construido a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística (INE), ilustra adecuadamente este carácter multidimensional, ya que analiza niveles de vulnerabilidad a nivel de sección censal para todos los municipios de España en base a diferentes indicadores. Aquellos considerados de interés para el presente trabajo son tres, asociados al perfil sociodemográfico y socioeconómico de las personas (Anexo 9.1): *renta neta media por persona, población menor de 15 años y población de 75 años y más*.

A estos dos este estudio añade el género ya que, si bien no se considera una variable de vulnerabilidad urbana en el Atlas, es cada vez más necesario considerar las particularidades de cada género en las políticas de movilidad, y empoderar a las mujeres en la agenda del transporte (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2018). Es así que en 2019 la Dirección General de Igualdad de la Comunidad de Madrid publicó una guía⁷ para ayudar en la planificación de las políticas urbanas con perspectiva de género.

Si bien existen muchas variables indicativas de la vulnerabilidad que sería interesante analizar, se trabajó con estas tres variables - renta, edad y género - puesto que son las segmentaciones sociodemográficas disponibles en las matrices OD, fuente principal de datos utilizada para caracterizar la demanda de viajes.

⁷ Disponible en: <https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/bvcm050125.pdf>

3. Fuentes de datos

3.1 Matrices OD provenientes de datos de telefonía móvil

La primera fuente utilizada en este estudio se compone por datos numéricos sobre los viajes internos a la Comunidad de Madrid que tengan como destino la almendra central de Madrid donde se está implementando la ZBE. Estos datos proceden de matrices origen-destino (OD) calculadas mediante la solución Nommon Mobility Insights⁸, para la obtención de indicadores de movilidad a partir de datos geolocalizados provenientes de teléfonos móviles y su fusión con otras fuentes de datos. Estos datos reflejan la movilidad total de una semana tipo previa a la finalización del preaviso⁹, en este caso del lunes 14/3 al domingo 20/3 de 2022, para toda la Comunidad Autónoma de Madrid. La zonificación que se ha elegido es la de las 1259 zonas del CRTM descritas en el área de estudio, generando 1.585.081 pares OD de la matriz. Las franjas temporales están desagregadas por hora, lo que habilita conocer la movilidad de las horas pico de ida y vuelta al trabajo/escuela. Algunas de las segmentaciones incluidas en la matriz son:

- *Edad*: se agrupa en cuatro rangos (0-24, 25-44, 45-65, 65+ años)
- *Género*: clasificación binaria hombre-mujer.
- *Renta*: se calcula cómo la renta media del lugar de residencia de los viajeros, según la información que proporciona el INE en su Atlas de Distribución de Renta de los Hogares¹⁰. La renta se agrupa en cinco rangos (0-7.000€, 7.000-10.000€, 10.000-12.000€, 12.000-15.000€ y más de 15.000 €).
- *Lugar de residencia*: este indicador se corresponde con los datos del INE. Esto es especialmente importante para el presente estudio puesto que, por ejemplo, un viaje con cierto origen no implica que ese origen sea el lugar de residencia del viajero.
- *Tipo de actividad*: se corresponde al tipo de actividad realizada en origen y destino. Los algoritmos de Nommon lo dividen en cuatro tipos: casa, trabajo/estudio¹¹ (movilidad obligada), actividades frecuentes y actividades no frecuentes. La actividad casa es la realizada en el lugar de residencia habitual; trabajo/estudio implica una actividad recurrente de una duración significativa (6-8 horas) realizada en un lugar estable; actividad frecuente es aquella realizada de manera recurrente en una misma localización que no pertenezca al grupo 'trabajo/estudio'; y actividad no frecuente son aquellas que forman parte del diario de actividades de un día concreto, es decir, no tiene una frecuencia preestablecida.
- *Movilidad profesional*: esta segmentación permite distinguir aquellos viajes que, por patrones de comportamiento longitudinal de los usuarios, son usuarios profesionales, lo cual es útil para disminuir sesgos cuando se quiere estudiar la movilidad de la movilidad personal.

⁸ <https://www.nommon.es/services/mobility-insights/>

⁹ Si bien a partir del 1 de enero de 2022 quedaba prohibido el acceso y circulación de vehículos con clasificación ambiental "A" por las vías públicas urbanas del interior de la M-30, excluyendo la propia M-30, se extendió una fase de preaviso sin penalización que finalizó el pasado 1 de mayo de 2022. Más información en: <https://www.madrid360.es/medio-ambiente/zonas-de-bajas-emisiones/>

¹⁰ Enlace al Atlas de Distribución de Renta: https://www.ine.es/experimental/atlas/experimental_atlas.htm

¹¹ A partir de ahora, este propósito de movilidad obligada se resumirá como "trabajo"

A partir de los días, la zonificación y las segmentaciones aplicadas al estudio, se obtuvo una matriz de 25.442.768 filas con un total de 135748556 viajes. A continuación, se observa un recorte de esta matriz.

date	period	origin	destination	country	origin_purpose	destination_purpose	residence	income	age	gender	professional	trips
2022-03-14	PH00	28001158	28902158	Spain	W	H	2890201	I2	65-100	male	No	3.16
2022-03-14	PH00	28001158	28070158	Spain	O	O	2807918	I3	45-65	male	No	2.773
2022-03-14	PH00	28001158	28071158	Spain	H	O	2800101	I3	45-65	male	No	2.0
2022-03-14	PH00	28001158	28078158	Spain	O	H	2807801	I3	45-65	female	No	8.0
2022-03-14	PH00	28005062	28148129	Spain	NF	O	2814801	I2	25-45	female	No	4.999
2022-03-14	PH00	28005062	28005061	Spain	O	H	2800504	I3	25-45	female	No	60.870000000000005
2022-03-14	PH00	28005062	28032186	Spain	O	O	2807913	I1	25-45	male	No	4.18
2022-03-14	PH00	28005062	28005061	Spain	O	H	2800503	I2	45-65	female	No	12.174
2022-03-14	PH00	28005062	28005062	Spain	H	O	2800505	I3	25-45	male	Urban	17.268
2022-03-14	PH00	28005062	28005062	Spain	O	H	2800501	I3	25-45	female	No	31.895999999999997
2022-03-14	PH00	28005062	28005063	Spain	NF	H	2800502	I1	25-45	female	No	6.783
2022-03-14	PH00	28005062	28005062	Spain	O	H	2800505	I3	45-65	female	No	69.35499999999999
2022-03-14	PH00	28005062	28005063	Spain	H	W	2800505	I3	45-65	female	No	5.335
2022-03-14	PH00	28005062	28005062	Spain	O	H	2800505	I3	45-65	male	No	37.477000000000004
2022-03-14	PH00	28005062	28005062	Spain	O	H	2800505	I3	65-100	male	No	33.56
2022-03-14	PH00	28005062	28005061	Spain	W	H	2800504	I3	25-45	male	No	3.412
2022-03-14	PH00	28005062	28005061	Spain	NF	O	2804903	I3	45-65	female	Urban	4.002
2022-03-14	PH00	28005062	28005061	Spain	O	O	2813601	I2	45-65	male	No	2.589
2022-03-14	PH00	28005062	28083187	Spain	H	O	2800505	I3	25-45	female	No	6.996
2022-03-14	PH00	28005062	28083187	Spain	H	O	2800505	I3	25-45	male	No	12.951
2022-03-14	PH00	28005062	28083187	Spain	H	O	2800505	I3	45-65	male	No	3.407
2022-03-14	PH00	28005062	28083187	Spain	NF	H	2808301	I2	25-45	female	Urban	5.798
2022-03-14	PH00	28011192	28011192	Spain	O	H	2801101	I1	45-65	female	Urban	4.889
2022-03-14	PH00	28011192	28100191	Spain	NF	O	2815701	I1	65-100	male	No	2.282
2022-03-14	PH00	28011192	28111188	Spain	H	O	2801101	I1	45-65	male	Urban	6.5
2022-03-14	PH00	28011192	28146196	Spain	H	O	2801101	I1	45-65	male	No	3.25

Figura 3. Recorte de matriz OD obtenida a partir de los datos de Nommon

Desde el inicio se quitó del análisis aquellos viajes realizados por conductores profesionales y aquellos viajeros con residencia fuera de la Comunidad de Madrid (código postal 28****), para estudiar únicamente movilidad personal de residentes del área de estudio. Una vez aplicados estos filtros, se obtuvieron las siguientes estadísticas:

En la Figura 4 se observa un volumen de viajes total de 117.069.254, distribuido en aproximadamente 18 millones de viajes por cada día de semana y entre 12 y 15 millones de viajes los días del fin de semana.



Figura 4. Volumen de viajes por día de la semana de estudio. Elaborado a partir de los datos de la matriz OD

Para la mayor parte de los análisis realizados en esta investigación se eligió el **martes 15 de marzo de 2022**. Se ha elegido este día porque representa un día normal de la movilidad semanal en un mes normal, sin días festivos o puentes que pudieran alterar los patrones de movilidad habituales. A continuación, se observa en la Figura 5 el patrón horario de los viajes para ese martes, con los tres picos de tráfico - mañana, mediodía y

tarde – reflejados.

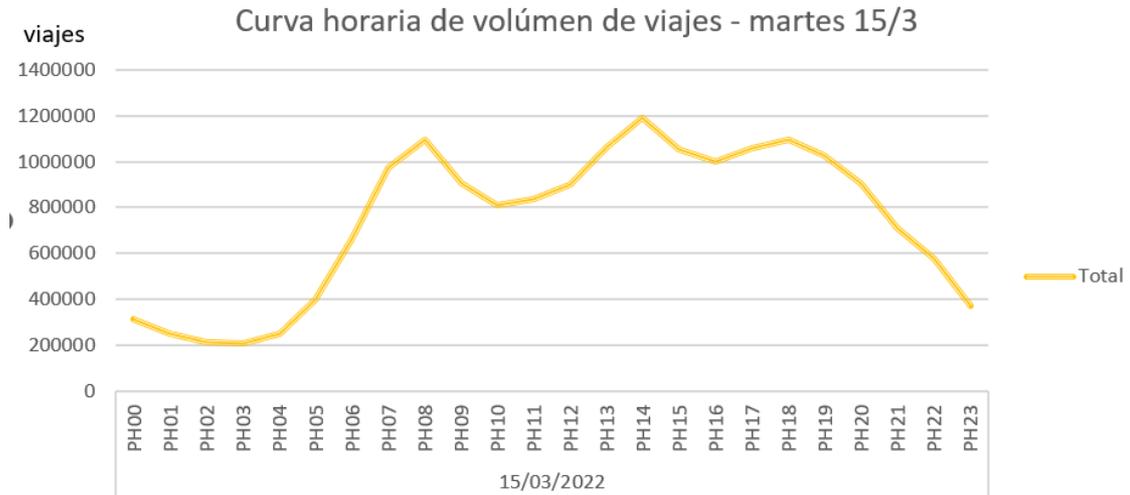


Figura 5. Volumen de viajes del martes 15 de marzo, por hora. Elaborado a partir de los datos de la matriz OD

3.2 Datos GTFS

Las especificaciones generales del suministro de datos para el transporte público, conocidas como GTFS (General Transit Feed Specifications), son series de archivos de texto compilados en un archivo ZIP que representan las redes de transporte público, con sus características y referencias geográficas correspondientes. Cada archivo modela un aspecto específico de esta red de transporte: paradas, rutas, viajes, datos horarios, entre otros¹². En el caso del presente trabajo, se utilizaron los GTFS de redes de Autobuses Interurbanos¹³, Metro¹⁴ y Cercanías¹⁵ del CRTM, consolidados y construidos para utilizarse en ArcMap por el equipo de investigación grupo de investigación “tGIS -Transporte, Infraestructura y Territorio” de la Universidad Complutense de Madrid. Este GTFS posee información únicamente para algunos meses de 2018, por lo que para los estudios de tiempos de viaje se debió elegir un día laborable promedio con movilidad normal, que se pareciera lo más posible al 15 de marzo de 2022 (ver Sección 4.6). A continuación, se visualiza la red utilizada en ArcGIS PRO.

¹² Información disponible en la API de Google Transit. Enlace:

<https://developers.google.com/transit/gtfs?hl=es-419>

¹³ <https://datos.crtm.es/datasets/885399f83408473c8d815e40c5e702b7/about>

¹⁴ <https://datos.crtm.es/datasets/gtfs-red-de-metro/about>

¹⁵ <https://www.ucm.es/tgis>

4. Metodología

4.1 Preparación de los datos de matrices OD

El primer paso en el desarrollo de la investigación consistió en la depuración de los datos de la matriz OD, es decir, en su preparación para el posterior análisis. Una vez ya descargados los datos de viajes, se decidió trabajar con una zonificación a nivel barrio para las zonas que están en el Municipio de Madrid, y a nivel zonificación de 208 zonas del CRTM en el caso de otros municipios de la Comunidad de Madrid¹⁶. Para esto, se utilizó un código de agregación de zonas realizado en Python 3 para agrupar en una misma fila aquellos viajes cuyo nuevo origen y/o destino coincidieran (ver Anexo 9.2). Seguidamente, se volvió a filtrar los viajes de conductores profesionales para trabajar únicamente con la movilidad personal y aquellos viajeros que no tuvieran residencia en la Comunidad Autónoma de Madrid.

El paso siguiente del trabajo consistió en definir el alcance y los indicadores de movilidad que se obtendrían a partir de las matrices OD.

4.2 Definición de alcance e indicadores para el análisis de movilidad

En cuanto al alcance, se definieron dos escenarios distintos para considerar como ‘destino de baja emisión’:

- **Escenario 1:** viajes con destino únicamente a la ZBEDEP Distrito Centro
- **Escenario 2:** viajes con destino a toda la almendra central de Madrid (escenario de ZBE extendida)

La justificación de esta elección de escenarios radica en comparar los flujos y potenciales efectos de las ZBE en un escenario poco ambicioso y otro escenario muy ambicioso. El primer escenario representa la zona geográfica de la ZBEDEP Distrito Centro, donde ya se comenzaron a aplicar medidas restrictivas a la circulación de los vehículos contaminantes; por ende, puede considerarse cómo un escenario ya existente, la situación actual. En cambio, el segundo escenario supone un desafío mucho más grande que supone una influencia a un número mucho más elevado de personas que se trasladan hacia la ciudad. Para estudiar cada caso se realizaron dos filtrados distintos de los códigos ID de los barrios (280790**); sólo aquellos del Distrito Centro para el primer escenario, y de los siete distritos de la almendra central para el segundo escenario¹⁷.

En cuanto a los indicadores, se definieron tres indicadores de interés:

- **Indicador 0:** para cada zona de toda la Comunidad Autónoma de Madrid, cantidad de viajes destinados al ámbito espacial cubierto por cada uno de los escenarios planteados
- **Indicador 1:** para cada zona de toda la Comunidad Autónoma de Madrid, cantidad de viajes propósito “trabajo”¹⁸ destinados al ámbito espacial cubierto por cada uno de los escenarios planteados con.

¹⁶ Esta zonificación es más agregada que la anterior, pero más desagregada que estudiar las zonas a nivel distrito, que podría generar sesgos en el análisis de vulnerabilidad y accesibilidad. Acceso a la nueva Zonificación en <https://datos.crtm.es/maps/zonificacionzt208>

¹⁷ https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Distritos_de_Madrid

¹⁸ Por similitud en los patrones de movilidad y duraciones de estancia de trabajo y de estudio, estas actividades no se diferencian en las matrices OD

- **Indicador 2:** para cada zona de toda la Comunidad Autónoma de Madrid, cantidad de viajes con propósito *distinto* a “trabajo”¹⁹ destinados al ámbito espacial cubierto por cada uno de los escenarios planteados.

El cálculo del Indicador 0 tiene por objeto ilustrar de manera general los patrones de movilidad de las personas hacia la zona central de Madrid y las características sociodemográficas generales, pero no se utilizó para los análisis posteriores de accesibilidad y su correlación con los niveles de vulnerabilidad. En cambio, en cuanto a la diferenciación entre los indicadores 1 y 2, se consideró interesante distinguir los viajes con propósito trabajo del resto puesto que podrían presentar patrones de movilidad muy distintos y, por ende, impactos distintos a partir de un escenario de expansión de la ZBE. Los viajes con propósito trabajo son viajes “obligados”, es decir, las personas que no tienen alternativa y deben acceder diariamente hacia la almendra central de Madrid. Esto se cree que puede generar resultados distintos en los patrones de movilidad.

4.3 Cálculo de indicadores de movilidad

A partir de los alcances definidos, se trabajó con la matriz OD agregada a través de la herramienta de consulta de base de datos en Excel, que permite la creación de tablas dinámicas y el filtrado de ciertos valores para las distintas segmentaciones y configuraciones de la matriz. La Tabla 1 ilustra los distintos campos utilizados para crear las tablas dinámicas que permitieron filtrar y desagregar la matriz a los efectos de cada análisis.

Elemento de tabla dinámica	Campo
Filas	Date (fecha)
Columnas	Income (nivel de renta)
	Gender (género)
	Age (edad)
Filtros	Professional (movilidad profesional)
	Residence (lugar de residencia)
	Destination (destinos del viaje)
	Purpose (propósito de viaje)
Valores (indicador)	Suma de trips (suma de viajes)

Tabla 1. Campos de la matriz OD utilizados en el análisis con Tablas Dinámicas. Elaboración propia.

A través de la creación de las tablas dinámicas, se filtró Destination para representar los dos escenarios y Purpose para calcular los tres indicadores definidos. Además, para todos los escenarios se mantuvieron los filtros de Professional para analizar únicamente los viajes personales, y Residence para estudiar únicamente los viajes de personas con residencia dentro de la Comunidad Autónoma de Madrid. A continuación, se utilizaron las herramientas de Gráficos de Excel para representar la movilidad diaria de toda la semana para la que hay datos, y particularmente para el martes 15 de marzo. Seguidamente, se exportaron las tablas finales con las que se eligió trabajar en ArcGIS PRO para poder geolocalizar y visualizar esos volúmenes de viajes y realizar los análisis sociodemográficos.

¹⁹ Propósitos distinguidos en las matrices OD, además de “Work” (trabajo/estudio): “Home” (casa), “Other Frequent” (actividades frecuentes que no son trabajo/estudio) y “Non Frequent” (actividades no frecuentes)

4.4 Análisis sociodemográficos de la movilidad

Una vez obtenidos los volúmenes de viajes para cada escenario y cada indicador, se realizaron los análisis sociodemográficos. El objetivo de éstos fue identificar patrones y diferencias relevantes en el volumen de viajes asociados a cada perfil de viajero para cada escenario de ZBE. Esto es, para construir posteriormente el indicador agregado de vulnerabilidad - a través del análisis multicriterio (Sección 4.5), se consideró necesario entender cuán relevante era el efecto de cada indicador sobre la movilidad y cuánto variaba el volumen de viajes de personas “más vulnerables” entre un escenario y el otro. Estos análisis se realizaron en ArcGIS PRO a partir de la simbolización de las capas de entidades.

El primer paso fue visualizar las características sociodemográficas de la movilidad general. Para cada escenario de ZBE, se realizaron mapas de calor representando los volúmenes de viajes desde cada origen para cada indicador por separado. Comenzando por el escenario del Distrito Centro, se visualizó primero en cuatro mapas la movilidad asociada a cada nivel de renta, para ver cuáles eran las zonas que tenían más cantidad de viajes hacia el Centro con niveles de renta más bajos y más altos. Seguidamente, se realizaron los mapas de volúmenes de viajes para cada franja etaria, para entender si variaba el volumen de viajes desde cada origen en función de la edad de los viajeros. Finalmente, se ilustró el volumen de viajes desde cada zona de origen para hombres, por un lado, y para mujeres por el otro. Estos análisis se repitieron para los viajes con destino a toda la almendra central de Madrid, para comparar si había patrones muy distintos entre los dos escenarios.

A partir de identificar los flujos de viajes según las distintas variables sociodemográficas, se pasó a observar la relación entre ellas específicamente para aquellas franjas o valores que fuesen indicativos de un perfil sociodemográfico vulnerable. Esto es, se concentró el análisis en las siguientes caracterizaciones:

- Movilidad de género: **‘mujer’**
- Movilidad para niveles de renta: **nivel 1** (el menor nivel de renta)
- Movilidad por edades: **0-25 y 65-100 años**, las edades más jóvenes y más mayores disponibles en la división de franjas de la matriz OD, tal como se analiza en el Atlas de Vulnerabilidad de España (ver Sección 2.3).

La opción de Simbología de **Colores Bivariantes**²⁰ permite mostrar la relación cuantitativa entre dos variables, distinguiendo entre cuatro posibilidades de relación: *‘High-High’*, *‘Low-Low’*, *‘High-Low’* y *‘Low-High’*. Esto implica que se estudiaron para cada origen en estudio los volúmenes de viajes de mujeres con el menor nivel de renta, mujeres para las franjas etarias más vulnerables, y viajes para esas franjas etarias que a su vez tuvieran el menor nivel de renta. Cuando las dos variables indicativas de vulnerabilidad coincidieran en un origen, la relación - y por ende el color de la visualización - de esa zona sería *High-High*.

Una vez finalizados los análisis para movilidad general, se realizaron análisis para la movilidad diferenciada por propósito realizando la comparativa entre trabajo y resto de actividades, pero únicamente para aquellos valores indicativos de vulnerabilidad que a su vez hubiera patrones, relaciones o alteraciones relevantes en los volúmenes de viajes. Por ejemplo, la movilidad femenina no se estudió diferenciada por propósito porque para el caso de la movilidad general ya no había variado con respecto a la del hombre, y lo mismo para la movilidad de los rangos etarios más vulnerables en comparación a los otros. Distinto es el caso de la movilidad en función de la renta de nivel más bajo, que mostró patrones muy distintos en la cantidad de viajes provenientes de cada zona para cada escenario. Asimismo, se prosiguió a estudiar la movilidad combinando

²⁰ Ver más en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/bivariate-colors.htm>

más de una variable de vulnerabilidad: viajes de mujeres con edades 0-25 y 65-100, mujeres con nivel 1 de renta, y viajes de ese nivel de renta con edades 0-25 y 65-100.

4.5 Análisis multicriterio de vulnerabilidad

El análisis multicriterio de vulnerabilidad tuvo por objeto la creación de un único indicador de vulnerabilidad a partir de las distintas variables que se estudiaron en el paso anterior, para luego poder analizarlo en relación al nivel de accesibilidad (ver Sección 4.6). Esto se llevó a cabo a través del análisis espacial de **Suma Ponderada** (*Weighted Sum*), que permite combinar varias entradas de ráster que representan varios factores, incorporando el peso o importancia relativa a cada uno. En este caso, cada entrada (capa) representaba uno de los cuatro factores de vulnerabilidad detectados en el análisis sociodemográfico: nivel de renta media '1', 'mujer', y los rangos etarios '0-25' y '65-100'.

El primer paso implicó definir las ponderaciones de cada variable indicativa de vulnerabilidad. El criterio se basó en dos cuestiones:

- En primer lugar, el nivel de relevancia o impacto en la movilidad detectado en los análisis sociodemográficos. Cómo puede observarse (Sección 5.2), la variable para la cual más cambios en la movilidad se detectan al cambiar de valor del indicador ha sido el nivel de renta, tanto para la movilidad general cómo para la movilidad diferenciada por propósito. Las variables de edad y género por sí solas no han presentado gran variabilidad en la movilidad entre escenarios ni por distintos propósitos, pero sí han mostrado patrones muy interesantes al cruzarlos con la renta. Esto es, hay importantes diferencias en el volumen de viajes - y de dónde provienen éstos - de mujeres con renta baja, o de personas entre 0-25 y 65-100 años con renta baja, para los distintos escenarios y configuraciones estudiadas.
- En segundo lugar, la revisión bibliográfica sobre el uso de estas variables como indicativas de vulnerabilidad en España, especialmente en análisis multicriterio. Por ejemplo, existen estudios que miden la vulnerabilidad a partir del índice de envejecimiento (De Cos Guerra & Reques Velasco, 2019), algunos tomándolo a partir de los 74 años (Alguacil Gómez et. al. 2013). Para la renta media, numerosos estudios han considerado esta variable directamente, como en el informe metodológico para la construcción del ranking de vulnerabilidad de Madrid (Ayto. Madrid, 2018), pero muchas veces cómo variable indirecta, como puede ser la imposibilidad de acceso a renta por desempleo (Méndez et. al. 2015). Para el indicador del rango etario menor, los estudios suelen considerar vulnerable una persona menor de 15 años (Atlas de Vulnerabilidad Urbana 2001-2011), e inclusive algunos incluyen únicamente población de edad infantil de nacionalidad extranjera (Alguacil Gómez et. al. 2013). Estas diferencias con los datos utilizados en el presente estudio se tuvieron en cuenta a la hora de asignar los valores de ponderación, disminuyendo su puntaje, principalmente por el hecho que más de la mitad de los años de la franja - de los 15 a los 25 años - no suele considerarse vulnerable. En el caso del indicador de viajes de mujeres, en otros estudios suele considerarse indicativo de vulnerabilidad cuando está relacionada con otra característica más, por ejemplo, mujeres en hogares monoparentales (Alguacil Gómez et. al. 2013), o mujeres de mayor edad con poca cualificación profesional (Ayto. Madrid, 2018).

Variable	Valor	Peso (%)
Nivel de renta	Nivel 1	45%
Rango de edad	0-25 años	20%
	65-100 años	25%
Género	Mujer	10%

Tabla 2. Variables y pesos relativos para el cálculo del indicador de vulnerabilidad. Elaboración propia

Una vez definidos los pesos, con la herramienta **Polygon to Raster** (*Polígono a Ráster*) se crearon los ráster de cada variable asignando el campo del "Valor" (Tabla X) de cada una como valor de los ráster de salida. A

continuación, se realizó el cálculo de suma ponderada, tomando cada variable según su respectivo peso (Figura 7). El resultado obtenido fue un único ráster de salida para cada escenario (Figura 8), que se pasó a valores enteros con la herramienta *Int (Entero)*²¹ para finalmente poder pasarlo a polígono con la herramienta *Raster to Polygon (Ráster a Polígono)*. Estos pasos se realizaron a través de la herramienta Modelbuilder (ver Anexo 9.3). Una vez que se obtuvieron los polígonos, se realizaron uniones espaciales con los datos de las matrices, contenidas en los polígonos que se transformaron a Ráster en el primer pasó, y se modificó la simbología de los mismos para representar los volúmenes de viajes según el indicador final de vulnerabilidad (campo "gridcode").

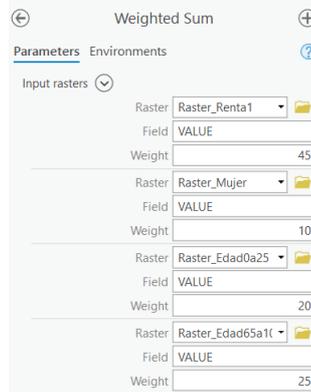


Figura 7. Cálculo de Suma Ponderada realizado en ArcGIS PRO.

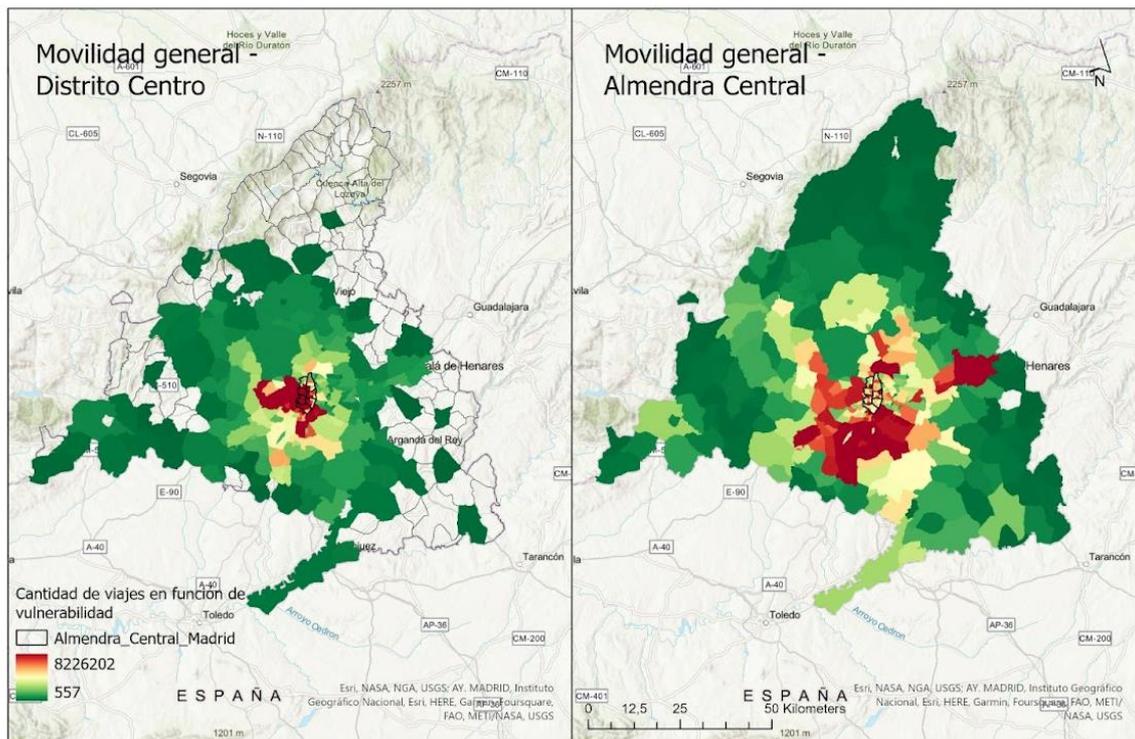


Figura 8. Ejemplo de ráster único de cantidad de viajes vulnerables para cada escenario de ZBE, creado a partir de la Suma Ponderada de los rásteres de entrada. Elaboración propia con ArcGIS PRO.

Estos pasos se repitieron para obtener los siguientes indicadores para la movilidad del martes 15 de marzo:

²¹ La herramienta 'Int' convierte cada valor de celda de un ráster a un entero mediante truncamiento. Esto es un paso necesario ya que la herramienta que conversión de dataset ráster a polígono sólo acepta ráster con números enteros. Más información: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/int.htm>

- Vulnerabilidad de viajeros hacia ZBEDEP Distrito Centro, diferenciada por propósito de viaje
- Vulnerabilidad de viajeros hacia ZBE almendra central de Madrid, diferenciada por propósito de viaje

4.6 Análisis de matriz de coste OD para cálculo de tiempos de viaje

Con el indicador único de vulnerabilidad en función de la cantidad de viajes ya calculado para cada origen, el último paso previo a los cálculos finales de correlación entre vulnerabilidad y accesibilidad fue calcular este último, medido en el tiempo de viaje que le toma a un viajero llegar en transporte público a la ZBE, tanto la ZBEDEP Distrito Centro como el escenario de toda la almendra central. Este análisis se realizó a través de la herramienta de **Análisis de Coste de Matriz OD (Origin Destination Cost Matrix)**, la cual permite a través de un análisis de redes GTFS, calcular los tiempos de viajes entre distintos orígenes y destinos simultáneamente

Como se indicó en la Sección 3.2, se utilizó el GTFS del grupo de investigación “tGIS -Transporte, Infraestructura y Territorio” de la Universidad Complutense de Madrid, construido para utilizar en ArcMap. Este GTFS incluye información de las redes de Cercanías, Autobuses y Metro, disponibles en el portal del CRTM. Dado que el GTFS posee información únicamente para algunos meses de 2018, se eligió el **martes 6 de noviembre de 2018**, un día promedio normal de movilidad que pudiera reflejar el nivel de servicio que existe hoy en día.

El primer paso fue crear las capas de puntos de orígenes y destinos en ArcGIS PRO. Éstas se generaron con la herramienta **Entidad a Punto (Feature to Point)** que permitió generar centroides para cada polígono de la zonificación de estudio. A continuación, con la red del GTFS de fondo, se modificaron con la herramienta de edición (**Edit > Modify**) aquellos centroides que se encontraban muy lejos de las calles y rutas. Esto se realizó dado que algunos puntos se encontraban en lagos, montañas o zonas descampadas que no sólo no representan la ubicación del centroide con más posibilidades de tener viajeros saliendo desde allí, sino que además son zonas inaccesibles que entorpecerían los cálculos de tiempos de viaje. Una vez listas las capas de punto, éstas se exportaron a ArcMap para proceder con el análisis de matriz de coste OD.

En ArcMap, se realizaron los ajustes e instalaron las extensiones necesarias para cargar la red, y se procedió a realizar el análisis de **Matriz de Coste OD (OD Cost Matrix)**. Los análisis se realizaron para las **8am**, representando el primer pico de movilidad y un horario donde suele haber una buena frecuencia de los servicios de transporte público para el desplazamiento de los viajeros que van a trabajar o estudiar.

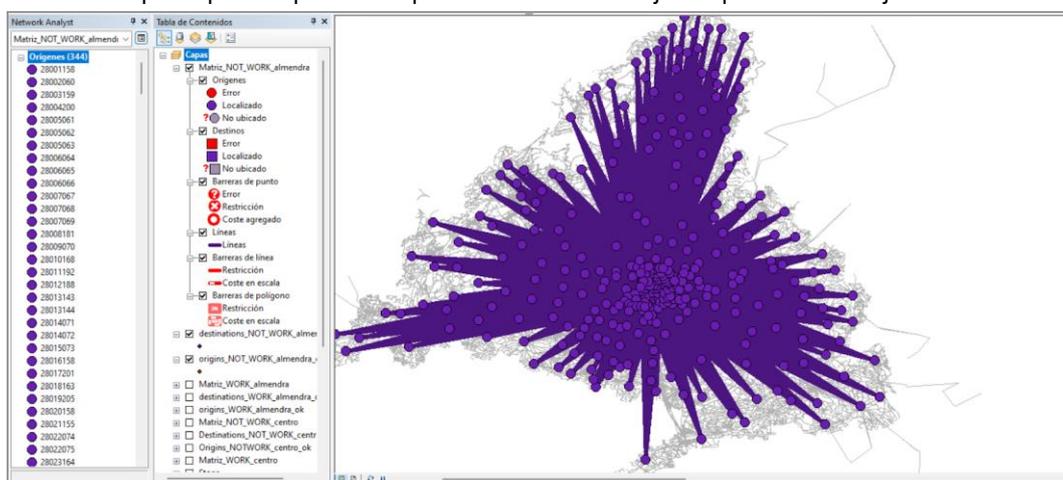


Figura 9. Cálculos de Matriz de Coste OD en ArcMap a partir de las redes de GTFS.

Una vez ejecutados los modelos y obtenidas las rutas (capa de entidades 'Lines') con sus respectivos tiempos de viaje entre cada par OD (campo 'TotalTime_TravelTransit'), se exportaron los resultados como archivos de capa de análisis de red para continuar su análisis en ArcGIS PRO.

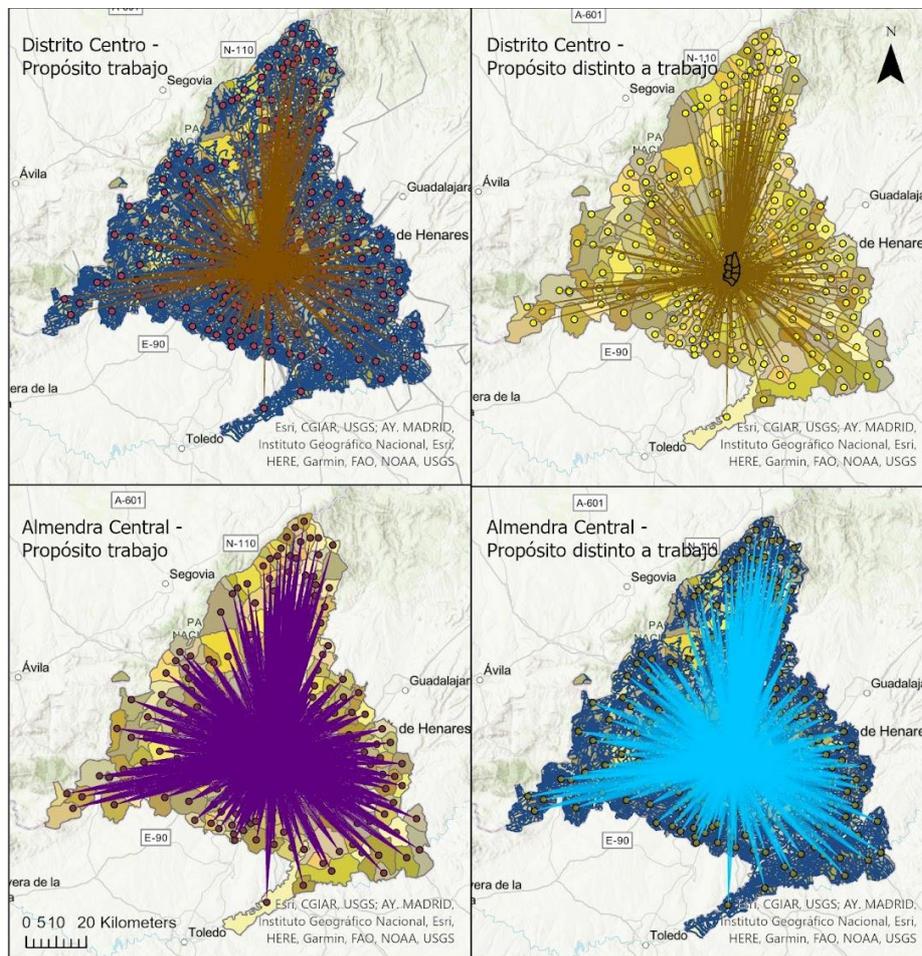


Figura 10. Matrices de coste OD exportadas al ArcGIS PRO.

El siguiente paso consistió en preparar los campos de las capas de Líneas para unirlos a las matrices de viajes base, con el objetivo de visualizar cada origen en función de su nivel de accesibilidad. Dado que en el análisis de Coste OD se unió en un sólo campo los códigos de origen y destino, el primer paso fue separarlos. Esto se realizó creando nuevos campos y, con la herramienta Calculate Field, calcularlos seleccionando únicamente los caracteres que representaban cada código²².

El último paso fue definir un único punto de destino para cada escenario, con el propósito de que cada origen tuviera un único tiempo de viaje. La aproximación que se eligió fue calcular la media de esos tiempos de viajes en Excel, y luego importar la nueva tabla. Una vez obtenidos los destinos "únicos" y por ende los tiempos de viaje "únicos" para cada origen, se realizó la unión de capas de entidades.

²² Esto se realizó con un código de Python 3 se selección de caracteres, por ejemplo, `!Nuevo_Campo![8:]`, donde 8 representa la cantidad de caracteres que se quieren "extraer" del nuevo campo que creó el análisis de Coste OD

4.7 Análisis de correlación espacial entre las características sociodemográficas de los viajeros y su nivel de accesibilidad

El último análisis que se realizó fue el de relacionar los indicadores de **vulnerabilidad**, construido a partir de los volúmenes de viajes con características sociodemográficas vulnerables, y **accesibilidad**, construido a partir de los tiempos de viaje en los servicios de transporte público del GTFS. El objetivo final que se buscó con esta sección fue evaluar hasta qué punto la hipótesis planteada (Sección 1.2) se cumplía, y en qué zonas específicamente. Es importante remarcar que, si bien todas las zonas del área de estudio contenían viajes para las cuáles se calcularon los tiempos entre origen y destino, no todas las zonas presentaron viajes vulnerables de acuerdo con las pautas del análisis multicriterio. Es por esto que este último estudio de correlaciones entre vulnerabilidad y accesibilidad no abarca todas las zonas de la Comunidad Autónoma de Madrid, sino únicamente las que ya han presentado viajes con cierto nivel de vulnerabilidad. Otra observación de relevancia es que cada estudio de estadística espacial puede arrojar distintos resultados, dependiendo qué herramienta se elija para ejecutar, qué peso se les asigne a las distintas variables, etc. Es por esto que no se buscó llegar a conclusiones a nivel zonas - aunque se hayan dado ejemplo a lo largo de la investigación, sino más bien a nivel macro.

Los análisis elegidos para estudiar correlaciones y sacar las conclusiones respecto a la hipótesis de partida fueron los siguientes:

- **Relaciones bivariantes locales:** este análisis examina si hay relación estadísticamente significativa entre dos variables²³. Esta herramienta las distingue entre variable dependiente y variable explicativa. Cada entidad de salida se clasifica en 6 categorías que indican el tipo de relación que se encontró:
 - No significativa: la relación entre las variables no es significativa estadísticamente.
 - Lineal positiva: la variable dependiente aumenta linealmente a medida que aumenta la variable explicativa.
 - Lineal negativa: la variable dependiente disminuye linealmente a medida que aumenta la variable explicativa.
 - Cóncava: la variable dependiente cambia en forma de curva cóncava a medida que aumenta la variable explicativa.
 - Convexa: la variable dependiente cambia en forma de curva convexa a medida que aumenta la variable explicativa.
 - Complejo sin definir: las variables mantienen una relación significativa, pero ninguna de las otras categorías describe de forma fiable el tipo de relación.

Existen algunos estudios multicriterio donde se considera a la accesibilidad como indicativa de vulnerabilidad también. Por ejemplo, la accesibilidad a los distintos elementos de intercomunicación, cómo carreteras y estaciones de ferrocarril, pueden sugerir una mayor o menor vulnerabilidad territorial (De Cos Guerra & Reques Velasco, 2019). Asimismo, existe el concepto de ‘vulnerabilidad subjetiva’ asociado a las viviendas cuya persona de referencia considera que su residencia tiene malas comunicaciones (Alguacil Gómez et. al. 2013). Teniendo esto en cuenta, y añadiendo el hecho que el indicador de vulnerabilidad es en realidad cantidad de viajes con características vulnerables, se definió que ésta fuese la variable dependiente y la accesibilidad como variable explicativa.

²³ Más información disponible en las referencias de ArcGIS PRO: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-statistics/localbivariaterelationships.htm>

A los efectos de este estudio, no se consideró relevante la diferenciación de estas categorías de relaciones, por lo que se concentró en aquellos resultados donde las variables mantuvieran cualquier tipo de relación significativa (lineal positiva o compleja sin definir).

- **Suma ponderada:** se realizó el mismo procedimiento que para el análisis multicriterio de vulnerabilidad, pero esta vez con dos variables - tiempo de viaje (*TravelTime_WithTransit*) y vulnerabilidad (*gridcode*) - asignando 50% del peso a cada una.
- **Correlación espacial Global Moran's I y Anselin Local Moran's I:** estos análisis buscan si existe correlación espacial en función de las ubicaciones de las entidades y los valores de atributo. Ninguna de estas herramientas permite comparar dos variables, por lo que se hizo para la capa de entidades que se generó previamente en el análisis de Suma Ponderada. Primero, se buscó comprobar con Global Moran's I²⁴ si había patrones de agrupación geográfica de estos viajes vulnerables con baja accesibilidad a los servicios de transporte público. Si los valores del índice de Moran I eran positivos, se indicaba una tendencia positiva hacia el *clustering*, la agrupación. En caso de que hubiera efectivamente correlación espacial, con el análisis Anselin local Moran's I²⁵ se buscó localizar geográficamente esas agrupaciones espaciales significativas.

²⁴ Más información disponible en las referencias de ArcGIS PRO: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/spatial-autocorrelation.htm>

²⁵ Más información disponible en las referencias de ArcGIS PRO: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-statistics/cluster-and-outlier-analysis-anselin-local-moran-s.htm>

5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los distintos pasos metodológicos planteados en el apartado anterior. En primer lugar, se obtuvieron las distribuciones de los volúmenes de viajes para cada escenario, tanto de movilidad general como diferenciada por propósito. Luego, se obtuvieron las distribuciones de estos volúmenes, filtrando por las características sociodemográficas de los viajeros. Seguidamente, se realizó el análisis multicriterio a partir de aquellas variables indicativas de vulnerabilidad. Posteriormente, se generó el indicador de accesibilidad a partir del análisis GTFS de tiempos de viaje. Finalmente, se obtuvieron las correlaciones espaciales entre estos dos indicadores a través de distintas herramientas de estadística espacial.

5.1 Indicadores de movilidad

5.1.1. Escenario 1 - viajes con destino a la ZBEDEP Distrito Centro

Indicador 0: Movilidad General

A través del filtrado de los destinos de la matriz OD para analizar los viajes con destino específico alguno de los barrios del Distrito Centro, se observaron un total de 11.920.273 viajes, de los cuáles hay entre 1,6 y 1,9 millones de viajes por día durante la semana, mientras que el sábado se observan 1,5 millones y el domingo 1,2 millones de viajes.

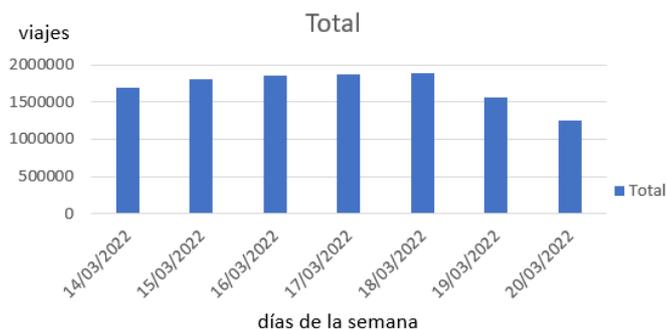


Figura 11. Movilidad general diaria con destino el Distrito Centro

La Figura 12 ilustra el volumen de viajes con destino la ZBEDEP Distrito Centro para el día 15 de marzo donde, cuanto más colorado el polígono, más cantidad de viajes registrados para ese día. Como puede observarse, la región donde más viajes se concentran es la del Municipio de Madrid, y particularmente dentro de la almendra central de Madrid y al oeste de la misma. Los viajes intrazonales, es decir, que tienen origen también el Distrito Centro, son aquellos que más se detectan: viajes desde Universidad, Palacio, Justicia y Embajadores. Otros orígenes con un volumen muy elevado de viajes fueron Aluche y Puerta del Ángel (Latina), San Isidro (Carabanchel), Pozuelo de Alarcón, Ciudad Universitaria y Casa de Campo (Moncloa-Aravaca), Valverde (Fuencarral El Pardo) y Valdefuentes (Hortaleza).

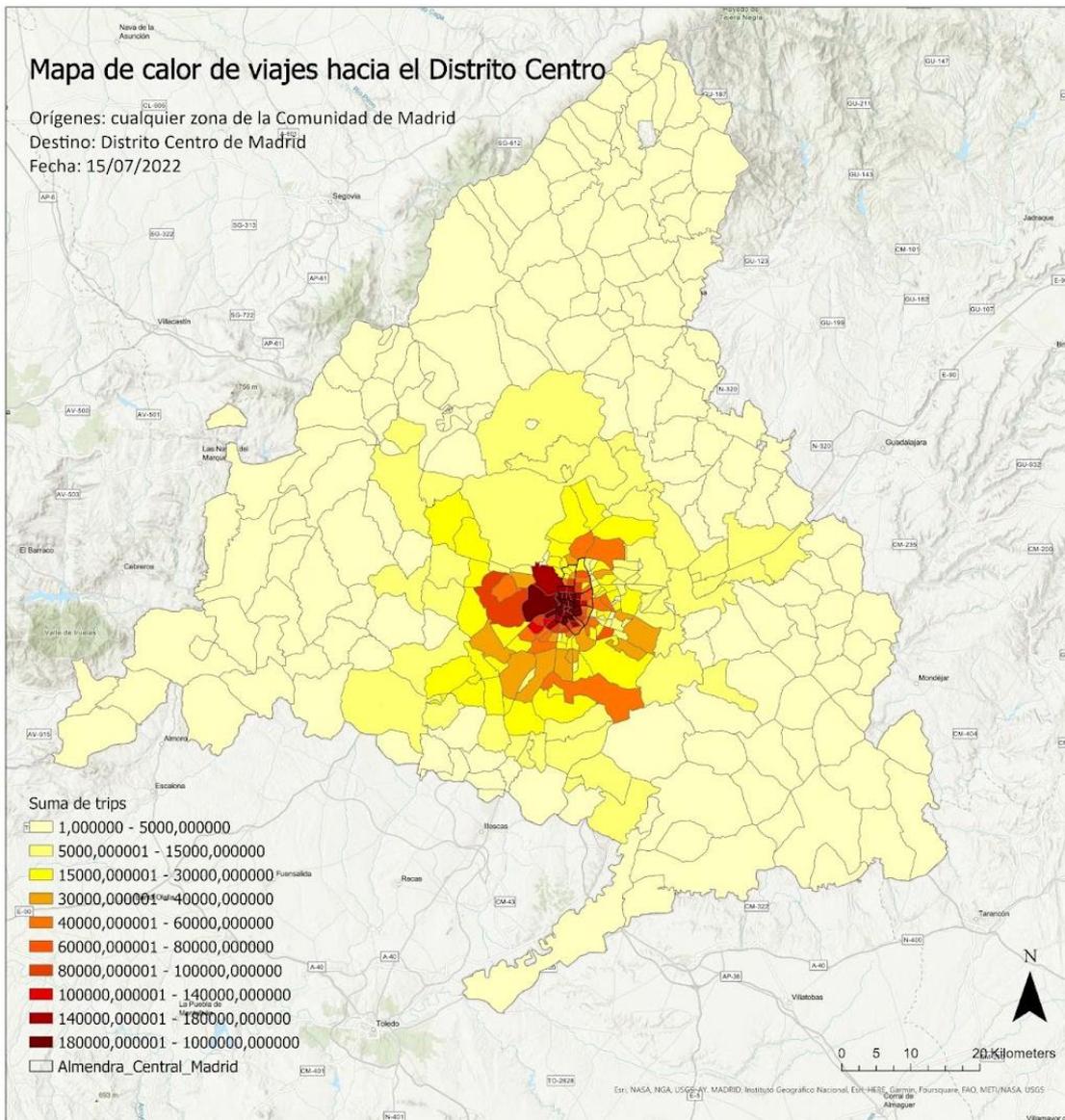


Figura 12. Volumen viajes hacia el Distrito Centro. Elaboración propia a partir de los datos de la matriz OD

Indicador 1: Movilidad con propósito trabajo

Para el escenario de la movilidad con propósito trabajo hacia el Distrito Centro, se registraron un total de 1.320.810 viajes. El volumen de los días de la semana varió entre 0,2 y 0,3 millones, mientras que para el fin de semana se registraron 96.000 viajes el sábado y 70.000 el domingo. Como es de esperar, la relación entre el volumen de viajes del fin de semana respecto al volumen semanal de viajes se reduce significativamente en comparación al análisis de la movilidad general sin filtrado de propósito.

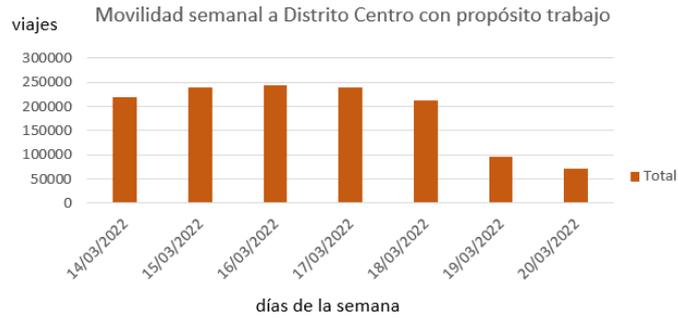


Figura 13. Movilidad con propósito trabajo diaria con destino el Distrito Centro

Indicador 2: Movilidad con propósito distinto a trabajo

El último indicador analizado en el escenario menos ambicioso de ZBE fue el de la movilidad con propósito distinto a trabajo. Se alcanzaron un total de 10.599.462 viajes, con un volumen semanal de entre 1,4 y 1,7 millones de viajes por día, y para el sábado y domingo 1,4 y 1,2 millones de viajes respectivamente. A diferencia del escenario de trabajo, la diferencia entre el volumen de los días de semana versus el volumen de sábado y domingo es mucho menor, y de hecho inexistente entre los volúmenes registrados para el lunes y el sábado. Esto puede explicarse dado que durante el fin de semana las actividades frecuentes que no son trabajo y las actividades no frecuentes - incluidos los viajes de turistas y excursionistas - aumentan significativamente.

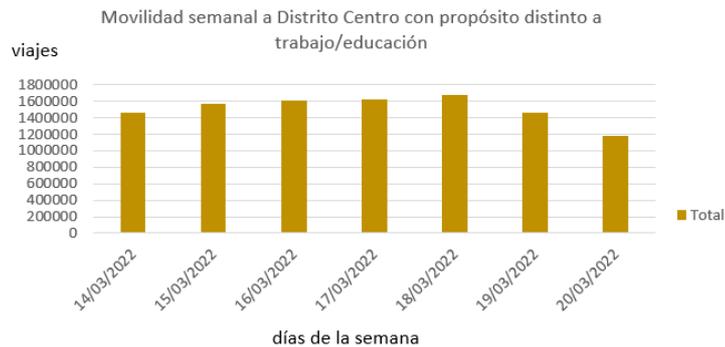


Figura 14. Movilidad con propósito trabajo diaria con destino el Distrito Centro

La Figura 15 ilustra la movilidad filtrada por propósito para el 15 de marzo: por trabajo del lado izquierdo, con 239.845 viajes totales, y por los otros propósitos del lado derecho con 1.568.346 viajes. Como puede observarse, hay una mayor cantidad de zonas con volúmenes altos de viajes hacia el Distrito Centro en el caso de propósitos distintos a trabajo, aunque los patrones son muy similares. De hecho, las zonas que registran mayor volumen de viajes para ambos casos²⁶ son las intrazonales, es decir, Universidad, Palacio, Justicia y Embajadores.

²⁶ Para este ejemplo, se contabilizan las zonas con más de 5.000 viajes para el propósito trabajo, y más de 30.000 viajes para el propósito distinto al trabajo

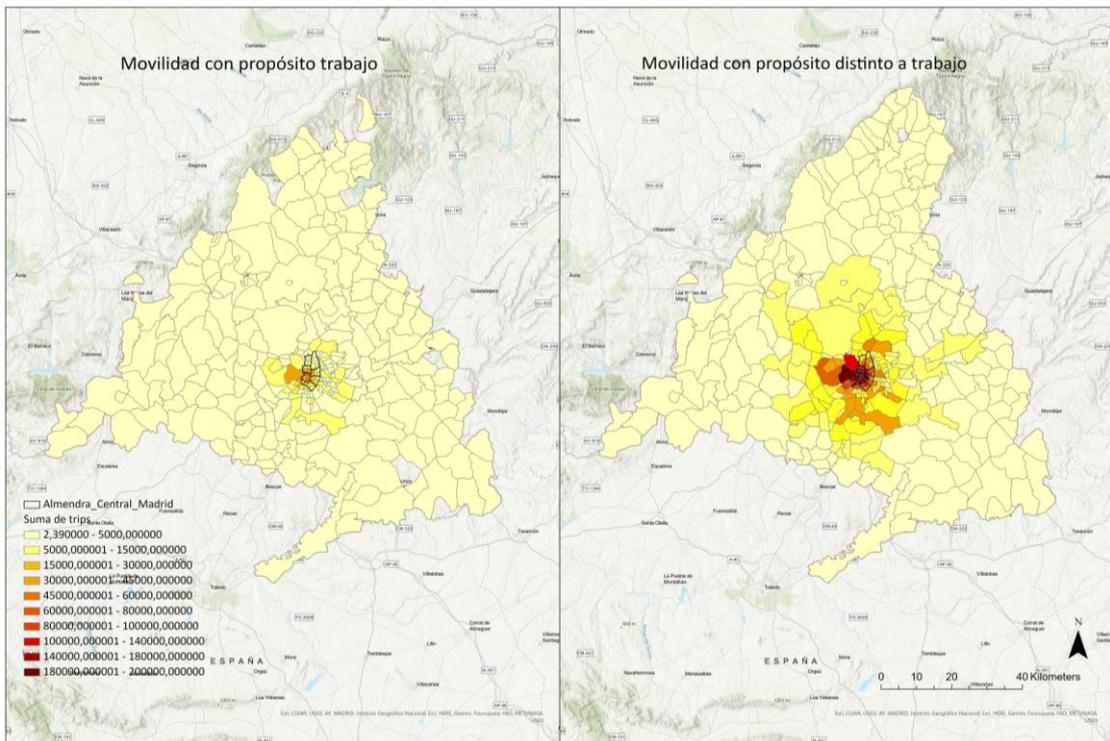


Figura 15. Volumen de viajes hacia Distrito Centro, diferenciado por propósitos de viaje. Elaboración propia a partir de los datos de la matriz OD

5.1.2. Escenario 2: viajes con destino a toda la almendra central

Indicador 0: Movilidad General

Para el último escenario, con destino cualquier zona dentro de la almendra central de Madrid, se observan un total de 24.501.460 viajes en la semana estudiada, con un promedio de entre 3,6 y 4 millones de viajes por día para los días de semana, mientras que el sábado se detectan alrededor de 3 millones de viajes, y el domingo alrededor de 2,5 millones. En comparación con la movilidad general con destino específico el Distrito Centro, la movilidad con destino a toda la almendra central aumenta en alrededor de un 105%. Esto confirma que expandir la ZBE a los siete distritos centrales trata de un escenario mucho más ambicioso a la hora de planificar y gestionar la movilidad en la ciudad madrileña.



Figura 16. Movilidad diaria con destino la almendra central de Madrid.

La Figura 17 ilustra el mapa de calor por volumen de viajes con destino a cualquier zona de la almendra central de Madrid. A diferencia de lo observado para la movilidad con destino al Distrito Centro, la zona con alto volumen de viajes es mucho más extensa. Esto es, se observa un nivel elevado de viajes originados en zonas dentro del Municipio de Madrid y también de los alrededores al municipio, con una extensión bastante

relevante hacia el sur y este del territorio de la Comunidad. Por consiguiente, se puede inferir que, tomando un escenario más ambicioso de restricciones de circulación por la ZBE, impacta a una mayor cantidad de orígenes con viajes hacia la ciudad, especialmente zonas del sur y el este. Algunas de estas son: Alcalá de Henares, Alcobendas, Alcorcón, Coslada Fuenlabrada, Getafe, Casco Histórico (Vallecas), Boadilla del Monte y Arroyomolinos.

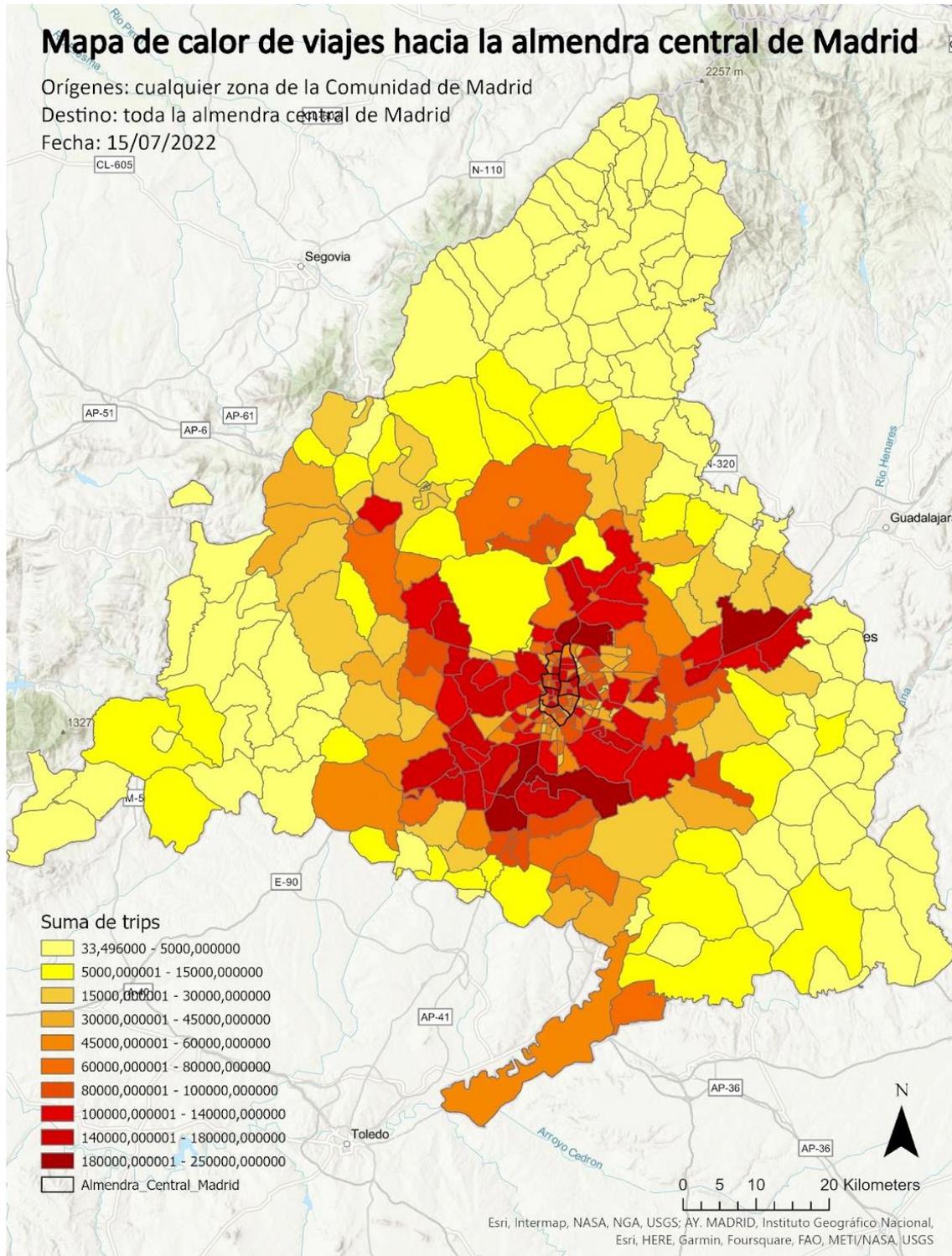


Figura 17. Distribución de viajes con destino a la almendra central de Madrid. Elaboración propia a partir de los datos de la matriz OD.

Indicador 1: Movilidad con propósito trabajo

Para el segundo escenario, la movilidad con destino a cualquier zona dentro de la almendra central de Madrid con filtrado de propósito trabajo fue de 3.017.975 viajes totales. Se observó un promedio de 0,5 millones de viajes por cada día de semana, mientras que el sábado y domingo se registraron aproximadamente 0,2 millones y 0,15 millones respectivamente. En comparación con la movilidad con destino específico el Distrito Centro, la movilidad con destino a toda la almendra central aumenta alrededor de un 130%.



Figura 18. Movilidad diaria con propósito trabajo con destino la almendra central de Madrid. Elaboración propia a partir de los datos de la matriz OD.

Indicador 2: Movilidad con propósito distinto a trabajo

Finalmente, para el escenario de movilidad con propósito distinto al trabajo se observaron un total de 21.483.485 viajes con destino la almendra central. En comparación con la movilidad con destino específico el Distrito Centro, la movilidad para propósitos distintos a trabajo con destino a toda la almendra central aumenta alrededor de un 100%.



Figura 19. Movilidad diaria con propósito distinto a trabajo con destino la almendra central de Madrid. Elaboración propia a partir de los datos de la matriz OD.

La Figura 20 ilustra la movilidad filtrada por propósito: por trabajo del lado izquierdo, y por los otros propósitos del lado derecho. Como puede observarse, hay una mayor cantidad de zonas con volúmenes altos de viajes en el caso de propósitos distintos a trabajo, aunque los patrones son muy similares. De hecho, las zonas que registran mayor volumen de viajes para ambos casos ²⁷ son Valverde (Fuencarral El Pardo), Getafe, Leganés, Alcalá de Henares, Valdefuentes (Hortaleza) y Fuenlabrada.

²⁷ Para este ejemplo, se contabilizan las zonas con más de 20.000 viajes para el propósito trabajo, y 150.000 viajes para el propósito distinto al trabajo

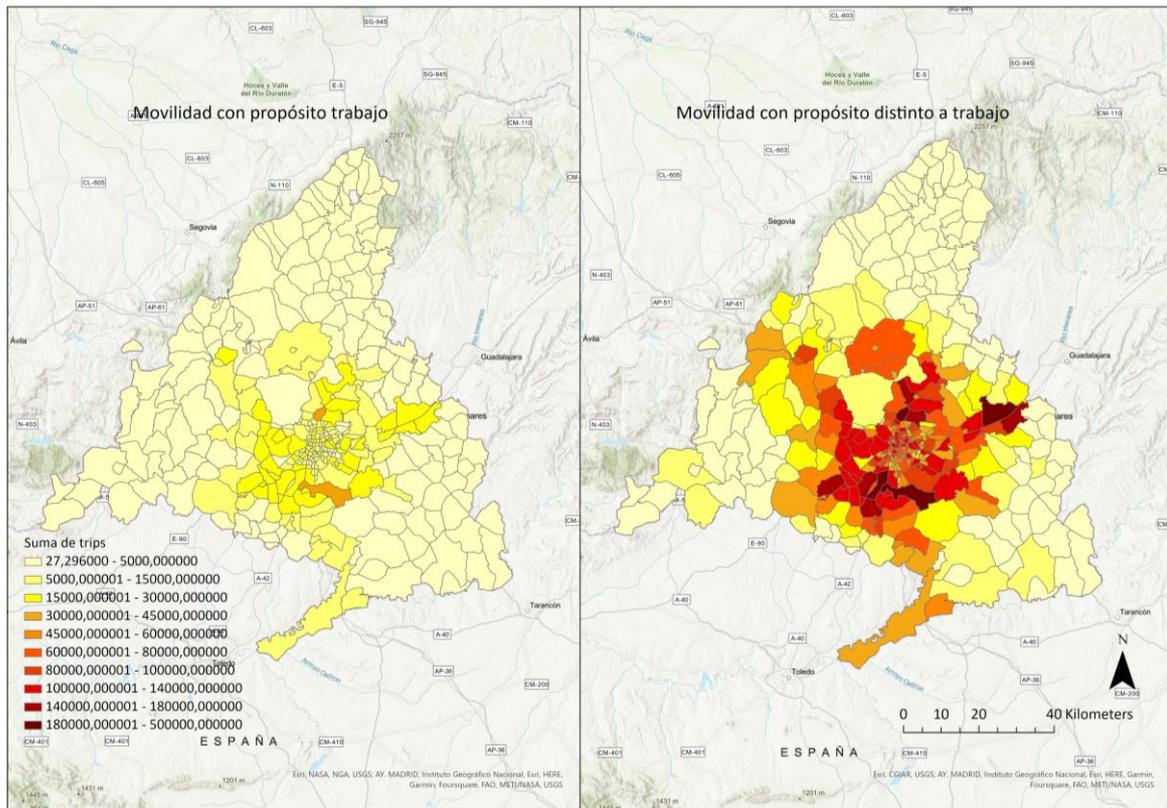


Figura 20. Volumen de viajes hacia la almendra central, diferenciando propósitos de viaje. Elaboración propia a partir de los datos de la matriz OD

A continuación, la Tabla 3 sintetiza los volúmenes de viajes registrados en cada escenario, para cada indicador analizado. Una primera observación para realizar es en el enorme cambio en volumen de viajes que implica pasar de un escenario 1 de ZBEDEP a un escenario más ambicioso como el 2, para los tres casos de estudio de movilidad, especialmente durante la semana. Esto supone que las autoridades gubernamentales tendrían más del doble de personas requiriendo ingresar, y por ende debiendo encontrar alternativas al vehículo privado. Esto tiene implicaciones en el nivel de servicio y accesibilidad del transporte público para que sea una alternativa real al vehículo privado, en términos de costes y tiempos de viaje. En segundo lugar, se observa que el cambio porcentual para los promedios de fin de semana es más alto para la movilidad con propósito trabajo, por lo que se puede inferir que pasar al Escenario 2 afectaría un poco menos al turista/excursionista que a viajeros con propósito trabajo/estudio. De todos modos, los cambios porcentuales son altos para todo tipo de movilidad, lo cual refuerza la ambición que implica pasar a una ZBE de toda la almendra central.

Cantidad de viajes totales	Escenario 1 (Distrito Centro)			Escenario 2 (almendra central de Madrid)			Cambio porcentual en volumen de viajes		
	Prom. semanal	Prom. finde	Total semana + finde	Prom. semanal	Prom. finde	Total semana + finde	Prom. semanal	Prom. finde	Total semana + finde
Movilidad general	1,82	1,40	11,92	3,82	2,7	24,5	109%	93%	105%
Movilidad propósito trabajo/estudio	0,23	0,08	1,32	0,53	0,17	3,02	130%	113%	130%

Movilidad distinta a propósito trabajo/estudio	1,59	1,32	10,6	2,35	2,52	21,48	148%	90%	100%
--	------	------	-------------	------	------	--------------	------	-----	-------------

Tabla 3. Resumen de viajes registrados para cada escenario y la variación porcentual entre ambos

5.2 Análisis de movilidad en función de características sociodemográficas

A partir de esta primera detección de flujos de viajes, se realizaron diversos análisis sobre la distribución de viajes con destino la almendra central en función de las variables sociodemográficas disponibles en los datos de la matriz OD. Tal cómo se ha descrito en la Sección 3.1, se ha elegido trabajar con el día **martes 15/7** para representar los patrones de movilidad general durante un día de semana para Madrid en marzo de 2022.

5.2.1. Movilidad General

Escenario 1 - viajes con destino a la ZBEDEP Distrito Centro

Un primer análisis sociodemográfico fue el de la distribución de viajes en función de los niveles de renta media del lugar de residencia de los viajeros (Figura 21). La renta se agrupó en 4 niveles (7.000-10.000€, 10.000-12.000€, 12.000-15.000€ y más de 15.000€²⁸), siendo nivel 1 el más bajo y nivel 4 el de la renta más alta. Como se observa, el número de viajes se reduce cuando se divide en las rentas, inclusive con zonas sin viajes hacia el Centro para determinado nivel de renta. Hay tendencia clara para los dos extremos de nivel de renta, de mayor cantidad de viajes de personas provenientes principalmente del sur y en parte del sureste para el nivel 1, y más viajes provenientes del centro y norte de la almendra central para el nivel 4. Por otra parte, el nivel 2 de renta presenta un patrón similar al nivel 1, mientras que el nivel 3 tiene una distribución relativamente heterogénea de viajes entre las distintas regiones de la Comunidad Autónoma.

²⁸ No se han detectado zonas con el quinto rango de nivel de renta: 0-7.000€.

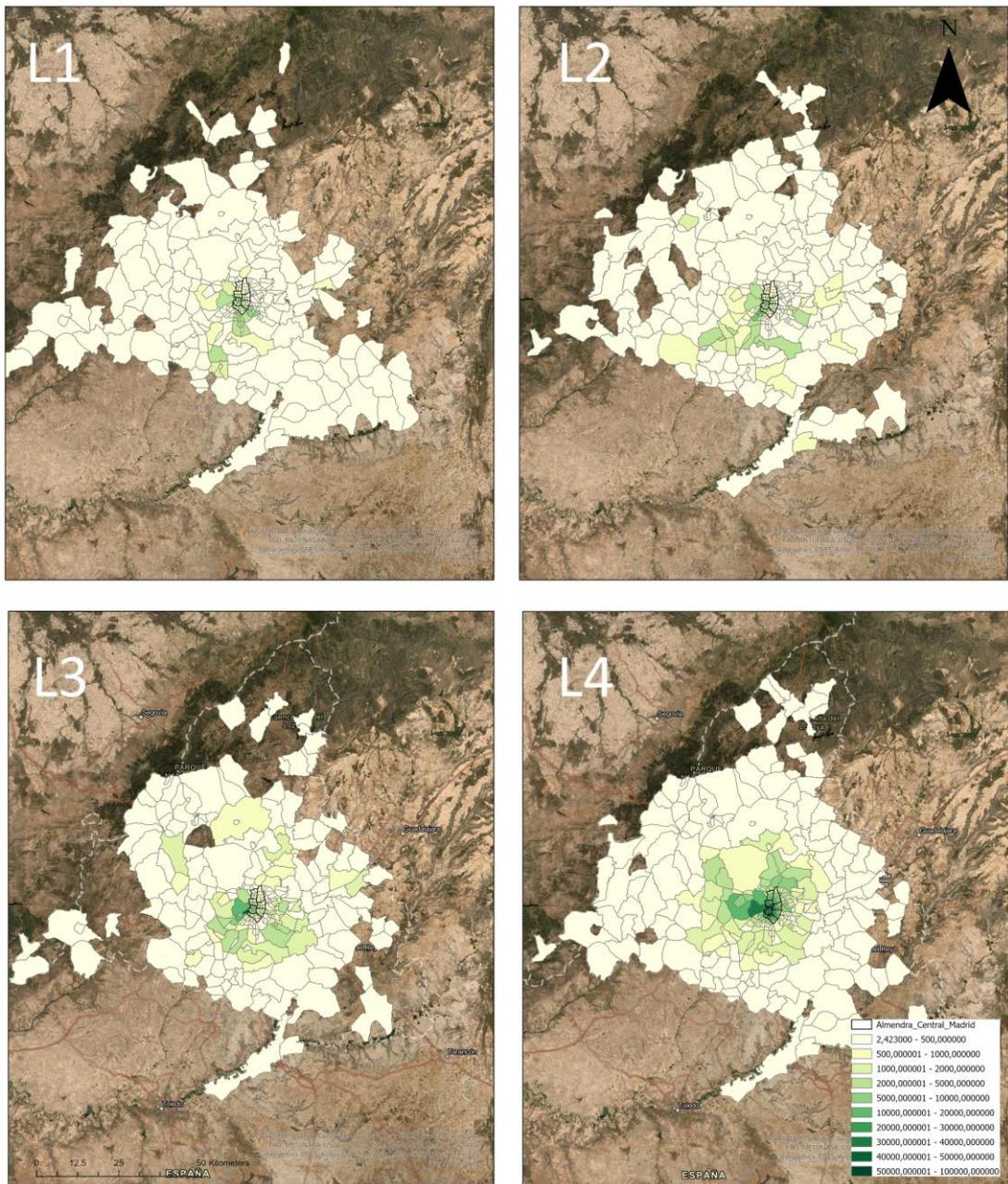


Figura 21. Cantidad de viajes hacia el Distrito Centro en función del nivel de renta. Elaboración a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

En un segundo análisis, se visualizó la movilidad hacia la almendra central por las franjas etarias disponibles (Figura 22). Si bien se puede detectar un mayor volumen de viajes para las franjas 25-45 y 45-65, los patrones en la distribución de viajes por cada origen son relativamente similares para todas las edades.

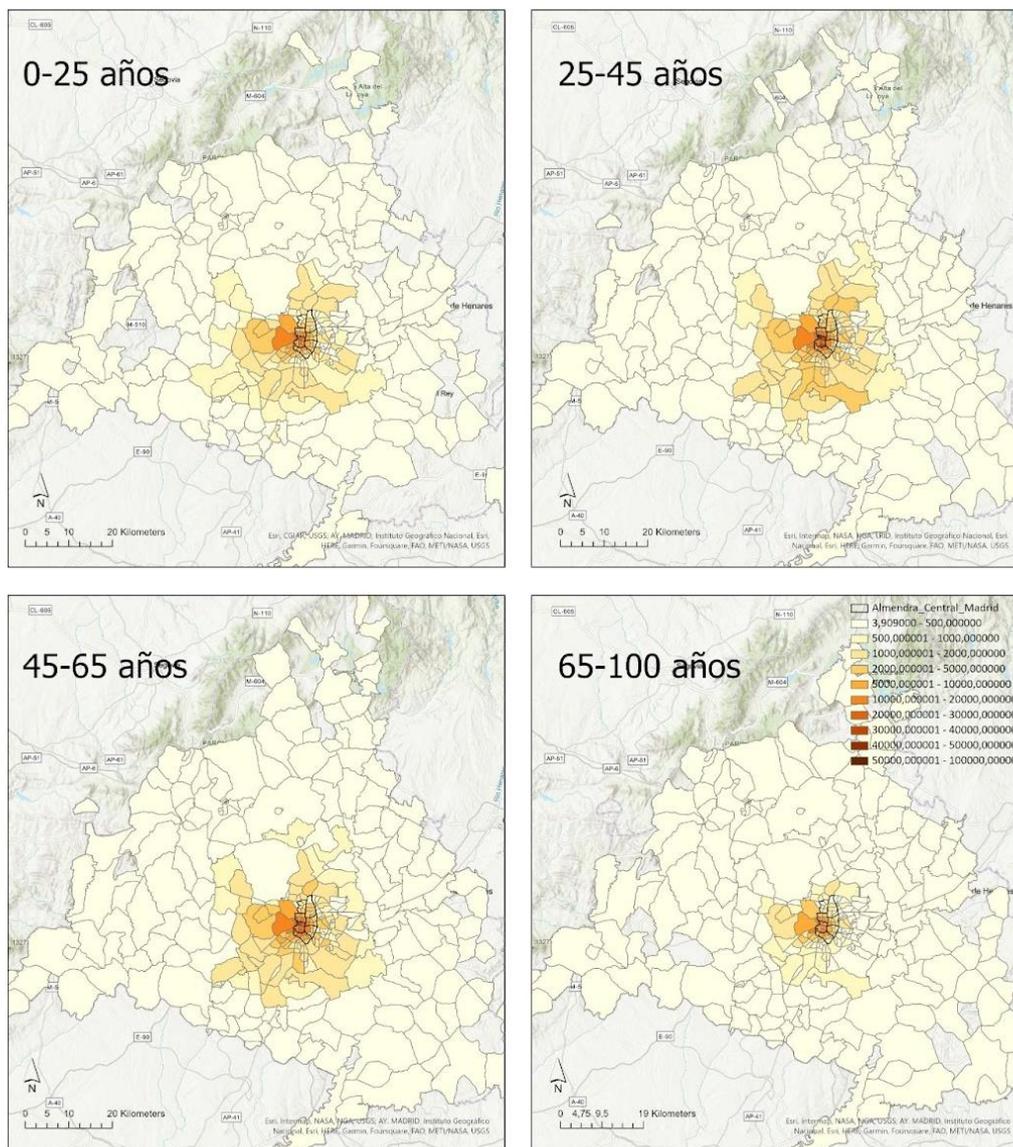


Figura 22. Volumen de viajes hacia Distrito Centro por franjas etarias. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Un tercer análisis identificó el volumen de viajes para ambos géneros (Figura XX). Se observaron patrones y tendencias en los volúmenes muy similares para mujeres y hombres.

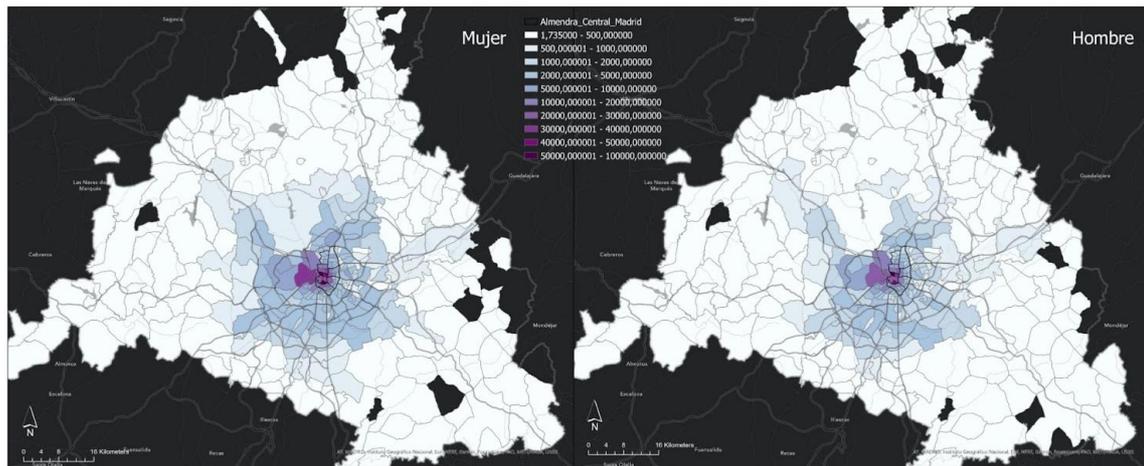


Figura 23. Volumen de viajes hacia Distrito Centro por género. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Escenario 2: viajes con destino a toda la almendra central

Para el caso de la distribución de la renta en viajes con destino a toda la almendra central, en contraposición a los viajes con destino único Distrito Centro, se observan viajes provenientes de todos los orígenes en estudio. En términos generales, se ve con gran claridad la diferencia en el volumen de viajes que tienen las zonas con menor y mayor nivel de renta. De manera similar a los viajes con destino únicamente el Distrito Centro, en la almendra central los niveles 1 y 2 tienen patrones similares a los viajes con destino el Distrito Centro con más viajes provenientes de la zona sur - y en parte la zona este - de la Comunidad de Madrid, mientras que para los niveles 3 y 4 los volúmenes de viajes están más distribuidos hacia el norte y oeste del territorio en estudio. En el rango de mayor poder adquisitivo hay una gran concentración de viajes con origen dentro del municipio de Madrid e intrazonales, es decir, que tienen destino y también origen en la almendra central. y se registran muy pocos viajes provenientes de la periferia.

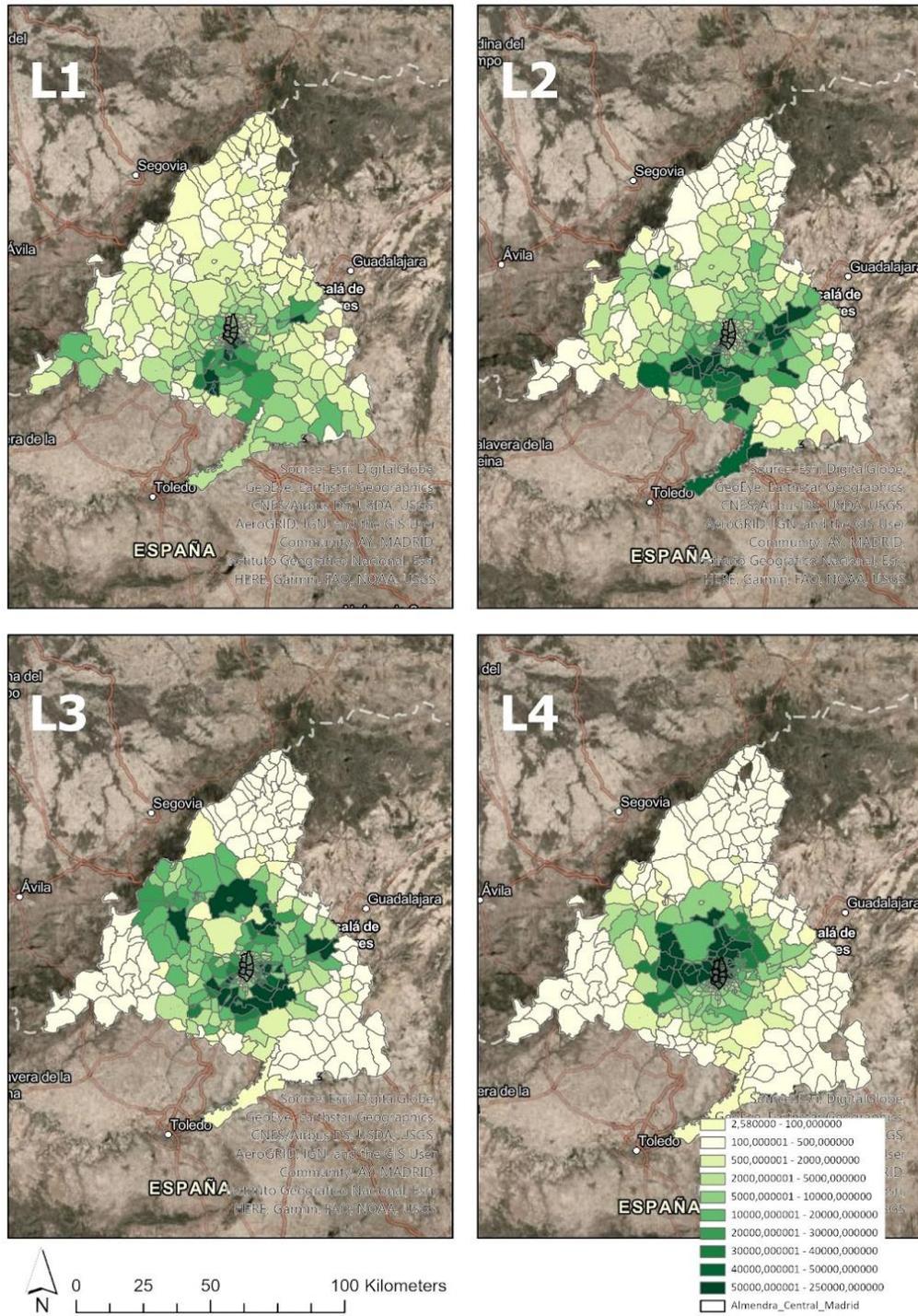


Figura 24. Viajes hacia la almendra central en función del nivel de renta. Elaboración a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Algunas de las zonas con mayor cantidad de viajes para nivel de renta más bajo (Nivel 1) son Fuenlabrada, San Cristóbal y Los Rosales (Villaverde), Valdebernardo (Vicálvaro), Torrejón de Velasco, Torrejón de Ardoz, Pradolongo (Usera), Palomeras Sureste, Portazgo y Casco Histórico de Vallecas (Puente de Vallecas). Todas las zonas se encuentran al sur y este del área de estudio. Los orígenes con mayor cantidad de viajes hacia la almendra central para el nivel de renta más alto (Nivel 4) fueron San Juan Bautista (Ciudad Lineal), Arapiles (Chamberí), Fuencarral El Pardo, Simancas (San Blas), Palos de Moguer (Arganzuela), Castilla (Chamartín), Quintana (Ciudad Lineal), Valdefuentes (Hortaleza), Majadahonda y Guindalera (Salamanca).

Para el análisis de franjas etarias, si se compara con los viajes con destino Distrito Centro se observa nuevamente un incremento importante en los volúmenes de viajes para todas las edades. Específicamente para las franjas más vulnerables (0-25 y 65-100 años), algunas zonas donde se detectaron altos volúmenes de viajes son Casco Histórico de Vallecas, Camarma de Esteruelas, Buena Vista (Carabanchel), Boadilla del Monte, Fuencarral El Pardo, Gaztambide (Chamberí), Pozuelo de Alarcón y Getafe.

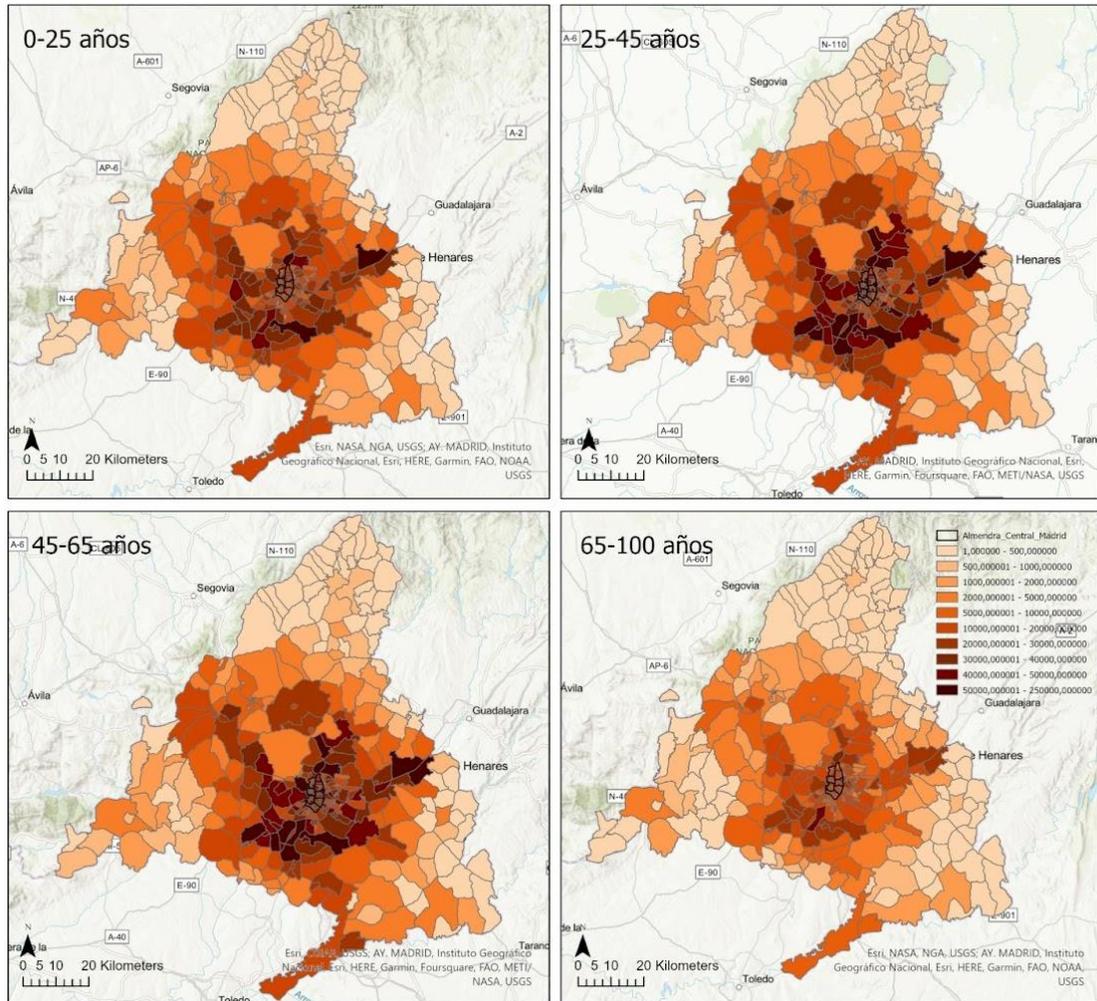


Figura 25. Volumen de viajes hacia la almendra central por franjas etarias. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Para el análisis de distribución de viajes distinguidos por género, se observa la misma distribución que para los viajes con destino el Distrito Centro, aunque con volúmenes más elevados.

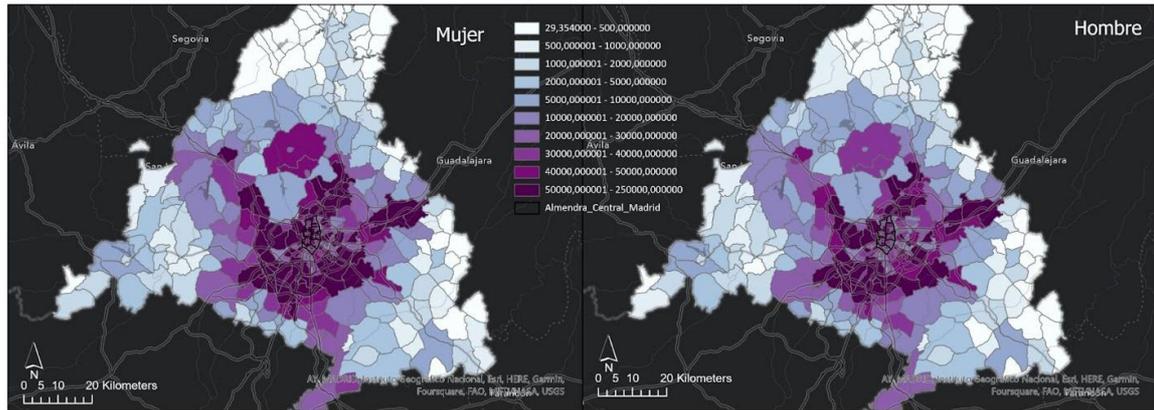


Figura 26. Mapa de calor de volumen de viajes hacia la almendra central, por género. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Correlaciones entre variables sociodemográficas

Observando cómo las distintas variables sociodemográficas afectaban los volúmenes de movilidad hacia cada escenario de ZBE, se definió estudiar la relación cuantitativa de a dos variables a la vez, con la simbología de Colores Bivariantes²⁹. Los valores de las variables utilizados para estos análisis fueron aquellos definidos en la Sección 4.4 como indicativos de vulnerabilidad:

- Movilidad de género femenino
- Movilidad para nivel 1 de renta (más bajo)
- Movilidad para las franjas de 0-25 y 65-100 años

Por ejemplo, el primer análisis consistió en relacionar aquellos viajes realizados por mujeres y aquellos viajes realizados por las edades definidas como más vulnerables, para ilustrar en qué zonas se daban los volúmenes más altos de viajes con ambas características. La Figura 27 representa el escenario de viajes hacia el Distrito Centro, mientras que en la Figura 28 se amplían los viajes estudiados a todos aquellos con destino cualquier zona de la almendra central. El color morado indica las zonas *High-High*, es decir, que tienen valores altos de ambas variables. Resulta interesante visualizar que, a excepción de algunas zonas “outliers” para el Escenario 2 como Soto del Real y Pedrezuela en el norte, las zonas *High-High* suelen estar concentradas y geográficamente agrupadas. Aunque sin un patrón suficientemente claro, esto se observa un poco más para la región sur en ambos escenarios, y también la región este para el Escenario 2. Al comparar las correlaciones de ambos escenarios, para el escenario más ambicioso aumenta significativamente las zonas *High-High* hacia el este del área de estudio, particularmente hacia el norte.

²⁹ Más información en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/bivariate-colors.htm>

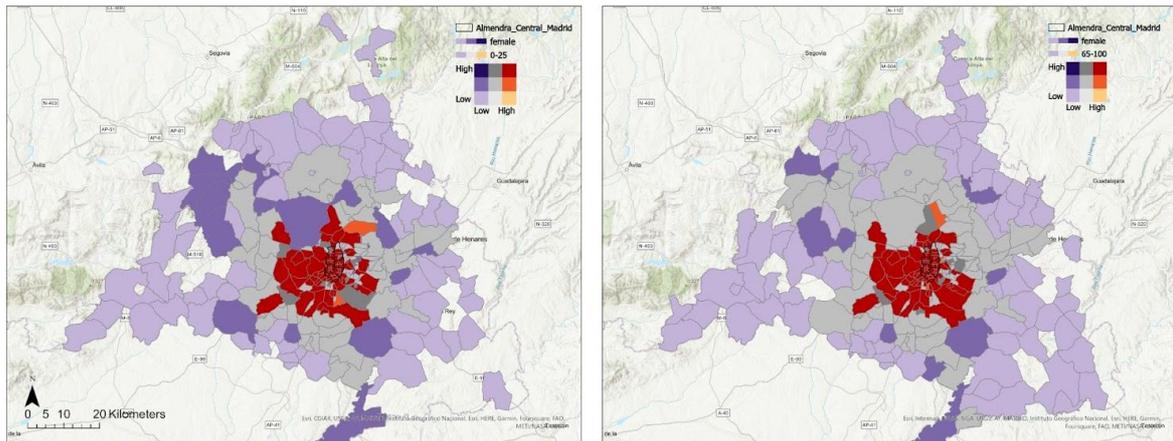


Figura 27. Variación de volumen de viajes hacia el Distrito Centro realizados por mujeres, en relación al volumen de viajes para aquellas edades más vulnerables. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

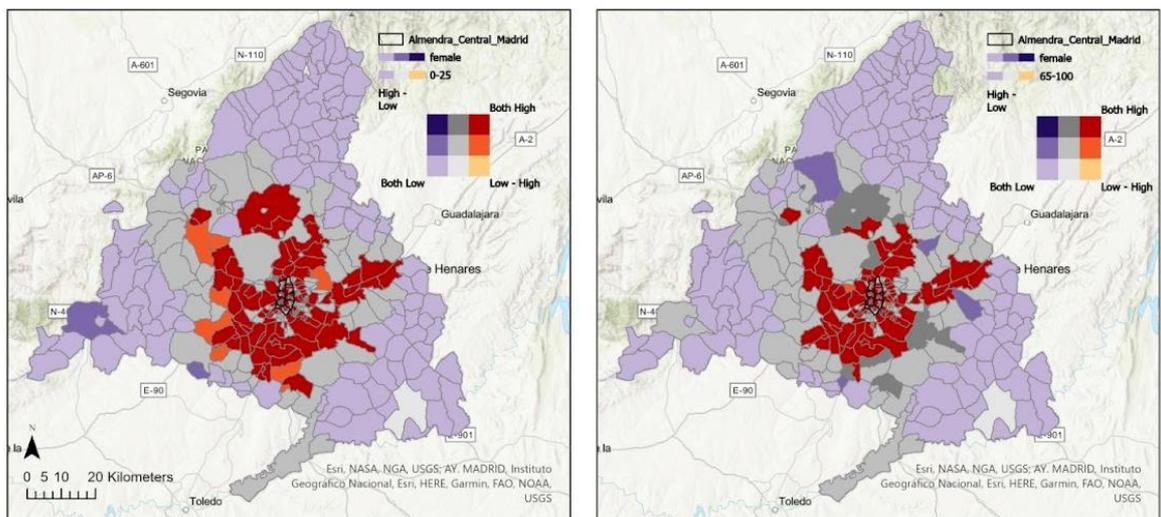


Figura 28. Variación de volumen de viajes hacia la almendra central realizados por mujeres, en relación al volumen de viajes para aquellas edades más vulnerables. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Seguidamente, se estudió la relación entre los volúmenes de viajes realizados por mujeres y con el nivel de renta más bajo (Nivel 1), a la izquierda para el escenario 1 de viajes al Distrito Centro, y a la derecha para el escenario 2 de viajes hacia la almendra central. Estos escenarios presentan patrones de viajes de mujeres con renta baja muy diferentes: mientras que en el escenario del Distrito Centro hay más orígenes con patrones *High-High* en las zonas del Municipio de Madrid, más céntricas, para el escenario de toda la almendra central estos patrones se extienden hacia el sur y este de Madrid. Esto es, a medida que se piensa un escenario más ambicioso de ZBE, más población vulnerable – según estos dos indicadores analizados – en el sur y este del área de estudio se está movilizando. Además, si se contabilizan los viajes únicamente al Distrito Centro, no hay una zona muy concentrada de *Low-Low* (es decir, de baja vulnerabilidad), mientras que cuando se pasa a un estudio de mayor cantidad de zonas como destino de viajes, hay una concentración de vulnerabilidad *Low-Low* muy notoria en el norte del área de estudio.

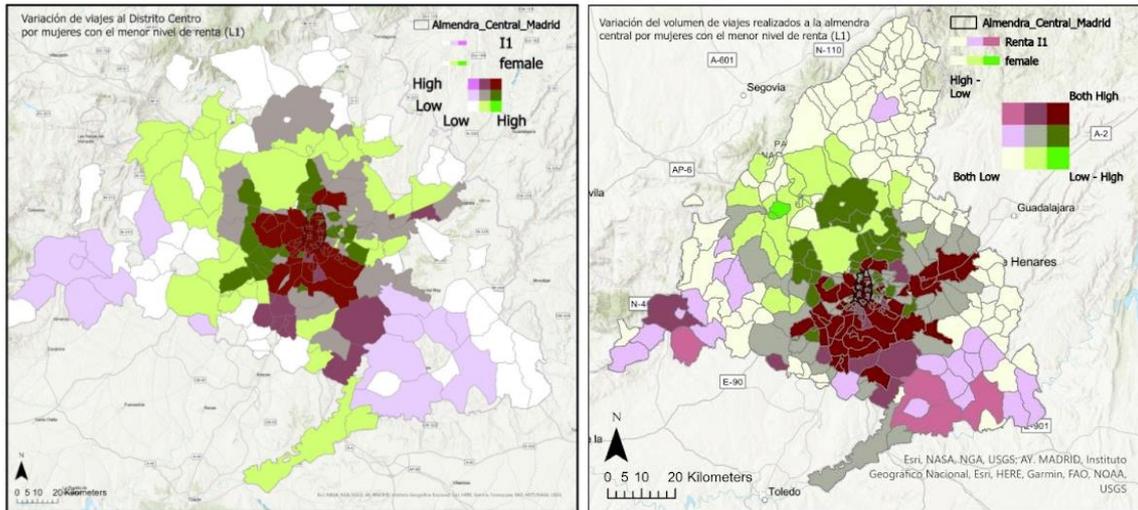


Figura 29. Mapas de correlaciones entre volúmenes de viajes por mujeres y nivel de renta más vulnerable hacia Distrito Centro y la almendra central. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Dado que previamente no se había detectado gran diferencia en los patrones de movilidad entre hombres y mujeres, el análisis que se considera de mayor interés para localizar geográficamente aquellas zonas más vulnerables es el análisis cruzado de los viajes para las edades más vulnerables y los niveles de renta más bajos. En las Figura 30 y Figura 31 se observa la movilidad hacia cada uno de los escenarios definidos, para viajeros de 0-25 años (izquierda) y 0-65 años (derecha), con el menor nivel de renta (Nivel 1). Para comenzar, en los primeros mapas representando el Escenario 1, se registran varias zonas sin viajes con las características en análisis, por lo que para algunas zonas no hay información. Para este escenario, los patrones de vulnerabilidad *High-High* y *Low-Low* para ambas franjas etarias son bastante similares, teniendo más viajeras vulnerables en la zona del municipio de Madrid, y menor vulnerabilidad en zonas distribuidas por todas las orientaciones de la periferia. De manera diferente, para el Escenario 2, hay un patrón más claro de zonas del sur y del este donde residen viajeros con mayor vulnerabilidad que se desplazan hacia la almendra central. Nuevamente, para este escenario, las distribuciones de cada franja etaria son similares entre sí.

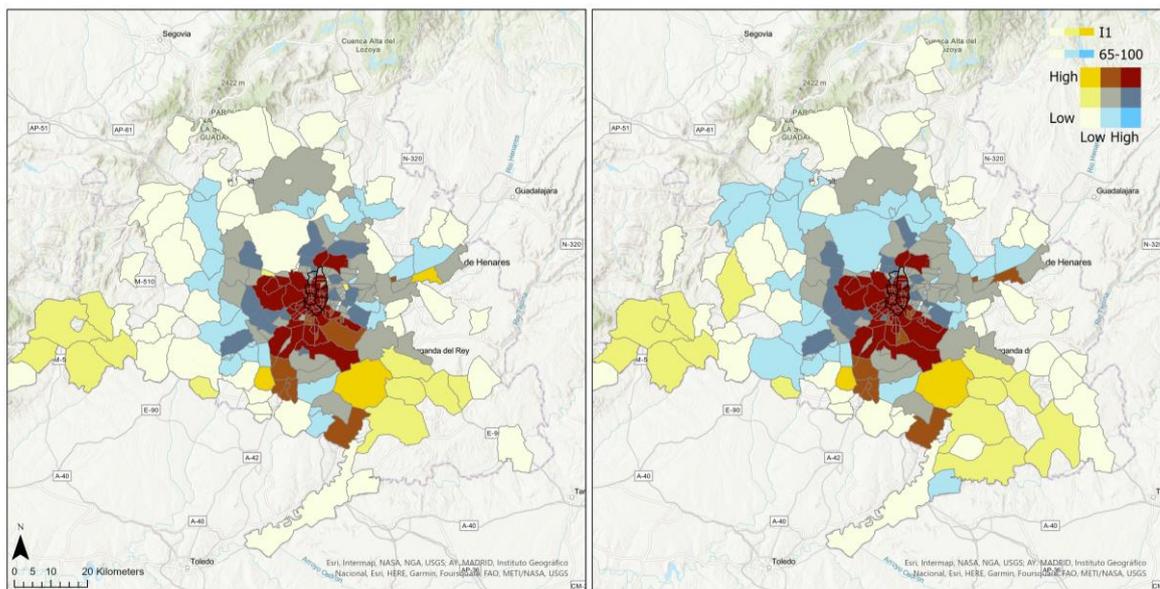


Figura 30. Mapa de correlaciones entre volúmenes de viajes por renta y edades más vulnerables hacia Distrito Centro. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

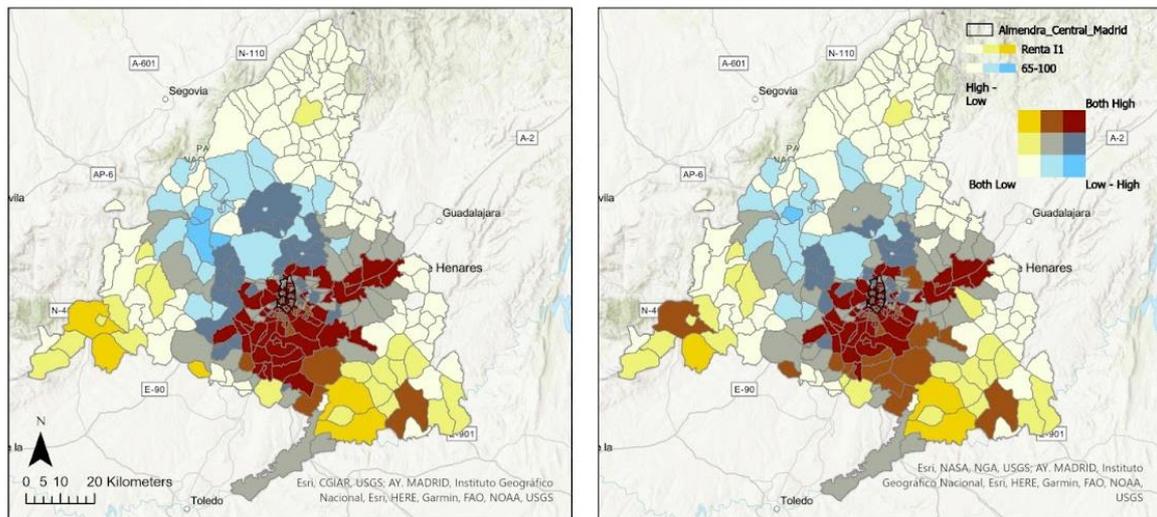


Figura 31. Mapa de correlaciones entre volúmenes de viajes por renta y edades más vulnerables hacia la almendra central. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

5.2.1. Movilidad diferenciada por propósito de viaje

A partir de los resultados observados en los análisis de movilidad general para cada escenario, se analizaron los viajes diferenciados por propósito para valores indicativos de vulnerabilidad de las variables sociodemográficas disponibles, específicamente para aquellos que habían presentado algún patrón relevante que impactara en el volumen de viaje. Esto es, se analizaron los siguientes escenarios:

- Nivel de renta 1 (más bajo)
- Nivel de renta 1 en relación a los viajes de mujeres
- Nivel de renta 1 en relación a los viajes de personas entre 0 y 25 años
- Nivel de renta 1 en relación a los viajes de personas entre 65 y 100 años
- Viajes de mujeres entre 0 y 25 años
- Viajes de mujeres entre 65 y 100 años

Para los viajes con nivel de renta 1 diferenciados por propósito, puede observarse en la Figura 32 aquellos con destino el escenario de ZBEDEP Distrito Centro, y en la Figura 32 aquellos con destino al escenario de ZBE de la almendra central. En el primer caso, las tendencias de movilidad son similares, con una mayor cantidad de viajes intrazonales, con origen dentro de la almendra central, y también provenientes de zonas del sur del Municipio de Madrid, como Arganzuela, Puente de Vallecas, Getafe y Usera. Una diferencia que se observa es que, para el propósito distinto al trabajo, hay viajes de personas con baja renta que provienen de algunas zonas al oeste y norte de la almendra central, como Valverde (Fuencarral El Pardo), Ciudad Universitaria y Casa de Campo (Moncloa Aravaca), Pozuelo de Alarcón y Puerta del Ángel (Latina).

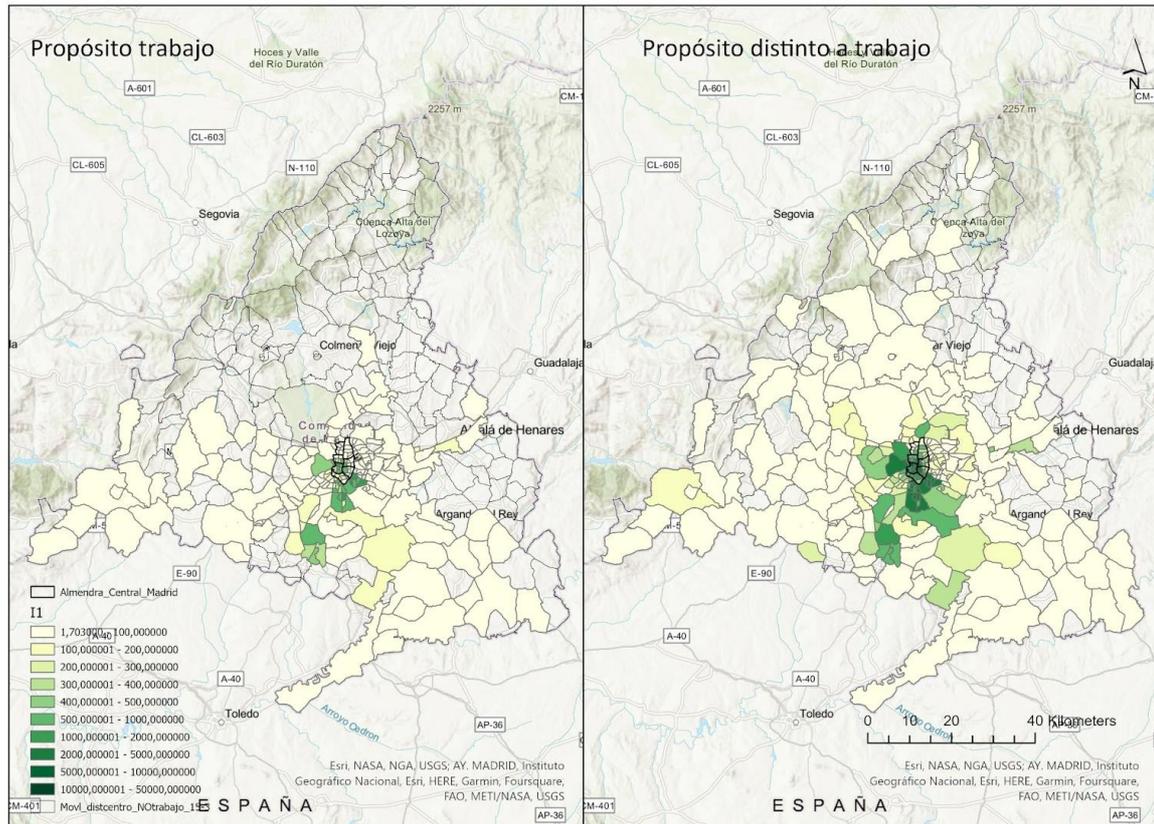


Figura 32. Volumen de viajes de nivel 1 de renta y diferenciados por propósito, con destino el Distrito Centro de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

Al expandir la ZBE y estudiar los viajes con destino a toda la almendra central, las variaciones en los orígenes de los viajes con baja renta presentan características muy diferentes al diferenciarlos por propósito. Para los viajes con propósito trabajo, se detectan patrones relativamente similares a los de la ZBEDEP Distrito Centro, de viajes principalmente provenientes de las zonas sur y este de la Comunidad Autónoma. En cambio, para el caso de los viajes con propósito distinto al trabajo no hay un área determinada que contenga más viajes con este perfil sociodemográfico, sino que está bastante esparcido por todo el territorio, exceptuando el norte. Alcalá de Henares, Casco Histórico de Villaverde Alto, Fuenlabrada, Parla y la mayoría de los barrios de Puente de Vallecas son las zonas con más viajes, todas en el sur a excepción de Alcalá de Henares.

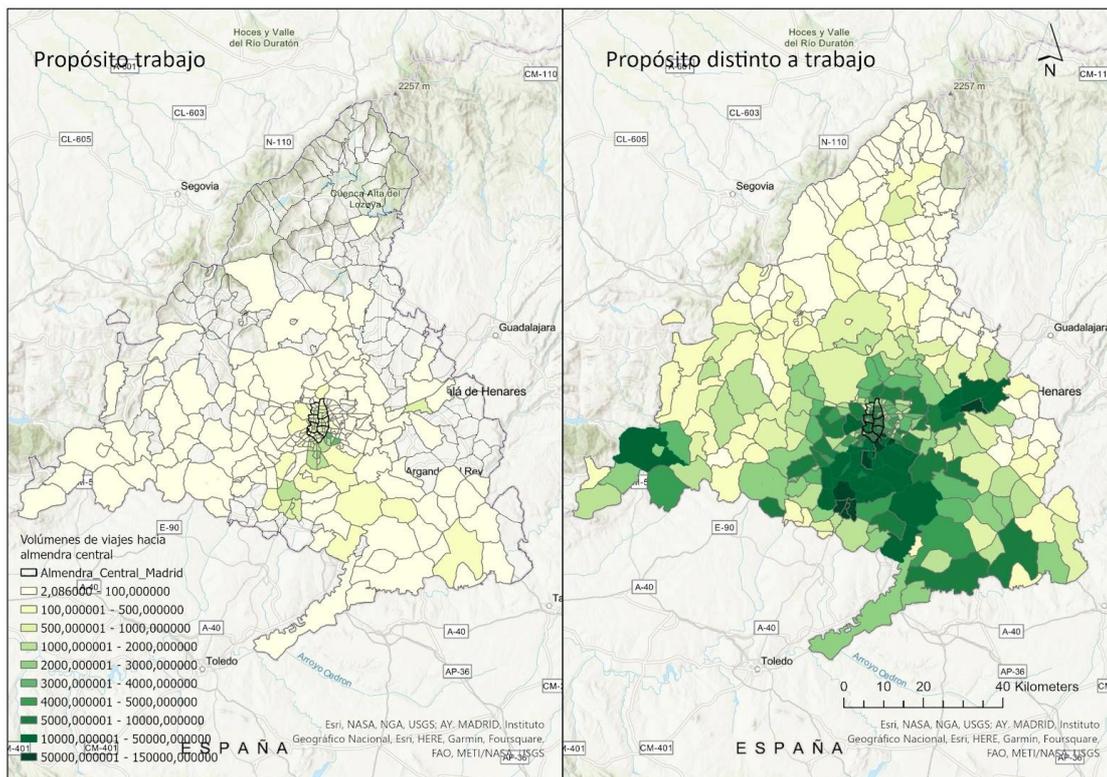


Figura 33. Volumen de viajes de nivel 1 de renta y diferenciados por propósito, con destino la almendra central de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD.

El siguiente análisis consistió en detectar aquellas zonas para las cuáles se originaron altos niveles de viajes de mujeres con nivel de renta bajo, en este primer caso con destino hacia el Distrito Centro. Como puede observarse en el caso de los viajes con propósito trabajo, la cantidad de zonas de la Comunidad de Madrid para las cuáles se registran viajes con estas características combinadas es muy baja, y se concentra principalmente en la zona sur de la almendra central, y algunos pocos distritos en el sur cómo Getafe, Leganés, y varios barrios de Villaverde Alto y Puente de Vallecas. Esto se amplía para el caso de viajes con propósito distinto a trabajo, sumando algunos orígenes que registran volúmenes altos de viajes como Leganés, Pozuelo de Alarcón, Casa de Campo, Ciudad Universitaria y Aravaca (Moncloa-Aravaca), Valverde (Fuencarral El Pardo) y Valdefuentes (Hortaleza).

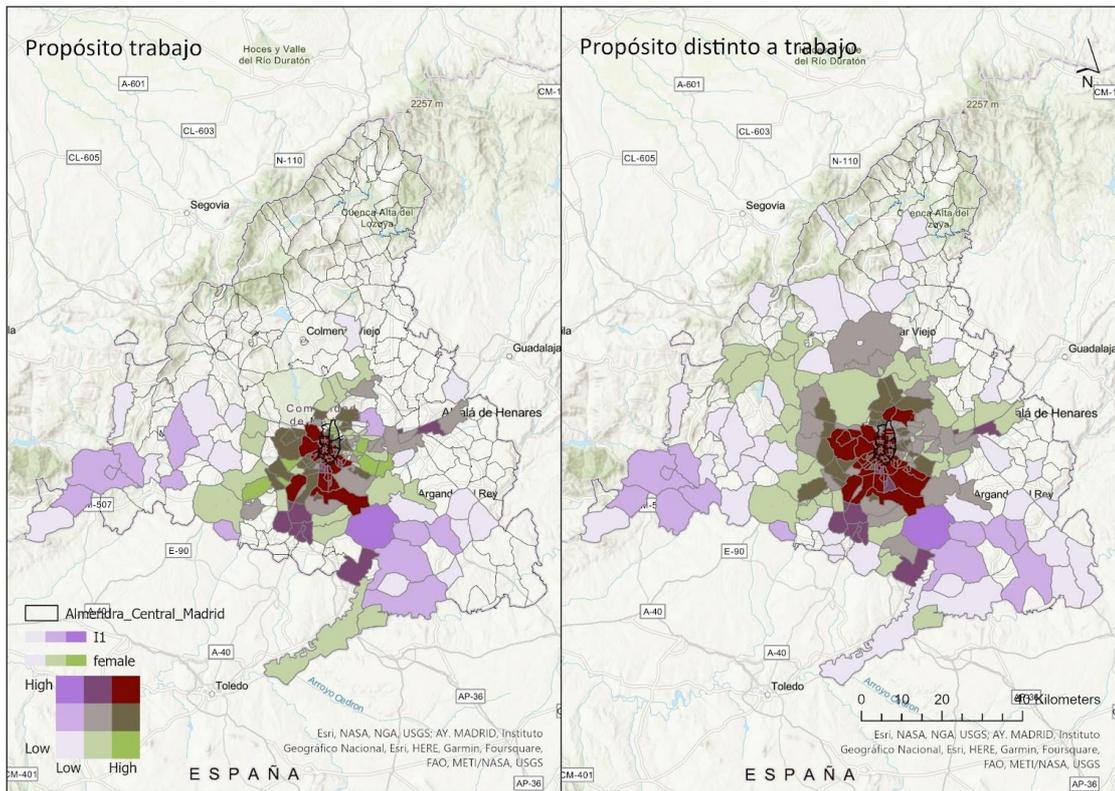


Figura 34. Volumen de viajes por mujeres con nivel 1 de renta y diferenciados por propósito, con destino el Distrito Centro de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

Para el caso de la movilidad con destino toda la almendra central de Madrid, se observan patrones mucho más diferenciados entre propósitos que para los casos de viajes con destino Distrito Centro. Similar al último análisis, se detectan para el propósito trabajo viajes con origen especialmente en la zona sur. En cambio, para la movilidad no obligada, se expandió la zona que registra importantes volúmenes de viajes principalmente hacia el este, como es el caso para las zonas de San Fernando de Henares, Coslada, Torrejón de Ardoz y Alcalá de Henares. En ambos casos, el norte es indicativo de registrar niveles nulos (Escenario 1) o muy bajos (Escenario 2) de viajes provenientes del norte con estas características.

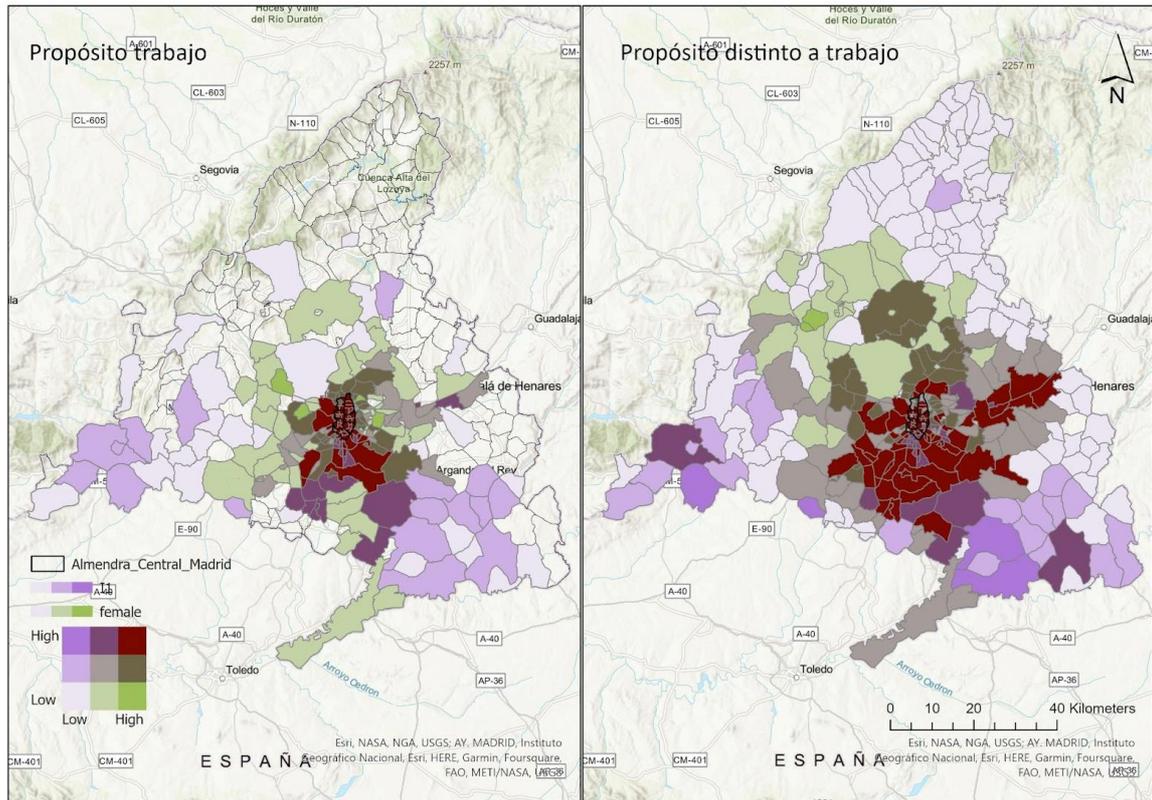


Figura 35. Volumen de viajes por mujeres con nivel 1 de renta y diferenciados por propósito, con destino la almendra central de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

Seguidamente, se analizaron los viajes de personas de edades vulnerables y con bajo nivel de renta. Primero, se analizó para aquellos viajeros de entre 0 y 25 años. Para el propósito trabajo, los orígenes de viajes con estas características se concentran en la zona sur y oeste del Municipio de Madrid, a excepción de Parla, la única zona que registra valores *High-High* por fuera del término municipal. Para los otros propósitos, también se detectan viajes con orígenes dentro del municipio, a excepción de algunas zonas periféricas en el sur y oeste del mismo.

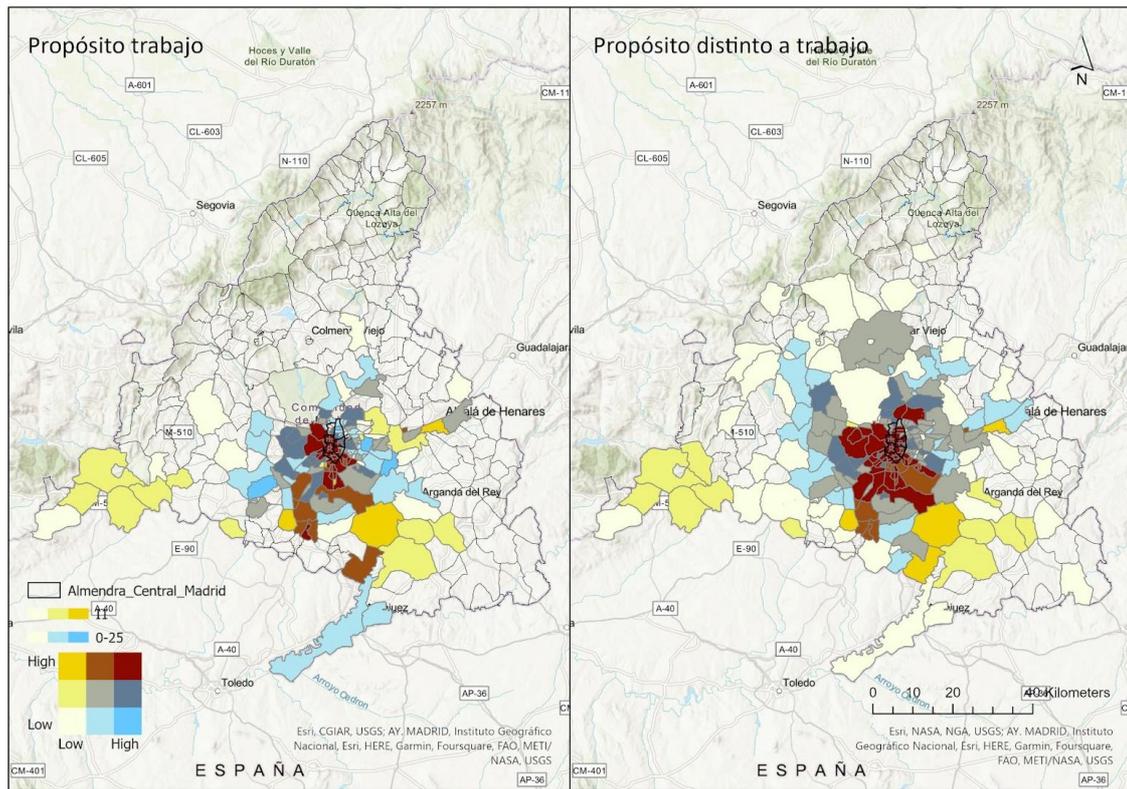


Figura 36. Volumen de viajes de personas entre 0 y 25 años con nivel 1 de renta y diferenciados por propósito, con destino el Distrito Centro de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

Para el caso de los viajes con las mismas características pero con destino cualquier parte de la almendra central, se observa una situación similar a la del otro escenario de ZBE, añadiendo valores *High-High* para Fuenlabrada y Getafe, mientras que para otros propósitos los escenarios de ZBE 1 y 2 presentan resultados muy distintos, ya que en el segundo escenario los orígenes con viajeros de estas características de vulnerabilidad se expanden significativamente hacia zonas en el sur y este del área de estudio. Nuevamente no se detectan viajes provenientes de las zonas más al norte y oeste de la Comunidad Autónoma.

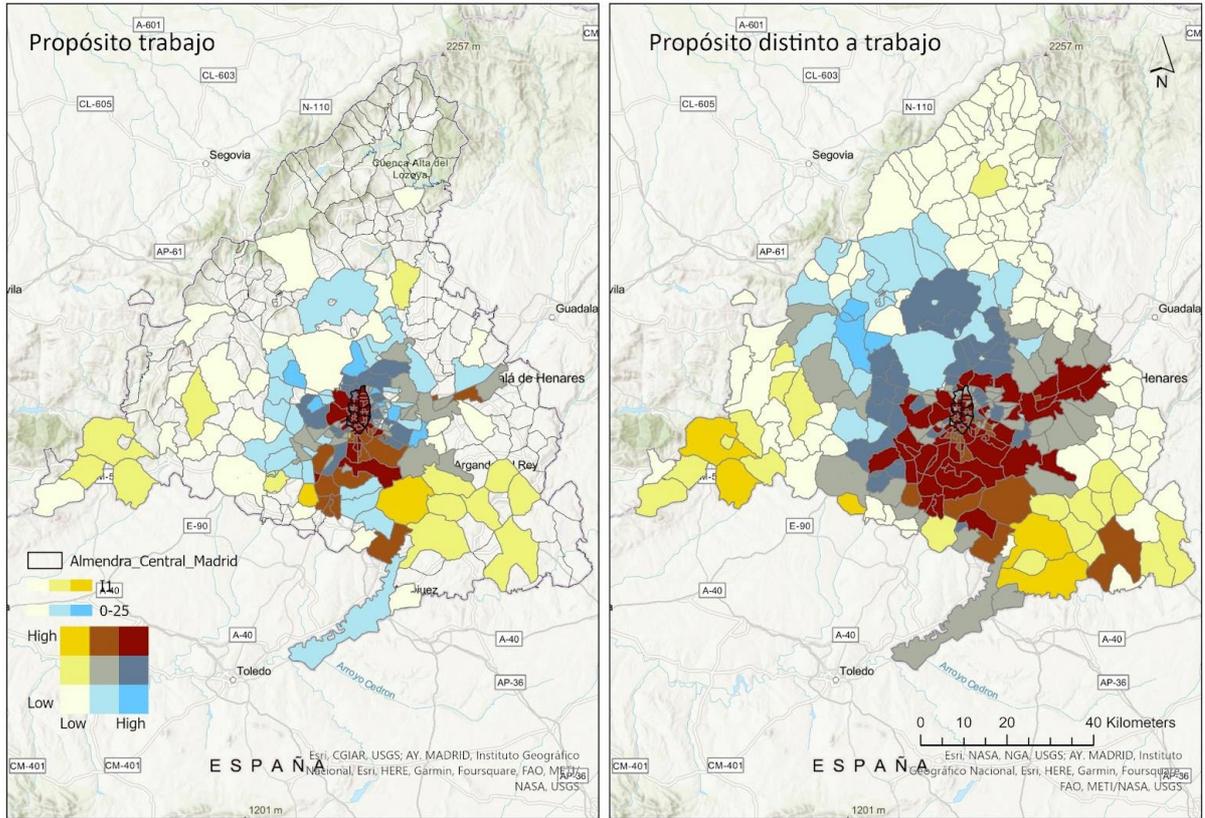
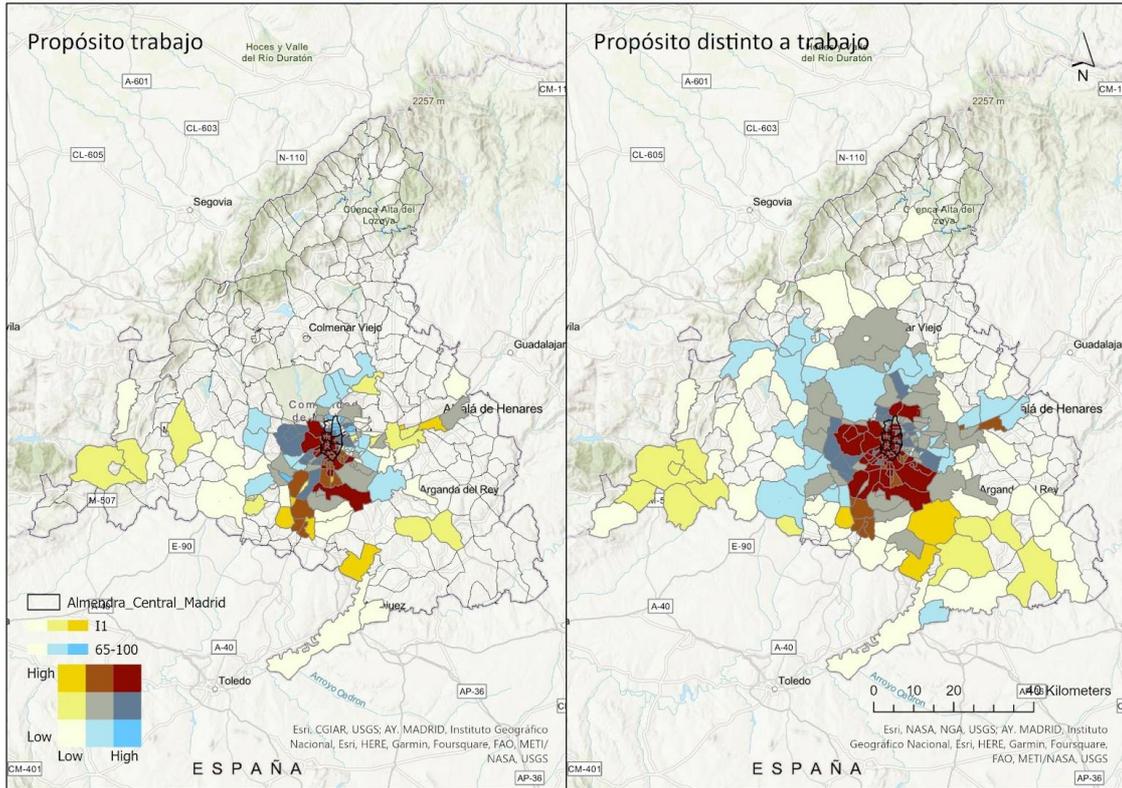


Figura 37. Mapa de volumen de viajes de personas entre 0 y 25 años con nivel 1 de renta y diferenciados por propósito, con destino la almendra central de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la Matriz OD

A continuación, se volvieron a analizar viajes de personas con edad vulnerable y baja renta, esta vez para aquellos de entre 65 y 100 años. Para ambos escenarios de viajes con destinos el Distrito Centro y la almendra central, y para ambas segmentaciones de propósitos de viaje, los patrones son muy similares a los detectados para viajeros de entre 0 y 25 años.

Almendra Central



Distrito Centro

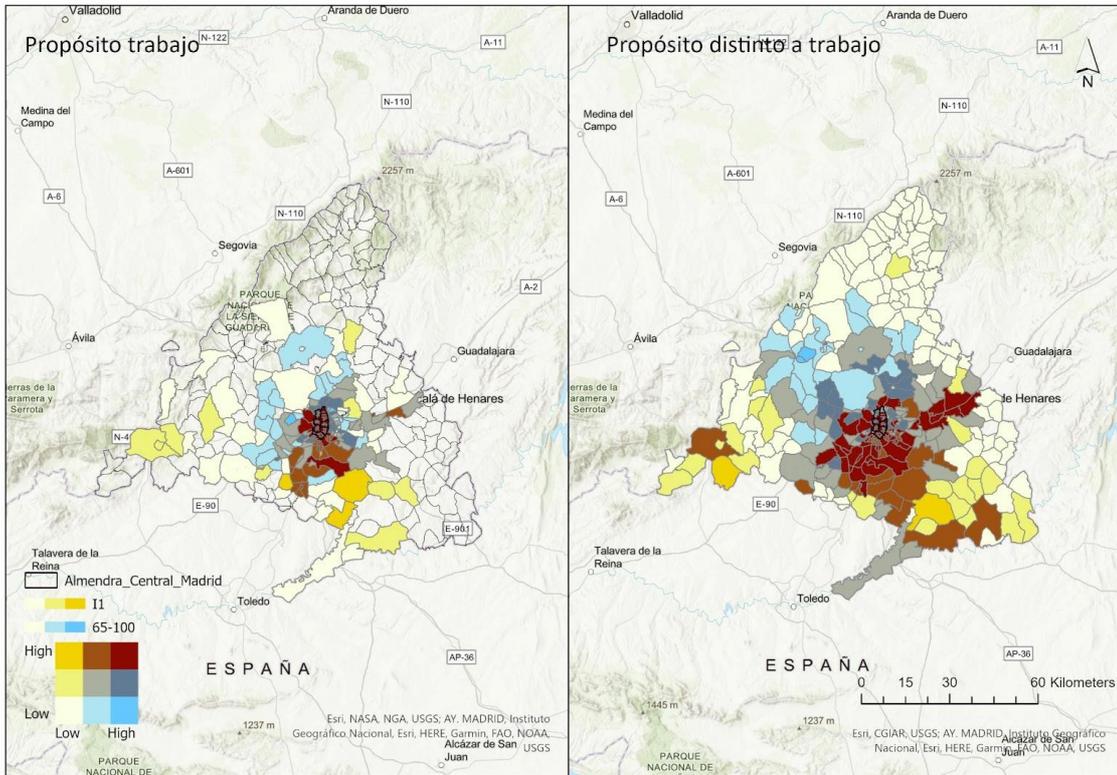


Figura 38. Volúmenes de viajes de personas entre 65 y 100 años con nivel 1 de renta y diferenciados por propósito, para cada escenario de ZBE. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

Seguidamente, se estudiaron los viajes realizados por mujeres de los dos rangos de edades más vulnerables. En el caso de los viajes con propósito trabajo de mujeres para el primer rango de 0 a 25 años, se registran

viajes de varias zonas dentro del término municipal, así como varios otros provenientes de algunas zonas al oeste de este, como por ejemplo El Pardo, Boadilla del Monte, Alcorcón y El Plantío (Moncloa-Aravaca). Para otros propósitos de viajes, se siguen detectando viajes de muchos orígenes por el oeste, así como viajes desde distintas zonas del sur (Getafe, Fuenlabrada, Alcorcón) y norte (Alcobendas).

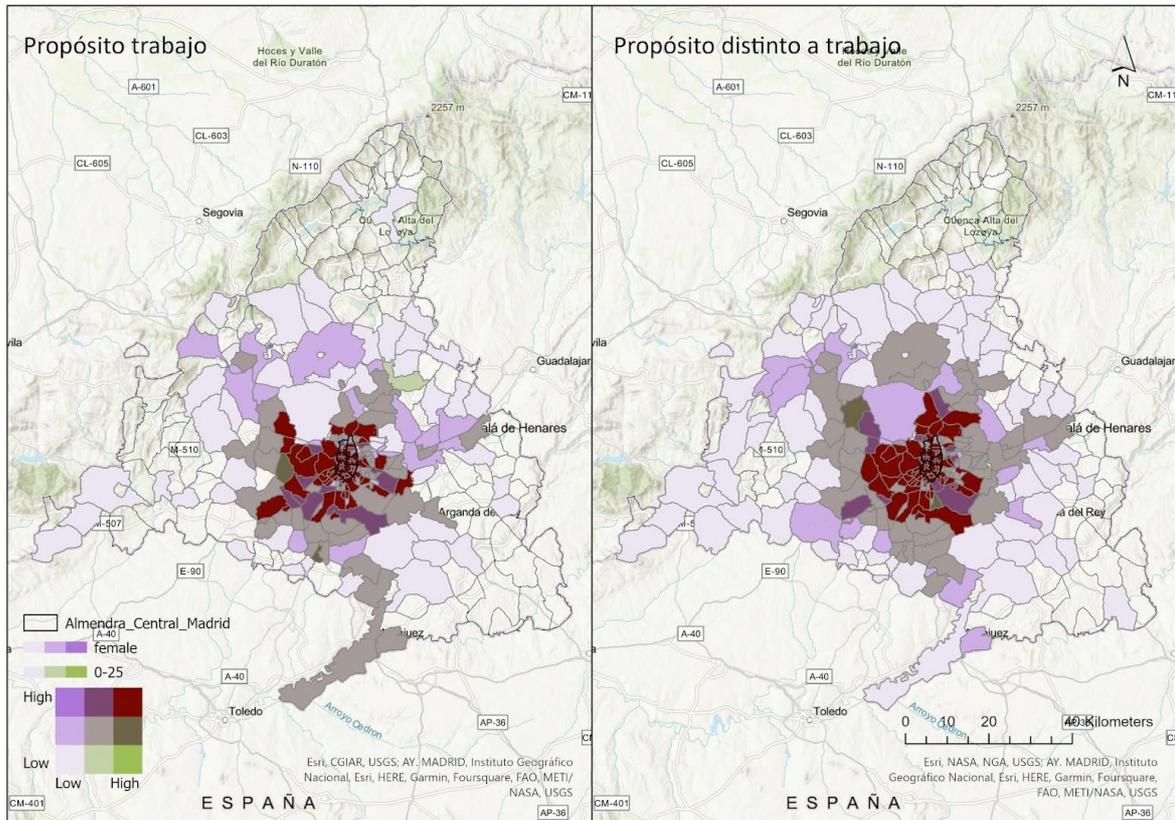


Figura 39. Volumen de viajes por mujeres de entre 0 y 25 años diferenciados por propósito, con destino el Distrito Centro de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

En el caso de los viajes con destino la almendra central, resulta llamativo que para viajes de trabajo la cantidad de orígenes con valores *High-High* es menor a la registrada en el escenario de viajes con destino el Distrito Centro. En este segundo escenario, hay menos ‘dispersión’ de estos viajes, se encuentran más contraídos hacia el centro. Distinto es el caso de viajes con propósitos distintos al trabajo, donde se observa una zona significativamente más amplia y desagrupada de viajes con valores *High-High*. Algunos de los orígenes más alejados a la almendra que contienen viajes de estas características son Valdemoro, Arganda del Rey y Collado Villalba.

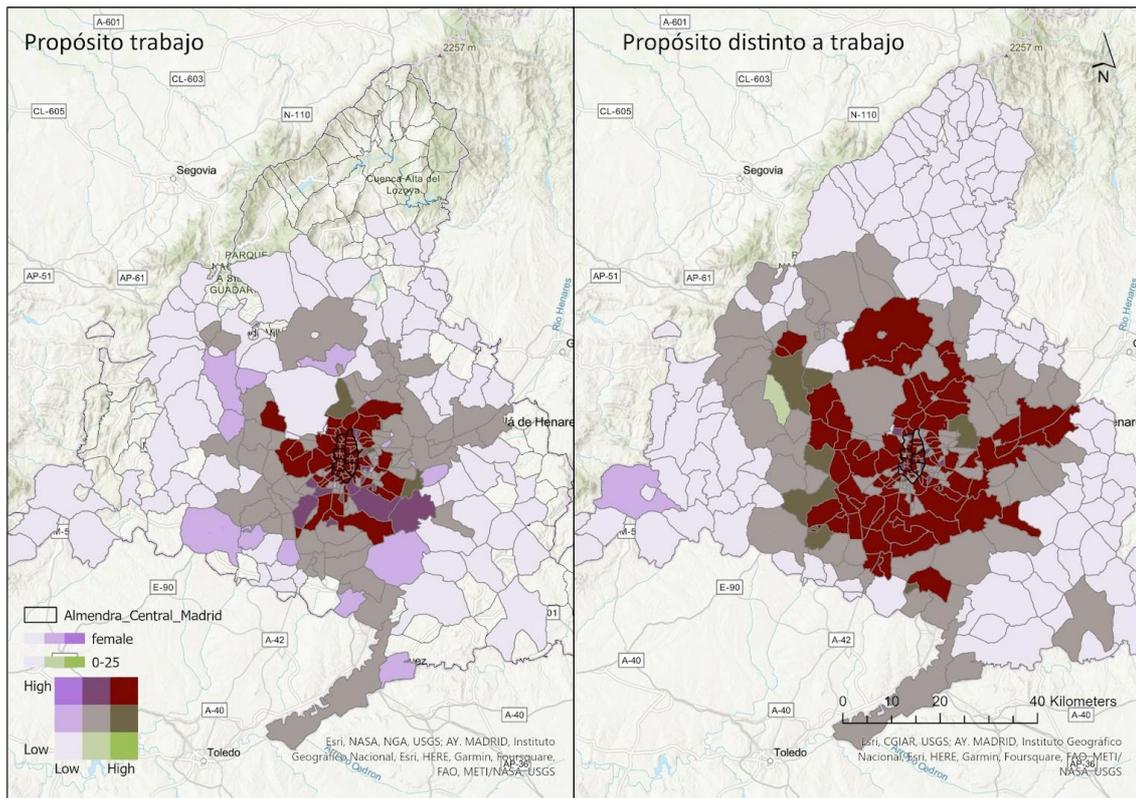


Figura 40. Volumen de viajes por mujeres de entre 0 y 25 años diferenciados por propósito, con destino la almendra central de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

Por último, se estudiaron los viajes realizados por mujeres por el segundo rango de edad vulnerable: 65 a 100 años. Para ambos escenarios diferenciados por propósito, se registran elevadas cantidades de viajes con ambas características de vulnerabilidad provenientes del oeste, sur, intrazonales y otros distritos de la almendra central. En el caso de la movilidad con propósito distinto al trabajo, estos patrones se extienden principalmente hacia el sureste y, en parte, hacia el norte del municipio de Madrid.

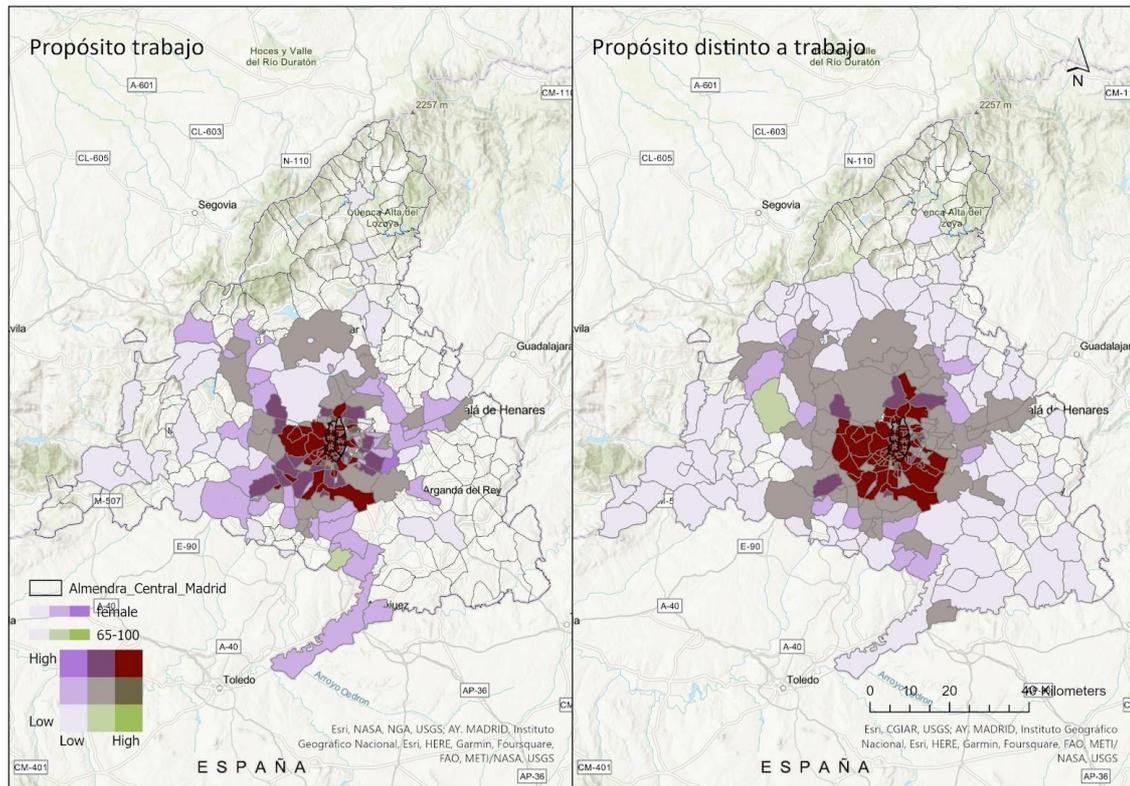


Figura 41. Volumen de viajes por mujeres de entre 65 y 100 años diferenciados por propósito, con destino el Distrito Centro de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

Para el caso de la movilidad hacia cualquier destino dentro de la almendra central, al igual que la movilidad de mujeres con el primer rango de edad vulnerable, se observa una gran variación entre los viajes diferenciados por propósito. Para la movilidad obligada, los viajes son principalmente intrazonales y de algunas zonas periféricas a la almendra central en el norte, oeste y sur. Para la movilidad con propósito distinto al trabajo, se extienden los orígenes con niveles altos de viajes hacia todas las direcciones, aunque principalmente dentro del municipio. Al igual que para los viajes con destino el Distrito Centro, se registran pocos o nulos viajes provenientes del norte de la Comunidad de Madrid con estas características.

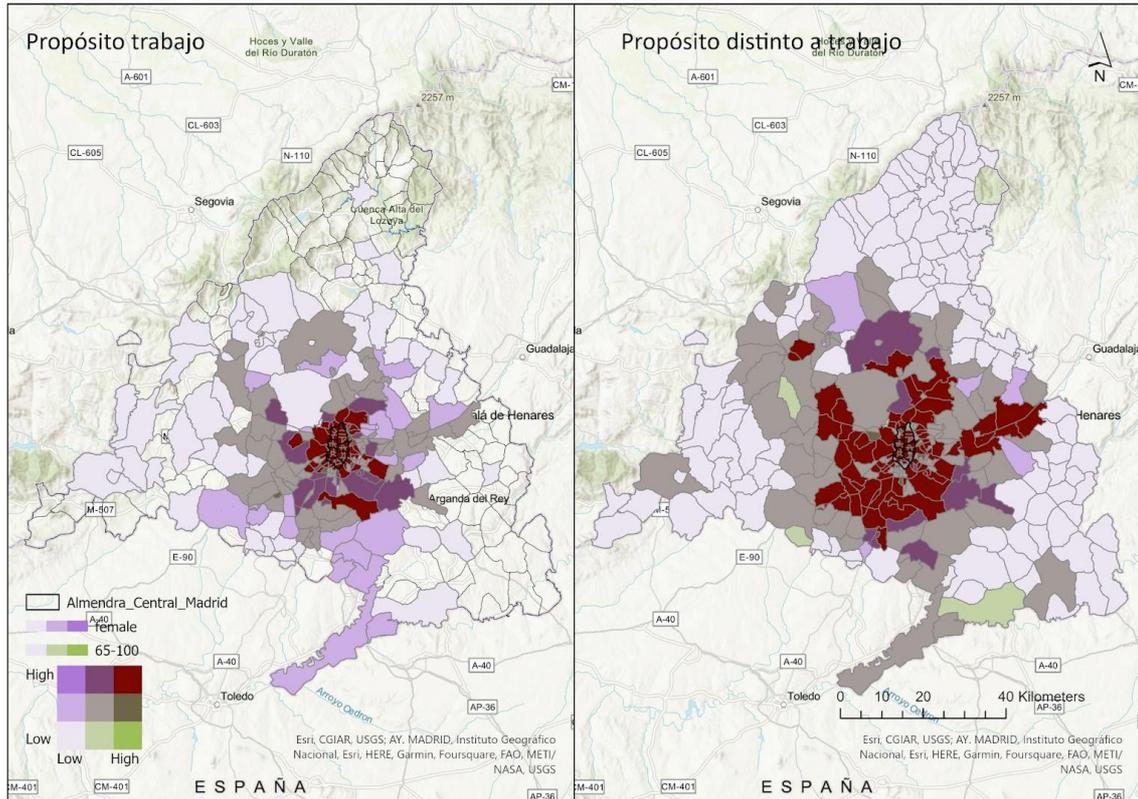


Figura 42. Volumen de viajes por mujeres de entre 65 y 100 años diferenciados por propósito, con destino el Distrito Centro de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

En conclusión, se puede observar que, para cada combinación de variables sociodemográficas, los resultados de las zonas con mayores viajes hacia cada escenario de ZBE varían de manera significativa. También se observó que no todas las variables al cambiar de valor - por ejemplo, de hombre a mujer o cambiar el rango etario - tienen un impacto relevante en los volúmenes de viajes, en especial por sí solas. Los análisis más relevantes afín a la presente investigación han sido los exclusivos de valores indicativos de vulnerabilidad de las variables disponibles. Al combinarlas y sacar zonas con valores *High-High*, se comienzan a ver patrones más interesantes. Por ejemplo, para absolutamente todas las combinaciones de vulnerabilidad disponibles a partir de los datos de la matriz OD, el norte de la Comunidad Autónoma de Madrid jamás ha registrado volúmenes relevantes de viajes de personas vulnerables hacia el Distrito Centro o almendra central. Lo mismo ocurre con el oeste de la Comunidad, en general no se detectan viajes de personas vulnerables, a excepción de alguna zona "outlier" cuando se analiza individualmente bajo nivel de renta para propósito distinto a trabajo y el escenario más ambicioso de ZBE. Esto puede explicarse no solamente por la inexistencia de población vulnerable en estas regiones, sino también por un tema de distancias significativas con respecto a la ciudad madrileña. A la inversa, otro patrón recurrente - aunque no generalizable a toda el área - es el volumen de viajes que provienen de zonas dentro de la almendra central. En todos los escenarios, la cantidad de viajes intrazonales es elevada para todo tipo de propósito, aunque esto no sea exclusivamente para viajeros vulnerables, sino que para todo perfil sociodemográfico. En cuanto a cada escenario en particular, para la movilidad hacia el Distrito Centro se observan viajes provenientes principalmente de zonas dentro del Municipio de Madrid, y para la movilidad no obligada esto se extiende un poco hacia el oeste y bastante más hacia el sur. Para el escenario de ZBE más ambicioso, de viajes con destino a cualquier parte de la almendra central, no sólo son muchos más los viajes impactados, sino que también son muchos más los orígenes de esos viajes. Para la movilidad obligada, aumentan la cantidad de zonas hacia el sur y oeste inmediatos del Municipio de Madrid. Para el resto de los propósitos de viajes, se acentúa significativamente la zona este y sur del área de estudio, además de aumentar apenas un poco el oeste y norte inmediato.

Si bien se han observado ciertos patrones en los efectos que tienen las variables indicativas de vulnerabilidad sobre la cantidad de viajes y los orígenes de los mismos, no todas tienen el mismo nivel de influencia. Esto implica que no todos los perfiles de viajeros vulnerables se afectarían de igual manera ante un cambio en la extensión de la ZBE. Para resolver esta cuestión es que se realizó el análisis de Suma Ponderada

5.3 Análisis multicriterio de vulnerabilidad

El análisis multicriterio tuvo por objetivo obtener un indicador único de vulnerabilidad que describa la movilidad de toda la Comunidad de Madrid hacia ambos escenarios de ZBE. Todos los análisis se realizaron para los viajes detectados el día martes 15 de marzo de 2022. Tal como se ha descrito en la Sección 4.5, se realizó un análisis de **Suma Ponderada** (*Weighted Sum*) a través de ArcGIS PRO. Una vez obtenido el indicador de vulnerabilidad (campo “*gridcode*”) el siguiente paso fue visualizar los resultados en mapas de calor por volumen de viajes vulnerables. Se estudió primero la movilidad general, para luego compararla por la movilidad diferenciada por propósito.

5.3.1. Movilidad General

Los primeros resultados que se observan muestran patrones muy distintos para cada escenario. Para la movilidad con destino el Distrito Centro, las zonas con mayor cantidad de viajes vulnerables son intrazonales, desde Palacio, Justicia y Universidad, y de algunas otras zonas internas a la almendra central y al oeste de la misma: Puerta del Ángel (Latina), Argüelles y Casa de Campo (Moncloa-Aravaca). Sorprendentemente, estos resultados no se condicen con los últimos análisis de características sociodemográficas indicativas de vulnerabilidad realizados de la sección 5.2. Una hipótesis es que hay un nivel demasiado elevado de viajes intrazonales en comparación al resto de los orígenes y en la suma ponderada se otorgó demasiado peso a aquellas variables que en la sección anterior no modificaron significativamente los patrones de la movilidad general sin caracterización sociodemográfica.

Para la movilidad con destino el escenario más ambicioso de la ZBE extendida a toda la almendra central, el panorama de distribución de zonas con más cantidad de viajes vulnerables se modificó de manera significativa. Estos orígenes con más viajes son Parla, San Cristóbal (Villaverde) Palomeras Bajas (Puente de Vallecas), Casco Histórico de Vallecas (Villa de Vallecas), Torrejón de Velasco, Pinto, Fuenlabrada, Leganés, Torrejón de la Calzada y Torres de la Alameda. A excepción de esta última que se encuentra al este, todas las zonas se ubican al sur de la almendra central de Madrid. Esto es, los viajes de personas vulnerables hacia la almendra central están ubicados principalmente en el sur de la Comunidad Autónoma de Madrid. El norte no registra viajes con estas características, a excepción de las zonas ‘inmediatas’ al Municipio de Madrid, como los distritos de Fuencarral El Pardo y Hortaleza. En el este, Alcalá de Henares también presenta niveles altos de viajes de personas vulnerables.

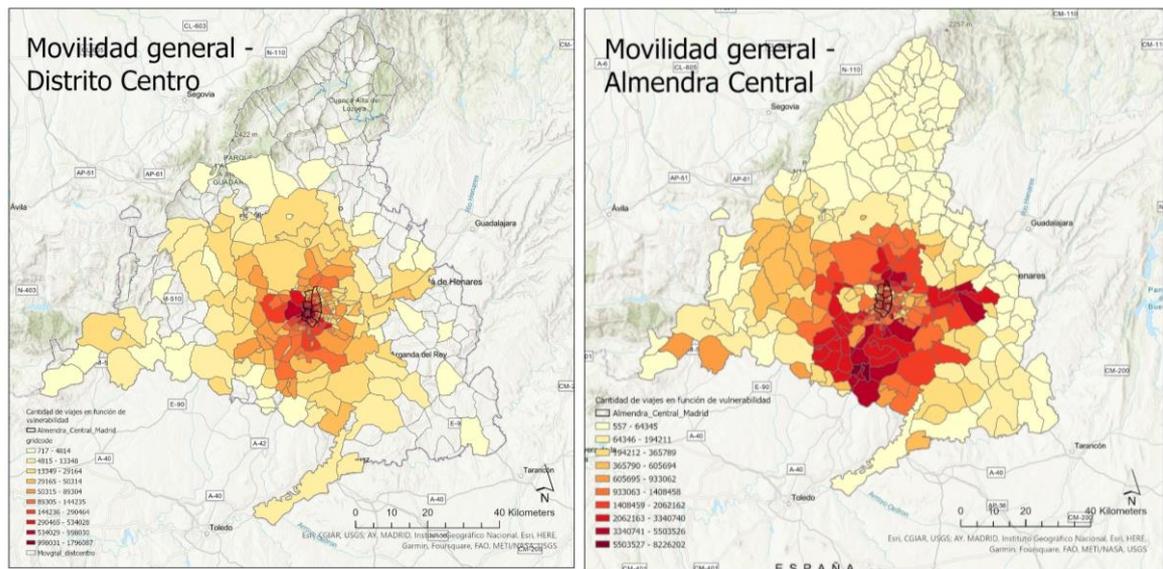


Figura 43. Volumen de viajes con mayor vulnerabilidad con destino el Distrito Centro y la almendra central de Madrid. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

A partir de los volúmenes de viajes obtenidos con la Suma Ponderada, se realizó un análisis comparativo del volumen de viajes vulnerables de cada zona con sus viajes totales, con el fin de comprender en qué zonas la proporción de sus viajes vulnerables sobre sus viajes totales es más alta. Si se comparan los resultados de la Figura 44 con el análisis anterior, se puede observar que los patrones coinciden. En el caso del escenario de Distrito Centro como destino, esto se detecta para algunas zonas del norte del término municipal y algunas zonas del sur, aunque gran parte de las zonas – especialmente hacia el norte de la Comunidad Autónoma – no presentan datos, puesto que no hay volúmenes de viajes vulnerables significativos. En cambio, para el escenario de la movilidad con destino toda la almendra central, los resultados son claramente más relevantes para la zona periférica del sur y este del área de estudio, y para algunas zonas aisladas del oeste también.

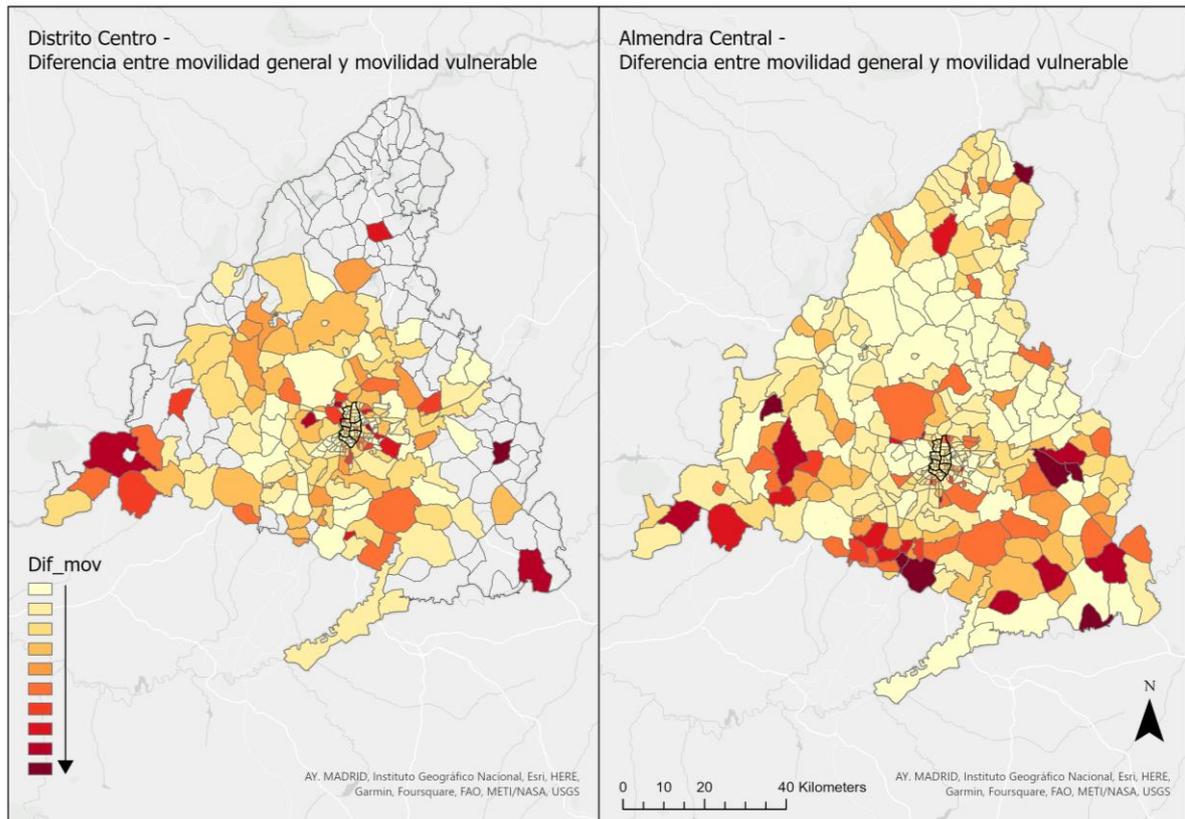


Figura 44. Proporción de volúmenes de viajes vulnerables por sobre el total de viajes para cada zona. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos y de movilidad general de la matriz OD

5.3.2. Movilidad diferenciada por propósito de viaje<

Al diferenciar la movilidad por propósito, para el escenario de ZBEDEP Distrito Centro, las zonas con más viajes de personas vulnerables que se desplazan hacia allí se concentran más fuertemente en el centro del área de estudio. En el caso del propósito trabajo, además del Distrito Centro y algunos barrios de la almendra central como Almagro (Chamberí), Acacias y Palos de Moguer (Arganzuela), se detectaron volúmenes altos de viajes vulnerables para zonas principalmente al sur de la almendra: Moscardó (Usera), Los Rosales (Villaverde), San Diego, Numancia y Palomeras Sureste (Puente de Vallecas). En el caso de la movilidad no obligada los orígenes de los viajes se concentran en el Distrito Centro, Ciudad Universitaria y Casa de Campo (Moncloa-Aravaca).

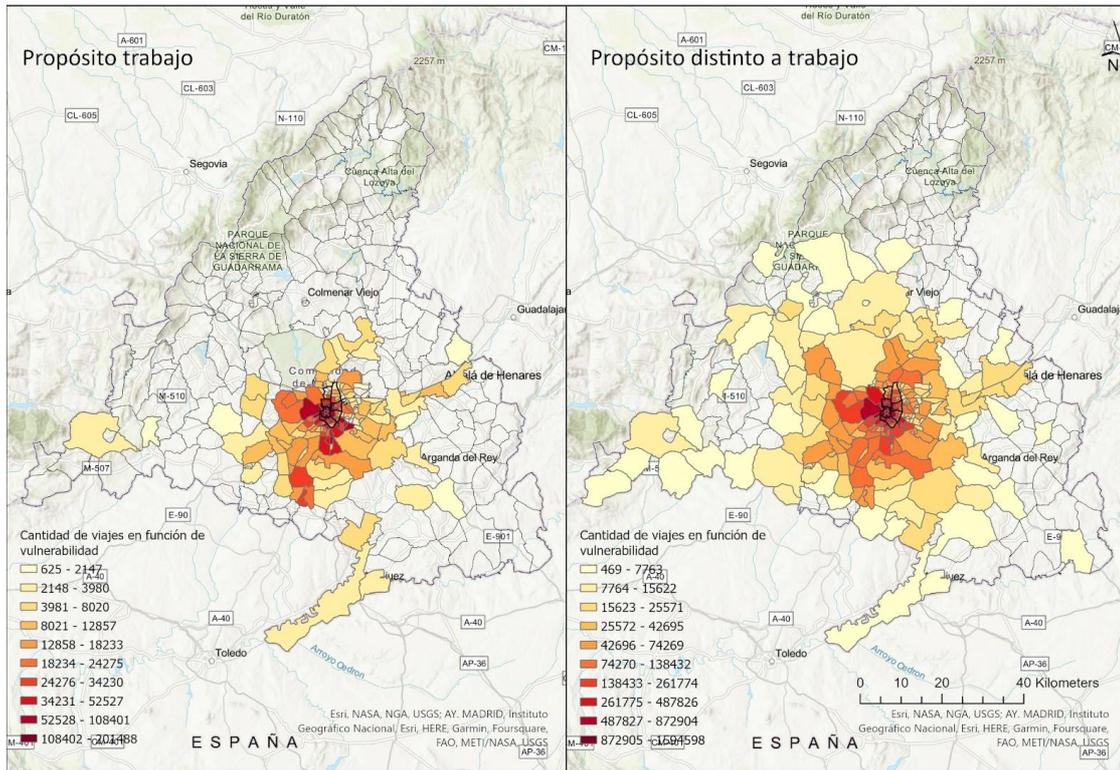


Figura 45. Volumen de viajes con mayor vulnerabilidad con destino el Distrito Centro de Madrid, diferenciados por propósito de viaje. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

En el escenario de ZBE en toda la almendra central, los viajes vulnerables con propósito trabajo siguen un patrón similar al del escenario 1, originándose principalmente en los barrios del Distrito Centro, otros distritos de la almendra central, y algunas zonas en el sur: San Diego, Numancia y Palomeras Sureste (Puente de Vallecas), Moscardó (Usera). A estos orígenes se añaden algunas zonas en el norte de la almendra central, como por ejemplo Cuatro Caminos (Tetuán), Río Rosas (Chamberí), El Viso y Nueva España (Chamartín). Muchos de éstos suelen tener niveles de rentas bastante elevados, pero también suelen tener bastante población entre 65 y 100 años y población femenina (y masculina) en general, lo que puede explicar el resultado de la distribución del indicador luego de aplicarse la suma ponderada. El caso de la movilidad no obligada, las zonas con importantes volúmenes de viajes de personas vulnerables se expanden significativamente hacia el sur y este del área de estudio. Algunas de éstas son Leganés, Villaverde, Fuenlabrada, Parla, Getafe, Puente de Vallecas, Alcalá de Henares y Fuencarral El Pardo.

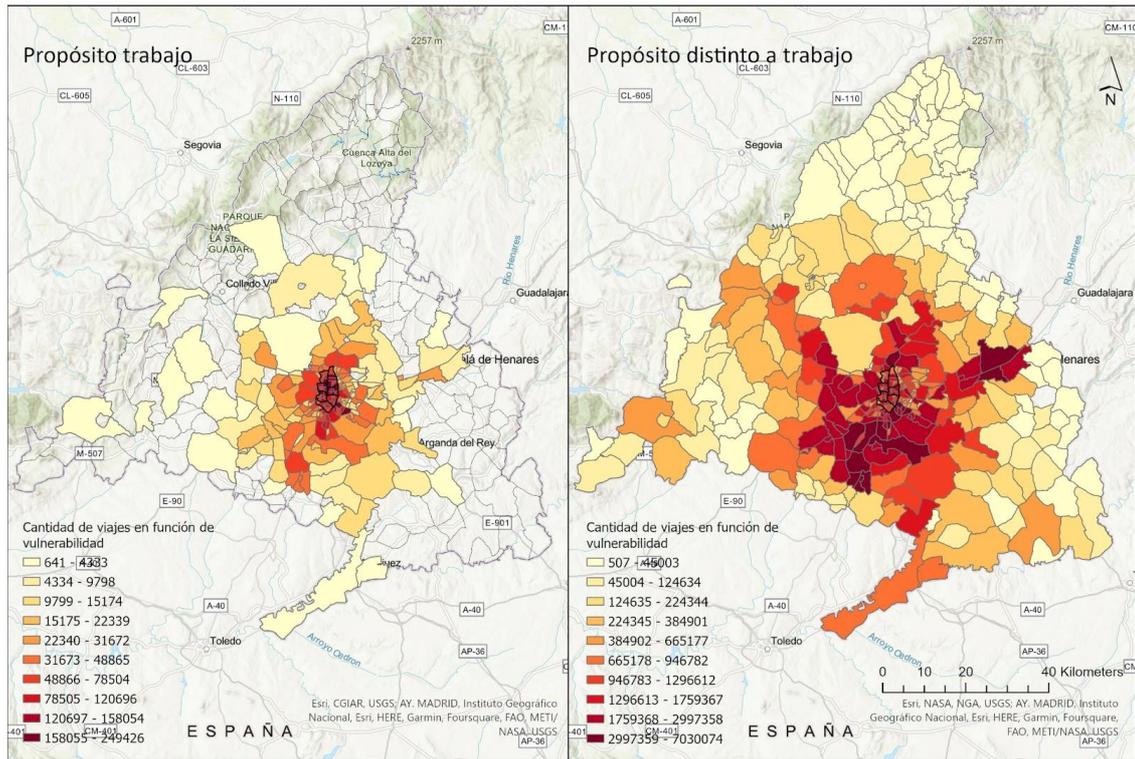


Figura 46. Volumen de viajes con mayor vulnerabilidad con destino la almendra central de Madrid, diferenciados por propósito de viaje. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos de la matriz OD

A continuación, se realizó el mismo análisis ilustrado en la Figura 44, comparando los volúmenes de viajes vulnerables por sobre los volúmenes totales de movilidad, pero diferenciando los propósitos de viaje. Nuevamente, en general los resultados se condicen con la distribución de viajes con características vulnerables observadas en las dos figuras anteriores. Para los viajes con propósito trabajo, para la mayoría de las zonas no se observan datos. En el caso de la movilidad con destino el Distrito Centro, las zonas con proporciones significativas de viajes vulnerables sobre el total de viajes se encuentran definitivamente hacia el sur y este del área de estudio, mientras que para el escenario extendido a toda la almendra central hay una distribución más equitativa alrededor de todo el término municipal. En el caso de la movilidad con propósito distinto al trabajo, para el escenario de destino Distrito Centro las zonas con proporciones altas de viajes vulnerables también está bastante dividido en todo el territorio dentro de y vecino al término municipal, mientras que para el escenario extendido a la almendra central hay una tendencia un poco mayor del sur, este y oeste. En ambos escenarios de propósito distinto a trabajo, varias zonas del oeste han resaltado dado que para el bajo volumen de viajes que presentan en los análisis de movilidad general, parecería haber una proporción significativa que corresponde a viajes con características sociodemográficas vulnerables. Un último punto relevante que aplica a los cuatro escenarios es que la diferencia proporcional ha sido muy baja en casi todas las zonas de la almendra central, indicando que, si bien se han detectado altos volúmenes de viajes vulnerables, estas zonas de por sí tienen los volúmenes más altos de viajes generales, por lo que son representativos de vulnerabilidad por el volumen de viajes relativo a otras zonas más periféricas, pero no necesariamente por ser vulnerables per se.

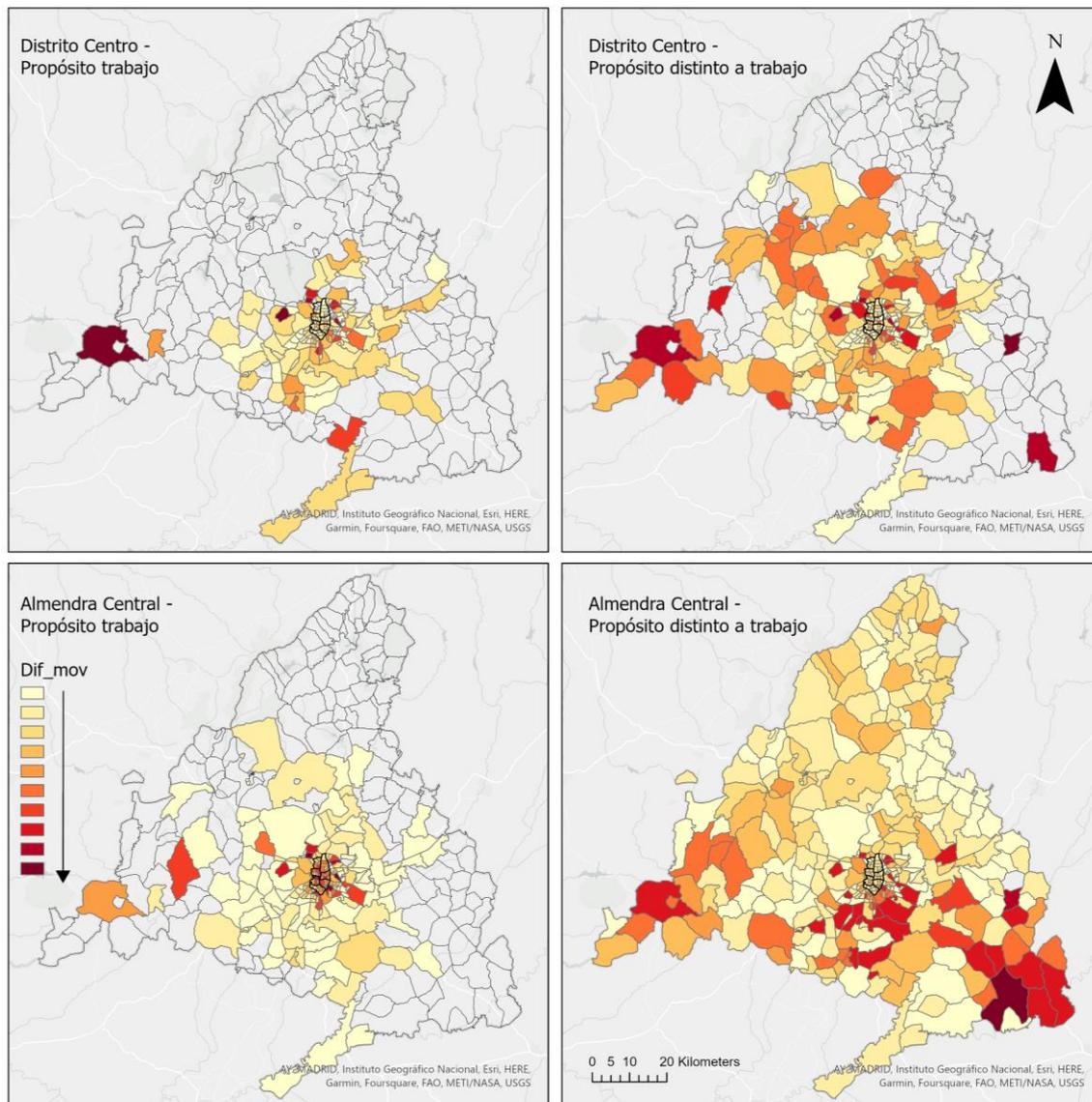


Figura 47. Proporción de volúmenes de viajes vulnerables por sobre el total de viajes, diferenciados por propósito de viaje, para cada zona. Elaboración propia a partir de datos sociodemográficos y de movilidad general de la matriz OD

En síntesis, los resultados del cálculo del indicador único de vulnerabilidad aplicado a los volúmenes de viajes demuestran que, para la movilidad de un día promedio laboral, en este caso el martes 15 de marzo de 2022, los viajes con destino el Distrito Centro suelen provenir principalmente de zonas alrededor del mismo, con una leve inclinación hacia el sur. Para el caso de la movilidad con destino la almendra central, se detecta un área relativamente más extendida de orígenes para esos viajes hacia el sur y este, en especial para la movilidad no obligada. El norte principalmente, pero también el oeste del área de estudio, continúan sin volúmenes de viajes relevantes. En conclusión, **al aumentar la ZBE hacia un escenario más ambicioso, analizando exclusivamente los viajeros vulnerables, se afectaría principalmente a viajes provenientes de distritos al sur y al este de la ciudad.**

Es importante resaltar que, por más que los análisis multicriterio busquen objetivar lo más posible los análisis, la decisión de los pesos relativos que se asignan a cada variable no sólo son subjetivos, sino que alteran completamente los resultados finales observados. Es por esto que al relacionar vulnerabilidad y accesibilidad (ver Sección 5.5), se priorizó un análisis de correlación espacial que detecte zonas más generales (y no puntos específicos) donde se observarían a los dos indicadores interactuando entre sí.

5.4 Nivel de accesibilidad: cálculos de tiempos de viaje a partir de GTFS

Según las Encuestas de Movilidad de la Comunidad de Madrid 2018 (EDM18)³⁰, los residentes de la Comunidad dedican en promedio 1 hora y 10 minutos a viajar. A su vez, mientras que en vehículo privado el tiempo de viaje es de 23 minutos promedio, en transporte público éste aumenta a 38 minutos, y este empeoramiento de promedios implica especialmente a los residentes de las coronas más externas al centro de Madrid. De hecho, el tiempo promedio de viaje en coche es bastante homogéneo para los traslados en vehículo privado, mientras que en transporte público se pasa de 31 minutos para residentes en la almendra central, a 57 minutos para residentes en la Corona Regional (ver Anexo 9.4). Estas estadísticas dan una pauta de promedios esperables de tiempo de viaje, y por ende aceptables de ser posibles de hacer con transporte público. Con la encuesta de 2018 y observando las redes de transporte público de Cercanías, Metro y Autobús agregadas en el GTFS de estudio, se puede dar una pauta de aquellos orígenes cuyo nivel de accesibilidad está dentro de márgenes normales y promedios, y cuáles no.

La Figura 48 ilustra el tiempo de viaje en transporte público entre los distintos orígenes del área de estudio, y los destinos de cada escenario de ZBE. La escala de colores representando tiempo de viaje varía cada 30 minutos. En esta primera instancia no se distingue la movilidad por propósito ya que esta variable no influye en los tiempos de viaje, y por ende para mismos orígenes y destinos, los resultados son los mismos indistinto del propósito. Lo que puede observarse es que los patrones de tiempos de viaje para cada escenario son muy similares. Esto se debe en gran medida a que la localización del Distrito Centro con respecto al área de la almendra central no es muy distinta ni muy lejana.

³⁰ Disponible en: https://www.crtm.es/media/712934/edm18_sintesis.pdf

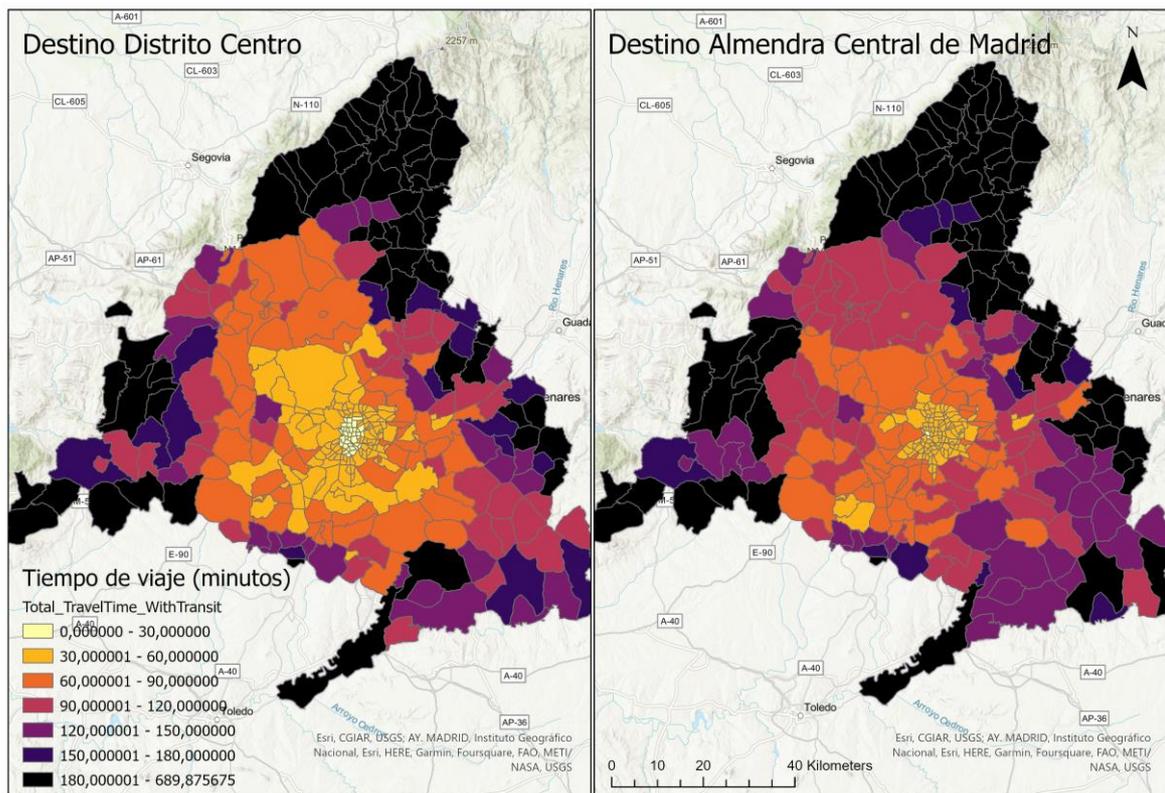


Figura 48. Tiempos de viaje en transporte público desde cada origen para cada escenario de ZBE. Elaboración propia con ArcGIS PRO

Para ambos escenarios, todos los orígenes dentro del término municipal de Madrid tienen un tiempo de viaje menor a 90 minutos, a excepción de El Cañaveral (Vicálvaro) y Casco Histórico de Vallecas (Villa de Vallecas) en el escenario más ambicioso de ZBE, que tienen entre 90 y 120 minutos de viaje. Todos los viajes con origen dentro de la almendra central tienen un viaje máximo de 60 minutos. La zona más al norte de la Comunidad Autónoma presenta tiempos de viaje muy altos para todos los distritos en ambos escenarios, pero es importante remarcar que es el área con menos viajes diarios detectados de movilidad general hacia la ciudad de Madrid, por lo que son un número muy bajo los viajeros que, en caso de reemplazar la movilidad en vehículo privado por transporte público, sufrirían la baja accesibilidad. Algo similar ocurre con el oeste de la región, aunque en menor medida ya que varias zonas tienen tiempos de viaje bastante más reducidos pese a su distancia física del centro de Madrid. Algunas de éstas son: Navas del Rey, Chapinería, Pelayos de la Presa, Guadarrama, Molinos, Collado Mediano y Becerril de la Sierra. Por otra parte, en la Sección 5.3 se había concluido que, ante una expansión de la ZBE a toda la almendra central, se afectarían principalmente a viajes provenientes del sur y este. En este análisis se observa que hay muchas zonas con viajes que, además de ser vulnerables según los análisis anteriores, tienen una accesibilidad relativamente mala porque presentan tiempos de viaje muy elevados. Algunas zonas para remarcar en este aspecto son:

- al sur: Aranjuez, Titulcia, Chinchón, Villarejo de Salvanes, Casarrubuelos y Estremera
- al este: Santos de Humosa, Villalbilla, Pezuela de las Torres, Ambite, Olmeda de las Fuentes, Valverde de Alcalá, Corpa, Anchuelo y Santorcaz.

En síntesis, si bien los patrones de tiempos de viaje son similares, **en el escenario más ambicioso de ZBE más viajeros se verán un poco más afectados, ya que se aumenta el tiempo de viaje de la mayoría de las zonas.** Se observa que, para ambos escenarios, las zonas más periféricas en todas las direcciones tienen mayor tiempo de viaje, lo cual se puede explicar en gran parte por la distancia física con respecto a la ciudad de Madrid. No obstante, en este mapa no se representa volúmenes de viajes desde cada origen, variable muy importante a la hora de concluir dónde la mala accesibilidad es un problema importante en relación al

número de personas que afecta. Por ejemplo, los distritos más al norte de la Comunidad Autónoma tienen muy pocos viajeros que se movilizan hacia la ciudad de Madrid, mientras que aquellos del sur y este no sólo presentan volúmenes altos de viajes diarios, sino que además son realizados por viajeros con perfiles sociodemográficos más vulnerables.

La Figura 49 ilustra la relación entre la cantidad de viajes de cada origen, y el tiempo de viajes entre éstos y cada escenario de destino, de manera generalizada. Como puede observarse, las zonas en bordó son aquellas con valores High-High, es decir, que tienen mucha cantidad de viajes y tiempos de viaje altos. Esas son las zonas más críticas para mejorar la accesibilidad al transporte público. Por el contrario, casi toda la periferia no tiene niveles *High-High* y está en amarillo, que denota mayores tiempos de viaje, pero poco volumen de viajes.

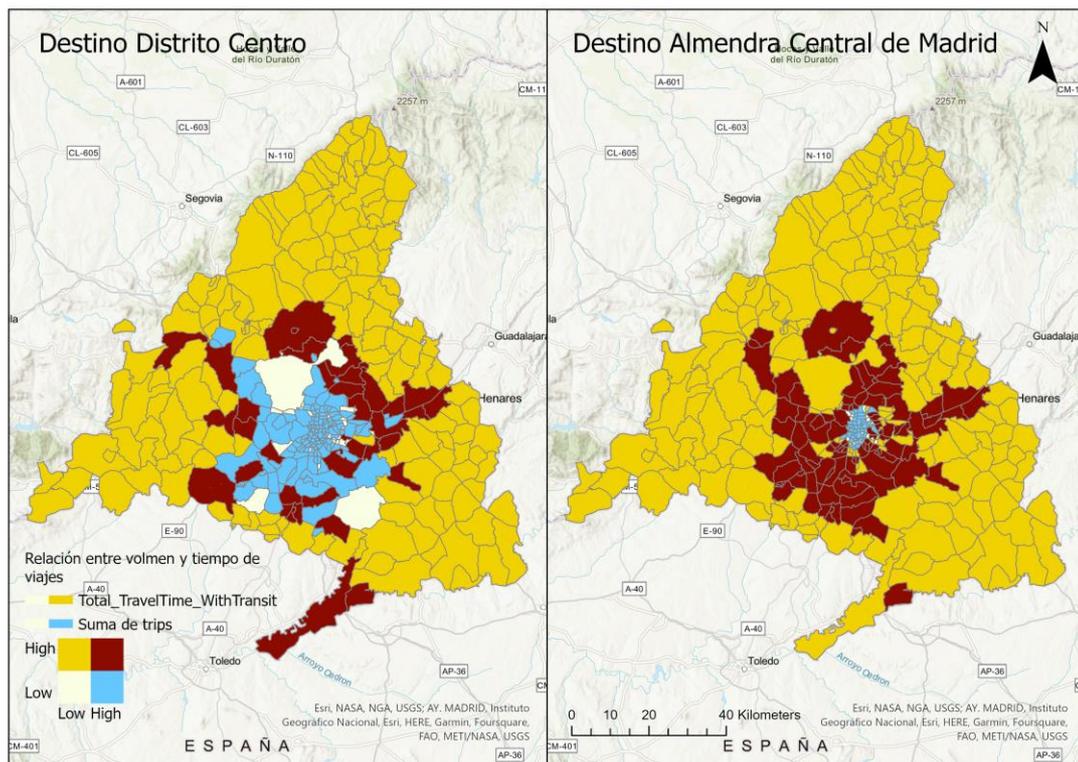


Figura 49. Relación entre volúmenes de viajes y tiempos de viaje desde cada origen hacia cada escenario de ZBE. Elaboración propia con ArcGIS PRO

5.5 Análisis de correlaciones entre accesibilidad-vulnerabilidad

Una vez obtenidos los indicadores de accesibilidad y vulnerabilidad de los viajeros de cada origen de la Comunidad de Madrid para cada escenario y propósito de viaje, se realizaron estudios de correlación para corroborar si la hipótesis se cumplía o no. A partir de los análisis anteriores, ya se obtienen indicios de que ésta no se cumple para todo el territorio. Esto es, hay zonas que presentan altos volúmenes de viajes vulnerables a partir de las características sociodemográficas estudiadas, pero que tienen buen nivel de accesibilidad, poco tiempo de viaje en transporte público. Por el contrario, algunas zonas con tiempos de viaje mucho más elevados no presentan indicios de tener población vulnerable.

Como se ha mencionado en la Sección 4.7, cada herramienta de geoprocésamiento funciona distinto, y es esperable que cada cálculo arroje resultados desiguales. Es por esto que el objetivo de los análisis finales es

encontrar patrones más bien generales y no específicos por cada zona desagregada.

5.5.1. Análisis de Relaciones Bivariantes Locales

El primer análisis se concentró en detectar aquellos orígenes cuyos volúmenes altos de viajes vulnerables se relacionaran con una mala accesibilidad, es decir, tiempos de viaje altos. Cabe aclarar que aquellas zonas donde directamente no se detectaron volúmenes de viajes relevantes para alguno de los dos indicadores quedaron fuera del análisis. Esto se ve más que nada para la movilidad con propósito de trabajo, y en especial para aquella con destino específico el Distrito Centro, puesto que el volumen de viajes es menor al del escenario de la ZBE extendida a toda la almendra central, y en especial para la movilidad con propósito distinto a trabajo. Como es de esperar, dado su buen nivel de servicio de transporte público, el sur del Municipio de Madrid e ‘inmediato’ al mismo no presenta zonas con correlación positiva en ninguno de los cuatro escenarios. De hecho, en algunos se observa correlación negativa, donde a más vulnerabilidad, menos relación con mala accesibilidad. Otro patrón recurrente es la zona norte del área de estudio, sea por una correlación baja, nula u orígenes que directamente no han entrado en el estudio dado que no presentan niveles de vulnerabilidad baja en los viajes hacia la ciudad.

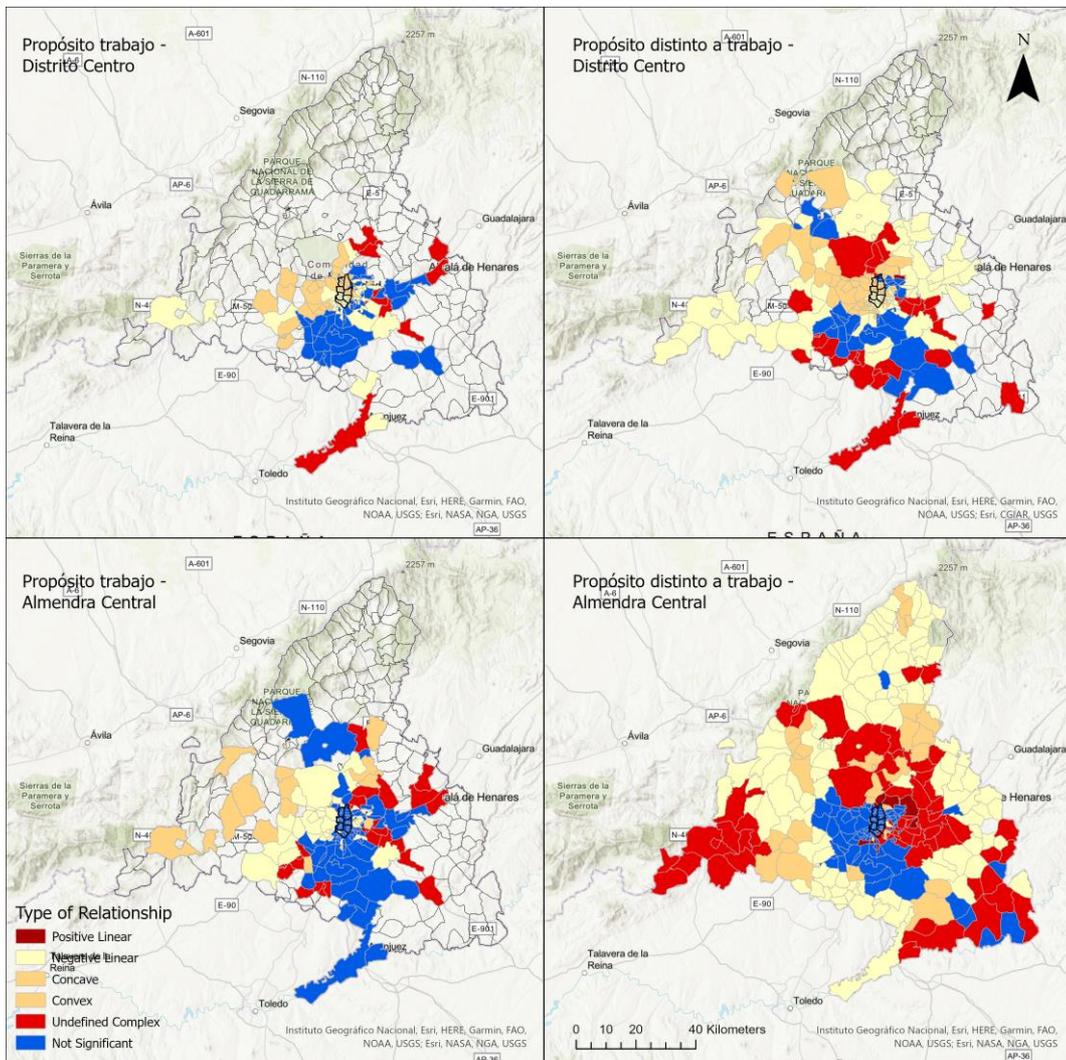


Figura 50. Mapas de relaciones bivariantes locales entre vulnerabilidad y accesibilidad, para cada escenario de movilidad diferenciado por destino de ZBE y por propósito de viaje. Elaboración propia a partir de ArcGIS PRO.

Para el primer escenario de viajes hacia el Distrito Centro, en el caso de movilidad con propósito trabajo, se detecta correlación en un número reducido de zonas, principalmente en el este del área de estudio: El Cañaveral y Valderrivas (Vicálvaro), Coslada, Rivas-Vaciamadrid, Alcalá de Henares, Meco y Arganda del Rey. Cabe resaltar que se tratan de orígenes donde el tiempo de viaje fue siempre mayor a la media de 70 minutos que arrojan los resultados de la Encuesta de Movilidad de Madrid 2018.

En el caso de la movilidad con propósito distinto a trabajo, se detecta correlación en varios orígenes más, especialmente en el sur más periférico y este de la Comunidad Autónoma. Por ejemplo, en el sur, para Aranjuez, Valdemoro, Torrejón de Velasco, Parla, Griñón, El Álamo, Morata de Tajuña, Arroyomolinos y Moraleja de Enmedio. Hacia el este, Fuentidueña de Tajo, Arganda del Rey, Nuevo Baztán, Mejorada del Campo, Rivas-Vaciamadrid, El Cañaveral y Casco Histórico de Vicálvaro, y Velilla de San Antonio. Nuevamente, todas estas zonas presentan tiempos de viaje mayores a la media. El resultado menos predecible de este escenario fue la correlación detectada para algunas zonas en el norte del Municipio de Madrid: El Pardo, El Goloso, y Mirasierra (Fuencarral El Pardo), Alcobendas y Timón (Barajas). Para estas zonas, en las secciones anteriores, se detectaron tiempos de viaje en transporte público alrededor de los 50-60 minutos y un promedio de 35.000 viajes con vulnerabilidad alta por zona.

Para el segundo escenario de viajes extendido a toda la almendra central de Madrid, los patrones de relación entre los indicadores fueron muy distintos según el propósito de viaje. En el caso de la movilidad obligada, se detecta relación significativa entre un alto volumen de viajes vulnerables y tiempos de viaje altos principalmente en el este del área de estudio, por ejemplo, en Arganda del Rey, Coslada, Rivas-Vaciamadrid, Casco Histórico y El Cañaveral (Vicálvaro), Costillares (Ciudad Lineal), Alcalá de Henares y Camarma de Esteruelas. También se detectó correlación en algunas zonas en el suroeste del territorio, específicamente Parla, Griñón, Arroyomolinos, Móstoles y Alcorcón.

En el caso de la movilidad no obligada, tanto en la almendra central como en las zonas al sur y oeste de la misma se registraron relaciones no significativas. Esto se debe a que, si bien muchas de estas zonas presentaron volúmenes altos de viajes vulnerables en la Sección 5.3, son las zonas con mejor accesibilidad al transporte público. Por el contrario, las zonas sur y oeste más a la periferia de la Comunidad Autónoma resultaron tener correlación entre alta vulnerabilidad y baja accesibilidad. En los análisis previos, efectivamente se trataban de zonas con vulnerabilidad media y media-alta (en especial por nivel de renta bajo), y los tiempos de viajes para estas combinaciones OD registraban tiempos a partir de los 90 minutos, llegando hasta 240 minutos. Asimismo, casi toda la zona este ha registrado correlación entre vulnerabilidad y mala accesibilidad. La vulnerabilidad de los viajes se había observado ya en el análisis multicriterio, mientras que los tiempos de viaje varían mucho - entre los 60 y 180 minutos - según el distrito o barrio específico, pero en casi todos los casos por sobre la media de tiempos de viaje de Madrid. Por último, se detectaron correlaciones en algunas zonas del norte y noreste al término municipal, con volúmenes de movilidad vulnerable y tiempos de viajes muy diversos entre cada zona, que van desde los 35 hasta los 532 minutos, pero con un promedio aproximado de 120 minutos, valor también por encima de la media.

5.5.2. Análisis de suma ponderada

El siguiente análisis consistió en calcular un único indicador a partir de combinar los de vulnerabilidad y accesibilidad, aplicando el mismo peso de 0.5/1 a cada uno. Los resultados obtenidos fueron muy distintos al del estudio de relaciones bivariantes, puesto que la metodología y el criterio de relación entre ambas variables es muy distinto en la Suma Ponderada, es una relación mucho más sencilla donde no hay una variable dependiente de otra variable explicativa ni se busca una correlación entre ellas, sino más bien se las combina para crear una nueva variable única.

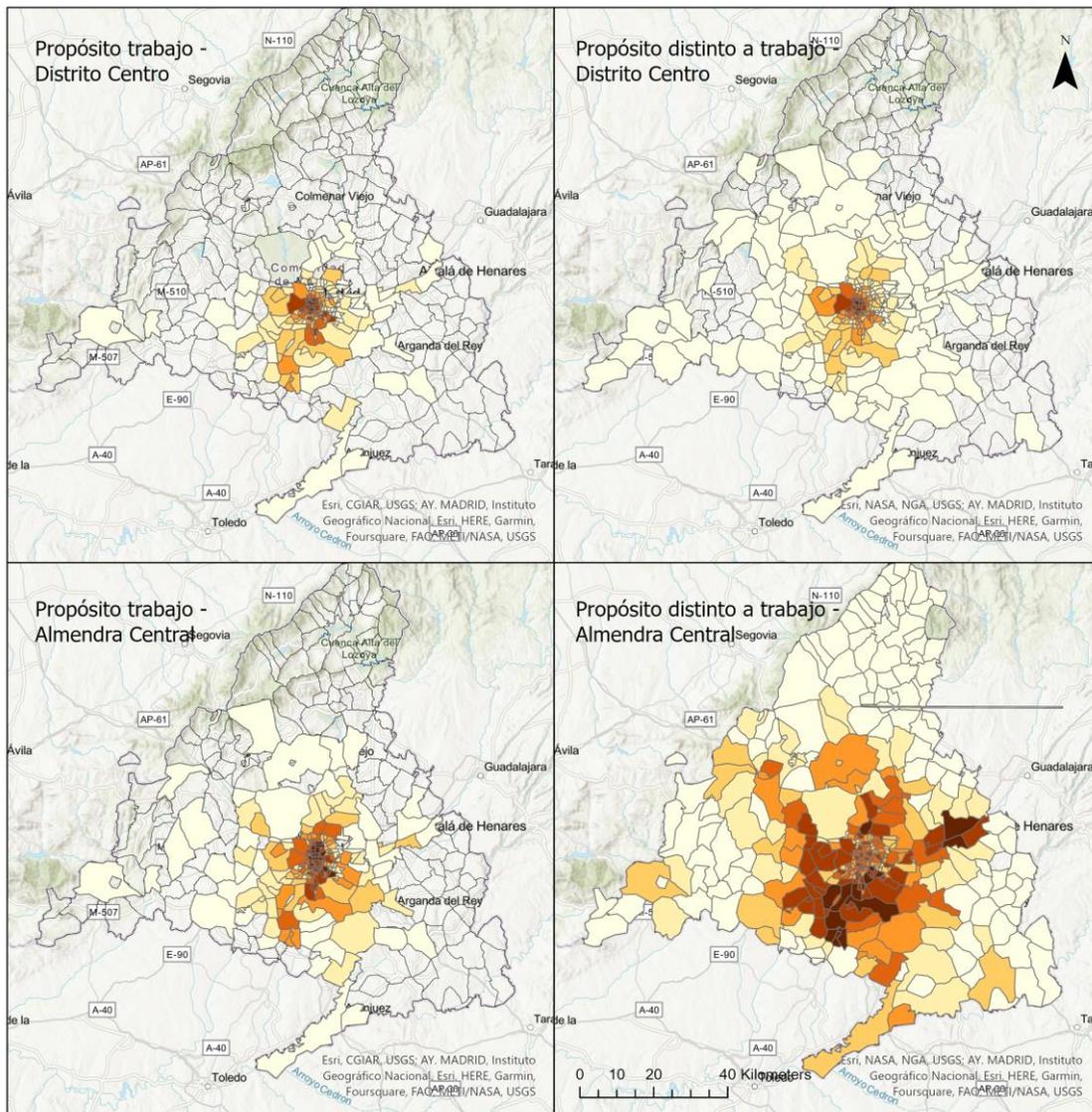


Figura 51. Mapas de calor de orígenes con mayor volumen de viajes vulnerables y menor accesibilidad con destino ambos escenarios de ZBE. Elaboración propia con ArcGIS PRO

Como puede observarse, a diferencia del análisis previo, el indicador de vulnerabilidad dado por el volumen de viajes ha vuelto a tomar gran protagonismo, puesto que aquellas zonas con valores más altos en su mayoría tienen un número elevado de viajes, muchos de ellos con características vulnerables, pero en orígenes con buen nivel de accesibilidad. Esto quiere decir que, mientras en el análisis de correlación anterior el indicador de accesibilidad tenía mucho peso, en este caso quien ha tenido mayor peso en la relación de variables es el indicador de cantidad de viajes con características sociodemográficas consideradas vulnerables. Al igual que en los mapas de volúmenes de viajes vulnerables con propósito trabajo (Sección 5.3.2), para ambos escenarios de ZBE se detecta el indicador con más fuerza en las zonas sur y este a la almendra central. En el caso del propósito distinto al trabajo se detectaron más zonas con vulnerabilidad alta y mala accesibilidad, en parte lógicamente por una mayor cantidad de viajes detectados para este tipo de movilidad. Si bien los resultados son muy diferentes respecto al análisis de relaciones bivariantes, en el escenario de movilidad hacia la almendra central hay varias de las zonas del norte y este que coinciden en presentar correlación; por ejemplo, Colmenar Viejo, Valdefuentes (Hortaleza), La Paz y Valverde (Fuencarral El Pardo), Rivas-Vaciamadrid y Torrejón de Ardoz.

5.5.3. Análisis de correlación espacial: Global Moran's I y Anselin local Moran's I

A partir de los indicadores agregados que se obtuvieron en el análisis previo combinando vulnerabilidad y accesibilidad, se ejecutaron los cálculos de correlación espacial Global Moran's I, con el objetivo de explorar si, para cada escenario, se tendía a una concentración (clustering) de estos viajes vulnerables con baja accesibilidad a los servicios de transporte público. El resultado fue de correlación positiva en todos los escenarios, es decir, existe una tendencia de agrupamiento de los valores altos de este indicador agregado, y por el contrario de aquellas zonas donde no se encuentra presente de forma relevante.

Escenario de ZBE	Distrito Centro		Almendra Central	
	Movilidad obligada (trabajo)	Movilidad no obligada	Movilidad obligada (trabajo)	Movilidad no obligada
Moran's Index	0,243752	0,258937	0,316630	0,403240
Z-score	11,090765	19,260914	15,509056	28,654075
Nivel de clustering	significate	significate	significate	significate

Tabla 4. Resumen de resultados del análisis de correlación espacial Global Moran's I

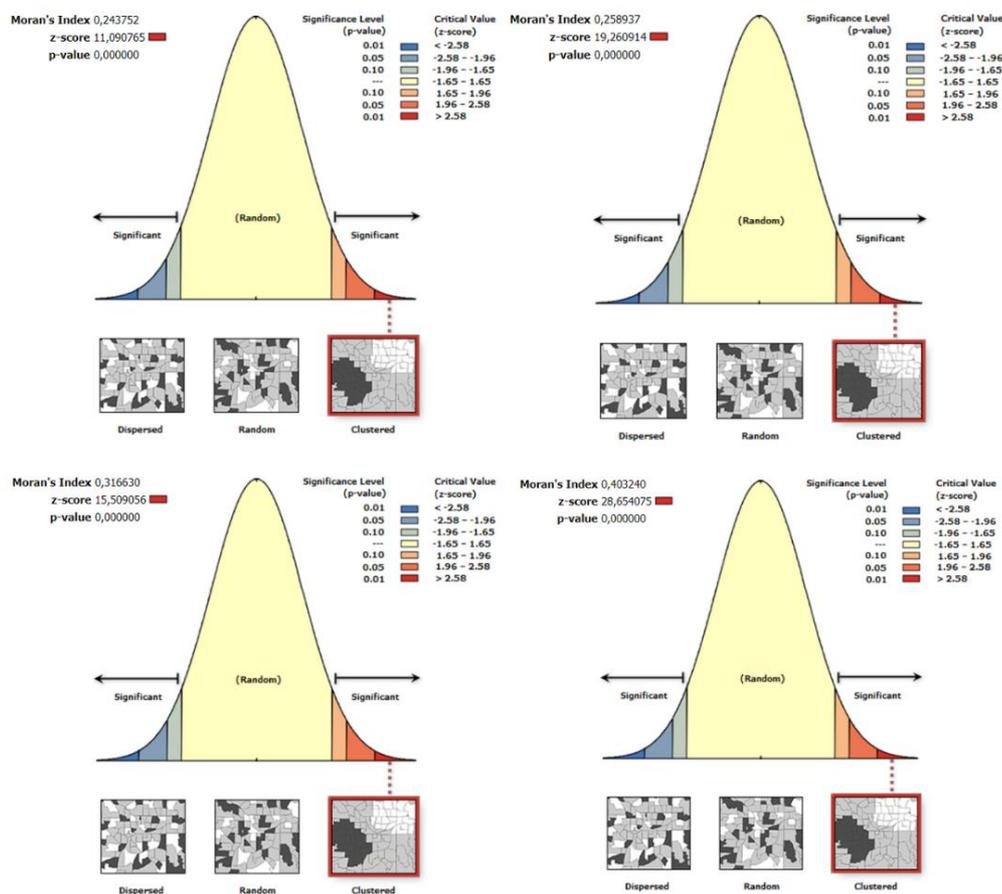


Figura 52. Resultados del análisis de correlación espacial Global Moran's I. Reporte generado por ArcGIS PRO.

Finalmente, con el análisis de clúster y de valor atípico (Anselin local Moran's I) se buscó localizar geográficamente esas correlaciones espaciales significativas, obteniendo los resultados que se observan en la Figura 53.

En el escenario de ZBEDEP del Distrito Centro, para el caso de la movilidad obligada, tiende a haber correlación *High-High* principalmente en el sur, sureste y suroeste de la almendra central y su periferia inmediata. Este mismo patrón, aunque intensificado se observa para la movilidad no obligada, mientras que

las zonas de la Comunidad Autónoma de Madrid más alejadas al Centro tienen correlación Low-Low, es decir, se dan agrupaciones de zonas con valores bajos para el indicador agregado de vulnerabilidad-accesibilidad.

En el escenario de ZBE de la almendra central, para el caso de la movilidad obligada, la distribución de clústeres con correlación positiva se da dentro de toda la almendra central, y en el norte, sur y oeste inmediato a la misma también. En cambio, los resultados obtenidos para la movilidad no obligada son de una zona relativamente más extensa con correlación positiva (*High-High*), extendida principalmente hacia el sur y este del área de estudio. Asimismo, se observa una extensión muy importante de clustering de correlación negativa (*Low-Low*) para todo el norte, el oeste y parte del sureste de la Comunidad Autónoma.

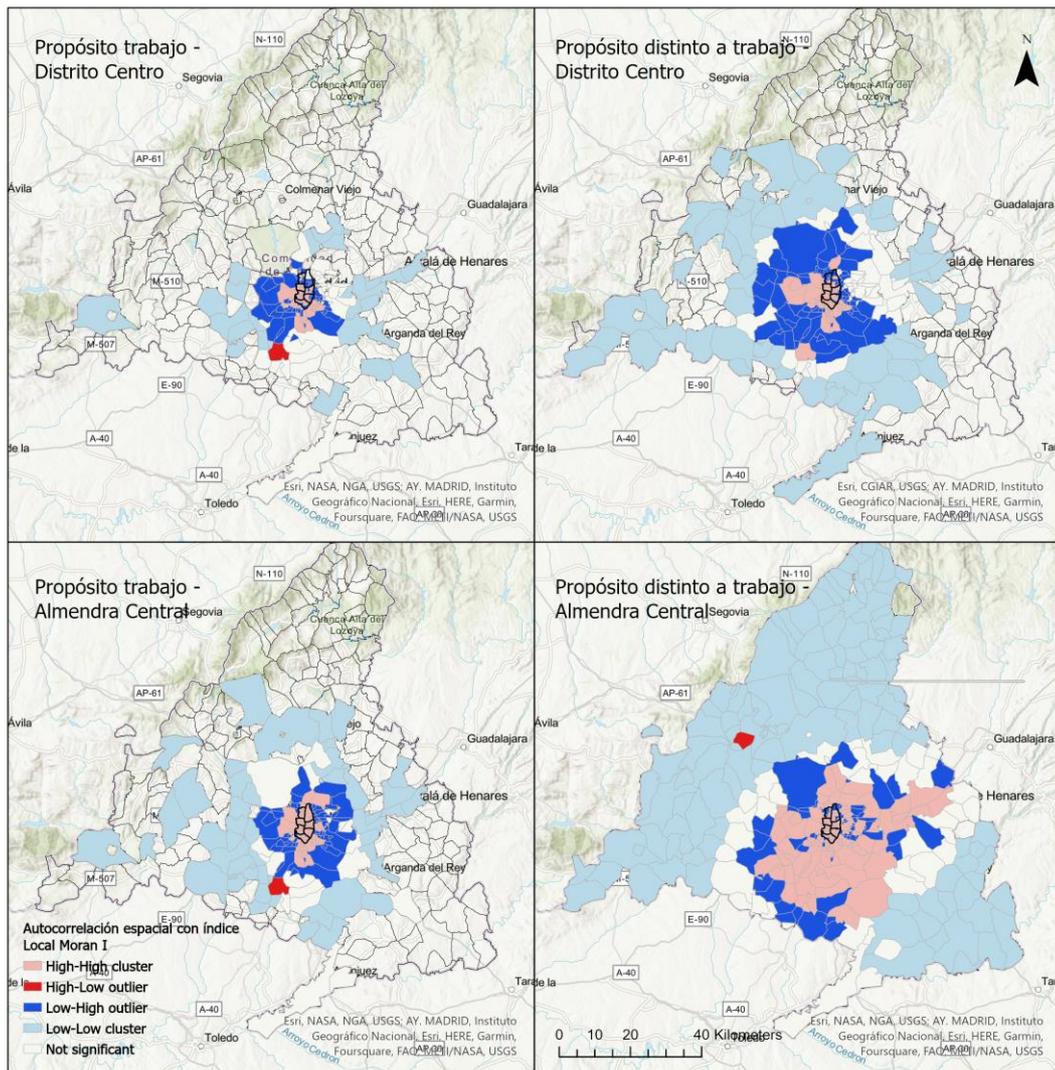


Figura 53. Resultados del análisis de correlación espacial Global Moran's I. Elaboración propia con ArcGIS PRO.

En síntesis, los resultados demuestran que las zonas con más cantidad de viajes vulnerables y peor accesibilidad se encuentran en el sur más periférico de la Comunidad Autónoma y en el este "inmediato" al término municipal de Madrid. Esto no ocurre, sin embargo, para las zonas con los mayores volúmenes de viajes vulnerables que se encuentran en el sur inmediato a la almendra central, puesto que la accesibilidad al transporte allí es muy buena. Por último, se demuestra que la gran mayoría de zonas del norte y oeste de la Comunidad Autónoma tienen una mala accesibilidad por tiempos de viaje muy elevados, pero no presentan grandes volúmenes de viajes vulnerables.

6. Conclusiones

En virtud de los resultados obtenidos en los análisis realizados en la Sección 5, se han alcanzado de manera fructífera los siguientes objetivos:

- Conocer la movilidad general y diferenciada por propósito para cada uno de los escenarios de ZBE; el escenario actual de la ZBEDEP Distrito Centro, y un escenario futuro más ambicioso de extensión a toda la almendra central de Madrid
- Estudiar las características sociodemográficas de los viajes objeto de estudio, tanto para la movilidad general como para la movilidad diferenciada por propósito.
- Conocer, a través del análisis de GTFS, el tiempo de viaje de las personas, para reflejar la accesibilidad de las mismas a los tres modos alternativos al coche privado más relevantes en Madrid: Metro, autobuses y red de Cercanías.
- Realizar un análisis de correlación espacial entre las características sociodemográficas de los viajeros y su nivel de accesibilidad, diferenciando la movilidad por propósito de viaje

La combinación de todos estos estudios de estadística espacial y herramientas SIG se utilizaron con el objetivo último de evaluar el total de viajes y los viajes según grupos sociodemográficos afectados por los dos escenarios de zonas de bajas emisiones planteados, y así entender el potencial impacto de una expansión progresiva del área de la misma.

Un aspecto positivo de los resultados obtenidos es la concentración de viajes con orígenes tanto dentro de la almendra central como en los distritos inmediatos a la misma. Estas zonas suelen estar muy bien comunicadas, por lo que, ante una expansión de la ZBE, los viajeros que provienen de las mismas cuentan con varios modos alternativos al vehículo privado para movilizarse en transporte público, pero también en alternativas sostenibles para viajes cortos como la micromovilidad, caminabilidad y el Mobility-as-a-service (MaaS). Esto no ocurre para las zonas más periféricas, donde estos últimos desarrollos de movilidad sostenible no han llegado. Para éstas, la única alternativa al vehículo privado sería una buena accesibilidad al transporte público, o el poder cambiar el vehículo contaminante por uno con una etiqueta ambiental que lo habilite para circular en las ZBE. Sin embargo, sigue habiendo cientos de miles de viajes que provienen de zonas más alejadas, que dependen de un buen servicio de transporte público para reemplazar los viajes en vehículo privado, ya sea porque con su actual vehículo no puedan acceder a las ZBE, o porque por su poder adquisitivo no les permite costear el cambio a un vehículo eléctrico.

En términos generales, se observó que, para todos los análisis, la cantidad de zonas y volúmenes de viajes afectados por la expansión del área considerada como ZBE aumentan significativamente, más de un 100% en todos los casos, y este aumento es aún mayor entre la movilidad obligada (130% aproximadamente). Es por esto que ha resultado de mucha relevancia poder identificar qué zonas son las más afectadas, ya que este porcentaje de aumento de viajes implicados no aumenta de manera homogénea en todo el territorio y, por ende, no afecta de igual manera a cada viajero.

La investigación reveló que la hipótesis no se cumple para todas las zonas objeto de estudio, es decir, no se ha detectado una correlación positiva entre mayor vulnerabilidad y peor accesibilidad de manera generalizada para todas las zonas y todos los escenarios estudiados. El ejemplo más claro de esto, ya mencionado, son los viajes provenientes del sur “inmediato” a la almendra central, que han revelado el patrón opuesto (*Low-Low*) o relaciones no significativas. Éstas son las zonas con mayor cantidad de viajes con características indicativas de vulnerabilidad que van hacia la zona central de Madrid, pero tienen, en comparación a otras zonas, muy buena accesibilidad en transporte público.

Donde sí se ha detectado esta relación de “viajes vulnerables” y mala accesibilidad en transporte público fue para viajes – principalmente con propósito distinto al trabajo y con destino la almendra central – provenientes del sur periférico y los municipios metropolitanos del este. Éstas son las zonas más críticas del análisis donde más foco se debe hacer para brindar soporte en el proceso de adaptación de la nueva situación de movilidad en Madrid.

Por otra parte, la gran mayoría de zonas del norte y oeste de la Comunidad Autónoma tienen una mala accesibilidad en transporte público, con tiempos de viaje muy elevados, pero no presentan grandes volúmenes de “viajes vulnerables”. En la Sección 5.2 se ha observado que estos viajeros suelen tener niveles de renta mayores, por lo que se podría asumir que podrán optar por reemplazar el traslado en vehículo privado no permitido en la ZBE de la almendra central, por otras alternativas que no impliquen depender del transporte público. Por ejemplo, el reemplazo por vehículos eléctricos o híbridos cuya circulación esté permitida.

Para todos estos resultados, en el análisis de correlación espacial entre vulnerabilidad y accesibilidad, se ha observado una tendencia de agrupación (*clustering*). Independientemente de la relación entre los indicadores para cada origen, se han detectado pocos *outliers*, es decir, pocas zonas han dado resultados muy distintos a los de sus zonas vecinas.

Este estudio aporta un análisis descriptivo de la situación actual de los volúmenes de movilidad, las características sociodemográficas de los mismos, y la detección del nivel de accesibilidad al transporte público – medida en tiempo de viaje - de los distintos orígenes de los viajes de estudio a la actual y posiblemente futura ZBE. Habiendo detectado algunas áreas geográficas descritas previamente con vulnerabilidad alta y tiempos muy altos en transporte público, un próximo paso implicaría estudiar cómo mejorar estratégicamente esa accesibilidad; por ejemplo, aumentando la frecuencia, expandiendo la infraestructura actual de alguna de las redes de transporte, ofreciendo servicios de traslado adicionales para acceder a la red existente, entre otras opciones, dependiendo de las necesidades de cada área geográfica. Esto deberá ser acompañado por otras políticas públicas que apoyen, promuevan y faciliten la adaptación de las personas a las nuevas medidas de circulación y políticas medioambientales que afecten los hábitos de movilidad en Madrid.

7. Limitaciones y perspectivas a futuro

7.1 Tiempos de implementación de la ZBE de Madrid

Como primera limitación de tipo contextual, dado que todavía la ZBE de Madrid está en un estado prematuro que se implementará escalonadamente hasta 2025, se puede intuir que algunos de los resultados del estudio pueden verse afectados. Concretamente, la Ley de Cambio Climático y Transición Energética, además de establecer la obligatoriedad de ZBE, tiene otras medidas que favorecen la movilidad sostenible, como el incentivo a la caminabilidad, micromovilidad, uso del transporte público y transportes eléctricos, reparto de mercancías sostenible, entre otras. Por ende, la implementación de las ZBE y ZBEDEP se acompañará de otras políticas públicas para fomentar modelos urbanos sostenibles que no se tienen en consideración en el presente trabajo. Por ejemplo, todas las ampliaciones y mejoras en el servicio de la red de transporte público debieran ser tenidas en cuenta en las conclusiones de un estudio como este, puesto que el nivel de accesibilidad seguramente se vería alterado, y consigo una probable disminución de la vulnerabilidad de esos viajeros. Otro caso puede ser los incentivos económicos y financieros a la compra de vehículos eléctricos (VVEE), sumado al aumento de la infraestructura y de proveedores de estos servicios de movilidad. Esto supondría que algunos viajeros no necesiten el transporte público ni modifiquen el hábito de viajar en vehículo privado. Un último ejemplo puede ser que, para ciertas localidades y perfiles sociodemográficos, la descentralización de ciertos servicios y actividades supongan una reducción en los viajes con destino a la almendra central de Madrid. Esta “demanda disuadida” podría no verse tan afectada por la falta de una buena accesibilidad al transporte público, por más fundamental que se considere.

En la misma línea, otra limitación del estudio es no poder conocer aún el efecto de estas políticas de movilidad y las ZBE en el comportamiento de las personas que habitan la Comunidad de Madrid. Las personas no dejarán de moverse porque es inherente al humano, pero sí podrán comenzar a modificar ciertos hábitos y localizaciones de actividades frecuentes no obligatorias. Esto aplica también para la movilidad obligada que, en gran parte como consecuencia de la crisis COVID-19, se ha visto modificada significativamente y algunos hábitos de la ‘nueva normalidad’ como el trabajo remoto o *home office* llegaron para quedarse.

7.2 Matrices OD: propósitos de viaje

Otra limitación en los análisis realizados que resulta relevante aclarar es la de estudiar los patrones de movilidad de actividades distintas a trabajo/estudio contabilizando los viajes con propósito **Home (casa)**. Para la semana analizada, existen casi 7 de los 21,48 millones de viajes con propósito distinto a trabajo/estudio que tienen propósito Home. A los efectos del presente estudio no se analiza, pero resulta interesante ver hasta qué punto una implementación de ZBE puede modificar ese propósito, qué porcentaje es “obligado” porque va de la mano del propósito trabajo/estudio y qué porcentaje es movilidad que puede ser suspendida sin problema o bien reemplazada por modos más sostenibles como es la caminabilidad o la micromovilidad.

A su vez, la no distinción entre trabajo y estudio también presenta complicaciones para algunos estudios. En el caso particular de este trabajo, al querer distinguir a grandes rasgos movilidad obligada de no obligada, esta distinción no fue necesaria.

7.3 Segmentación por modo de transporte

Una de las limitaciones más importantes en el análisis de la movilidad a partir de datos de telefonía móvil es

la distinción de los viajes por modo de transporte en ámbitos urbanos. La resolución espacial y temporal de los datos no permite por lo general la identificación del modo de cada viaje observado, de manera que es necesario recurrir a la fusión con otras fuentes de datos. La solución Nommon Mobility Insights incluye funcionalidades de fusión de los datos de telefonía móvil con otras fuentes de datos, tales como encuestas de movilidad o datos de tarjetas inteligentes de transporte público, para mitigar las limitaciones de los datos de telefonía móvil para la identificación del modo de transporte en ámbitos urbanos. No obstante, las matrices OD empleadas en este trabajo no incluyen dichas funcionalidades. La segmentación por modo de las matrices OD puede aportar información interesante sobre el porcentaje de viajes desde cada zona que se realiza en vehículo privado y en transporte público.

Además, el análisis de accesibilidad se ha centrado en el modo transporte público, sin considerar las diferencias de tiempo de viaje con el vehículo privado.

En síntesis, una mejora de la presente investigación sería evaluar el reparto modal de los viajes a las zonas susceptibles de ser incluidas en las restricciones al vehículo privado, además de comprobar que los tiempos de transporte público sean efectivamente mucho más altos que el privado, y cuan grande es esa diferencia, para poder valorar con mayor detalle si las medidas de expansión de la ZBE suponen una importante pérdida de la accesibilidad de los viajeros.

7.4 Análisis multicriterio y de correlación

Como se ha mencionado brevemente al final de la Sección 5.3, este tipo de análisis donde se debe elegir definiciones, criterios, pesos de ponderación y valores indicativos de variables complejas suelen conllevar mucha subjetividad de por medio. Mismo si se eligen métodos conocidos por buscar la objetividad en las elecciones, como el método Delphi o las revisiones bibliográficas exhaustivas, al ser elecciones siempre hay una cuota importante de subjetividad en las decisiones de qué estudiar y cómo llevarlo adelante. Estas subjetividades luego se arrastran a los análisis de relaciones entre las variables, pudiendo generar sesgos o al menos resultados muy distintos, dependiendo qué herramientas o análisis se elijan realizar. Por ejemplo, en el caso del presente estudio, la ponderación elegida para cada variable en el análisis multicriterio de vulnerabilidad ha condicionado todos los resultados de los análisis de correlación entre este indicador y el nivel de accesibilidad realizados posteriormente. Es por esto que priorizaron análisis de estadística espacial que detectaran relaciones de zonas más generales (y no puntos específicos), al igual que para las conclusiones alcanzadas.

8. Referencias

Ayuntamiento de Madrid (2021). Madrid 360 - Zonas de Bajas Emisiones. Disponible en: <https://www.madrid360.es/medio-ambiente/zonas-de-bajas-emisiones/>

Ayuntamiento de Madrid (2018). Metodología para la Elaboración del Índice de Vulnerabilidad Territorial de Barrios y Distritos de Madrid y Ranking de Vulnerabilidad. Coordinación Territorial Y Cooperación Público Social. Disponible en: <https://datos.madrid.es/portal/site/egob>

Ayuntamiento de Madrid (2019). Inventario de Emisiones 1990-2019. Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental. Disponible en: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/El-Ayuntamiento/Medio-ambiente/Cambio-Climatico/?vgnextfmt=default&vgnextoid=0ca36936042fc310VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vgnextchannel=4b3a171c30036010VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD&idCapitulo=6877178>

Bruquetas, M.; Moreno, J.; Walliser, A. (2005): La regeneración de barrios desfavorecidos, Documento de Trabajo 67, Madrid, Fundación Alternativas.

Ceballos, M. A. (2020). La calidad del aire en el Estado español durante 2018. Ecologistas en Acción. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/2020/06/informe-calidad-aire-2019.pdf>

Comisión Europea de Medio Ambiente (última actualización: 2018). Programa “Clean Air For Europe” (CAFE). Disponible en: <https://ec.europa.eu/environment/archives/cafegeneral/keydocs.htm>

Comunidad de Madrid (2019). Guía para la elaboración de informes de evaluación del impacto de género en el sector del urbanismo y para la planificación urbanística con perspectiva de género. Dirección General de Igualdad. Disponible en: <https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/bvcm050125.pdf>

De Cos Guerra, O.; Reques Velasco, P. (2019). Vulnerabilidad territorial y demográfica en España. Posibilidades del análisis multicriterio y la lógica difusa para la definición de patrones espaciales. Investigaciones Regionales - Journal of Regional Research, 45, 201-225. Disponible en: <https://investigacionesregionales.org/>

Ecologistas en Acción (2019). Informe Zonas de Bajas Emisiones: Herramienta contra la contaminación y el calentamiento del planeta. Disponible en:

<https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/2019/04/informe-zonas-de-bajas-emisiones.pdf>

Gómez, Julio & Gutiérrez, Javier & Aja, Agustín. (2013). La vulnerabilidad urbana en España. Identificación y evolución de los barrios vulnerables. *Empiria. Revista de metodología de ciencias sociales*. 73. 10.5944/empiria.27.2014.10863.

IS Global (2018). 5 claves para ciudades más saludables. Iniciativa de Planificación Urbana, Salud y Medio Ambiente. Disponible en: <https://www.isglobal.org/es/ciudadesquequeremos>

La Vanguardia (2021). El Tribunal Supremo anula Madrid Central. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/local/madrid/20210511/7444921/supremo-anula-madrid-central.html>

Méndez, Ricardo; Abad, Luis D.; Echaves, Carlos (2015). Atlas de la crisis; Impactos socioeconómicos y territorios vulnerables en España. Editorial Tirant Humanidades. Valencia. España

Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática (2021). Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética. Jefatura de Estado. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/l/2021/05/20/7>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2018). La perspectiva de género en la movilidad ha llegado para quedarse. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/carpeta-informativa-del-ceneam/novedades/perspectiva-genero-movilidad.aspx>

Nieuwenhuijsen, M.J. (2021). New urban models for more sustainable, liveable and healthier cities post covid19; reducing air pollution, noise and heat island effects and increasing green space and physical activity. *Environment International*, Elsevier, Volume 157. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016041202100475X>

Ayuntamiento de Madrid (2008). Nomenclátor oficial y Callejero (NOMECALLES), Instituto de Estadística. Disponible en: <https://www.madrid.org/nomecalles/> (última consulta: 25/08/2022)

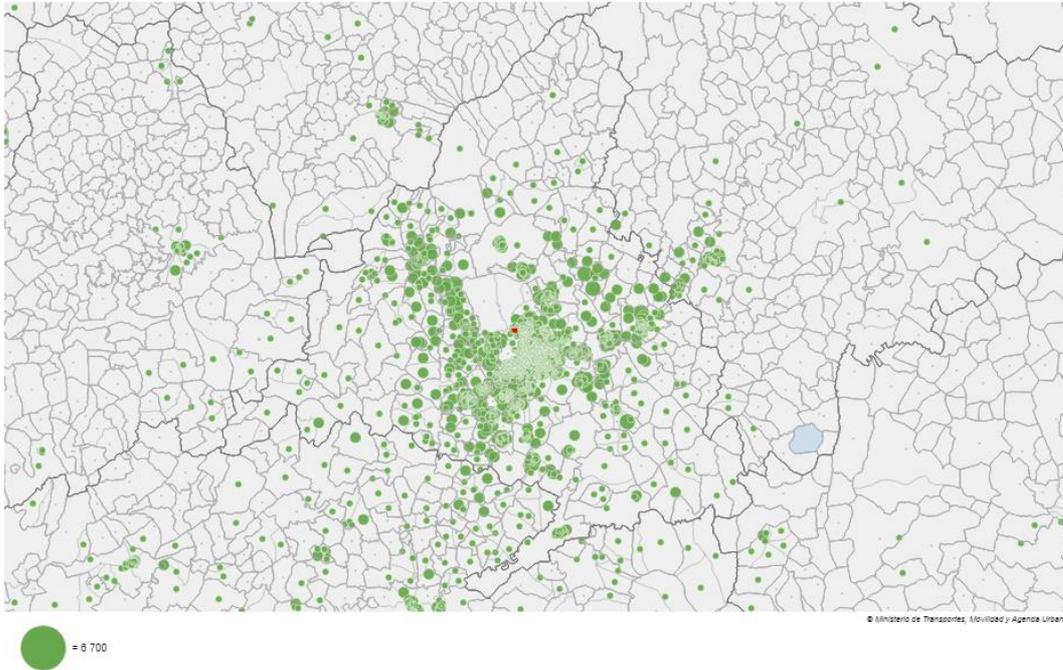
Ruiz, N. (2012) La definición y medición de la vulnerabilidad social. Un enfoque normativo. *Investigaciones Geográficas*. Boletín del Instituto de Geografía 77: 63-74

9. Anexos

9.1 Mapas del Atlas de Vulnerabilidad Urbana del MITMA

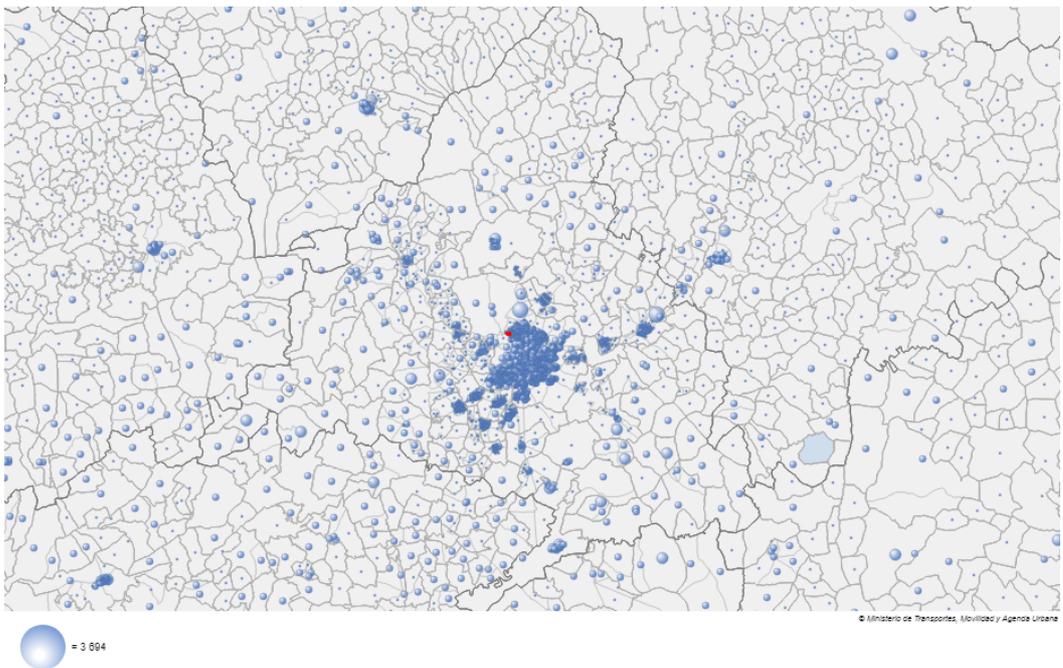
Distribución de población menor de 15 años en la Comunidad Autónoma de Madrid:

Población menor de 15 años (Dato disponible para 2001 y 2011) (personas) - Fuente : INE

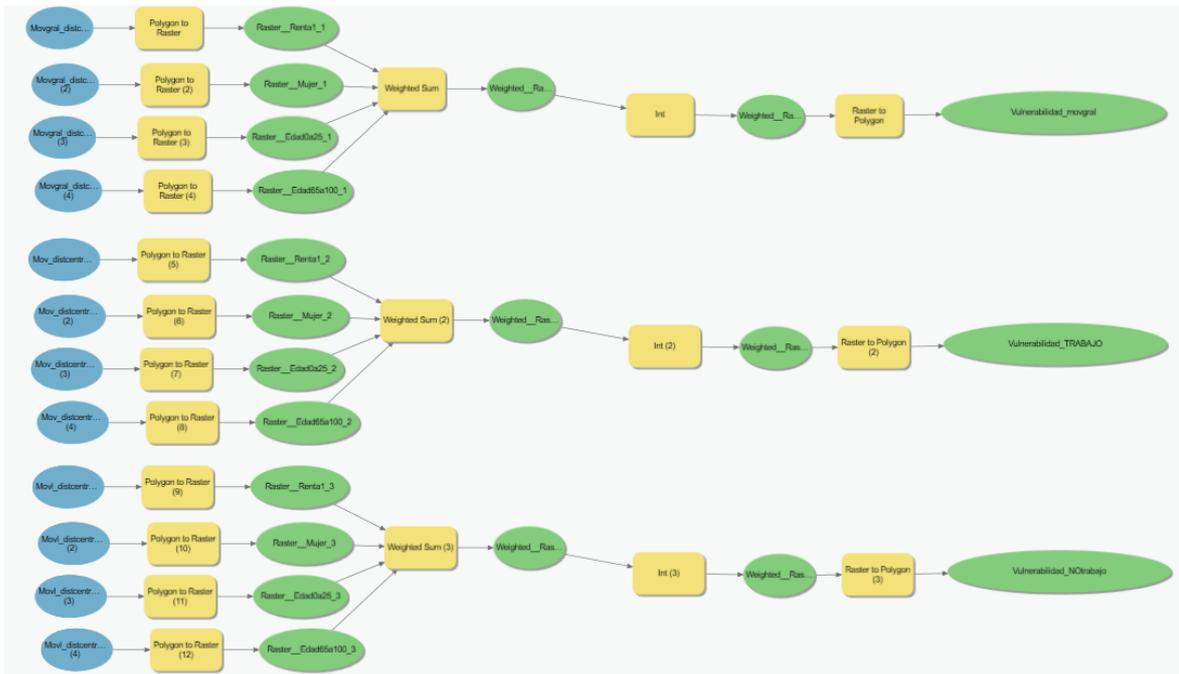


Distribución de población mayor de 75 años en la Comunidad Autónoma de Madrid:

Población de 75 años y más (Dato disponible para 2001 y 2011) (personas) - Fuente : INE



9.3 Modelbuilder para análisis multicriterio

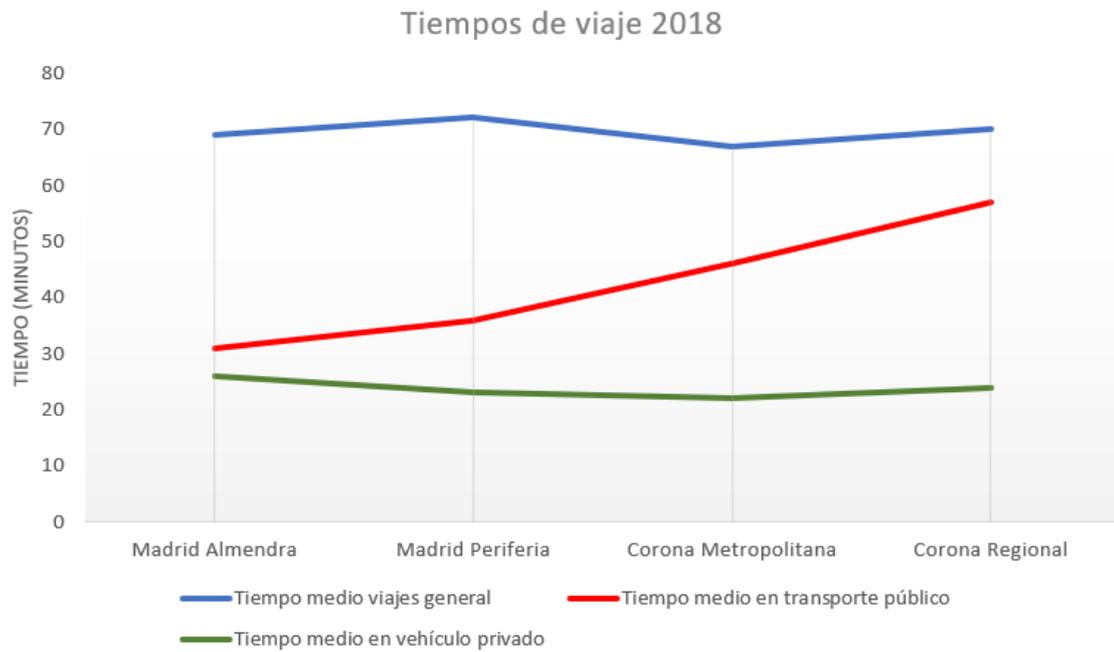


9.4 Resultados de EDM 2018, sección tiempos y distancia de viajes

Tiempo medio del viaje por corona y modo de transporte en Madrid:

Corona de Residencia	Tiempo medio del viaje (minutos)				
	Tiempo Medio Personas que Viajan	Promedio del Viaje	A Pie	Transporte Público	Vehículo Privado
Madrid Almendra	69	25	19	31	26
Madrid Periferia	72	26	18	36	23
Corona Metropolitana	67	24	17	46	22
Corona Regional	70	25	15	57	24
Comunidad de Madrid	69	25	17	38	23

Comparativa de tiempos de viaje en vehículo privado y transporte público, a partir de los datos de la Encuesta de Movilidad de la Comunidad Autónoma de Madrid 2018:



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la EDM 2018