

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA



**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CURSO 2023-24

**ESTUDIO DE LA SERIE ESPACIO-TEMPORAL DE LOS
ACCIDENTES DE TRÁFICO EN LA CIUDAD DE MADRID ENTRE
2019 Y 2023**

*STUDY OF THE SPATIO-TEMPORAL SERIES OF TRAFFIC ACCIDENTS IN THE
CITY OF MADRID BETWEEN 2019 AND 2023*

ALONSO RODRÍGUEZ, LUCÍA

CONVOCATORIA: JUNIO 2024

TUTOR: Juan Carlos García Palomares

Departamento de Geografía de la Facultad de Geografía e Historia

RESUMEN

La red viaria de la ciudad de Madrid está formada por 9.371 viales vigentes, los cuales se tramifican hasta llegar a las 64.384 unidades, en los cuales, entre 2019 y 2023, se produjeron 221.786 accidentes de tráfico. Lo que implica que este fenómeno genera unas pautas de localización y patrones espacio-temporales en el municipio. Pudiendo fundamentarse en que la intensidad media del tráfico urbano, durante el año 2022, en días laborales, fue de 1.848.772. Además, el parque de vehículos existente es igual a 1.392.864 turismos, lo que implica que en Madrid hay un 1,29 vehículos por cada hogar. Así pues, la redacción del marco teórico ha servido para tener un conocimiento previo de la materia y analizar posibles desarrollos temáticos dentro de la misma. Mediante el desarrollo de los diferentes apartados que componen el capítulo de resultados, se han detallado las pautas de localización, los patrones espacio-temporales, así como la previsión en la serie temporal de los accidentes de tráfico, y por último, el entrenamiento y modelado predictivo con Inteligencia Artificial de la serie temporal de los accidentes de tráfico. Todo ello, con la finalidad de analizar la distribución espacio-temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

PALABRAS CLAVES

Tecnologías de la Información Geográfica, accidentes de tráfico, ciudad de Madrid, serie espacio-temporal, aprendizaje profundo.

ABSTRACT

The road network of the city of Madrid is made up of 9.371 roads in force, which are processed to reach 64.384 units, in which, between 2019 and 2023, 221.786 traffic accidents occurred. This implies that this phenomenon generates location patterns and spatial-temporal patterns in the municipality. Which can be based on the fact that the average intensity of urban traffic during the year 2022, on working days, was 1.848.772. Furthermore, the existing vehicle fleet is equal to 1.392.864 cars, which implies that in Madrid there are 1.29 vehicles for every household. Thus, the drafting of the theoretical framework has served to gain prior knowledge of the subject and to analyse possible thematic developments within it. Through the development of the different sections that make up the results chapter, we have detailed the localisation patterns, the spatio-temporal patterns, as well as the prediction in the time series of traffic accidents, and finally, the training and predictive modelling with Artificial Intelligence of the time series of traffic accidents. All this with, the aim of analysing the spatio-temporal distribution of traffic accidents in the city of Madrid between 2019 and 2023.

KEY WORDS

Geographic Information Technologies, traffic accidents, city of Madrid, spatio-temporal serie, Deep Learning.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
A). Justificación del estudio.....	1
B). Objetivos.....	2
II. MARCO TEÓRICO	2
III. METODOLOGÍA	3
IV. ÁMBITO DE ESTUDIO.....	5
A). La red viaria de la ciudad de Madrid	6
B). Evolución temporal de los accidentes de tráfico en la red viaria de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	8
V. RESULTADOS	9
A). Análisis espacial de los accidentes de tráfico en la red viaria de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	9
1. Estadística descriptiva de las pautas de localización de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	10
2. Ratio de los accidentes de tráfico en la red viaria por tramos de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	12
3. Cálculo de la densidad de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	14
4. Indicadores generales de las pautas de localización de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	16
5. Identificación espacial de las pautas de localización de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	17
B). Estudio de patrones espacio-temporales de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	21
1. Elaboración del cubo 3D espacio-temporal de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	21
2. Análisis de puntos calientes emergentes de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	22
3. Análisis de valores atípicos locales de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	23
4. Agrupación de series temporales de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	26
C). Previsión de la serie temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	28
1. Previsión de ajuste a la curva de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	28
2. Previsión de suavizado exponencial de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	29
3. Previsión basada en bosque de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	30

D). Entrenamiento y modelado predictivo con Inteligencia Artificial de la serie temporal de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.	31
1. Entrenamiento del modelo predictivo de las series temporales de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.....	31
2. Modelo predictivo de las las series temporales de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.	31
VI. CONCLUSIONES.....	33
VII. REFERENCIAS	36

I. INTRODUCCIÓN

Dentro de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) se engloban la Cartografía, la Estadística espacial, los Sistemas de Información Geográfica, los Sistemas de posicionamiento por satélite y la Teledetección (Chuvienco et al., 2005). De estas materias, en el presente estudio se van a tratar las tres primeras.

En este sentido, el Sistema de Información Geográfica empleado en este proyecto son los productos de Esri España, principalmente ArcGIS Pro y ArcGIS *Online* (Esri España, s. f.-b). La Cartografía, se va a fundamentar en la realización de mapas en formato 3D (Esri España, s. f.-a); así como en el diseño de un *Story Map* en ArcGIS *Online* para la presentación de los resultados obtenidos (ArcGIS for Server, s. f.). Y, en relación con la Estadística espacial, se han calculado diversos índices a escala global local con la finalidad de identificar los patrones espacio-temporales de los accidentes de tráfico. (Siabato & Guzmán-Manrique, 2019).

En materia de siniestralidad vial en la ciudad de Madrid, la Ordenanza de Movilidad Sostenible señala la relevancia de estudiar los accidentes de tráfico (Dirección General de la Policía Municipal de Madrid, 2022). Trasponiendo esta necesidad con la elaboración del Plan Estratégico de Seguridad Vial de la ciudad de Madrid 2021-2030, donde se realicen diversos estudios estadísticos y mapas de siniestralidad urbana (Dirección General de la Policía Municipal de Madrid, 2022).

Siendo el objetivo final de la Estrategia Europea de Seguridad Vial, no registrar ningún fallecimiento en el conjunto de los viales de la Unión Europea para el año 2050 (Dirección General de la Policía Municipal de Madrid, 2022). Además, este propósito está en conformidad con la Agenda 2030 sobre Desarrollo Sostenible de la ONU (Dirección General de la Policía Municipal de Madrid, 2022).

De ahí que, sea oportuno tratar los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid en función de su localización y temporalidad, debido al elevado número de desplazamientos diarios, y por lo cual, en ella se concentran intensamente las tres variables del tráfico: densidad, intensidad y velocidad (López Maldonado et al., 2019).

En consecuencia, la finalidad de este análisis conocer la distribución espacio-temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023, así como realizar un entrenamiento y modelado de la serie temporal analizada mediante un cubo 3D espacio-temporal.

A). Justificación del estudio

Este trabajo se encuadra dentro del Trabajo de Fin de Máster del Máster Universitario en Tecnologías de la Información Geográfica de la Universidad Complutense de Madrid.

Se fundamenta en el interés personal por conocer la distribución espacio-temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023. Y con la finalidad de entender su concentración y evolución, pudiendo servir este análisis como documento de referencia para mejorar las propuestas de actuación por parte de las autoridades competentes.

Dadas las cifras de siniestros mortales en la serie histórica, y a pesar de que en la última década las cifras siguen una tendencia decreciente, es preciso identificar mejor a escala local los posibles puntos calientes persistentes de accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid.

B). Objetivos

Así pues, el **objetivo principal** del presente estudio es analizar la distribución espacio-temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023 utilizando las Tecnologías de la Información de Geográfica, la Estadística Espacial y el aprendizaje profundo (*Deep Learning*). Complementándose con los siguientes **objetivos secundarios**:

- Identificar las pautas de localización de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.
- Cálculo de la densidad y ratio de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.
- Estudio de los patrones espacio-temporales de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.
- Análisis de la previsión de la serie temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.
- Entrenamiento y modelado predictivo usando Inteligencia Artificial de la serie temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

En consecuencia, el estudio se estructura en cuatro capítulos: el marco teórico, la metodología, el ámbito de estudio y los resultados. En el primer capítulo, dentro del marco teórico se ha realizado una búsqueda de trabajos científicos relacionados con los accidentes de tráfico en diferentes países. En el segundo capítulo, ha sido desarrollada la metodología empleada, que se basa en la búsqueda de fuentes y en el tratamiento de estos datos. En el tercer capítulo, se ha conceptualizado la ciudad de Madrid a nivel general, y específicamente se ha desarrollado un apartado sobre la red viaria madrileña. Y, en cuarto lugar, el apartado de resultados se subdivide en cuatro apartados: análisis espacial de los accidentes de tráfico en la red viaria de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023, estudio de patrones espacio-temporales de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023, previsión de la serie temporal de los de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023, y, por último, entrenamiento y modelado predictivo con Inteligencia Artificial de la serie temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

II. MARCO TEÓRICO

Con la finalidad de tener un conocimiento previo de esta materia se van a exponer los antecedentes teóricos que se han encontrado en diversas fuentes de investigación.

Durante el proceso de revisión bibliográfica se han encontrado estudios realizados por otros estudiantes y profesionales de la materia relativos a artículos científicos, Trabajos de Fin de Grado, Trabajos de Fin de Máster y Tesis Doctoral.

Señalando que para su desarrollo han empleado algún sistema de información geográfica y combinado con otras metodologías.

Como puede ser la segmentación dinámica, tratada en la distribución de los accidentes de tráfico en las carreteras federales del estado de Tamaulipaulipas (México), con la finalidad de constituir los segmentos de acceso virtuales entre las bases de datos tabulares y los datos vectoriales de los mapas (Luna González & Chías Becerril, 1999).

La integración de accidentes por punto kilométrico, empleado en la evaluación de las áreas de carreteras españolas con mayor densidad de accidentes de tráfico con víctimas mortales entre 2008 y 2011, para así obtener la distancia media estimada y esperada de los accidentes (Gómez-Barroso et al., 2015).

El método bayesiano empírico, implementado en los factores que influyen en la ocurrencia de accidentes en vías urbanas en la ciudad de Cartagena (Colombia), debido a que su propósito era identificar las variables explicativas de estos sucesos (Cantillo et al., 2016). Así mismo, fue aplicado en el análisis espacial de los accidentes de tráfico en Banda Aceh (Indonesia), con el objetivo de identificar los factores que contribuyen la presencia de siniestros (Satria, 2020).

El análisis espacial de los accidentes de tráfico, se empleó en la accidentalidad urbana en la ciudad de Mashhad (Irán), con el fin de identificar las pautas de localización de los accidentes de tráfico (Ali Shafabakhsh et al., 2017).

La estadística, sirvió como principal fuente para la elaboración de un visor de información geográfica, donde se pueden hacer consultas y visualizaciones en relación con la accidentalidad viaria de la ciudad de Toluca de Lerdo (México) (Muñoz & Hinojosa, 2023).

Las técnicas de aprendizaje automático, minería de datos y análisis de probabilidad, fueron empleadas en el análisis predictivo de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid, cuya intención era establecer la probabilidad de siniestralidad y accidentalidad en los puntos de los trayectos mediante gráficos y mapas dinámicos (Béjar Gladkowski, 2023).

O, las redes neuronales y regresiones lineales, utilizadas para la construcción de varios modelos predictivos, con la intención de facilitar la probabilidad de estimación de suceso de los accidentes de tráfico en zonas concretas de la ciudad de Madrid (Cruz Bellas, 2017).

Siendo las herramientas de geoprocésamiento más utilizadas: índice de I de Moran de autocorrelación espacial, análisis de puntos calientes (G_i^* de Getis-Ord), densidad de Kernel, índice del vecino más cercano o el resultado de la función K.

Concluyendo que se obtuvieron resultados dispares, debido a que con los índices de identificación general y espacial de las pautas de localización se demostró que los accidentes de tráfico estaban agrupados en mayor medida de lo esperado aleatoriamente. Pero en el modelo predictivo expuesto las variables predictoras no explicaban con precisión la variable dependiente, por lo que, para su construcción deberían buscar otras variables y métodos. Y, por último, mediante el enfoque espacial bayesiano se consiguió proponer un conjunto de medidas a escala local para optimizar la seguridad de las carreteras.

III. METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos planteados se han utilizado **fuentes y datos cuantitativos**, estructurando un procedimiento compuesto en tres etapas:

- **Primera etapa:** previamente al desarrollo del análisis, se realizó una búsqueda temática para el desarrollo del mismo, ya que inicialmente existían varias propuestas para llevarlo a cabo, aunque finalmente se decantó por realizarlo sobre los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid. Una vez se tuvo el tema elegido, se prosiguió con la búsqueda de información asociada para estructurar el marco teórico y los diversos análisis que son

necesarios ejecutar en el apartado de resultados. Conformando así una base de datos con la información asociada, la cual se ha ido actualizando en función de las necesidades que han ido surgiendo en el proceso.

- **Segunda etapa:** con la información cuantitativa recabada ha sido necesario implementar algunas transformaciones en los datos, debido a que el formato de origen no podía ser utilizado en el software GIS. Así pues, se han llevado a cabo desde el propio sistema, empleando técnicas de automatización de procesos mediante el uso del *Model Builder* de ArcGIS Pro. Una vez se ha completado este proceso, los datos han podido ser explotados en los diferentes análisis del trabajo.
- **Tercera etapa:** la redacción del trabajo se ha dividido en dos partes diferenciadas, por un lado, se expusieron los capítulos del 1 al 4, donde se incluyen: la introducción, el marco teórico, la metodología y el ámbito de estudio. Iniciando esta composición por el marco teórico, con la finalidad de conocer otros proyectos y posibles aportaciones de diversos autores; continuando con una descripción general de la ciudad de Madrid y específicamente de la red viaria existente; finalizando con el desarrollo de la metodología y la introducción. Y, por otro lado, se efectuaron los capítulos 5 y 6, referentes a los resultados obtenidos en los análisis espacial, temporal y modelo predictivo, así como las conclusiones a las que se han llegado tras su realización.

De esta manera, la selección de referencias y bibliografía ha sido un proceso relevante a la hora de realizar el estudio, debido a que ha identificado las ideas conceptuales óptimas para poder realizarlo. Aunque la recopilación de los datos cuantitativos es la base fundamental. Todos los datos que se han empleado en este trabajo proceden de **fuentes** oficiales que se describen a continuación:

- **Centro de Descargas del Organismo Autónomo del Centro Nacional de Información Geográfica:** de esta página web del Instituto Geográfico Nacional se ha descargado el producto de Redes de transporte del municipio de Madrid en formato *shapefile* (Centro de Descargas del Organismo Autónomo del Centro Nacional de Información Geográfica, 2024).
- **Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid:** dentro del catálogo de datos obtuvimos los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid, teniendo que descargar 5 ficheros en formato CSV relativos a los años 2019, 2020, 2021, 2022 y 2023 (Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid, 2024).
- **Geoportal del Ayuntamiento de Madrid:** del servidor web municipal se ha conseguido las capas en formato *shapefile* de los límites administrativos de la ciudad de Madrid, es decir, el término municipal, los distritos, los barrios y las secciones censales (Geoportal del Ayuntamiento de Madrid, 2024).
- **ArcGIS Hub:** de aquí se encontraron los límites de las comunidades autónomas de España en formato *shapefile* (ArcGIS Hub, 2024).
- **Open Data de Esri España:** finalmente en los contenidos de Esri España, hallamos los puntos kilómetros de España en formato *shapefile* (Esri España Contenidos, 2023).

Además, al ser un proyecto de investigación práctico se han utilizado los siguientes **programas** tanto de *software* libre como comercial:

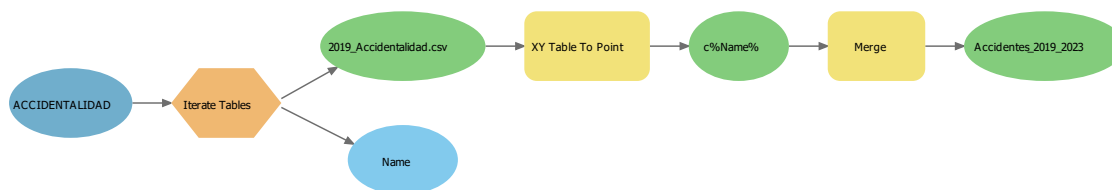
- **ArcGIS Online:** en este entorno digital se han diseñado y publicado los resultados obtenidos en el presente caso práctico.
- **ArcGIS Pro:** es la herramienta fundamental del estudio y en él se han ejecutado todos los procesos que lo conforman. Dentro de él, se ha utilizado los mapas y diseños, para

crear las diferentes composiciones de mapas; las herramientas de geoprocésamiento, para desarrollar los análisis; así como, los Model Builder, para automatizar los procesos.

- **Mendeley Reference Manager:** se ha aplicado para hacer las referencias de los artículos científicos, proyectos académicos de otros estudiantes y fuentes de los datos empleados. Diseñando por tanto la bibliografía del trabajo.

Y, por último, en este capítulo, ha sido preciso ejecutar una **transformación de los datos** de los accidentes de tráfico procedentes del portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid (Ayuntamiento de Madrid, 2024a), como se indica en el siguiente *Model Builder* de ArcGIS Pro:

Figura 1: Model Builder del tratamiento de los datos



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid y el Centro de Descargas del Organismo Autónomo del Centro Nacional de Información Geográfica

Debido a que están subidos en esta plataforma en formato XLSX o CSV, es decir, son archivos de Excel o separados por comas que directamente no se pueden representar en un mapa. Por lo tanto, los cinco archivos CSV descargados se metieron en una carpeta denominada *Accidentalidad*, como se puede ver en la primera elipse azul situada a la izquierda. A partir de ella, se aplicó un iterador de tablas, es decir, esta función hace que se vayan recorriendo las tablas de una en una hasta completar el fichero, obteniendo la elipse verde llamada *2019_Accidentalidad.csv*, siendo importante mencionar que allí están recopiladas todas las tablas, aunque el nombre refiere al primer archivo de la carpeta.

Para que estas tablas se pudieran simbolizar en el mapa, se ha utilizado la herramienta de geoprocésamiento nombrada como *XY Table To Point*, señalada en un rectángulo amarillo en el modelo, cuyo cometido es crear los puntos de los accidentes de tráfico mediante sus coordenadas, es decir, en cada tabla hay dos campos, uno se corresponde con las coordenadas X, y otro con las coordenadas Y. En función de los cuales se georreferencian los puntos en el mapa, resultado la elipse verde asignada como *c%Name%*, que significa que las capas vectoriales resultantes se van a denominar c seguido por el nombre de origen de la tabla. Y, por último, con la herramienta de geoprocésamiento calificada *Merge*, indicada en el antepenúltimo rectángulo amarillo, se ha procedido a la unión de todas las capas, obteniendo la capa final en formato vectorial llamada *Accidentes_2019_2023*, representada en la última elipse verde del *Model Builder*.

IV. ÁMBITO DE ESTUDIO

El análisis se centra en la ciudad de Madrid, que tiene una superficie de 60.445,51 hectáreas con una población de 3.339.931 habitantes en 2024, lo que supone una densidad de población de 55 habitantes por hectárea (Ayuntamiento de Madrid, 2024b).

El municipio de Madrid está compuesto por 21 distritos y 131 barrios. Y cuenta con un amplio servicio de transporte público como es el Metro de Madrid, la red de Cercanías, el Metro

Ligero, los autobuses urbanos de la EMT, los autobuses interurbanos de compañías privadas, y recientemente se han instalado estaciones de BiciMad en todos los distritos.

A). La red viaria de la ciudad de Madrid

En Madrid, las aceras tienen una superficie de 23.720.568 metros cuadrados y las calzadas 37.108.150 metros cuadrados, sumando entre ambas un total de 60.828.718 metros cuadrados (Ayuntamiento de Madrid, 2024b). Así mismo, en el siguiente mapa se representa la red viaria por tramos del municipio:

Figura 1: Red viaria por tramos de la ciudad de Madrid



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el Centro de Descargas del Organismo Autónomo del Centro Nacional de Información Geográfica

Según el callejero oficial del Ayuntamiento de Madrid, la red viaria madrileña está formada por 9.371 viales vigentes (Geoportal del Ayuntamiento de Madrid, 2019b), los cuales se

tramifican hasta llegar a las 64.384 unidades (Centro de Descargas del Organismo Autónomo del Centro Nacional de Información Geográfica, 2024). Así como, 27.700 subviales vigentes, que se corresponden con los polígonos de las parcelas de la red viaria (Geoportal del Ayuntamiento de Madrid, 2019a).

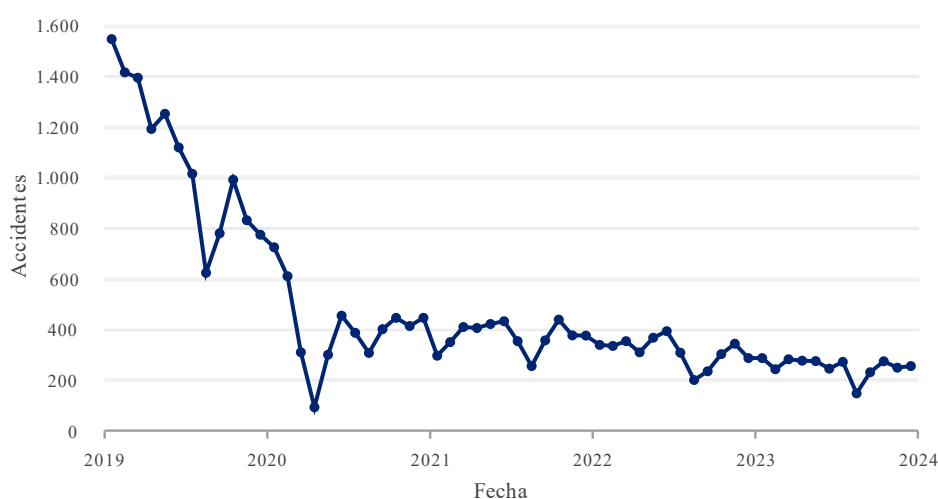
En materia de tráfico, en el año 2022, la intensidad media del tráfico urbano en días laborales en el total fue de 1.848.772 (Ayuntamiento de Madrid, 2024c). Y el parque de vehículos existente es igual a 1.392.864 turismos, lo que implica que en Madrid hay un 1,29 vehículos por cada hogar (Ayuntamiento de Madrid, 2024c).

Por último, con esta capa de viales por tramo de la ciudad de Madrid se ha realizado una unión espacial con la capa de accidentes de tráfico entre 2019 y 2023, para así obtener la capa denominada viales_accidentes, que será con la que se realicen parte de los cálculos. Y concluyendo que, en los 64.384 tramos del viario, entre 2019 y 2023, tuvieron lugar 221.786 accidentes de tráfico.

B). Evolución temporal de los accidentes de tráfico en la red viaria de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

En la capa de viales_accidentes se encuentran los campos de fecha y hora de cada uno de los accidentes de tráfico que han tenido lugar en la ciudad de Madrid en el período entre 2019 y 2023, por lo que, ambos campos van a ser utilizados en la realización de los siguientes gráficos de tiempo:

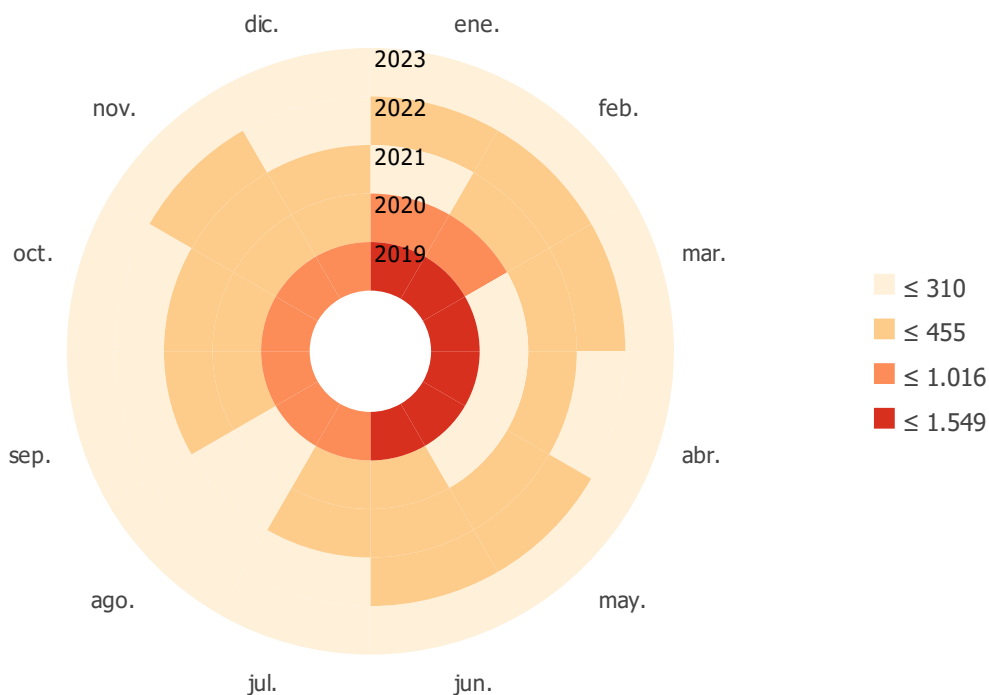
Figura 2: Gráfico de líneas de los accidentes de tráfico en la red viaria de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid y el Centro de Descargas del Organismo Autónomo del Centro Nacional de Información Geográfica

La gráfica muestra la evolución temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023; los cuales se han agrupado por mes para que fuera sencilla su comprensión. Pudiendo comprobarse que la ocurrencia de siniestros en los viales madrileños ha decrecido considerablemente después de la pandemia de COVID-19, dado que los registros más elevados los encontrados a lo largo del año 2019; empezando a decaer a principios de 2020, y cayendo abruptamente durante los meses del confinamiento. Tras ello, los accidentes en 2021 y 2022 se mantuvieron estables, dado que los puntos más bajos se deben a períodos estivales en toda la serie. Y comenzaron a bajar de nuevo durante el año 2023, ubicando aquí los registros más bajos.

Figura 3: Grafico temporal de los accidentes de tráfico en la red viaria de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid y el Centro de Descargas del Organismo Autónomo del Centro Nacional de Información Geográfica

Se indica una tendencia decreciente en materia de accidentalidad viaria en el municipio de Madrid, debido a que el mayor número de accidentes se produjeron entre enero y junio de 2019. Remarcando que cada año de la serie temporal analizada ha registrado una siniestralidad vial menor en comparación con el año anterior.

Particularmente, entre marzo y mayo de 2020, se aprecia un claro descenso, producido por el confinamiento derivado de la pandemia de COVID-19. En menor medida, también se observan las épocas estivales, con una bajada en el recuento de accidentes de tráfico.

V. RESULTADOS

En este apartado se muestran los procesos que se han llevado a cabo para realizar este análisis y los resultados que se han obtenido. Los cuales se dividen en tres apartados principales, con la finalidad de describir los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023 mediante un estudio espacio-temporal.

A). Análisis espacial de los accidentes de tráfico en la red viaria de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Comenzamos este capítulo analizando espacialmente los accidentes de tráfico que han tenido lugar en el viario madrileño. Para ello, inicialmente debemos conocer los datos básicos para poder estudiarlos con más detalle.

1. Estadística descriptiva de las pautas de localización de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Así pues, la estadística básica de los accidentes de tráfico en la red viaria nos indica que la media de siniestros en viales entre 2019 y 2023 fue de 3,44 siniestros por tramo vial y la mediana de 0 siniestros por tramo vial, aunque hay que tener en cuenta que la desviación estándar se sitúa en el 8,13. Esto nos refleja que en la mayoría de los viales se producen pocos accidentes, que se concentran en algunos de ellos, puesto que el número máximo de accidente por vial es de 330 siniestros por tramo vial.

Figura 5: Estadística descriptiva de los accidentes de tráfico en la red viaria de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023

Media	3,44
Mediana	0
Desviación estándar	8,13
Filas	64.384
Recuento	64.384
Nulos	0
Mínimo	0
Máximo	330
Suma	221.786
Oblicuidad	10,10
Curtosis	248,32

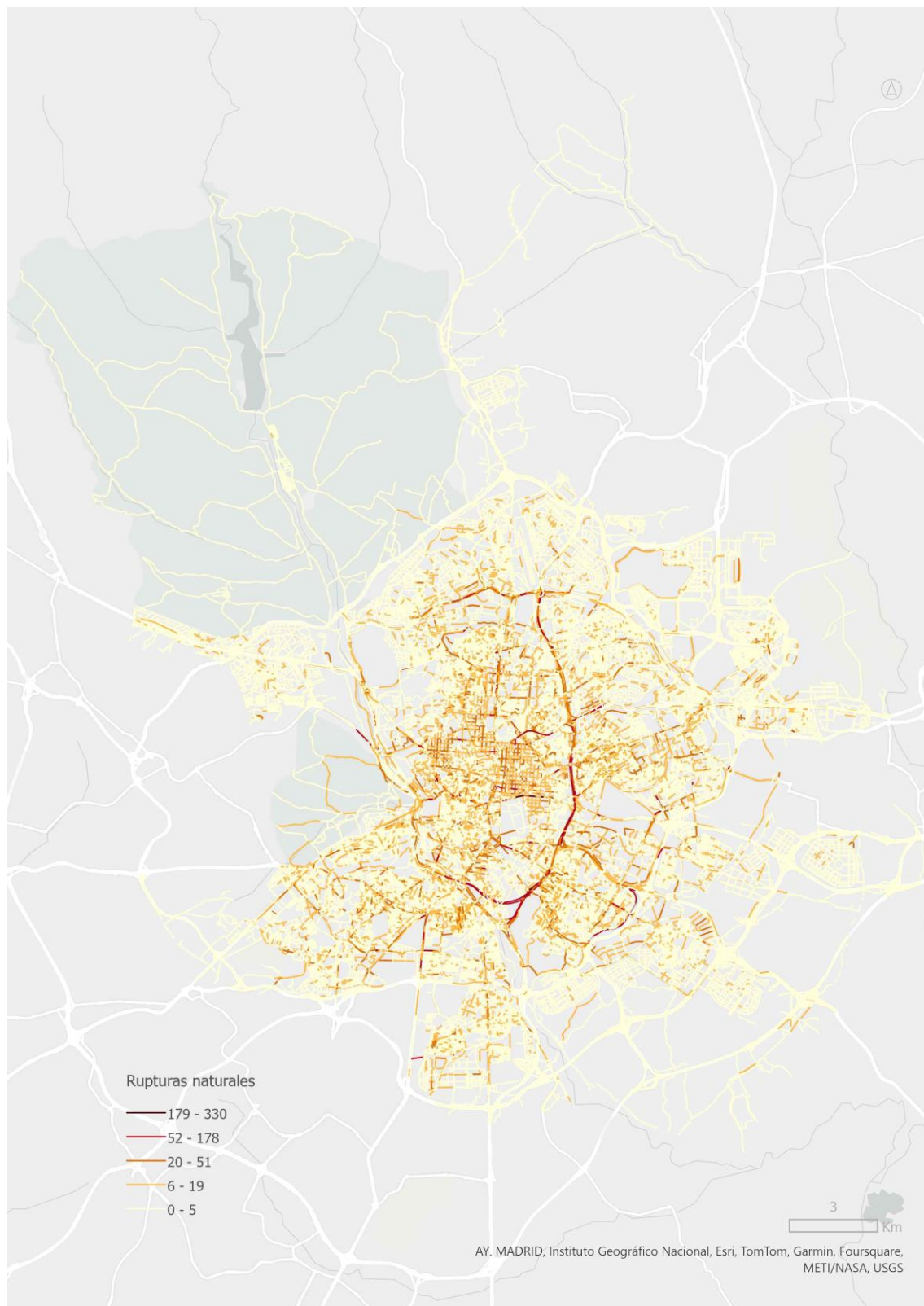
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid y el Centro de Descargas del Organismo Autónomo del Centro Nacional de Información Geográfica

Ratificando que en la gran parte de los tramos viales hubo pocos accidentes, señalando que en el primer cuartil, es decir, el 25% del total de los datos se registraron 0 siniestros por tramo vial. En el segundo cuartil, donde se ubica el 50% de los registros, se identificaron 3 siniestros por tramo vial. Y, en el tercer cuartil, correspondiente con el 75% de la muestra, se contabilizaron 8 siniestros por tramo vial.

Y, por último, el índice de asimetría es de 10,10, lo que significa que en la muestra hay una asimetría a la derecha, es decir, los datos tienen a agruparse a la izquierda de la media; y el índice de Curtosis al ser 248,32 representa que una distribución Platicúrtica.

Ahora que ya conocemos el comportamiento general de nuestros datos, es preciso identificar su distribución espacial de acuerdo con la estadística planteada. De esta manera, utilizando el método de clasificación de datos correspondiente a rupturas naturales se ha elaborado el siguiente mapa:

Figura 6: Clasificación de los accidentes de tráfico en la red viaria de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid y el Centro de Descargas del Organismo Autónomo del Centro Nacional de Información Geográfica

Donde se puede ver que, en la red viaria de la ciudad de Madrid, los accidentes de tráfico entre 2019 y 2023 se concentraron en mayor medida en los viales principales más próximos a la

almendra central del municipio, siendo estos la calle O'Donnell, la autopista A-2, la autovía E-90, la Avenida de América, la calle 30, la calle María de Molina, el camino de Valderribas, la Avenida de los Reyes Católicos o la Avenida del Mediterráneo. Por el contrario, durante el período de estudio no se contabilizaron ningún siniestro en la avenida de la Innovación, en la avenida de Aragón, la avenida del Gran Suroeste, la calle Tembleque o en la carretera M-50, todos ellos situados fuera del anillo de la carretera M-30. Aunque también hay una elevada presencia al suroeste en el distrito de Latina, debido a que aquí encontramos la autopista A-5.

2. Ratio de los accidentes de tráfico en la red viaria por tramos de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Para cerrar este apartado se ha considerado relevante calcular la ratio por kilómetro/año de accidentes de tráfico en los viales por tramos del municipio, puesto que es un indicador preciso para conocer la accidentalidad viaria (Tobaruela Delgado, 2022). Se ha calculado con la siguiente fórmula:

$$\text{Ratio} = \text{!Join_Count!} / 5 * (\text{!Longitud!} / 1000)$$

Donde:

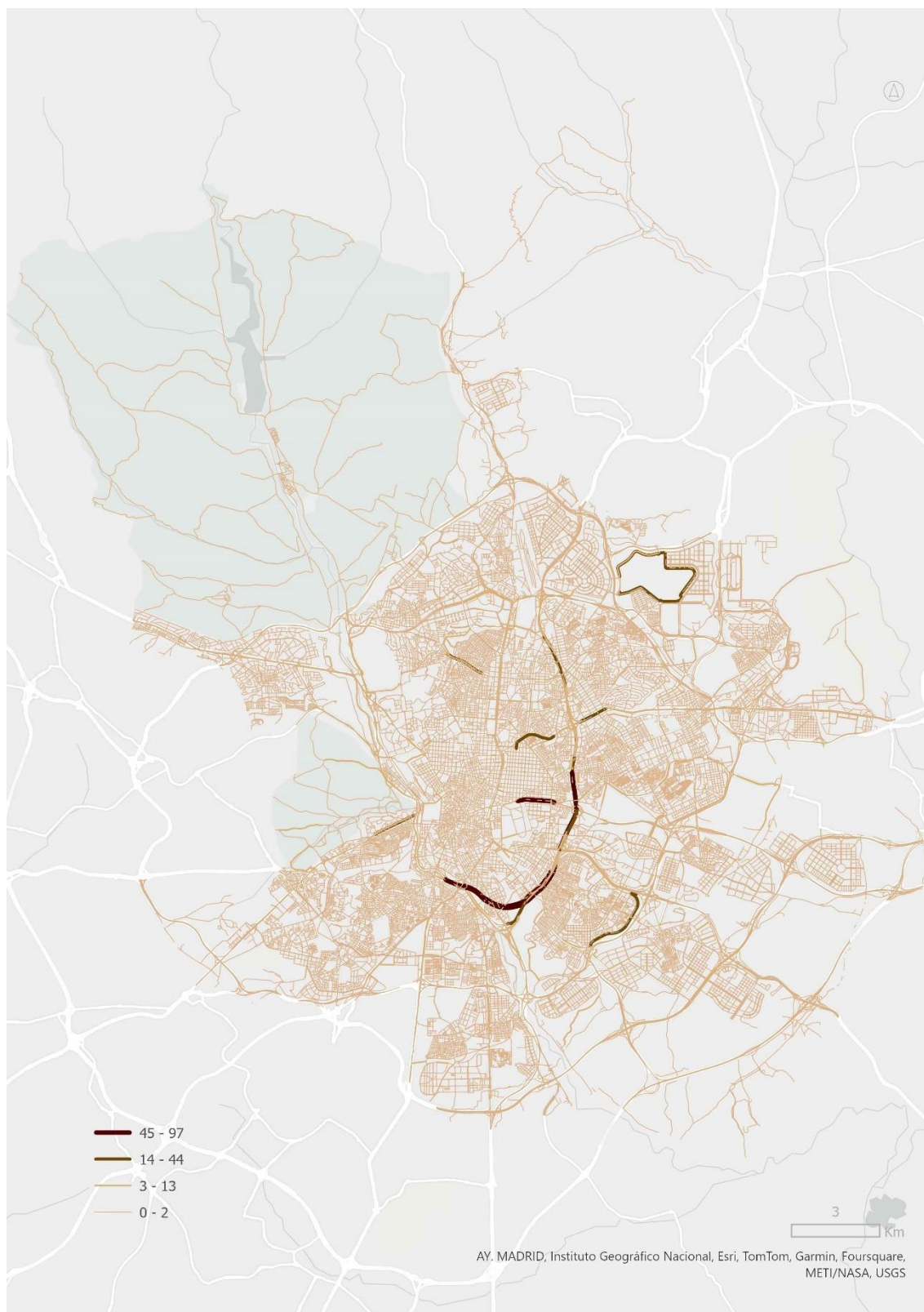
Join_Count → es el recuento de accidentes de tráfico que se han producido en cada tramo de la red viaria de la ciudad de Madrid.

5 → son los años que abarcan la horquilla temporal en análisis, es decir, de 2019 a 2023.

Longitud → es el perímetro de los tramos viales en metros, de ahí que sea necesario dividirlo entre 1.000 para que el resultado final este en kilómetros.

Para realizar este indicador se ha creado un campo nuevo en la tabla de la capa de viales_accidentes y el resultado de esta operación el siguiente mapa:

Figura 7: Ratio de accidentes de tráfico en la red viaria por tramos de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid y el Centro de Descargas del Organismo Autónomo del Centro Nacional de Información Geográfica

Para simbolizarlo se han extruido los viales con el campo de ratio en metros, de ahí que se vean tanto en símbolos proporcionales como extruidos por el recuento de entidades en cada

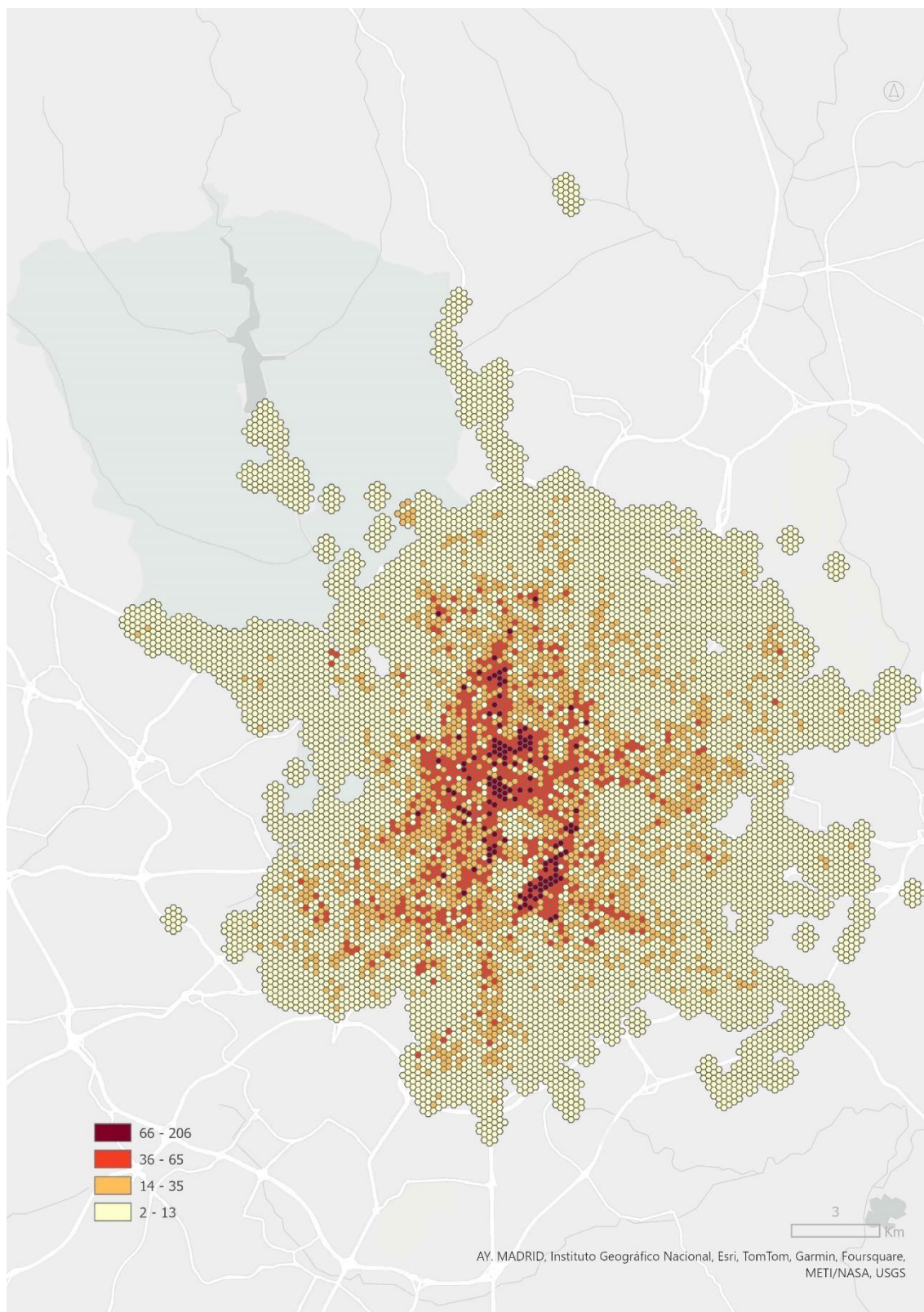
uno de los intervalos que componen la ratio de accidentes de tráfico en la red viaria por tramos de la ciudad de Madrid.

Siendo, la M-30, en los diferentes tramos que la conforman, el vial donde se concentra la siniestralidad viaria madrileña, situándose en el intervalo de entre 79 y 97, aunque al estar muy segmentada se encuentra también en otros intervalos como entre 59 y 77 o 40 y 58. Así mismo, la calle O'Donnell a la altura del número ocho también se emplaza en el intervalo superior, con una ratio de 88 accidentes de tráfico por kilómetro/año. En el intervalo entre 20 y 39 accidentes de tráfico por kilómetro/año se ubican viales como la Calle 30, la Calle Sor Angela de la Cruz, la Autovía A-5, la Autovía A-2, la Autopista E-90 o la Avenida de América. Y, por último, en el intervalo más bajo, encontramos viales como la Avenida de las Suertes, la carretera M-40, la calle Gran Vía, la carretera A-3 o la carretera M-603, con una densidad entre 0 y 19 accidentes de tráfico por kilómetro/año.

3. Cálculo de la densidad de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Con la herramienta Calcular densidad de la caja de herramientas de Geoanalytics Desktop, se ha calculado la densidad de los puntos referentes a los accidentes de tráfico entre 2019 y 2023, con la finalidad de corroborar la distribución espacial de los mismos (Esri, 2023e). Para realizar este cálculo se ha utilizado un tipo de bin hexagonal de tamaño 200 metros en un vecindario de 400 metros, y además se ha procesado con un intervalo de tiempo de 4 semanas. El resultado se presenta a continuación:

Figura 8: Densidad de los accidentes de tráfico de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid

En este mapa se corrobora la distribución espacial que resultante en los índices anteriores, pero aquí particularmente se muestra la densidad de concentración de los accidentes de tráfico en el municipio. Indicando que, con una densidad de accidentes entre 2 y 3, se ubican principalmente

la periferia, aunque también se encuentran dispersos por el municipio. Con una densidad de entre 14 y 35 accidentes se emplazan espacialmente en el entorno de zonas con una baja concentración y rodean a áreas con una presencia más elevada. En el intervalo de una densidad entre 36 y 65 accidentes de tráfico se ubican el entorno de la almendra central, así como el suroeste, noreste y sureste de la ciudad. Y por último, la densidad más alta con datos entre 66 y 206 accidentes de tráfico se halla, como decíamos antes, en la almendra central y sus viales aledaños, los cuales conectan la ciudad, de ahí que al tener una mayor intensidad, densidad y velocidad, la accidentalidad viaria sea considerable (López Maldonado et al., 2019).

4. Indicadores generales de las pautas de localización de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Para analizar espacialmente los accidentes de tráfico, previamente es necesario conocer si se encuentran agrupados o dispersos en la red viaria madrileña.

Índice de Autocorrelación espacial (I de Moran Global)

Este indicador calcula la autocorrelación espacial fundamentada en la ubicación y los valores de los datos paralelamente, con la intención de valorar si la muestra se encuentra agrupada, dispersa o aleatoria (Esri, 2023d).

Índice de Clustering alto/bajo (G general de Getis-Ord)

Mide el grado de agrupamiento de los valores altos o bajos de los datos analizados. Es una estadística inferencial, es decir, se basa en la hipótesis nula de los resultados estudiados. Por lo que, tiene como premisa que no hay agrupaciones espaciales en los valores de las entidades (Esri, 2023e).

En estos gráficos están representados los resultados obtenidos utilizando la ratio de accidentes de tráfico por kilómetro/año en la red viaria:

Figura 9: Índice de Clustering alto/bajo (G general de Getis-Ord)

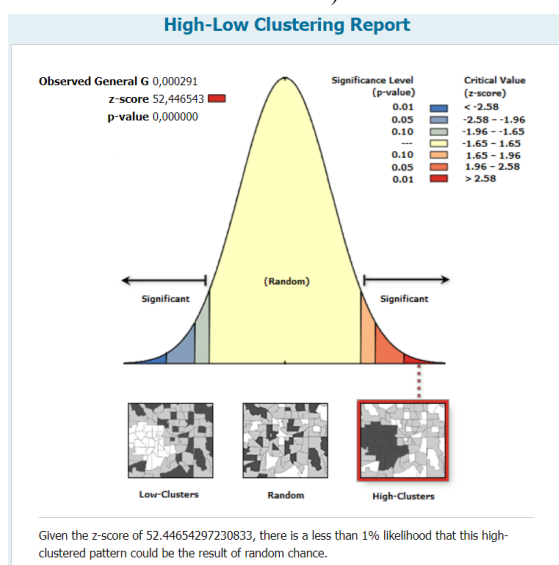
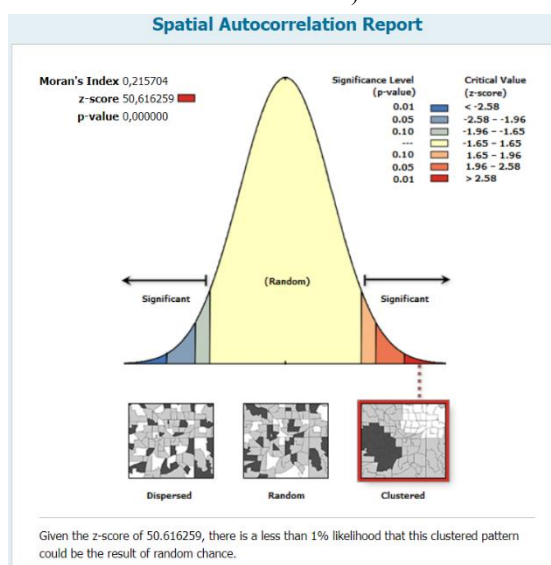


Figura 10: Índice de Autocorrelación espacial (I de Moran Global)



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid

Además, se ha conceptualizado las relaciones espaciales con la distancia inversa. Y las distancias están calculadas con el método *Manhattan*, para que así se realizará teniendo en cuenta las manzanas del entramado urbano de la ciudad (Esri, 2023e).

Comenzando, con el índice de Moran Global, la estadística nos muestra que los datos se encuentran agrupados debido a que tienen un valor P, que se refiere a la probabilidad de 0, y una puntuación z, referente a las desviaciones estándar de 202,19. Por lo tanto, al ser la puntuación z mayor de 2,58 y el valor P menor a 0,01, los datos están agrupados con un nivel de confianza del 99% (Esri, 2023p).

Y siguiendo con el índice de Getis Ord Global, la estadística nos indica que nuestra muestra está altamente agrupada, puesto que el valor P de probabilidad es de 0 y la puntuación z de desviaciones estándar es de 191,60. De esta manera, la puntuación z es superior a 2,58 y el valor P es menor de 0,01, los datos están altamente agrupados con un nivel de confianza del 99% (Esri, 2023p).

5. Identificación espacial de las pautas de localización de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

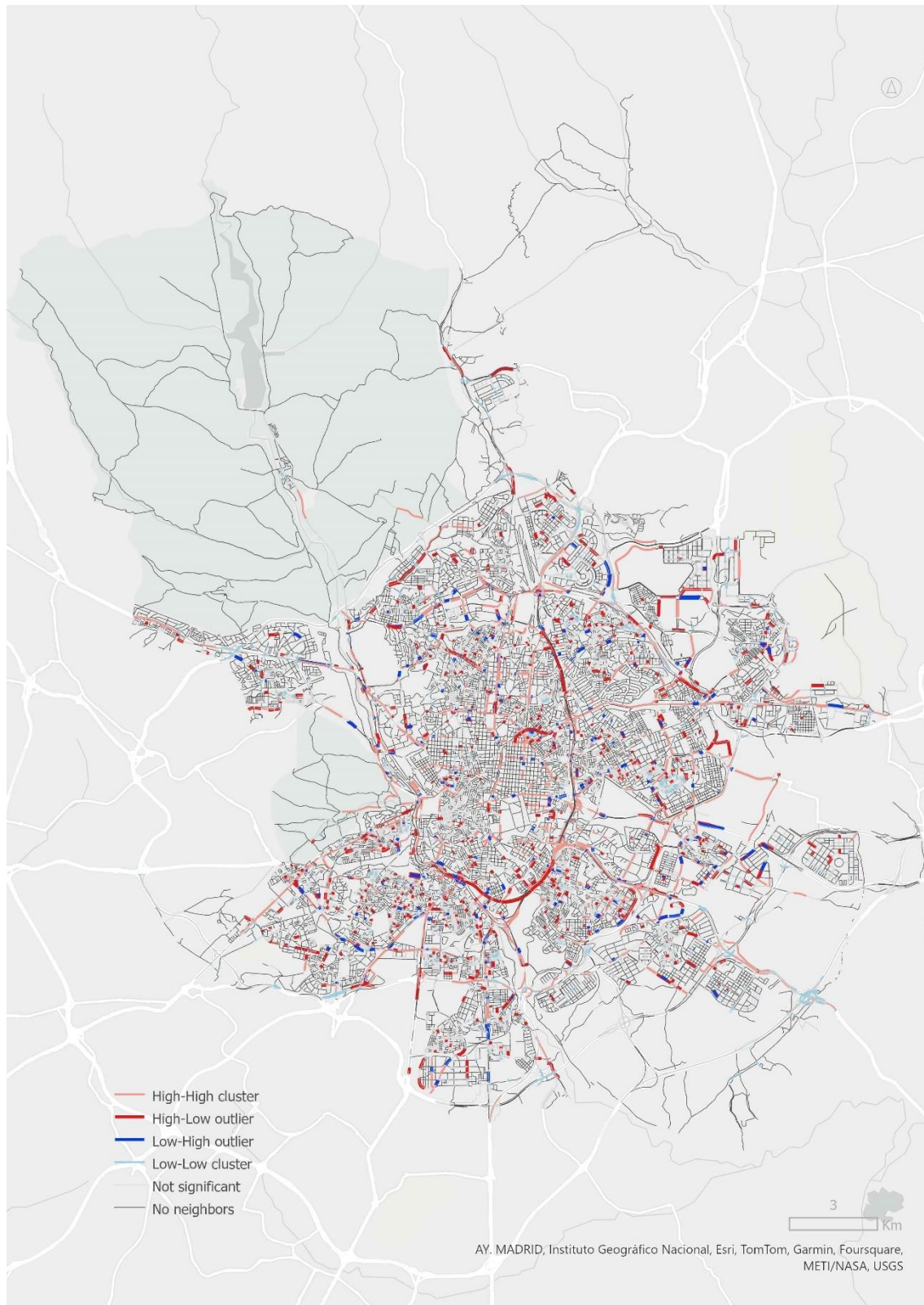
Ahora que ya sabemos que los datos que se están analizando están agrupados espacialmente en la ciudad de Madrid, debemos representarlos gráficamente. Para lo cual vamos a utilizar los índices de Moran y Getis Ord Local.

En ambos índices, se han conceptualizado las relaciones espaciales con la distancia inversa. Y las distancias están calculadas con el método *Manhattan*, para así se realizará teniendo en cuenta las manzanas del entramado urbano de la ciudad (Esri, 2023a). Así mismo, se ha utilizado la ratio de accidentes de tráfico por kilómetro/año en la red viaria como campo de entrada.

Análisis de clúster y de valor atípico (I Anselin local de Moran)

A partir del campo de entrada de los accidentes de tráfico entre 2019 y 2023, la herramienta calcula los clústeres de las entidades en función de si sus valores son altos o bajos, así como los valores atípicos. Y esto lo hace mediante el valor I de Moran Local, el pseudovalor P y la puntuación z (Esri, 2023a). Dando como resultado el siguiente mapa:

Figura 11: Análisis de clúster y de valor atípico (I Anselin local de Moran) de la ratio los accidentes de tráfico de la red viaria de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.



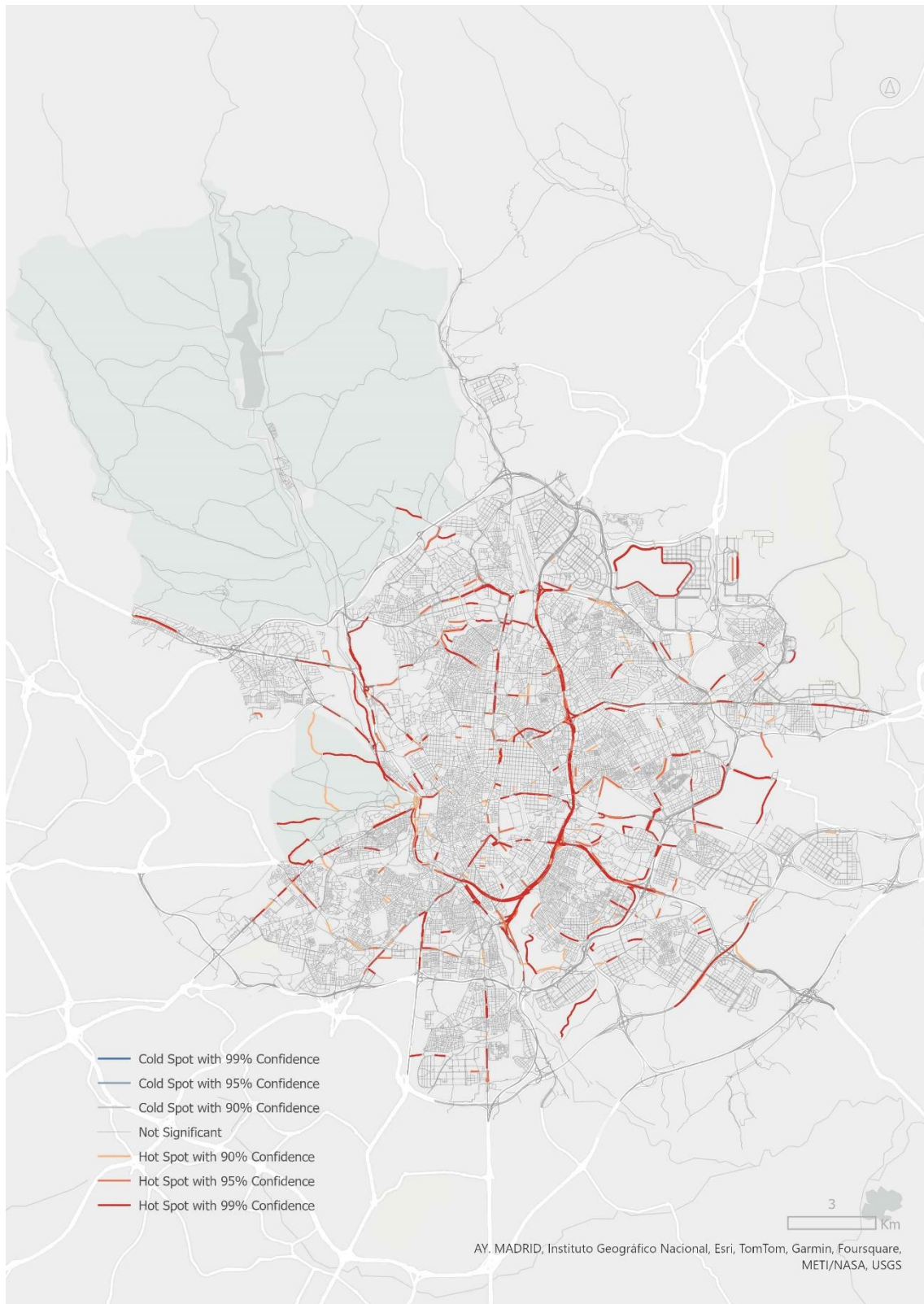
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid y el Centro de Descargas del Organismo Autónomo del Centro Nacional de Información Geográfica

Aquí se puede ver que dentro de la almendra central se hallan los clústeres alto-alto, simbolizados en rojo claro, encontrándolos solo en esta zona de la ciudad, debido a que son valores más altos y están rodeados por valores altos en todos los casos. A su vez, en el entorno de estos clústeres se ubican los simbolizados azul oscuros, que se refieren a valores bajos en el entorno de los altos. Además, en los viales próximos a las arterias periféricas de la ciudad se emplazan clústeres altos en áreas de valores bajos, representados en rojo brillante. Y, en azul claro se presentan los viales bajos en zonas de valores bajos. Por último, en este mapa también se muestran valores no significantes o sin vecindario.

Análisis de puntos calientes (G_i^* de Getis-Ord)

Esta herramienta identifica clústeres espaciales que son estadísticamente significativamente tanto en los valores altos, que se representan como puntos calientes, como valores bajos, siendo estos los valores fríos. Todo ello en función de la puntuación z de desviaciones estándar y el valor P de probabilidad (Esri, 2023c). Obteniendo como salida el siguiente mapa:

Figura 12: Análisis de puntos calientes (Gi* de Getis-Ord) de la ratio los accidentes de tráfico en la red viaria de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid y el Centro de Descargas del Organismo Autónomo del Centro Nacional de Información Geográfica

Donde se puede ver que no se han creado ninguno de los clústeres de la categoría de valores bajos, es decir, no se han identificado puntos fríos con valores de confianza de 90%, 95% y 99%. Por el contrario, en relación con los valores altos sí se han identificado clústeres en todas las categorías, viéndose en el mapa en naranja claro los puntos calientes con un nivel de confianza del 90%, que se ubican en pequeños tramos viales del centro de la ciudad; en naranja, se distinguen los puntos calientes con un nivel de confianza del 95%, situados en viales medios del interior de la almendra central, así como los más próximos a estos en el suroeste y sureste del municipio; y por último, en rojo se identifica la almendra central, con la M-30 como máximo exponente, aunque también aquí se hallan las principales autovías de la ciudad, como la A-5. Además, en gris claro se observan los valores que no significantes a la hora de clasificar los diferentes clústeres.

Por último, es importante señalar que tanto el índice de Moran Local como el índice de Getis Ord Local identifican con claridad las pautas de localización de los accidentes de tráfico entre 2019 y 2023, que en ambos casos se sitúan en la almendra central y su entorno, pero también en las autovías del sureste y suroeste de la ciudad de Madrid.

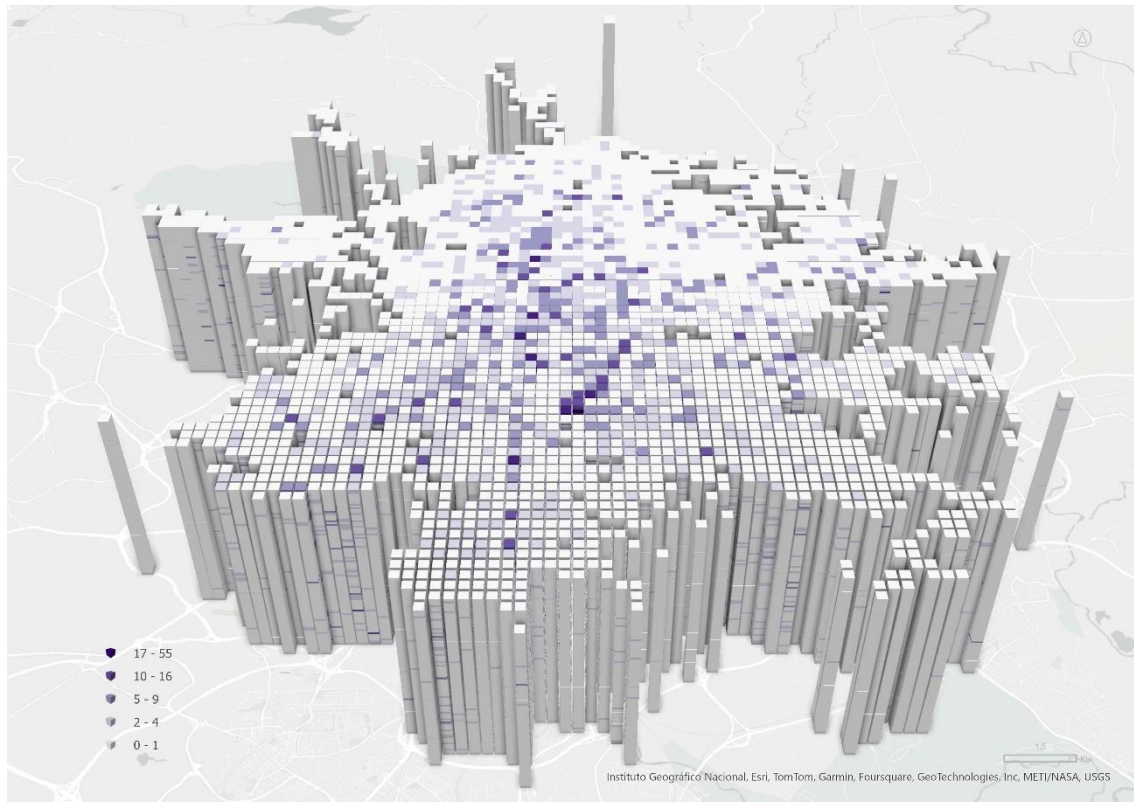
B). Estudio de patrones espacio-temporales de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Una vez analizado espacialmente los accidentes de tráfico entre 2019 y 2023, utilizando los campos que tenemos disponibles en la capa que hemos creado referentes a fecha y horas de los mismo, se va a realizar con diversas herramientas a hacer un análisis espacio-temporal.

1. Elaboración del cubo 3D espacio-temporal de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Con la herramienta de crear cubo espacio-temporal por agregación de puntos, poniendo en el apartado de tiempo, el campo de la capa de Accidentes_2019_2023 llamado fecha y agregándolos por el tipo de cuadrícula de red (Esri, 2023i). El resultado de esta herramienta es un cubo 3D, pero es necesario utilizar utilizar otra herramienta para visualizarlo. Dicha herramienta se llama visualizar cubo espacio temporal en 3D, poniendo en la variable del cubo el recuento de entidades y en el tema de visualización el valor (Esri, 2023q). Siendo el siguiente el siguiente mapa el resultado de salida:

Figura 13: Cubo 3D espacio-temporal de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid

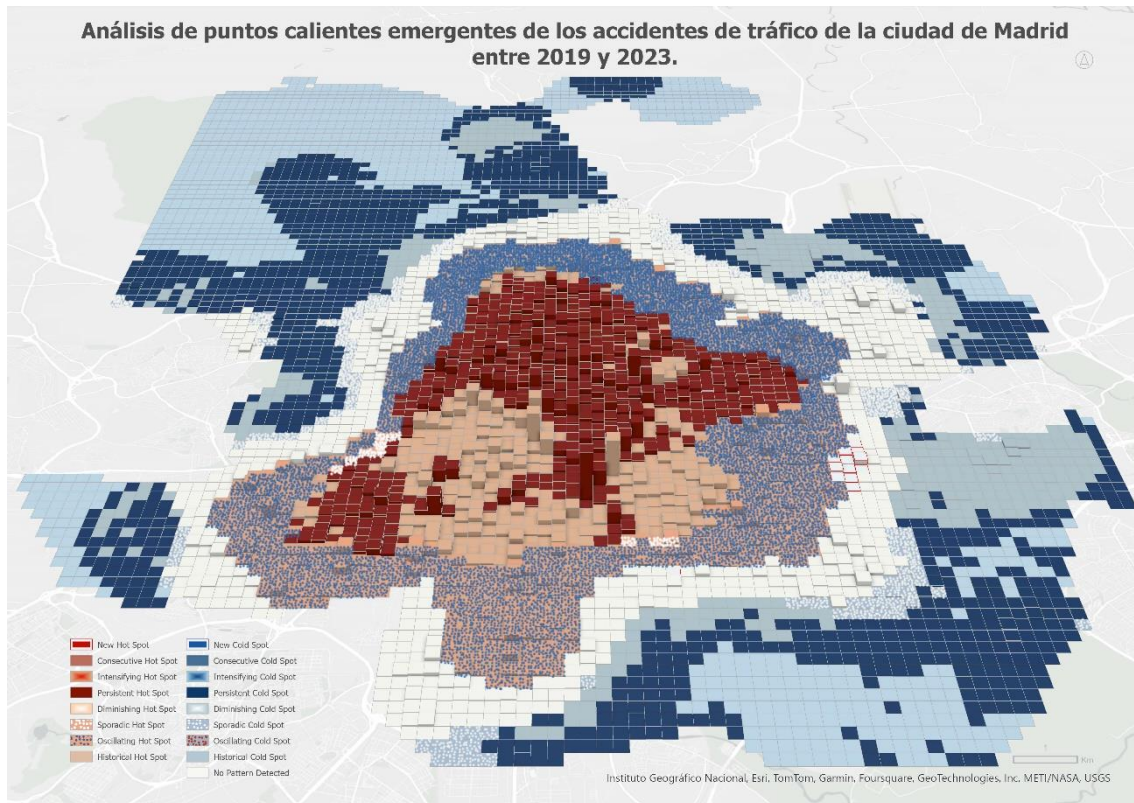
Se puede ver como todas las entidades están extruidas a la misma altura pero están representadas con diferentes colores, conformando así el cubo 3D espacio-temporal. Donde se distingue que los valores más elevados se sitúan en el centro de la ciudad y suroeste de la misma. Siendo importante mencionar que cada fila de cubos se va superponiendo como se puede en algunas de las columnas ubicadas a la izquierda del mapa, viéndose varios colores de la graduación de valores en una sola.

Este cubo 3D espacial-temporal es la base necesaria para hacer los siguientes análisis, ya que dentro de la caja de herramientas de minería de patrones en espacio-tiempo, tanto en el conjunto de herramientas de análisis de patrones como en el conjunto de herramientas de previsión de serie temporal son la capa de entrada de los diferentes procesos (Esri, 2023j).

2. Análisis de puntos calientes emergentes de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Esta herramienta de análisis de puntos calientes emergentes también se encuentra dentro de la caja de herramientas de minería de patrones en espacio-tiempo (Esri, 2023b). Sirve para determinar tendencias en la agrupación del recuento de los accidentes de tráfico entre 2019 y 2023. El resultado se categoriza en puntos calientes y fríos nuevos, consecutivos, en aumento, persistentes, en disminución, esporádicos, oscilantes e históricos (Esri, 2023b); como se puede ver en el siguiente mapa:

Figura 14: Análisis de puntos calientes emergentes de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid

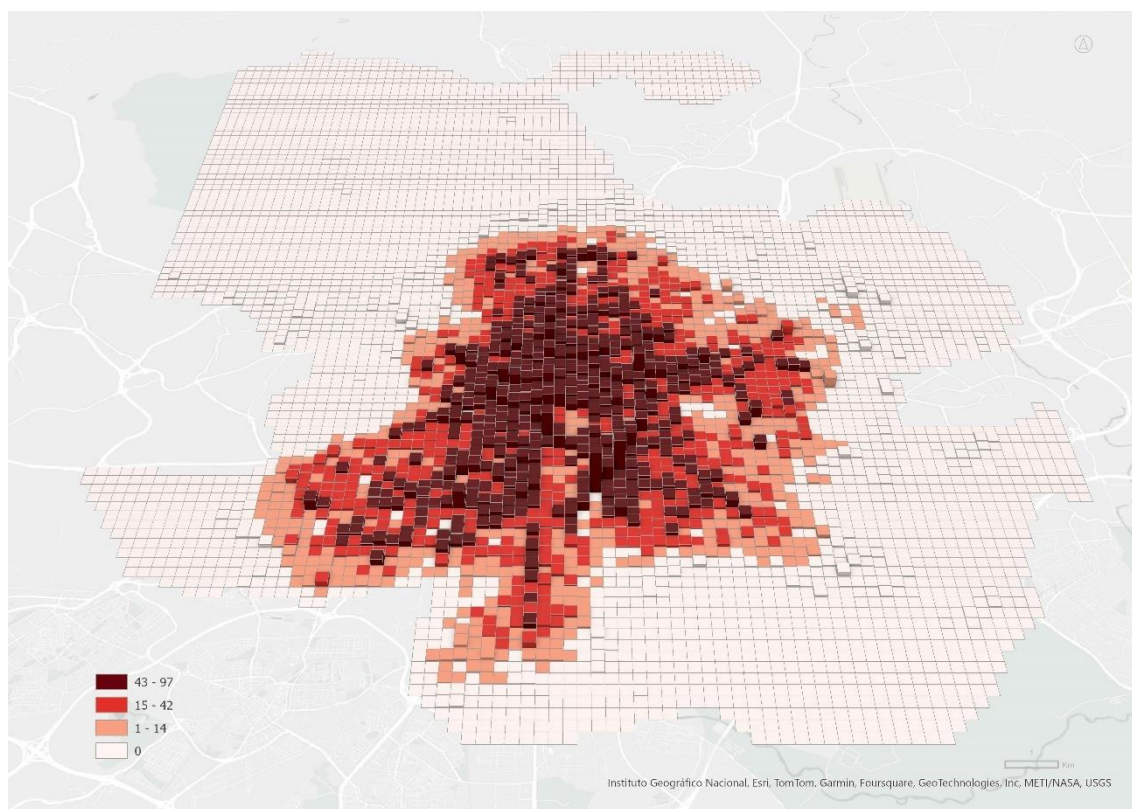
Se puede ver como el centro de la ciudad de Madrid se sitúa dentro de la categoría de punto caliente persistente e histórico de accidentes de tráfico entre 2019 y 2023. Estando ambos rodeados por la categoría de punto caliente oscilante, que significa que en algún momento ha sido un punto frío significativo pero que ahora estadísticamente es un punto caliente significativo. En el entorno de estos valores se ubican, al este nuevos puntos calientes; al norte, algunos puntos calientes consecutivos; y en la mayor parte de este anillo no se han detectado ningún patrón. Y en la periferia se emplazan tanto puntos fríos persistentes como históricos; minoritariamente en esta zona también se observan puntos fríos esporádicos (Esri, 2023h).

3. Análisis de valores atípicos locales de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

La herramienta de análisis de valores atípicos locales igual que las anteriores se encuentra dentro de caja de herramientas de minería de patrones en espacio-tiempo (Esri, 2023j). Es una implementación del índice de Análisis de clúster y de valor atípico (I Anselin local de Moran) teniendo en cuenta el cubo espacio-temporal. Por lo que, su función es hallar clústeres y valores atípicos dentro de los valores analizados. Los siguientes mapas son los resultados que se ha obtenido al recorrerla:

Porcentaje de clústeres Altos-Altos:

Figura 15: Análisis de valores atípicos locales identificando el porcentaje de clústeres Altos-Altos de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

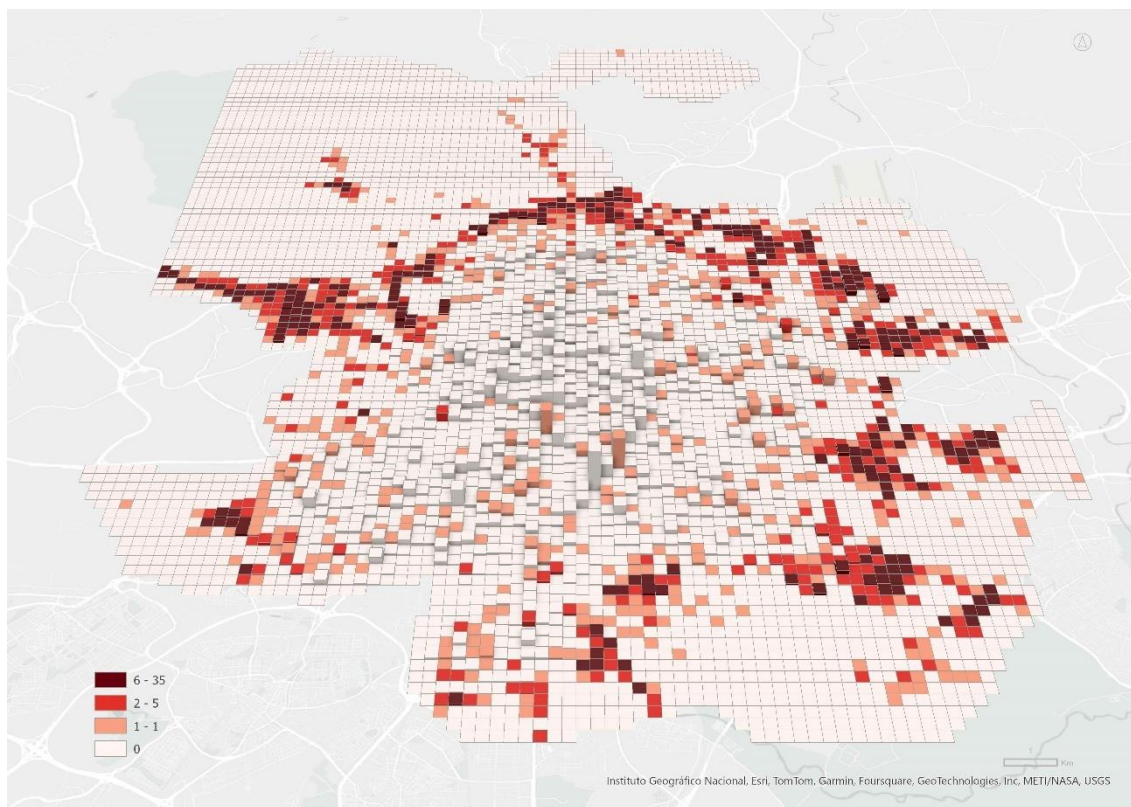


Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid

Puede comprobarse como los clústeres Altos-Altos se concentran en la almendra central y viales de acceso, llegando a situarse entre el 43% y 97% de la ocurrencia de los accidentes de tráfico. Además, se distingue con claridad un anillo que engloba a los valores más elevados, donde se ubican los viales que enlazan el municipio o con municipios colindantes, abarcando una horquilla entre el 1% y el 42% de la presencia de la accidentalidad viaria. Concluyendo que la siniestralidad vial está fuertemente delimitada en el municipio por sus principales arterias conectoras (Esri, 2023g).

Porcentaje de valores atípicos locales Altos- Bajos:

Figura 16: Análisis de valores atípicos locales identificando el porcentaje de valores atípicos Altos-Bajos de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

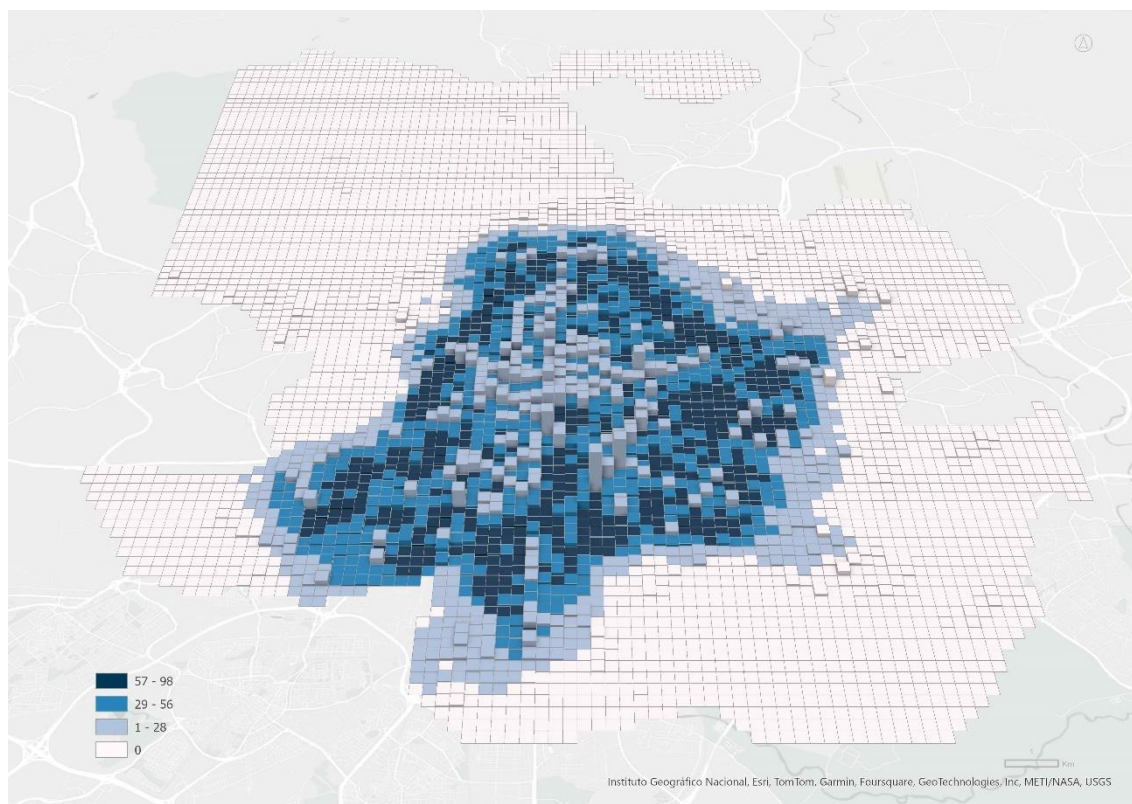


Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid

Este mapa representa el porcentaje de valores atípicos Altos-Bajos, es decir, son valores altos en áreas donde predominan los valores bajos, y esto se debe a que se ubican en la periferia de la ciudad. Aunque en mayor medida, se indica su incidencia, entre un 6% y 35% de accidentalidad viaria, en el norte del municipio, correspondiéndose con la autovía A-6, en el entorno de La Florida y El Plantío; o la autovía A-2, en la zona de Barajas.

Porcentaje de valores atípicos locales Bajos-Altos:

Figura 17: Análisis de valores atípicos locales identificando el porcentaje de valores atípicos Bajos-Altos de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.



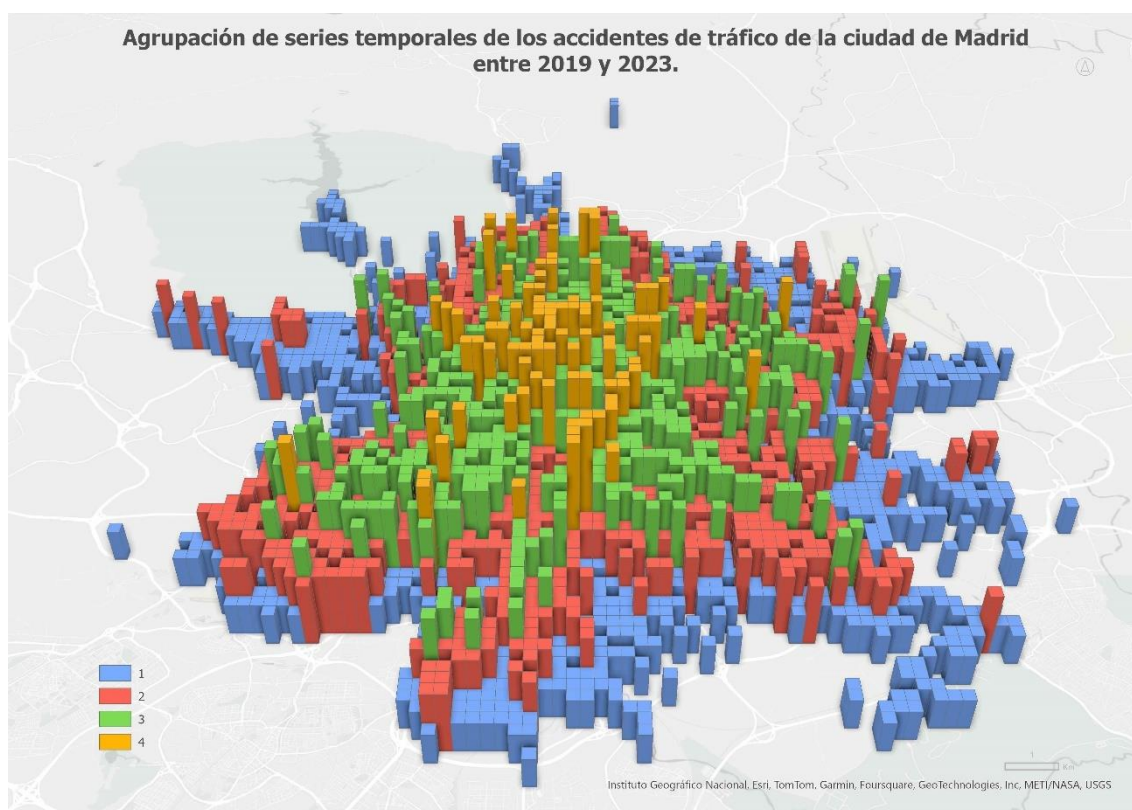
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid

Aquí se observa como el porcentaje de valores atípicos Bajos-Altos se emplazan en áreas que deberían haber registrado valores elevados de accidentalidad viaria, y en cambio, se han identificado valores bajos. Y esto se debe a que estadísticamente, solo han sido significativos los valores atípicos bajos-altos durante el período analizado (Esri, 2023g). Y, concentrándose espacialmente en el anillo exterior del centro y el suroeste de la ciudad.

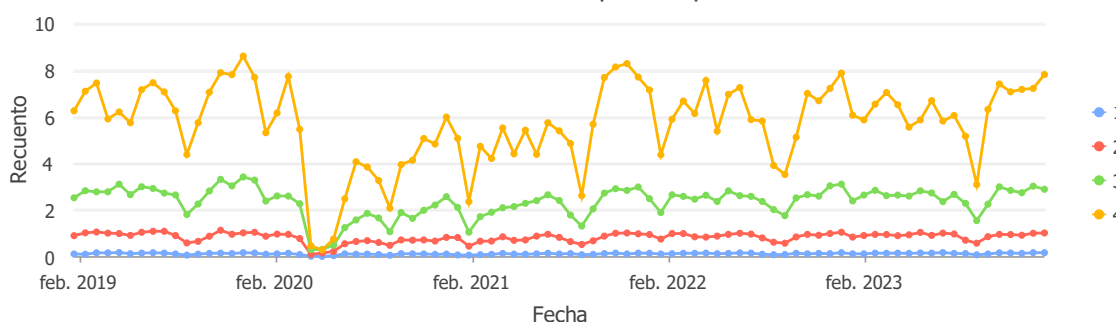
4. Agrupación de series temporales de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Por último, dentro de la caja de herramientas de minería de patrones en espacio-tiempo, se ha utilizado la herramienta de agrupación de series temporales, con la finalidad de repartir la serie temporal de acuerdo con sus características (Esri, 2023f). El siguiente mapa se ha diseñado utilizando la característica de interés de Perfil (*Fourier*), es decir, las series temporales resultantes son similares si tienen patrones parecidos en las localizaciones durante el período de estudio (Esri, 2023f). Además, se ha decidido ignorar el retardo temporal. A continuación se presentan el mapa y su gráfica:

Figura 18: Agrupación de series temporales de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.



Promedio de series temporales por clúster



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid

Donde se diferencian cuatro series temporales dentro del conjunto de la muestra, ya que al recorrer la herramienta se ha puesto como parámetro este número de clústeres. Así mismo, dichos clústeres están extruidos por su categoría en metros.

Apreciándose que la serie temporal 1, mantiene una evolución constante en valores muy bajos durante todo el período. Igualmente, las series temporales 2 y 3, aunque tienen un comportamiento temporal casi análogo, en la agrupación 3 se llegan a recuentos más elevados en comparación con la serie 2. Y, por último, destaca por encima del resto, la serie temporal 4, donde se aprecian los recuentos más elevados, puesto que, se corresponde con las áreas de la ciudad que más accidentes registran, pero en el conjunto de la ciudad supone un número de viales minoritario.

Concluyendo que, las cuatro series temporales resultantes siguen la misma tendencia temporal, y se asemejan con una fidelidad elevada con la distribución espacial de los accidentes de tráfico en el viario madrileño.

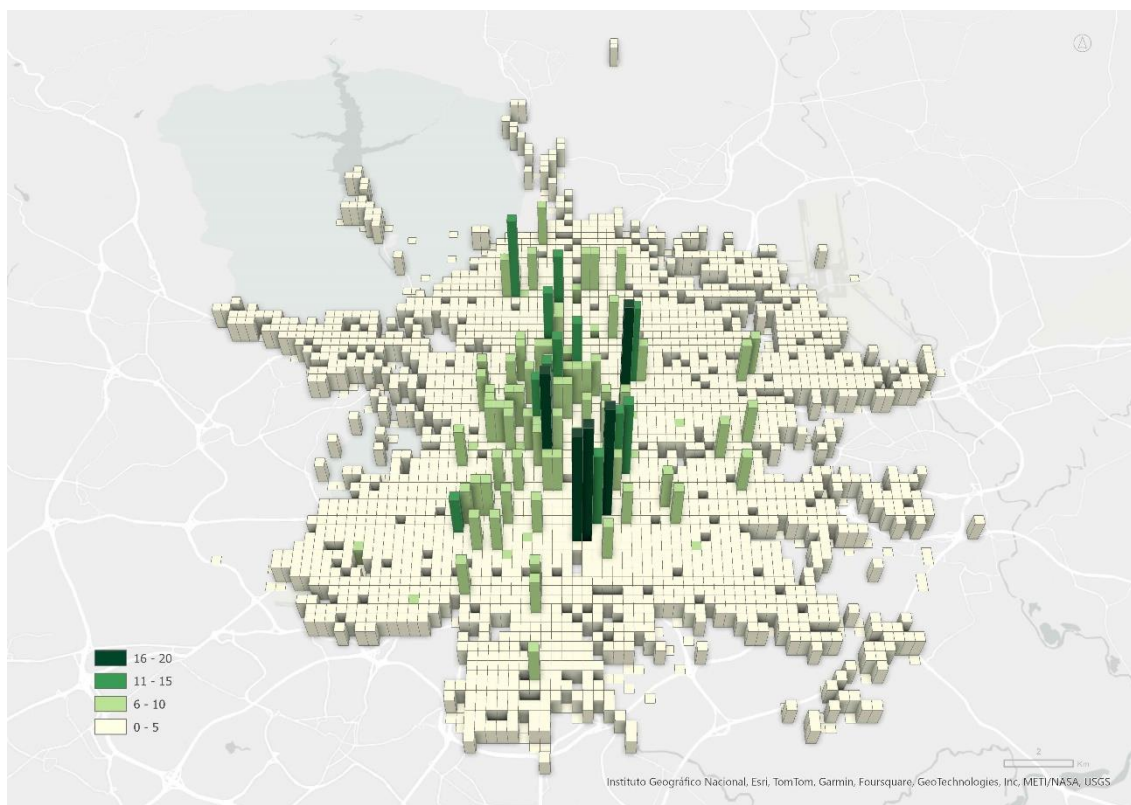
C). Previsión de la serie temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Dado que ya conocemos la distribución espacio-temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023, en este apartado se van a emplear diversas herramientas para prever la serie temporal de los mismos.

1. Previsión de ajuste a la curva de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Esta herramienta predice los valores de localización de los valores dentro del cubo espacio-temporal, ajustando una curva paramétrica en cada una de ellas y extrapolándola en periodos futuros (Esri, 2023n). Las curvas de este proceso pueden ser lineales, parabólicas, en forma de S (Gompertz) o exponenciales (Esri, 2023n); en este caso, se ha utilizado la opción de detectar automáticamente la que fuera óptima para cada valor, así como se ha puesto la categoría de detectar los valores atípicos con un nivel de confianza del 99%. El resultado de salida de esta herramienta es el siguiente mapa:

Figura 19: Previsión de ajuste a la curva de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid

Donde se indica el recuento de previsiones a fecha de 21 de enero de 2024, medido con el índice RMSE de predicción, cuya función es medir el ajuste a la curva de los datos de dentro de la serie temporal. Por lo que, la mayoría de los datos en estudio estarán en el intervalo de entre 0 y 4 accidentes de tráfico; en el intervalo de entre 5 y 8 accidentes de tráfico se ubican entidades situadas en zonas periféricas; en el intervalo de 9 a 12 accidentes, se sitúan en el entorno del centro de la ciudad, pero tienen muy poca entidad. Tanto el intervalo de entre 13 y 16 accidentes como en el de entre 17 y 20 accidentes se observan en la almendra central del municipio.

Figura 20: Tipos de curva empleados en la previsión de ajuste a la curva de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Tipo de curva	Número de ubicaciones	% ubicaciones
Lineal	1.248	45,82
Parabólica	709	26,03
En forma de S (Gompertz)	549	20,15
Exponencial	218	8,00

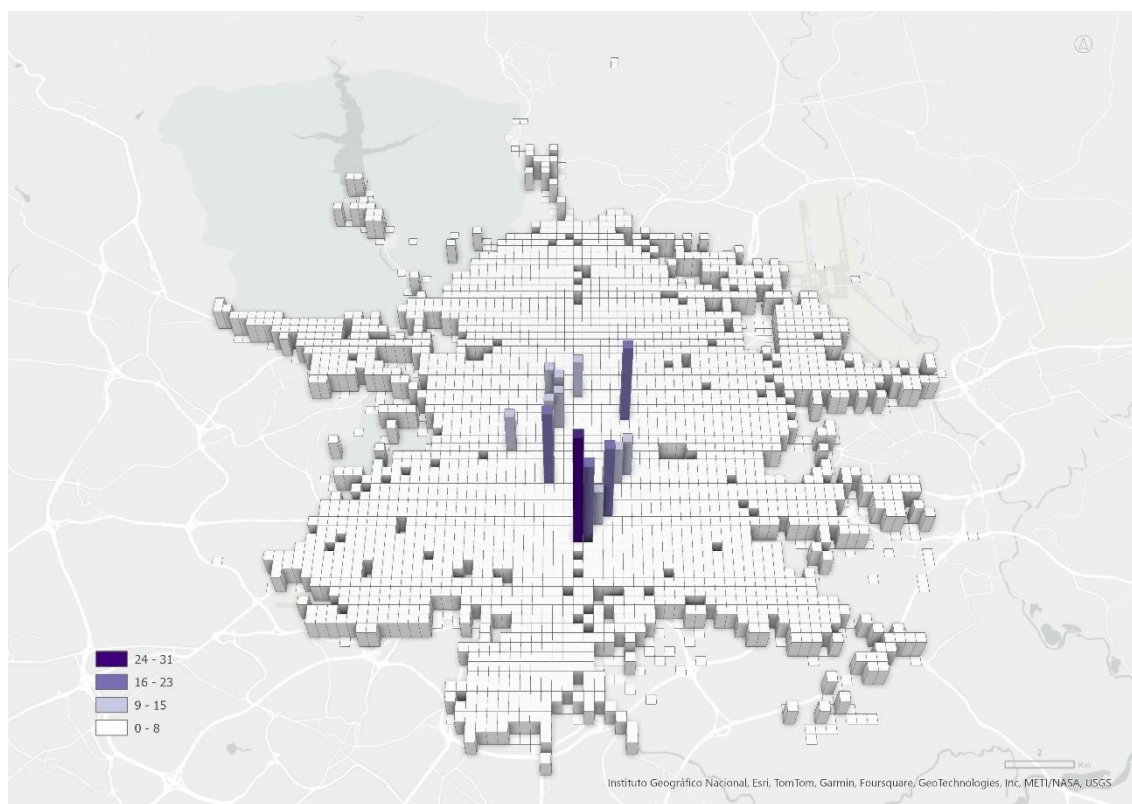
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid

También, viendo las estadísticas de esta herramienta se ha comprobado que 1.248 de estas ubicaciones se ajustan a una curva lineal, es decir, el 45,82% del total de localizaciones; 709 se extrapolan en una curva parabólica, suponiendo el 26,03% de las ubicaciones, 549 ubicaciones se asemejan a una curva en forma de S, representado el 20,15% del total de localizaciones; y, por último, 218 se ajustan a una curva exponencial, siendo el 8% de las ubicaciones.

2. Previsión de suavizado exponencial de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Esta otra herramienta de previsión de la serie temporal, predice los valores en cada una de sus localizaciones dentro del cubo espacio-temporal empleando el método de suavizado exponencial Holt-Winters, el cual divide las series temporales de cada ubicación en componentes estacionales y de tendencia (Esri, 2023o). Resultado con esta herramienta el siguiente mapa:

Figura 21: Previsión de suavizado exponencial de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid

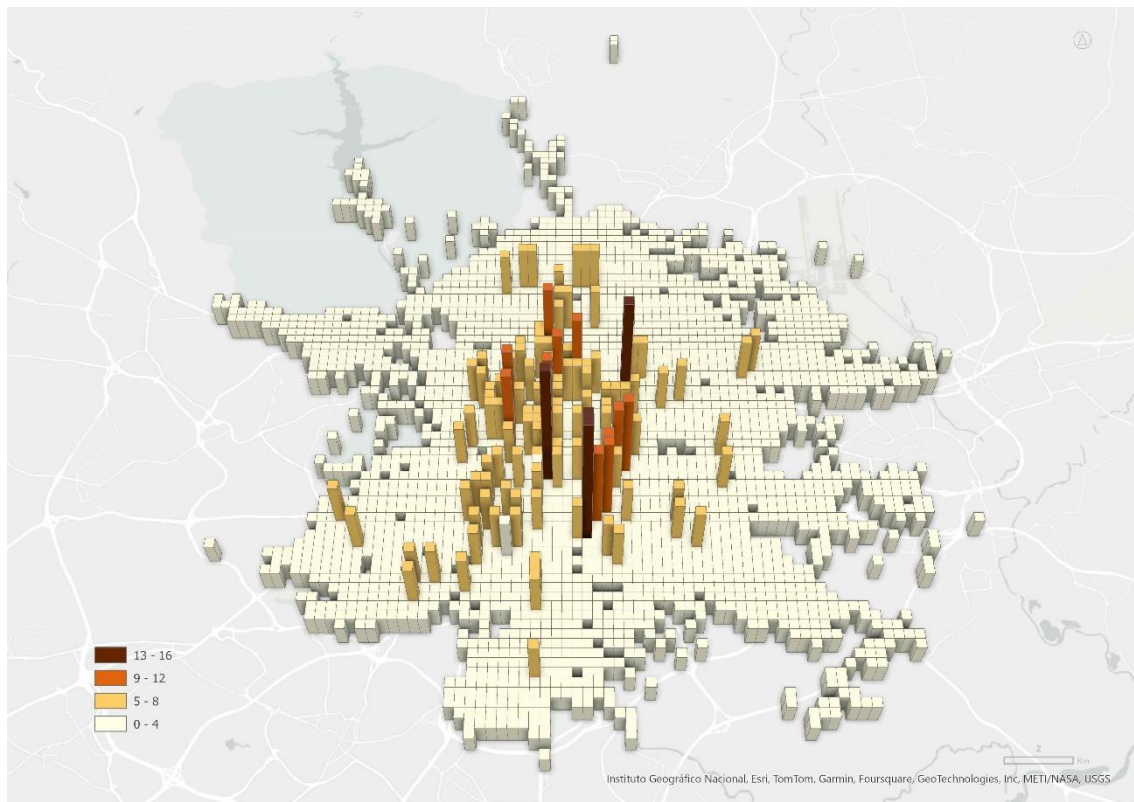
Identificando que en el recuento de previsión a fecha 21 de enero de 2024 la gran parte de la ciudad se encuentra en el intervalo entre 0 y 6 accidentes de tráfico. Y solo en el centro de

la ciudad, concretamente en la almendra central, se sitúan entre 7 y 31, lo que significa que los valores de recuento de accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid en el futuro variarán dentro de este espacio, por lo que, las oscilaciones de accidentalidad viaria no son notables y están muy concretadas en el área ya delimitado.

3. Previsión basada en bosque de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Y para terminar este apartado de previsiones, la herramienta de previsión basada en bosque predice los valores en cada localización dentro del cubo espacio-temporal gracias a una adaptación realizada en el algoritmo de bosque aleatorio de Leo Breiman y Adele Cutler, siendo este un modelo de aprendizaje automático supervisado (Esri, 2023m).

Figura 22: Previsión basada en bosque de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid

Se puede ver como la herramienta ha predicho en función de la ubicación de cada valor de la serie temporal fijada en el cubo 3D espacio-temporal, las futuras localizaciones de accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid. Indicando que, en promedio, en el centro de la ciudad, el recuento de accidentes de tráfico registrados variarán entre 9 y 16 accidentes en comparación con el período en estudio. En el entorno de los mismos, aproximadamente en el eje de las autopistas A-5 y A-2, los valores variarán en torno a 5 y 8 siniestros. Y a sus alrededores, solo fluctuarán entre 2 y 4 accidentes de tráfico en relación con los registros reales de la serie temporal. Mostrando en general la misma tendencia que los valores registrados, por lo que, la concentración de accidentes es un fenómeno fuertemente arraigado en el centro del municipio.

D). Entrenamiento y modelado predictivo con Inteligencia Artificial de la serie temporal de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Para concluir este estudio se van a utilizar dos herramientas para entrenar y modelar los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023. Estando dichas herramientas fundamentadas en el aprendizaje profundo y el *machine learning*.

1. Entrenamiento del modelo predictivo de las series temporales de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Mediante el uso del aprendizaje profundo de la serie temporal con la herramienta de entrenar el modelo de predicción de series temporales se entrena un modelo de predictivo utilizando los datos registrados en cada localización dentro de la horquilla temporal que compone el cubo espacio-temporal (Esri, 2023k). Los valores registrados en la serie temporal pueden tener diversos niveles de estacionalidad y seguir distintas tendencias en contraposición de los modelos tradicionales de previsión de series temporales, ya que, estos dependen de los patrones de estacionalidad y tendencia de los datos (Esri, 2023k).

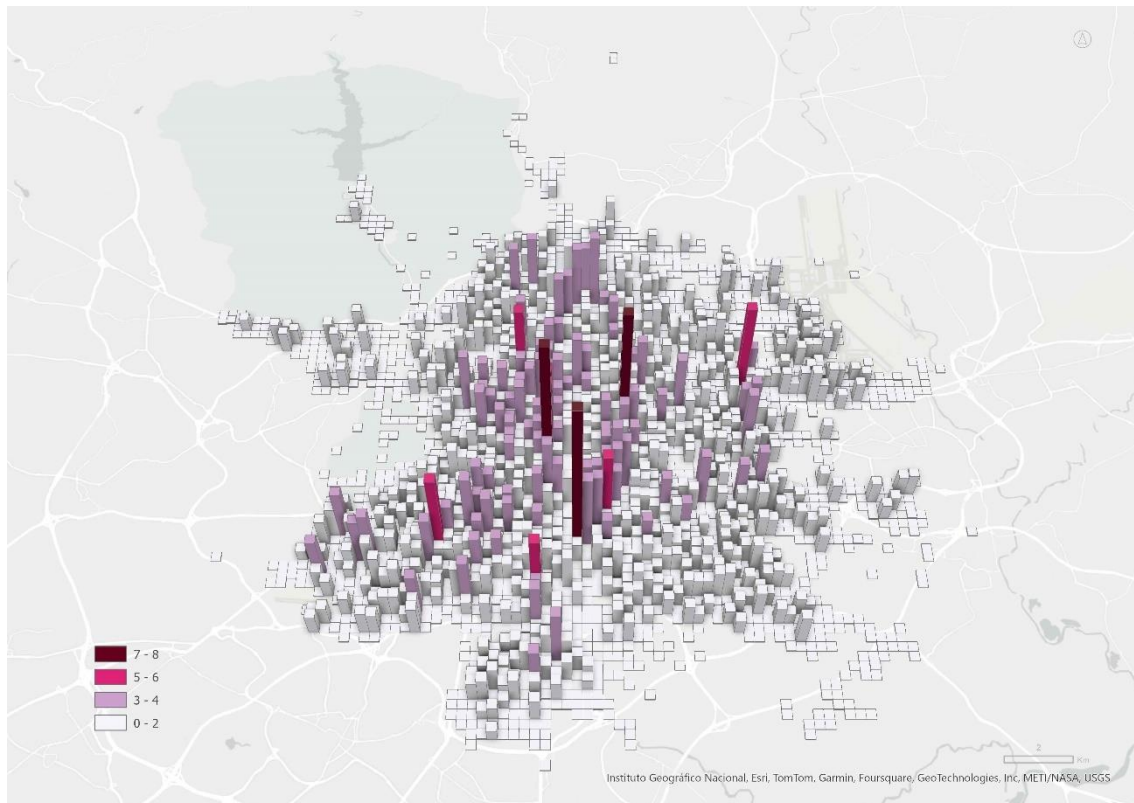
De esta manera, los modelos fundamentados en el aprendizaje profundo abarcan una multiplicidad de conocimientos con una elevada capacidad de procesamiento, pudiendo tener como salida diferentes series temporales (Esri, 2023k). Y se basan en modelos de aprendizaje profundo como la red completamente conectada (FCN), la memoria a corto y largo plazo (LSTM), *Interception Time*, ResNET y ResCNN (Esri, 2023k).

El resultado de esta herramienta es una capa en formato .dlpk, que sirve como capa de entrada en el apartado de definición de modelo de la herramienta de predicción utilizando el modelo de series temporales, la cual se desarrolla en el siguiente apartado del trabajo.

2. Modelo predictivo de las las series temporales de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Para finalizar este estudio, se ha utilizado la herramienta de modelado predictivo con inteligencia artificial, siendo imprescindible la utilización del modelo de series temporales que se elaboró en la herramienta anterior. Cuya función es predecir los valores en cada ubicación dentro del cubo espacio-temporal mediante el modelo de aprendizaje profundo entrenado (Esri, 2023l).

Figura 23: Modelo predictivo de las las series temporales de los accidentes de tráfico de la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid

Es importante mencionar que para poder utilizar estas herramientas se ha tenido que instalar el marco de aprendizaje profundo para *Python* en ArcGIS Pro, el cual se puede obtener en la ayuda del conjunto de herramientas de Inteligencia Artificial de series temporales (Esri, 20231).

A diferencia de otros modelos predictivos, esta herramienta al utilizar el aprendizaje profundo, estudia la tendencia y relaciones de los datos de la serie temporal, siendo muy eficaz cuando, como en este caso, son complejas o estacionales (Esri, 20231).

Este modelo predictivo basado en la inteligencia artificial, crea valores futuros en todas la localizaciones que conforman el cubo 3D espacio-temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023. Por lo que, con fecha de 11 de febrero de 2021, en la almendra central de la ciudad se estima un incremento de entre 7 y 8 accidentes más en comparación con los datos reales presentes en la horquilla temporal estudiada. En las principales autopistas madrileñas se muestra un aumento de entre 3 y 4 siniestros. Así mismo, tanto en el entorno de la almendra central como en de las autopistas, se indica un aumento de la siniestralidad de entre 5 y 6 accidentes de tráfico. Concluyendo que en el conjunto del municipio se aprecia un ascenso de la accidentalidad viaria prevista para el primer trimestre de 2024.

VI. CONCLUSIONES

El presente trabajo se cierra con la descripción de los resultados que se han obtenido una vez realizados los consecutivos análisis realizados en el mismo.

El **objetivo principal** de este estudio es analizar la distribución espacio-temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023 utilizando las Tecnologías de la Información de Geográfica, la Estadística Espacial y el aprendizaje profundo (*Deep Learning*). El cual se ha desarrollado a partir de los siguiente **objetivos secundarios**:

→ Identificar las pautas de localización de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

En la ciudad de Madrid, entre 2019 y 2023, tuvieron lugar 221.786 accidentes de tráfico, los cuales al principio de la horquilla temporal, en 2019 se registraron los datos más elevados de siniestralidad, en el resto del período continuando con una clara evolución decreciente.

La clasificación por el método de rupturas naturales nos indica que la carretera M-30 es el vial con una mayor concentración de accidentes de tráfico, seguido por la calle O'Donnell, encontrándose ambos en el intervalo de entre 170 y 330 siniestros viales.

El índice de Autocorrelación espacial (I de Moran Global) refleja que los datos en estudio están agrupados, así como, el Índice de Clustering alto/bajo (G general de Getis-Ord), también muestra que los valores están altamente agrupados.

De esta manera, con el análisis de clúster y de valor atípico (I Anselin local de Moran), se aprecia que en el municipio, el clúster alto-alto se ubica exclusivamente en la almendra central, encontrando en sus alrededores valores bajos-altos, debido a que refieren a valores más bajos. Además, en los viales próximos a las arterias periféricas de la ciudad se emplazan clústeres altos en áreas de valores bajos. Y, con el análisis de puntos calientes (G_i^* de Getis-Ord) se confirma que los puntos calientes con un nivel de confianza del 99% se ubican en la almendra central, en autopistas, como la A-5, y en viales secundarios que conectan la ciudad.

→ Cálculo de la densidad y ratio de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Con la finalidad de corroborar la distribución espacial de los mismos, se ha calculado la densidad de accidentes de tráfico, resultado que con una densidad de accidentes entre 2 y 3, se ubican principalmente la periferia. Con una densidad de entre 14 y 35 accidentes se emplazan espacialmente en el entorno de zonas con una baja concentración y rodean a áreas con una presencia más elevada. En el intervalo de una densidad entre 36 y 65 accidentes de tráfico se ubican el entorno de la almendra central, así como el suroeste, noreste y sureste de la ciudad. Y por último, la densidad más alta con datos entre 66 y 206 accidentes de tráfico se halla, como se exponía en los anteriores índices, en la almendra central y sus viales aledaños, los cuales conectan la ciudad, de ahí que al tener una mayor intensidad, densidad y velocidad, la accidentalidad viaria es considerable en comparación con el conjunto del municipio.

Y, la ratio de accidentes de tráfico, calculada en kilómetros/año, indica que con una densidad entre 0 y 19 accidentes de tráfico por kilómetro/año se ubican viales como la Avenida de las Suertes, la carretera M-40, la calle Gran Vía, la carretera A-3 o la carretera M-603. En el intervalo entre 20 y 39 accidentes de tráfico por kilómetro/año se encuentran viales como la Calle 30, la Calle Sor Angela de la Cruz, la Autovía A-5, la Autovía A-2, la Autopista E-90 o la Avenida

de América. Siendo, la M-30, en los diferentes tramos que la conforman, el vial donde se concentra la siniestralidad viaria madrileña, situándose en el intervalo de entre 79 y 97, aunque al estar muy segmentada se encuentra también en otros intervalos como entre 59 y 77 o 40 y 58.

→ Estudio de los patrones espacio-temporales de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

La creación y visualización del cubo 3D espacial-temporal ha sido la base necesaria para hacer los diferentes análisis.

La herramienta de detección de puntos de cambio refleja los cambios en el valor medio del recuento de los accidentes de tráfico entre 2019 y 2023, donde se identifican cinco clases en las que se agrupan los valores mediante la distribución de *Poisson*. Observándose que en el intervalo de 0 puntos de cambio se identifican 2.313 valores. En el intervalo de entre 1 y 2 puntos de cambio se identifican 384 valores. En el intervalo de entre 3 y 5 puntos de cambio se identifican 15 valores. En el intervalo de entre 6 y 8 puntos de cambio se identifican 7 valores. Y, por último, solo hay 5 puntos de cambio del total de 2.724 entidades que se encuentran en el intervalo de entre 8 y 12. De esta manera, se puede concluir mencionando que la mayoría de los datos de la muestra estudiada no tienen puntos de cambio, lo que significa que en la mayoría de los datos no se alteran las propiedades estadísticas dentro de la serie temporal.

La herramienta de análisis de puntos calientes emergentes determina las tendencias en la agrupación del recuento de los accidentes de tráfico entre 2019 y 2023. Donde se puede ver que en la periferia se emplazan tanto puntos fríos persistentes como históricos. Así mismo, el centro de la ciudad de Madrid se sitúa dentro de la categoría de punto caliente persistente e histórico de accidentes de tráfico entre 2019 y 2023. Estando estos últimos rodeados por la categoría de punto caliente oscilante, que significa que en algún momento ha sido un punto frío significativo pero que ahora estadísticamente es un punto caliente significativo. Lo que implica que la distribución espacial de los accidentes de tráfico entre 2019 y 2023 se concentran en el centro del municipio y sus alrededores, debido a que aquí se emplazan los valores más elevados en materia de tráfico diario.

La herramienta de análisis de valores atípicos locales tiene la función es hallar clústeres y valores atípicos dentro de los valores analizados. Identificando que en la periferia de la ciudad, se hallan los clústeres que son solo bajos-bajos, debido a que en la horquilla temporal en estudio solo ha sido estadísticamente significativo este valor. Y, en el centro de la ciudad y sus principales arterias, se distinguen clústeres de múltiples tipos, es decir, en este período ha habido oscilaciones entre varios tipos de clústeres y valores atípicos, pudiendo haber sido en algún momento de la serie un clúster alto-alto y en otro un valor atípico alto-bajo. Por lo que, este análisis enfatiza la conclusión de que los accidentes de tráfico se concentran en la almendra central de la ciudad de Madrid porque es ahí donde hay una mayor densidad e intensidad de tráfico diario.

Y, por último, en este apartado, la herramienta de agrupación de series temporales clasifica la serie temporal de acuerdo con sus características. Resultando tres agrupaciones en el conjunto de la muestra, donde en la evolución promedio de cada uno de los clúster en la horquilla temporal analizada, se aprecia que los clústeres 2 y 3 siguen una tendencia más o menos similar, oscilando en los valores entre 0,5 y 1, aproximadamente; en cambio, el clúster 1 mantiene una evolución más variante, encontrando aquí los recuentos más elevados. Pudiendo concluir que a nivel general los valores de la muestra siguen una predisposición análoga a lo largo de los años.

→ Análisis de la previsión de la serie temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

La herramienta de previsión de ajuste a la curva predice los valores de localización de los valores dentro del cubo espacio-temporal, ajustando una curva paramétrica en cada una de ellas y extrapolándola en periodos futuros. Se muestra que el recuento de previsiones a fecha de 21 de enero de 2024, medido con el índice RMSE de predicción, cuya función es medir el ajuste a la curva de los datos de dentro de la serie temporal. La mayoría de los datos en estudio estarán en el intervalo de entre 0 y 4 accidentes de tráfico; en el intervalo de entre 5 y 8 accidentes de tráfico se ubican entidades situadas en zonas periféricas; en el intervalo de 9 a 12 accidentes, se sitúan en el entorno del centro de la ciudad, pero tienen muy poca entidad. Tanto el intervalo de entre 13 y 16 accidentes como en el de entre 17 y 20 accidentes se observan en la almendra central del municipio.

La herramienta de previsión de suavizado exponencial predice los valores en cada una de sus localizaciones dentro del cubo espacio-temporal empleando el método de suavizado exponencial Holt-Winters. En ella se identifica que en el recuento de previsión a fecha 21 de enero de 2024 la gran parte de la ciudad se encuentra en el intervalo entre 0 y 6 accidentes de tráfico. Y solo en el centro de la ciudad, concretamente en la almendra central, se sitúan entre 7 y 31, lo que significa que los valores de recuento de accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid en el futuro variarán dentro de este espacio, por lo tanto, las oscilaciones de accidentalidad viaria no son notables y están muy circunscritas en el área ya delimitado.

Para cerrar este apartado, la herramienta de previsión basada en bosque es un modelo de aprendizaje automático supervisado y predice los valores en cada localización dentro del cubo espacio-temporal gracias a una adaptación realizada en el algoritmo de bosque aleatorio. Donde se indica que, en promedio, en el centro de la ciudad, el recuento de accidentes de tráfico registrados variarán entre 9 y 16 accidentes en comparación con el período en estudio. En el entorno de los mismos, aproximadamente en el eje de las autovías A-5 y A-2, los valores variarán en torno a 5 y 8 siniestros. Y a sus alrededores, solo fluctuarán entre 2 y 4 accidentes de tráfico en relación con los registros reales de la serie temporal. En conclusión, se aprecia la misma tendencia futura que los valores reales registrados, por lo que, la concentración de accidentes es un fenómeno fuertemente arraigado en el centro del municipio.

→ Entrenamiento y modelado predictivo usando Inteligencia Artificial de la serie temporal de los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023.

Con la intención de cerrar este estudio se han a utilizado dos herramientas para entrenar y modelar los accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid entre 2019 y 2023. Con la herramienta de entrenamiento del modelo predictivo de las series temporales se entrena un modelo de predictivo utilizando los datos registrados en cada localización dentro de la horquilla temporal que compone el cubo espacio-temporal, con la singularidad de que usa el aprendizaje profundo para realizarlo. Y la herramienta de modelo predictivo de las las series temporales, predice los valores en cada ubicación dentro del cubo espacio-temporal mediante el modelo de aprendizaje profundo entrenado. De esta manera, con fecha de 11 de febrero de 2021, en las principales autovías madrileñas se muestra un aumento de entre 3 y 4 siniestros. Así mismo, tanto en el entorno de la almendra central como en de las autopistas, se indica un aumento de la siniestralidad de entre 5 y 6 accidentes de tráfico. Y, en la almendra central de la ciudad se estima un incremento de entre 7 y 8 accidentes más en comparación con los datos reales presentes en la horquilla temporal estudiada. Concluyendo que en el conjunto del municipio se aprecia un ascenso de la accidentalidad viaria prevista para el primer trimestre de 2024, aunque emplazándose en las mismas ubicaciones que los valores reales registrados.

VII. REFERENCIAS

- Ali Shafabakhsh, G., Famili, A., & Sadegh Bahadori, M. (2017). GIS-based spatial analysis of urban traffic accidents: Case study in Mashhad, Iran. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 4(3), 290-299. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.05.005>
- ArcGIS for Server. (s. f.). *Acerca de crear aplicaciones SIG web*. ArcGIS Enterprise. Recuperado 29 de abril de 2024, de <https://enterprise.arcgis.com/es/server/10.3/create-web-apps/windows/about-creating-web-gis-applications.htm>
- ArcGIS Hub. (2024, enero 11). *Límites de Comunidades Autónomas (IGN)*. Esri España Contenidos. https://hub.arcgis.com/datasets/e75892d1a49646d8a29705ac6680f981_0/about
- Ayuntamiento de Madrid. (2024a). *Accidentes de tráfico de la Ciudad de Madrid*. Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid. <https://datos.madrid.es/portal/site/egob/menuitem.c05c1f754a33a9fbe4b2e4b284f1a5a0/?vgnextoid=7c2843010d9c3610VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aRCRD&vgnnextfmt=default>
- Ayuntamiento de Madrid. (2024b). *Anuario Estadístico 2023. Territorio y Medio Ambiente*.
- Ayuntamiento de Madrid. (2024c). *Anuario Estadístico 2023. Tráfico y Transportes*.
- Béjar Gladkowski, A. A. (2023). *Análisis predictivo de accidentes de tráfico en la ciudad de Madrid*.
- Cantillo, V., Garcés, P., & Márquez, L. (2016). Factores que influyen en la ocurrencia de accidentes de tránsito en vías urbanas: Un enfoque combinado GIS-Bayesiano empírico. *DYNA (Colombia)*, 83(195), 21-28. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.47229>
- Centro de Descargas del Organismo Autónomo del Centro Nacional de Información Geográfica. (2024, febrero). *Redes de transporte*. Instituto Geográfico Nacional. <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp#>
- Chuvieco, E., Bosque, J., Pons, X., Conesa, C., Santos, J. M., Gutiérrez Puebla, J., Salado, M. J., Martín, M. P., de la Riva, J., Ojeda, J., & Prados, M. J. (2005). ¿Son las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) parte del núcleo de la Geografía? *Boletín de la AGE*, 40, 35-55.
- Cruz Bellas, L. (2017). *Modelos predictivos de accidentes de tráfico en Madrid*.
- Dirección General de la Policía Municipal de Madrid. (2022). *Memoria de siniestralidad vial de la ciudad de Madrid*.
- Esri. (2023a). *Análisis de clúster y de valor atípico (I Anselin local de Moran) (Estadística espacial)*.
- Esri. (2023b). *Análisis de puntos calientes emergentes (Minería de patrones en espacio-tiempo)*. Caja de herramientas de minería de patrones en espacio-tiempo.
- Esri. (2023c). *Análisis de puntos calientes (Gi* de Getis-Ord) (Estadística espacial)*. Conjunto de herramientas de asignación de clústeres.
- Esri. (2023d). *Autocorrelación espacial (I de Moran global) (Estadística espacial)*. Conjunto de herramientas de analizar patrones.

- Esri. (2023e). *Clustering alto/bajo (G general de Getis-Ord) (Estadística espacial)*. Conjunto de herramientas de analizar patrones.
- Esri. (2023f). *Clustering de serie temporal (Minería de patrones en espacio-tiempo)*. Conjunto de herramientas de análisis de patrones en espacio-tiempo.
- Esri. (2023g). *Cómo funciona el análisis de valores atípicos locales*. Conceptos de minería de patrones en espacio-tiempo.
- Esri. (2023h). *Cómo funciona la herramienta Análisis de puntos calientes emergentes*. Conceptos de minería de patrones en espacio-tiempo.
- Esri. (2023i). *Crear cubo de espacio-tiempo agregando puntos (Minería de patrones en espacio-tiempo)*. Caja de herramientas de minería de patrones en espacio-tiempo.
- Esri. (2023j). *Descripción general de la caja de herramientas Minería de patrones en espacio-tiempo*. Herramientas de geoprocesamiento.
- Esri. (2023k). *Entrenar el modelo de previsión de series temporales (GeoAI)*. Conjunto de herramientas de IA de series temporales .
- Esri. (2023l). *Predicción utilizando el modelo de series temporales (GeoAI)*. Conjunto de herramientas de IA de series temporales.
- Esri. (2023m). *Previsión basada en bosque (Minería de patrones en espacio-tiempo)*. Conjunto de herramientas de previsión de serie temporal.
- Esri. (2023n). *Previsión de ajuste de curva (Minería de patrones en espacio-tiempo)*. Conjunto de herramientas de previsión de serie temporal.
- Esri. (2023o). *Previsión de suavizado exponencial (Minería de patrones en espacio-tiempo)*. Conjunto de herramientas de previsión de serie temporal.
- Esri. (2023p). *¿Qué es una puntuación z? ¿Qué es un valor P?* Caja de herramientas de Estadística Espacial.
- Esri. (2023q). *Visualizar cubo de espacio-tiempo en 3D (Minería de patrones en espacio-tiempo)*. Caja de herramientas de visualización de cubo de espacio-tiempo.
- Esri España. (s. f.-a). *Cartografía*. Esri España. Recuperado 27 de abril de 2024, de <https://www.esri.es/es-es/arcgis/productos/mapping>
- Esri España. (s. f.-b). *Productos de la Plataforma de ArcGIS*. Esri España. Recuperado 27 de abril de 2024, de <https://www.esri.es/es-es/arcgis/productos/index>
- Esri España Contenidos. (2023, julio 3). *Puntos kilométricos de España*. Contenidos Esri España. https://opendata.esri.es/datasets/d8854f26fd5c4baab08337ca0f3aff6f_0/explore?location=40.301284%2C-3.811821%2C9.00
- Geoportal del Ayuntamiento de Madrid. (2019a). *Callejero oficial. Subviales vigentes*. Ayuntamiento de Madrid. https://geoportal.madrid.es/IDEAM_WBGEOPORTAL/dataset.iam?id=96a4719d-29f0-11e9-874b-ecb1d752b636
- Geoportal del Ayuntamiento de Madrid. (2019b). *Callejero oficial. Viales vigentes*. Ayuntamiento de Madrid. https://www-2.munimadrid.es/IDEAM_WBGEOPORTAL/dataset.iam?id=f9f72bae-2a01-11e9-874b-ecb1d752b636

- Geoportal del Ayuntamiento de Madrid. (2024). *Límites administrativos*. Ayuntamiento de Madrid. https://geoportal.madrid.es/IDEAM_WBGEOPORTAL/dataset.iam?id=e251898e-4a9c-11eb-9104-dc4a3e8ce33b
- Gómez-Barroso, D., López-Cuadrado, T., Llácer, A., Palmera Suárez, R., & Fernández-Cuenca, R. (2015). Análisis espacial de los accidentes de tráfico con víctimas mortales en carretera en España, 2008-2011. *Gaceta Sanitaria*, 29, 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2015.02.009>
- López Maldonado, G., Pérez Zuriaga, A. M., & Camacho Torregrosa, Fco. J. (2019). *Variables Fundamentales del Tráfico: Intensidad, Velocidad y Densidad*.
- Luna González, L., & Chías Becerril, L. (1999). El uso de SIG en el análisis de la distribución de accidentes en carreteras: el caso de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas*, 40, 1-15.
- Muñoz, J. M., & Hinojosa, R. (2023). Diseño y creación de una herramienta geotecnológica para el análisis de la accidentalidad vial en la Ciudad de Toluca, México, SIGESEV-TC. *Revista Cartográfica*, 2023(106), 7-34. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i106.1660>
- Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid. (2024, abril 26). *Accidentes de tráfico de la Ciudad de Madrid*. Ayuntamiento de Madrid.
- Satria, R. (2020). *Spatial Analysis of Traffic Accidents using GIS. The Case of Banda Aceh, Indonesia*.
- Siabato, W., & Guzmán-Manrique, J. (2019). La autocorrelación espacial y el desarrollo de la geografía cuantitativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 1-22. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.76919>