



Modelo del crecimiento del parque automotor en la ciudad de Medellín, a partir de la implementación de políticas públicas para la gestión de la demanda basadas en la restricción por uso de placa y la chatarrización

José Alejandro Zapata Celis

Trabajo de grado presentado para optar al título de Magíster en Ingeniería

Director - UdeA
Yony Fernando Ceballos, Ph.D.

Codirector - IU Digital
Julián Andrés Castillo Grisales, MEng

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Industrial
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita

(Zapata Celis, 2023)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Zapata Celis, J. (2023). *Modelo del crecimiento del parque automotor en la ciudad de Medellín, a partir de la implementación de políticas públicas para la gestión de la demanda basadas en la restricción por uso de placa y la chatarrización* [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Maestría en Ingeniería, Cohorte 2023 - I.

Grupo de Investigación: Ingeniería y Sociedad

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA)



Centro de documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Modelo del crecimiento del parque automotor en la ciudad de Medellín, a partir de la implementación de políticas públicas para la gestión de la demanda basadas en la restricción por uso de placa y la chatarrización

*A ti Ñuperrí, porque si un ser tan pequeño puede impactar amorosamente tantas almas,
entonces ¡este mundo aún tiene esperanza!*

Agradecimientos

“Si quieres ir rápido ve solo, si quieres llegar lejos ve acompañado” (proverbio africano)

Este trabajo contó con el apoyo, energía, amor y buenos deseos de muchas personas a las cuales quiero dedicar estas cortas palabras:

- A mi amada esposa, por tu amor, confianza y apoyo en todos mis proyectos y locuras. ¡Este logro también es tuyo!
- A mi amado hijo, espero que cuando puedas leer este trabajo en un futuro, comprendas que fuiste fundamental en su construcción, ya que llegaste como un milagro para cambiar mi forma de pensar el mundo.
- A mi amada madre y mi amado hermano, por motivarme siempre a encontrar mi propósito de vida y buscar mi mejor versión. ¡La música une nuestras almas!
- A mis directores de investigación, por su paciencia y valioso acompañamiento durante todo mi proceso de formación.
- A los integrantes del grupo de investigación Ingeniería y Sociedad, por todos los aportes que contribuyeron a enriquecer este trabajo.
- A la Universidad de Antioquia, por ayudarme a crecer como persona, como ciudadano y como profesional. Por siempre ¡Viva la U!
- A la Secretaría de Movilidad de Medellín, por facilitar todas las herramientas necesarias para adelantar mi investigación.

¡Muchas gracias a todos!

Tabla de contenido

Listado de figuras	7
Listado de tablas	9
Siglas, acrónimos y abreviaturas	10
Resumen	11
Abstract.....	12
1. Introducción	13
2. Análisis de la literatura académica.....	16
2.1. Exploración y clasificación de las publicaciones.....	16
2.2. Análisis de las publicaciones por áreas temáticas	18
2.3. Clasificación de las publicaciones según el grado de relación con la investigación	
21	
3. Marco teórico	24
4. Estado del arte	32
5. Objetivos	37
5.1. Objetivo general.....	37
5.2. Objetivos específicos	37
6. Metodología	38
6.1. Conocimiento científico.....	38
6.2. Fuentes de información.....	38
6.3. Construcción de la línea base del modelo.....	52
6.4. Diseño del modelo	53
6.5. Parametrización, verificación y validación del modelo.....	62

7.	Resultados	68
7.1.	Escenario base.....	68
7.2.	Escenario No. 1	69
7.3.	Escenario No. 2.....	70
7.4.	Escenario No. 3.....	71
7.5.	Escenario No. 4.....	72
7.6.	Escenario No. 5.....	73
7.7.	Escenarios de crecimiento por comuna	74
7.8.	Escenarios vehículos TPC	76
8.	Conclusiones	78
9.	Recomendaciones.....	80
10.	Eventos científicos de circulación del conocimiento	81
11.	Bibliografía.....	83
12.	Anexo	87

Listado de figuras

Figura 1	Procedimiento para la revisión de la literatura.....	16
Figura 2	Relevancia de investigación por año.....	18
Figura 3	Áreas temáticas de estudio relacionadas con la investigación.....	19
Figura 4	Publicaciones relacionadas con la investigación por país de origen.....	19
Figura 5	Tipo de documento publicados.....	20
Figura 6	Publicaciones relacionadas con la investigación por universidad.....	20
Figura 7	Autores interesados en abordar el tema de investigación.....	21
Figura 8	Método de trabajo según su función primaria.....	22
Figura 9	Método utilizado en los años publicados.....	22
Figura 10	Relación función vs Método.....	23
Figura 11	Variables disponibles y fuente de información.....	39
Figura 12	Datos geográficos de la ciudad de Medellín QGIS 3.22.7.....	40
Figura 13	Proyecciones demográficas de la ciudad de Medellín.....	41
Figura 14	Distribución de los modos de transporte en Colombia 2021.....	42
Figura 15	Parque automotor y tasa de motorización, 2013-2020.....	45
Figura 16	Histórico de agentes de tránsito de Medellín 2021.....	49
Figura 17	Enfoques en el modelado de simulación en escala de nivel de abstracción.....	54
Figura 18	Visualización conceptual de un modelo bajo el protocolo ODD.....	54
Figura 19	Interfaz gráfica del ABM propuesto en la etapa de inicialización.....	61
Figura 20	Interfaz gráfica del ABM propuesto en la etapa de datos de entrada.....	62
Figura 21	Interfaz gráfica del ABM propuesto en la etapa de datos de salida.....	63
Figura 22	Proyección del parque automotor para los escenarios evaluados a 30 años.....	64
Figura 23	Escenario base de proyección del Parque Automotor a 30 años.....	69
Figura 24	Escenario No. 1 de proyección del Parque Automotor a 30 años.....	70
Figura 25	Escenario No. 2 de proyección del Parque Automotor a 30 años.....	71
Figura 26	Escenario No. 3 de proyección del Parque Automotor a 30 años.....	72
Figura 27	Escenario No. 4 de proyección del Parque Automotor a 30 años.....	73
Figura 28	Escenario No. 5 de proyección del Parque Automotor a 30 años.....	74

Figura 29 Escenario 1 de proyección de vehículos TPC..... 77

Listado de tablas

Tabla 1	Crecimiento del parque automotor en Colombia 2021.....	42
Tabla 2	Edad promedio del parque Automotor en Colombia y Antioquia 2021.....	42
Tabla 3	Crecimiento de las motos en Colombia 2012 - 2021	43
Tabla 4	Relación entre el crecimiento demográfico y el parque automotor.....	43
Tabla 5	Parque Automotor matriculado en el distrito de Medellín 2019 - 2020.....	44
Tabla 6	Vehículos TPC matriculado en el distrito de Medellín 2021	44
Tabla 7	Tenencia vehicular promedio en Medellín 2020	46
Tabla 8	Estimación del cálculo KVR	47
Tabla 9	Intensidad vehicular asociada al P&P 2021	48
Tabla 10	Incidentes viales en la ciudad de Medellín 2019-2021.....	50
Tabla 11	Resumen de información para línea base del modelo	53
Tabla 12	Parametrización de criterios	63
Tabla 13	Escenarios evaluados con el modelo ABM propuesto	68
Tabla 14	Escenarios Parque Automotor por comuna	75
Tabla 15	Escenarios evaluados vehículos TPC	76

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ABM	Agent Based Modeling
ACOFI	Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería
AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
IA	Índice Incidente / Agente
AT	Agente de Tránsito
CAF	Banco de Desarrollo de América Latina
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CONPES	Consejo Nacional de Política Económica y Social
HOV	Carriles de Alta Ocupación
ITS	Sistemas Inteligentes de Transporte
KVR	Kilometro – Vehículo Recorrido
LPR	Restricción Basadas en la Placa
MaSE	Multiagent System Engineering
PA	Parque Automotor
PCU	Unidades De Vehículos De Pasajeros
P&P	Pico y Placa
PIB	Producto Interno Bruto
RUNT	Registro Único Nacional de Tránsito
SIG	Sistema de información Geográfico
TDM	Medidas de Gestión de la Demanda
TPC	Transporte Público Colectivo
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

El aumento del parque automotor en zonas altamente densificadas y con una malla vial limitada, se convirtió en un reto para las principales ciudades del mundo, que han visto como con el crecimiento demográfico y económico de las últimas décadas se ha generado un incremento gradual en la congestión en sus vías y los tiempos de viaje de sus habitantes, afectando su productividad y calidad de vida. Para contrarrestar estos impactos, los gobiernos han implementado Medidas de Gestión de la Demanda (TDM, por sus siglas en inglés) que restringen la circulación de vehículos particulares, como una estrategia para disminuir la congestión vehicular, desincentivando su adquisición y promoviendo el uso del transporte público. Sin embargo, por sus características coercitivas la efectividad de estas medidas para desincentivar la adquisición de vehículos particulares y su real efecto a largo plazo en el control del crecimiento del parque automotor ha sido cuestionada. La investigación presenta una revisión de la literatura y de las metodologías científicas recientemente utilizadas para estimar las variaciones en el crecimiento del parque automotor, la identificación de las variables necesarias para estimar dichas variaciones en el distrito de Medellín a partir de las bases de datos disponibles con acceso público y la construcción de un modelo adecuado para evaluarlas, estableciendo escenarios de proyección del parque automotor basados en la implementación de políticas públicas para la gestión de la demanda como la restricción por uso de placa y la chatarrización, que permiten evaluar la relación entre la vida útil permitida para la circulación de vehículos sobre la malla vial y el aumento de nuevo parque automotor.

Palabras clave: Modelo, Parque Automotor, Medidas de Gestión de la Demanda, Políticas Públicas, Modelo Basado en Agentes.

Abstract

The increase in the number of vehicles in highly dense areas with a limited road network has become a challenge for main cities worldwide. Recent decades' demographic and economic growth has generated a gradual increase in traffic congestion and the commutation times of inhabitants, which directly affects their productivity and quality of life. To counteract these impacts, governments have implemented Transportation Demand Management (TDM) that restrict the circulation of private vehicles to reduce traffic congestion, while discouraging their acquisition and promoting the use of public transport. However, due to their coercive characteristics, the effectiveness of TDM to discourage the acquisition of private vehicles and their real long-term effect on controlling the growth of the vehicle fleet has been harshly questioned. This research presents a literature review and the recent scientific methodologies to estimate variations in automotive fleet growth. This work also identifies some estimation variables in Medellín city using publicly available databases, as well as one methodology proper for the selection of the appropriate evaluation model. These establish scenarios for projecting the vehicle fleet based on the implementation of public policies for demand management such as the restriction due to license plate-based and scrapping. This allows for evaluating the relationship between vehicle age allowed for the circulation of vehicles on the road network and the trend increase for new vehicles.

Keywords: Model, Vehicle Fleet, Transportation Demand Managements, Public Policies, Agent Based Model.

1. Introducción

La expansión periférica, la densificación y la sobrepoblación de las ciudades, sumado al incremento de la capacidad adquisitiva de sus habitantes, masifica la posesión y el uso del vehículo privado como modo de transporte predilecto. Este incremento de los vehículos en un territorio, disminuye la capacidad de operación de las vías para atender la demanda de viajes, generando un incremento gradual en la congestión vehicular de los territorios, que afecta la productividad y la calidad de vida de los ciudadanos (Wang et al., 2021).

Indicadores altos de congestión sobre las vías, se traducen en un uso ineficiente de la malla vial disponible, haciendo necesaria la inversión de recursos públicos en estrategias que permitan controlar los indicadores de movilidad (Litman, 2006). Adicionalmente, el aumento de los niveles de congestión genera un impacto negativo en la calidad del servicio de transporte público, lo que hace más difícil la elección del cambio modal por parte de los propietarios de vehículos particulares (Banco de Desarrollo de América Latina, 2011).

El actual volumen de vehículos que circulan por la malla vial de las ciudades, es el resultado histórico de las políticas públicas y los comportamientos socioculturales que han privilegiado la posesión y el uso del transporte privado, generando atrasos tecnológicos y operacionales que desfavorecen el uso del transporte público (Duk et al., 2020). Como consecuencia de este crecimiento del parque automotor, los centros urbanos presentan impactos negativos en la incidentalidad, los tiempos de viaje, los niveles de contaminación, entre otros factores, que han justificado la inversión de recursos públicos en estrategias que permitan mejorar estos indicadores de movilidad (Litman, 2006).

En este sentido, Medellín al igual que otras ciudades en el mundo ha implementado diversas Medidas de Gestión de la Demanda (TDM, por sus siglas en inglés), que buscan restringir la circulación de vehículos particulares, como una estrategia para gestionar y condicionar los viajes de sus ciudadanos en este modo de transporte, buscando desincentivar su adquisición y promover el uso del Transporte Público Colectivo (Área Metropolitana del Valle de Aburrá,

2017). Sin embargo, por su característica coercitiva la efectividad de estas medidas para desincentivar la adquisición de vehículos particulares y su real efecto a largo plazo en el control del crecimiento del parque automotor ha sido cuestionada (Duk et al., 2020).

A pesar de no tener un panorama claro de sus efectos a largo plazo, medidas de gestión de la demanda que restringen la circulación vehicular como el Pico y Placa y el Cobro por Congestión, continúan siendo utilizadas como una política de movilidad regional a corto plazo, para controlar los efectos negativos de la congestión (Litman, 2006). No obstante, las políticas económicas nacionales para la adquisición y chatarrización de vehículos, parecen ir en contravía de los objetivos regionales que hacen un intento por mejorar las condiciones de movilidad (Aydınalp Köksal et al., 2021). Lo anterior, se puede evidenciar en los últimos reportes del Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT) que muestran un crecimiento del 18% en las matrículas para nuevos vehículos en Colombia entre las vigencias 2020 y 2021, a pesar de las condiciones restrictivas de circulación que se implementaron por motivo de la pandemia de la Covid-19 (CONPES, 2020). Adicionalmente, políticas laxas de chatarrización de los vehículos que pierden su vida útil, han dado lugar al uso extendido en el tiempo de vehículos que no cuentan con las condiciones técnicas óptimas para su operatividad (Aydınalp Köksal et al., 2021).

Adicionalmente, el éxito de las políticas públicas dirigidas a mejorar la movilidad de los territorios, está determinado por el grado de aceptación de los ciudadanos, frente a las estrategias que se proponen para enfrentar los retos en materia de transporte y conectividad (Gibson et al., 2011). Esta situación ocasiona que muchas estrategias de movilidad urbana, varíen y se modifiquen periódicamente, perdiéndose la credibilidad y la oportunidad de obtener resultados medibles a largo plazo de los efectos en de las TDM en el crecimiento del parque automotor y el uso de transporte público (Banco de Desarrollo de America Latina, 2011).

En los últimos años, el estudio de las problemáticas derivadas del crecimiento del parque automotor, la congestión vehicular y las TDM, ha tomado mayor relevancia dentro de las

investigaciones científicas divulgadas, las cuales buscan mediante metodologías estadísticas y modelaciones proponer soluciones a una problemática generalizada en las ciudades con una alta concentración poblacional (Banco de Desarrollo de America Latina, 2018).

Las modelaciones realizadas, se han basado en registros del crecimiento poblacional, la demanda de tráfico, la seguridad vial o los indicadores de congestión obtenidos a partir de diferentes bases de datos y herramientas tecnológicas de tráfico disponibles, que facilitan los análisis comparativos (Muley et al., 2021). Complementariamente, los análisis de planificación de los sistemas de movilidad continúan sustentándose en el modelo clásico de transporte que permite representar los orígenes y destinos de los viajes al interior de un territorio (Aydinalp Köksal et al., 2021). Bajo esta premisa, los principales resultados que se pueden obtener de los modelos de transporte, vienen asociados a la disminución de la congestión vehicular sobre la malla vial disponible (Vidal et al., 2020).

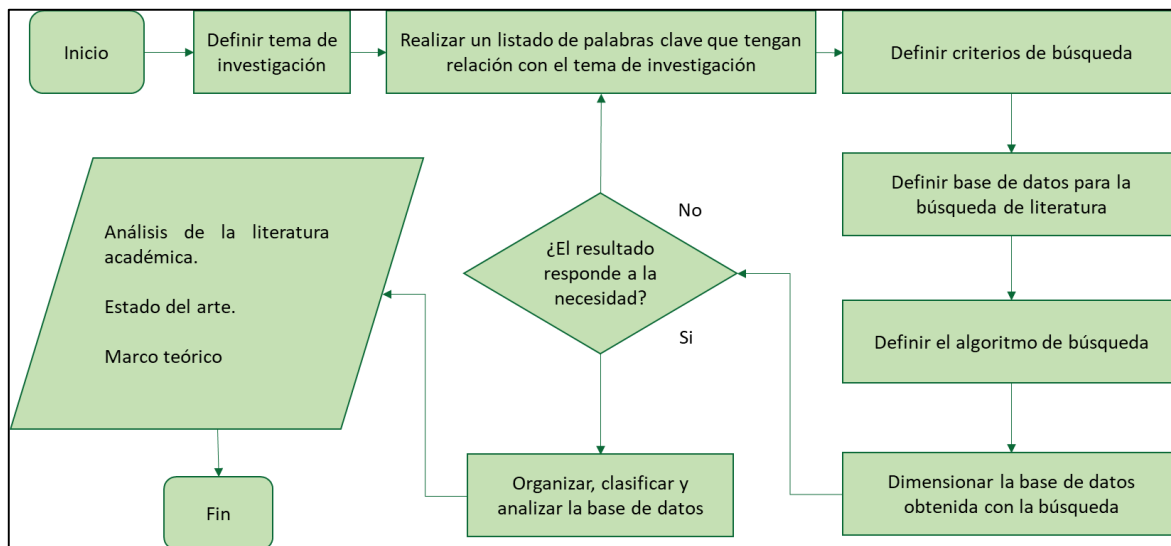
Teniendo en cuenta que las TDM tienen efecto en la decisión de adquirir un vehículo automotor privado como medio de transporte (Vidal et al., 2020), se plantea como pregunta de investigación: ¿Qué efectos tendrán las políticas públicas de gestión de la demanda por uso de placa y chatarrización, en el control del crecimiento del parque automotor de la ciudad de Medellín en los próximos 30 años?

2. Análisis de la literatura académica

Con el objetivo de identificar el conocimiento científico generado sobre el tema de investigación en los últimos años, se realizó una búsqueda a través de la base de datos bibliográfica Scopus. Esta búsqueda permitió establecer y caracterizar las publicaciones relacionadas, siguiendo el procedimiento que se describen en la Figura 1.

Figura 1

Procedimiento para la revisión de la literatura



Nota. Elaboración propia a partir del curso de *Metodología de la Investigación UdeA.*

2.1. Exploración y clasificación de las publicaciones

La búsqueda de las publicaciones se realizó en cinco etapas:

En la etapa 1 se utilizó un conjunto segmentado de términos de búsqueda por palabra clave para producir un grupo inicial de artículos. La cadena de búsqueda fue KEY (mobility AND policy AND policies AND demand AND management AND congestion AND system AND vehicle stock AND model AND vehicle fleet AND car fleet). El resultado de esta búsqueda segmentó fuertemente los resultados, al punto de no obtener publicaciones asociadas.

En la etapa 2 se utilizó un conjunto segmentado de términos de búsqueda por palabra clave, eliminando las palabras `car` y `fleet` para producir un segundo conjunto de artículos. La cadena de búsqueda fue KEY (mobility AND policy AND policies AND demand AND management AND congestion AND system AND vehicle stock AND model). El resultado de esta búsqueda segmentó los resultados, sin embargo, no se obtuvieron publicaciones asociadas.

En la etapa 3 se utilizó un conjunto medianamente segmentado de términos de búsqueda por palabra clave, eliminando las palabras `vehicle` y `stock` para producir un tercer conjunto de artículos. La cadena de búsqueda KEY (mobility AND policy AND policies AND demand AND management AND congestion AND model). El resultado de esta búsqueda segmentó los resultados, obteniendo 3 publicaciones asociadas.

En la etapa 4 se utilizó un conjunto segmentado de términos de búsqueda por palabra clave, eliminando la palabra clave `model` para producir un cuarto conjunto de artículos. La cadena de búsqueda fue ' KEY (mobility AND policy AND policies AND demand AND management AND congestion)'. El resultado de esta búsqueda segmentó los resultados, obteniendo 8 publicaciones asociadas.

En la etapa 5 se utilizó un conjunto medianamente segmentado de términos de búsqueda por palabra clave y se eliminaron las palabras `policy` y `policies` para producir un quinto conjunto de artículos. La cadena de búsqueda fue ' KEY (mobility AND demand AND management AND congestion)'. El resultado de esta búsqueda segmentó los resultados, obteniendo 42 publicaciones asociadas.

En la etapa 6 finalmente se utilizó un conjunto segmentado por 3 palabras claves, para producir un último conjunto de artículos. La cadena de búsqueda fue ' KEY (mobility AND demand AND management)'. Con el resultado de esta búsqueda se obtuvieron 571 resultados.

2.2. Análisis de las publicaciones por áreas temáticas

Visualizando la magnitud de la literatura disponible, se trabajó con la base de datos de la etapa 6 que generó con palabras clave 571 artículos. Con esta base de datos se procedió a realizar un filtro por las áreas temáticas de interés asociadas a la investigación, como ingeniería, ciencias computacionales, ciencia medioambiental, ciencias de la decisión, matemáticas, física y astronomía, economía, econometría y finanzas, obteniendo un nuevo listado de 343 artículos.

2.2.1. Análisis y caracterización de la información filtrada en la base de datos

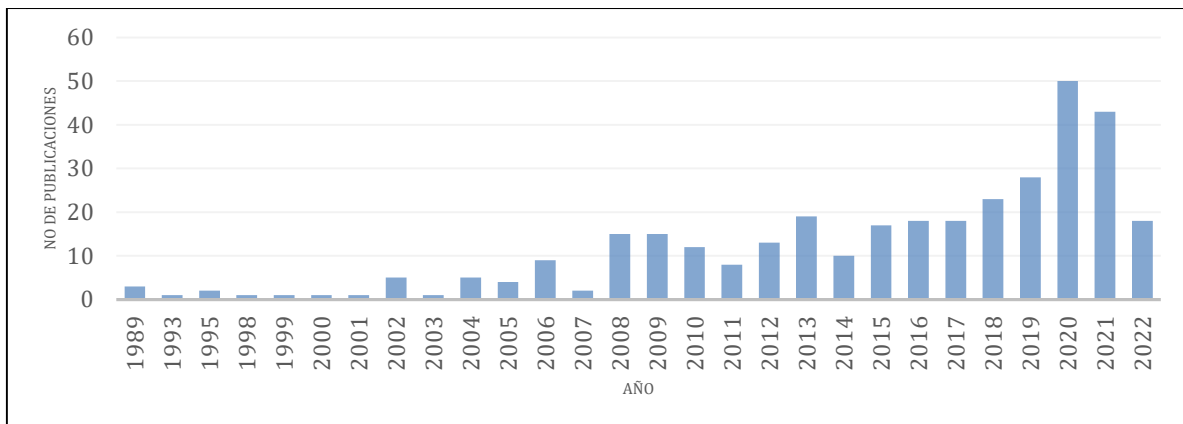
Con el nuevo listado de artículos, se procedió a realizar el análisis y caracterización de la información filtrada, de acuerdo con el interés de la investigación.

2.2.1.1. Relevancia de la investigación en los últimos años

La base de datos de las investigaciones publicadas, permitió establecer tal como se muestra en la Figura 2, que el tema propuesto ha tenido una gran relevancia en los últimos años, mostrando un incremento a partir del 2008 y un gran pico de publicaciones en el año 2020.

Figura 2

Relevancia de investigación por año



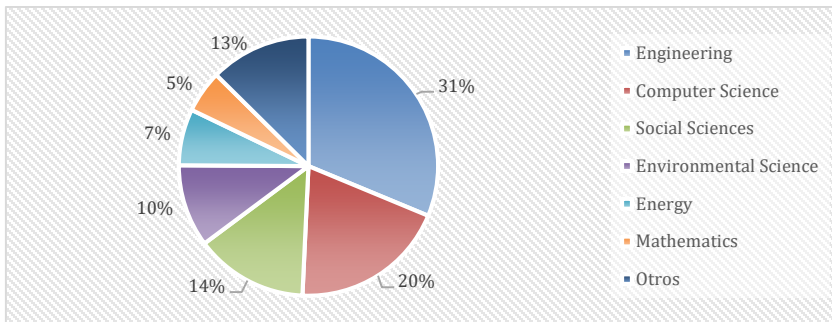
Nota. Elaboración propia a partir de base de datos *Scopus*.

2.2.1.2. Áreas temáticas de estudio asociadas a la investigación

Como se observa en la Figura 3, la ingeniería y las ciencias computacionales lideran la generación de nuevo conocimiento e investigaciones respecto a la gestión de la demanda en movilidad.

Figura 3

Áreas temáticas de estudio relacionadas con la investigación



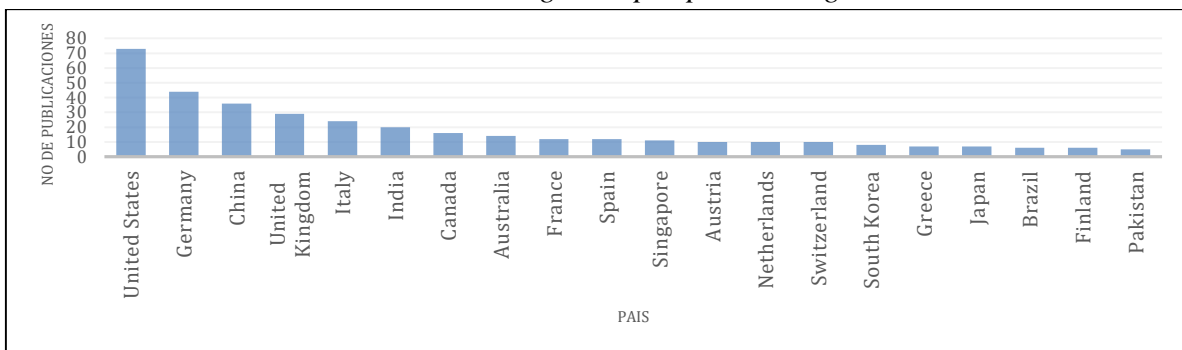
Nota. Elaboración propia a partir de base de datos Scopus.

2.2.1.3. País de origen de las investigaciones

Frente al análisis de los países que más han aportado publicaciones asociadas a la investigación, la Figura 4 muestra que Estados Unidos lidera la lista con más de 73 publicaciones, seguido de Alemania y China.

Figura 4

Publicaciones relacionadas con la investigación por país de origen

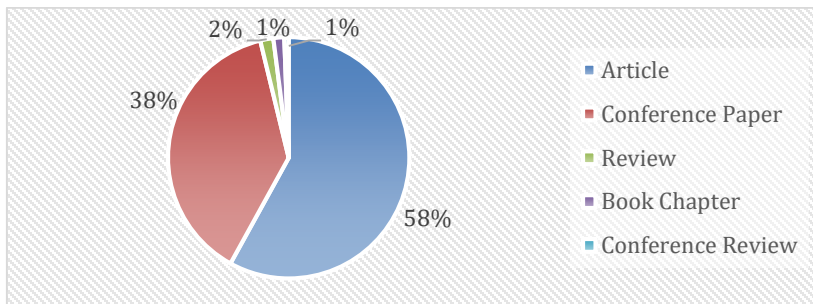


Nota. Elaboración propia a partir de base de datos Scopus.

2.2.1.4. Tipo de documentos publicados

La Figura 5, muestra como los *artículos* publicados representan el 58% de los documentos explorados, seguido de *conferences paper* con un 38%, lo cual muestra una diferencia marcada frente a otro tipo de publicaciones. En este sentido, se evidencia que el tema de investigación es un tópico muy común en congresos científicos, lo que fomentará el dialogo y la discusión.

Figura 5
Tipo de documento publicados

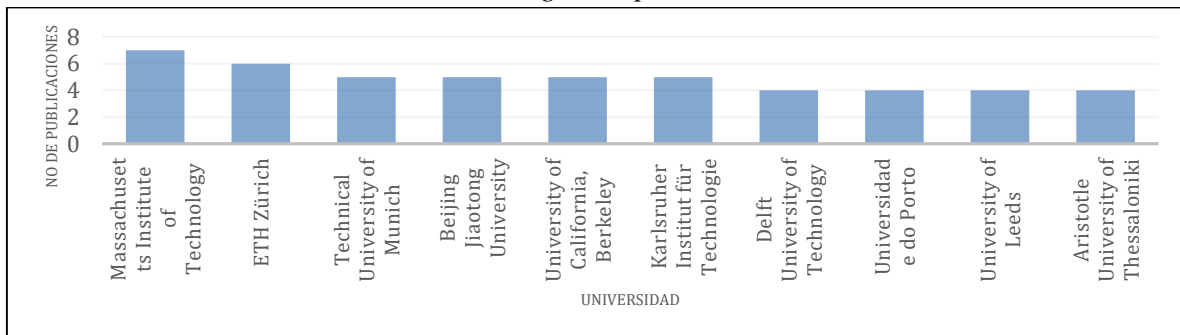


Nota: Elaboración propia a partir de base de datos *Scopus*.

2.2.1.5. Universidades y autores que han aportado conocimiento

En la Figura 6 se evidencia que las universidades estadounidenses y suizas muestran mayor interés tienen en abordar temáticas similares a la investigación. La lista la encabeza *Karlsruhe Institute of Technology* con 7 publicaciones y el *ETH Zürich* con 6 publicaciones.

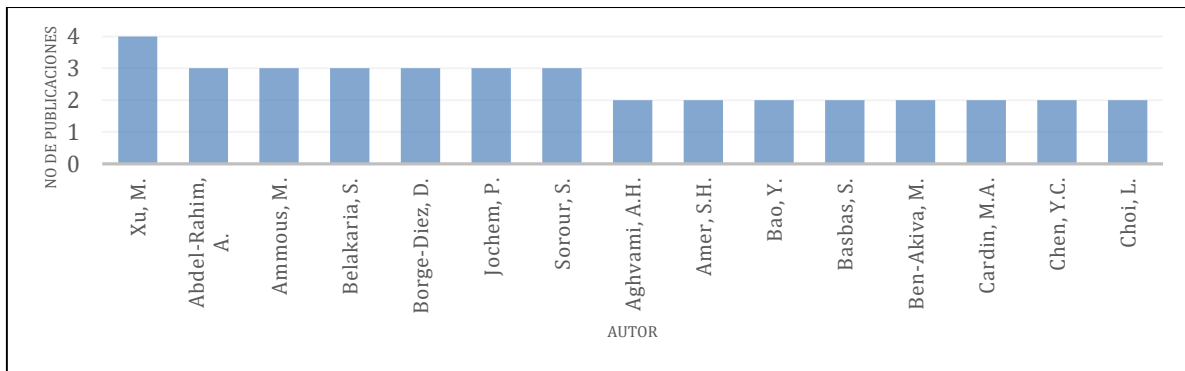
Figura 6
Publicaciones relacionadas con la investigación por universidad



Nota. *Elaboración propia a partir de base de datos Scopus.*

Finalmente, la Figura 7 presenta la lista de autores que abordaron temáticas similares a la investigación, la cual es encabezada por el investigador Meng Xu de la *Beijing Jiaotong University*.

Figura 7
Autores interesados en abordar el tema de investigación



Nota. Elaboración propia a partir de base de datos *Scopus*.

2.3. Clasificación de las publicaciones según el grado de relación con la investigación

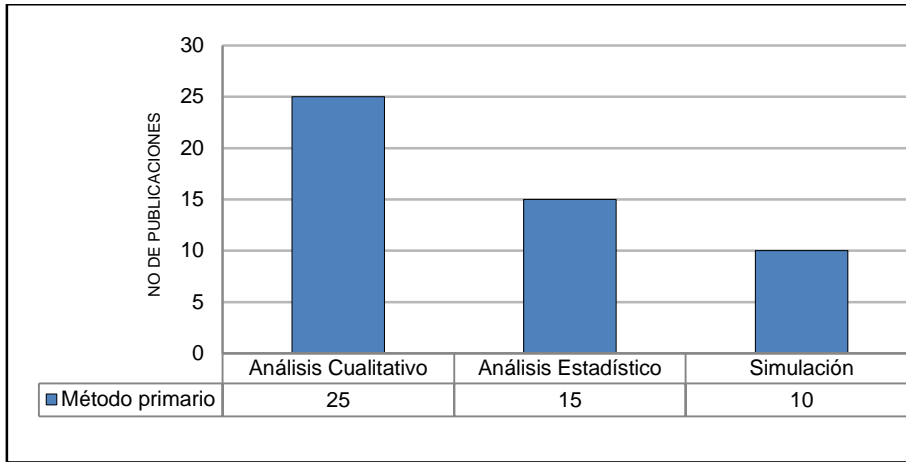
Con la nueva base de datos de 343 artículos, se realizó una categorización de las publicaciones de acuerdo con el grado de relación con la investigación propuesta. Esta caracterización permitió establecer un rango de 50 publicaciones que tenían una relación *Muy Alta* con la investigación, lo cual permitía realizar una correlación basada en el método utilizado, su funcionalidad y el nivel de implementación.

2.3.1. Análisis del método de trabajo según su función primaria

Esta clasificación permitió establecer tal como se muestra en la Figura 8, que el análisis estadístico es el más frecuentemente utilizado en las publicaciones, seguido del análisis cualitativo y las simulaciones.

Figura 8

Método de trabajo según su función primaria



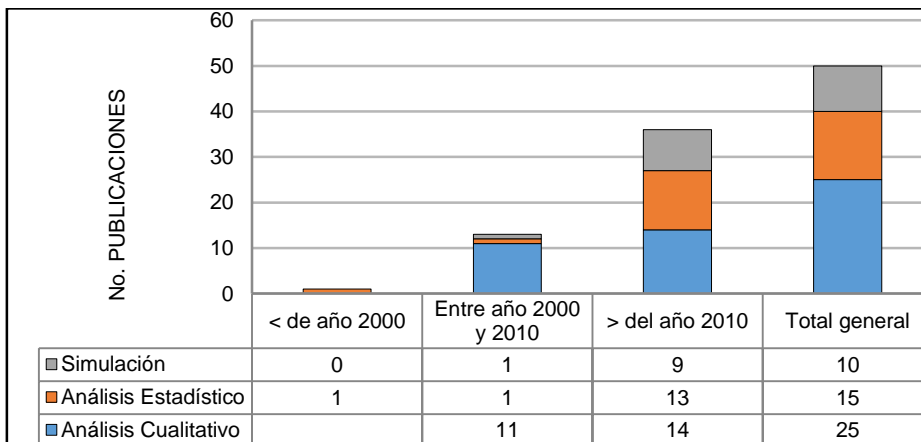
Nota. Elaboración propia a partir de base de datos Scopus.

2.3.2. Análisis del método por año de publicación

Con el análisis del método por año de la publicación presentado en la Figura 9, se estableció que el tema de la investigación ha tomado mayor relevancia a partir de 2010 y que los trabajos con análisis cualitativo, tiene mayor concurrencia para el planteamiento de soluciones.

Figura 9

Método utilizado en los años publicados

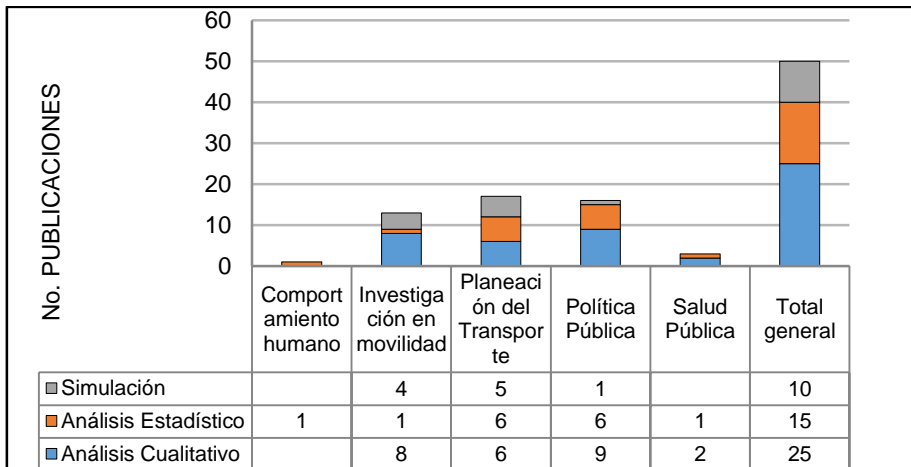


Nota. Elaboración propia a partir de base de datos Scopus.

2.3.3. Análisis de la relación función y método

Finalmente, como se muestra en la Figura 10, el análisis de la relación entre la función y el método, permitió establecer que la mayor parte de las 30 publicaciones responden a la necesidad de implementar políticas públicas para una óptima gestión de la demanda, basándose en revisión de bases de datos para la formulación de análisis estadísticos y simulaciones.

Figura 10
Relación función vs Método



Nota: Elaboración propia a partir de base de datos *Scopus*.

El análisis de las publicaciones consultadas, permite evidenciar la relevancia del tema de investigación en los últimos años y establecer que metodologías complejas como la simulación del transporte vienen tomando fuerza en los últimos años, debido a las ventajas que ofrece para evaluar múltiples variables en diferentes escenarios, que permitan proponer diferentes estrategias de solución.

3. Marco teórico

Históricamente las políticas públicas para la movilidad urbana se han enfocado en favorecer los viajes en vehículo particular, dejando otros modos para atender la misma demanda de viajes en segundo plano, lo cual ha incrementado la cantidad de vehículos privados en el territorio (Wang et al., 2021). Muchas ciudades en el mundo han invertido gran parte de sus recursos públicos en mejorar el diseño, la infraestructura y el espacio destinado a la circulación de vehículos, con el fin de maximizar la velocidad de circulación (Todd Litman & Transport Policy Institute, 2012). Sin embargo, territorios topográficamente limitados ocasionan que la infraestructura vial disponible no crezca con la misma velocidad que crece el parque automotor, lo que resulta en un aumento diferencial en los indicadores de congestión (Banco de Desarrollo de America Latina, 2011).

Por su parte, el crecimiento demográfico sumado a las necesidades de accesibilidad de la población al transporte, ha estructurado un modelo de ciudad que demanda la construcción permanente de infraestructura vial (Alzate, 2012). Las dificultades para acceder con políticas públicas de transporte a todo un territorio, lleva a los ciudadanos a elegir el vehículo privado como modo predilecto de movilización (Duk et al., 2020). De acuerdo con el Banco Mundial, se estima que la congestión vehicular, causa en países desarrollados una pérdida del 1% al 3% en el producto interno bruto (PIB) y probablemente hasta el doble en los países en desarrollo (Ma et al., 2008). Por el contrario, estrategias para aumentar el promedio en las velocidades de viaje de un vehículo privado en 1 km/h y del transporte público en 0.5 km/h, generarían una reducción de tiempos de viaje y costos de operación por un valor equivalente a 0.1% del producto interno bruto (PIB) (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2003). Lo anterior evidencia que la implementación de TDM requieren de una inversión significativa de recursos económicos, que para muchos países en desarrollo es inviable asignar (Banco de Desarrollo de America Latina, 2018).

A pesar de conocer estos indicadores, la globalización del mercado y los acuerdos de libre comercio entre países, propician un crecimiento del parque automotor que promueve una

cultura de movilidad contraria a las políticas públicas sostenibles (CONPES, 2020). Lo anterior, ha dificultado la racionalización del uso del vehículo particular, pues adicional a la comodidad y sensación de seguridad que ofrece este modo de transporte, también genera hábitos y necesidades que dificultan el cambio modal (Duk et al., 2020). Adicionalmente, esta dependencia desarrollada hacia el vehículo privado y las consecuentes tasas de motorización, tienden a incrementar los costos de vida de la población (Juhász, 2013).

Es por esto que las nuevas políticas de movilidad urbana, buscan que la oferta de los sistemas de transporte público responda a las necesidades de desplazamiento de los usuarios, garantizando su conectividad mediante un servicio fiable, accesible y asequible (CONPES, 2020). No obstante, la implementación de estos sistemas, requieren de una inversión inicial alta y adicionalmente su operación de carácter público necesita de los recursos que prolonguen su competitividad respecto a los otros modos, con el fin de propiciar un cambio modal permanente (Banco de Desarrollo de America Latina, 2011).

Adicionalmente, algunos actores económicos de la sociedad argumentan que el aumento de los viajes en vehículo privado promueve el desarrollo de diversos sectores de la economía y que su restricción afecta económicamente los ingresos sociales (Todd Litman & Transport Policy Institute, 2012). Sin embargo, incrementar los viajes en vehículo particular, aumenta los niveles de congestión, lo cual aumenta los costos sociales que se derivan de los tiempos de viaje, la contaminación, entre otros factores (Litman, 2006). De acuerdo con el Plan Maestro de Movilidad del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, actualmente en la ciudad de Medellín existe un incremento en los tiempos promedio de desplazamientos de todos los ciudadanos de 11 minutos para todos los modos de transporte, con respecto a los valores registrados en 2005 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2017).

Sumado a los anterior y debido a que la ocupación del suelo no siempre es planificada y controlada de la manera oportuna por parte del Estado, los territorios pierden la posibilidad de avanzar hacia modelos de ciudades ordenadas y compactas (Gibson et al., 2011). El desarrollo residencial en suelos en expansión sin la adecuada malla vial y sistemas de

transporte público eficiente, también promueve la adquisición y crecimiento del parque automotor rodante (Wang et al., 2021). Esto se traduce en un desequilibrio espacial entre los nuevos desarrollos residenciales de las ciudades y el número de celdas de estacionamiento disponibles para atender la demanda de vehículos (Gibson et al., 2011). Lo anterior ha generado una pérdida de la capacidad de la malla vial y un elevado número de vehículos privados que se estacionan en las vías públicas, obstaculizando el tránsito e incrementando a su vez los niveles de congestión (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2003).

A nivel nacional, la implementación de sobretasas a los combustibles fósiles mediante modelos econométricos, buscan generar un equilibrio en la economía de los países, que permita desincentivar el uso de vehículo particular sin afectar su economía (Asociación Colombiana de Petróleo, 2020). La complejidad de esta dependencia económica, causa finalmente una discordancia entre las políticas económicas que dependen del capital aportado por el comercio de combustible y las políticas de descongestión de las ciudades (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2003). Por tal razón, este tipo de modelos son relevantes en la implementación de políticas económicas, para países que basan parte de su estructura económica en la producción y comercialización del petróleo (Asociación Colombiana de Petróleo, 2020).

Según el balance del sector tránsito y transporte realizado por el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT) en diciembre de 2021 Colombia superaba los 17.020.451 de vehículos matriculados, de los cuales el 60% correspondían a motocicletas, el 39 % a vehículos como camiones, camionetas, buses, busetas y ciclomotores y el 1% a maquinaria pesada. Dicho informe muestra además, que a pesar de la coyuntura económica generada en el país por la pandemia del Covid- 19, las matrículas de nuevos vehículos en 2021 aumentaron un 6% con respecto al año anterior (RUNT, 2021b). Adicionalmente, el mismo Registro Único Nacional de Tránsito – RUNT en su último informe sobre la edad del parque automotor en Colombia, reportó que aproximadamente un 25% de los vehículos que circulan en el país superan los 16

años de antigüedad, lo que supone una mayor cantidad de vehículos en circulación (RUNT, 2021b).

Lo anterior muestra como las políticas públicas asociadas a la movilidad urbana generan un impacto directo en el desarrollo económico regional y en la calidad de vida de sus habitantes, por lo cual dichas políticas deben tener en cuenta los costos económicos y sociales derivados de la congestión vehicular, la incidentalidad y la salud pública, como factores que influyen en las finanzas del sector público, el sector privado y los hogares (Todd Litman & Transport Policy Institute, 2012). Así mismo, vemos como los niveles de congestión vehicular juegan un papel relevante a la hora de elegir las TDM apropiadas para gestionar la movilidad y la calidad de vida de las ciudades (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2003).

Entre sus múltiples conceptos, la movilidad define la forma en que los habitantes de un territorio acceden a los servicios, equipamientos y oportunidades que se ofrecen, mediante el uso de diferentes modos de transporte y a través de la red vial disponible (Gibson et al., 2011). Por esto, entender cómo se movilizan las personas y qué los motiva a hacerlo es fundamental para el desarrollo, la planeación de la red vial de las ciudades y la formulación de TDM (Ma et al., 2008). En consecuencia, la movilidad tiene diversas definiciones técnicas, económicas, sociales y filosóficas según el área del conocimiento en la que se enfoque (Alonso Romero & Lugo-Morín, 2018).

Con el aumento en los ingresos de los habitantes, la posesión y el uso del vehículo privado tiende a masificarse, incrementando los niveles de congestión sobre las vías y afectando la productividad de las ciudades (Duk et al., 2020). En este sentido, la cantidad de vehículos que circulan por la malla vial de un territorio se conoce como parque automotor y su incremento depende de la oferta de transporte público disponible, la infraestructura vial disponible, la topografía, las condiciones socioeconómicas y las políticas públicas que se implementen (Banco de Desarrollo de América Latina, 2011).

A su vez, la congestión vehicular se entiende como la relación que existe entre la malla vial disponible y el parque automotor que circula en un mismo periodo temporal, generando que los indicadores de velocidad disminuyan, lo cual es experimentado por los ciudadanos como un aumento en el tiempo que tardan para realizar sus desplazamientos (Tyler et al., 2013). También, indicadores altos de congestión sobre las vías, se traducen en un uso ineficiente de la infraestructura vial disponible, lo cual justifica la inversión de recursos públicos en estrategias que permitan mejorar las condiciones de movilidad (Litman, 2006). Este aumento en el tiempo de desplazamiento para todos los modos de transporte, tienen un impacto negativo particular en la calidad del servicio que ofrece el transporte público Colectivo (TPC), lo que a su vez dificulta la elección del cambio a otros modos de transporte por parte de los ciudadanos (Banco de Desarrollo de América Latina, 2011). Por esto es que la expansión periférica, la densificación y la sobrepoblación de las ciudades, exige a los gobernantes la implementación de estrategias que respondan a las necesidades de desplazamiento de sus ciudadanos, ya que la sobrepoblación sectorizada de un territorio sin una adecuada planeación de la movilidad, tiene impactos directos sobre los niveles de pobreza y exclusión social, así como aumentos en los índices de contaminación ambiental e incidentalidad (Gibson et al., 2011).

Buscando controlar los impactos derivados de la congestión, ciudades de países desarrollados y en vía de desarrollo han comenzado a implementar estrategias para gestionar y condicionar los viajes de sus ciudadanos, buscando reducir la compra de automóviles privados y promoviendo otros modos de transporte alternativos (Todd Litman & Transport Policy Institute, 2012). Sin embargo, la fuerza necesaria para la materialización de estrategias, requiere de un fuerte componente político y económico, debido al efecto negativo que este tipo de estrategias generan en la percepción ciudadana (Duk et al., 2020). Estas estrategias hacen parte integral de los planes de movilidad en aquellos territorios que enfrentan retos en materia de congestión vehicular y parque automotor. Dentro de las más conocidas para gestionar la demanda de viajes mediante la restricción del vehículo particular, se destacan TDM como: *Pico y Placa (P&P)*, *Aporte Solidario*, *Cobro por Congestión* y *Chatarrización* (Banco de Desarrollo de América Latina, 2018).

Estrategias como el *P&P*, busca desincentivar los viajes diarios en vehículo privados, limitando los días y horarios de circulación sobre la malla vial según la placa asignada por la autoridad de tránsito (Banco de Desarrollo de America Latina, 2018). Sin embargo, investigaciones realizadas en diversos territorios donde se aplica este tipo de TDM, han demostrado que la característica coercitiva de esta estrategia, genera cuestionamientos sobre su real impacto a largo plazo en el control del parque automotor (Duk et al., 2020).

Así mismo, como una medida complementaria al *P&P*, *el aporte solidario* permite a las personas realizar un pago voluntario que le habilite usar su vehículo durante sus días de restricción por *P&P* (Litman, 2006). Los recursos captados por la implementación de esta medida, ayuda a los gobiernos a realizar mayores inversiones en el mejoramiento de la malla vial y realizar la renovación de los vehículos de transporte público a combustibles más limpios (Banco de Desarrollo de America Latina, 2018)

Por su parte, ciudades como Londres y Estocolmo han optado por un modelo de TDM denominado *Cobro por Congestión*, el cual está siendo estudiado actualmente por varios países latinoamericanos con el objetivo de viabilizar su implementación (Tyler et al., 2013). Esta medida realiza un cobro al propietario del vehículo que desea circular por puntos específicos del territorio, los cuales están catalogados como de alta congestión en algunos rangos horarios (Banco de Desarrollo de America Latina, 2018).

De otro lado, el transporte público es uno de estos modos que permite generar mayores beneficios de equidad, eficiencia del sistema, reducción de tiempos de viajes y de emisiones (Tyler et al., 2013). Ciudades con altos niveles de congestión, tienen como principal estrategia implementar sistemas de transporte masivo de pasajeros de alta y mediana capacidad como los Trenes y los Buses de Transporte Rápido (BRT, por sus siglas en inglés), que promuevan el cambio del modo de transporte de los ciudadanos, ya que la capacidad de estos sistemas de transporte para atender una gran demanda de viajes, genera un impacto

positivo en los indicadores de congestión vehicular de las ciudades, aportando mayor capacidad a la malla vial disponible (Banco de Desarrollo de America Latina, 2011).

Igualmente, los sistemas de bicicletas públicas son estrategias complementarias de transporte, que buscan incentivar en los ciudadanos el uso de modos limpios para movilizarse en viajes menores a 5 kilómetros (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2015). A si mismo, la caminata continua siendo el modo más común y práctico de movilización, convirtiéndose en la opción más eficiente para gestionar la demanda de viajes en trayectos peatonales cortos (Todd Litman & Transport Policy Institute, 2012). En este sentido, mejorar la infraestructura peatonal y ciclista, permite propiciar un cambio modal hacia transportes seguros, económicos y amigables con el medio ambiente (Duk et al., 2020).

Desde un enfoque económico, gestionar la demanda a través de la reorganización de las jornadas laborales ha generado beneficios en la reducción de la congestión, la disminución de los tiempos de viajes y el costo de operación de las industrias durante la pandemia de la Covid 19. Esta tragedia ha tomado una mayor relevancia luego de evidenciar sus beneficios sociales y económicos, demostrando que el teletrabajo es una opción efectiva de gestionar la demanda de viajes sin afectar la productividad regional (Urrego et al., 2020).

Al ser las políticas públicas la estrategia del Estado para enfrentar los retos y necesidades de un territorio de forma eficiente y oportuna, su éxito depende del grado de aceptación de la sociedad, lo que hace que la interacción entre el Estado y la sociedad sea compleja, pues muchas veces en las políticas públicas prevalecen los valores, visiones e intereses particulares, haciendo que el proceso de toma de decisión sea lento, difícil y parcializado (Gibson et al., 2011). Esta situación impide que las estrategias de movilidad urbana, recojan todas las necesidades ciudadanas enfocadas al territorio, perdiendo la oportunidad de generar resultados positivos que favorezcan la generación de valor público (Banco de Desarrollo de America Latina, 2011).

Finalmente, la desconexión entre las políticas públicas nacionales y las problemáticas de movilidad existentes en la ciudad de Medellín, han derivado en un incremento en la edad promedio de vehículos que circulan sobre la malla vial disponible, baja efectividad de las TDM implementadas para controlar el crecimiento y uso del transporte privado y un crecimiento constante en las matriculas de nuevo parque automotor registrado año a año (Duk et al., 2020). Por lo anterior, es necesario diseñar un modelo que permita conocer los efectos que tendría la implementación de una nueva política pública de control de parque automotor en la ciudad, que se base en la implementación de estrategias de chatarrización y restricción por uso de placa, para los vehículos matriculados en el territorio (Aydınalp Köksal et al., 2021).

4. Estado del arte

Conocer la tasa de crecimiento del parque automotor de un territorio, permite a los gobiernos definir estrategias de TDM para afrontar los retos y necesidades de movilidad sus habitantes de forma eficiente y oportuna (Gibson et al., 2011). Como se evidenció el análisis de la literatura académica, en la última década se ha incrementado el interés por investigar el fenómeno de la congestión vial y su impacto sobre calidad de vida de los ciudadanos, a través de modelos de sistemas, modelos ABM y análisis estadísticos (Vidal et al., 2020).

Algunas de las investigaciones se han enfocado en comparar las buenas prácticas y los beneficios de las TDM que ya han sido implementadas en diferentes países, analizando las bases de las políticas públicas que las fundamentan (Banco de Desarrollo de América Latina, 2018). Para el caso de Inglaterra y Escocia, (Llewellyn et al., 2014) mediante una combinación de encuestas y entrevistas a diferentes dirigentes y expertos, se evaluó la aplicación práctica de la TDM desde los aspectos legales y políticos orientados a la planificación, encontrando pocas diferencias entre el marco normativo de estos dos territorios y falencias similares en los procesos de seguimiento y control de su efectividad.

Con este mismo enfoque y buscando determinar la pertinencia de las estrategias de TDM en el crecimiento del parque automotor, (Bartley, 2020) realizó una investigación sobre los niveles de aprobación y efectividad para gestionar la demanda de viajes. Su objetivo fue medir la respuesta de un grupo poblacional a varios escenarios y realizar un análisis estadístico de los datos recopilados para identificar las mejores TDM por su costo-beneficio y probabilidad de éxito.

Por su parte, (Aydıncı Köksal et al., 2021) en su investigación sobre las características del parque automotor a largo plazo en Turquía, presentó un modelo de análisis multivariable sobre la existencia de varios factores que deben tenerse en cuenta en la formulación de políticas de transporte. Para obtener el modelo de análisis de estas políticas, se determinó el

parque automotor proyectado hasta 2030 a partir de los indicadores gubernamentales de movilidad y salud pública asociados a la congestión, definiendo cinco escenarios que permitieron concluir que el parque automotor está aumentando rápidamente y envejeciendo a una tasa mínima de chatarrización.

Así mismo, para comprender los factores que afectan la aceptación pública de la restricción basadas en la placa (LPR, por sus siglas en inglés) en la ciudad de Xi'an en China, (Luo et al., 2022) realizó una investigación bajo un modelo teórico sobre la exploración de dichos factores, a partir de la formulación de encuestas a residentes locales de la ciudad y utilizando un modelo de ecuación estructural de mínimo parcial (PLS-SEM). La investigación permitió establecer que la percepción del problema, la eficacia percibida, el valor percibido y las normas sociales ejercen un impacto directo e indirecto significativo, en la aceptación de una política de gestión de la demanda.

De igual forma, (Muley et al., 2021) a partir de la obtención de datos de demanda de tráfico, seguridad vial e indicadores de congestión del año 2020, obtenidos de las diferentes herramientas tecnológicas de tráfico de Qatar, realizaron una investigación basada en análisis estadísticos comparativos del parque automotor y los indicadores de movilidad antes y después de la aparición del Covid-19. Los recuentos de tráfico diarios de 24 intersecciones, fueron recopilados cada 15 minutos durante varios días, permitiendo establecer una reducción 30% en el tráfico de la demanda para todos los puntos estudiados. Una investigación similar en Corea de Sur, comparó estadísticamente los volúmenes de tráfico diario de enero a marzo entre 2020 y 2019, mostrando los cambios de comportamiento en la elección modal y las variaciones del parque automotor (Lee et al., 2020).

También, (Viri et al., 2021) en su estudio sobre la flota de automóviles en Finlandia, basado en la velocidad de renovación del parque automotor, proporcionaron un escenario de proyección hasta el año 2040 a partir de un modelo que combina datos sociodemográficos de la poblacional finlandesa y la edad promedio de la flota. Dentro de sus múltiples resultados, concluyeron que las características de las zonas a las cual se realizan los modelos de

crecimiento tienen una influencia en los resultados, específicamente entre áreas rurales y urbanas.

Igualmente, en el año 2020 (Adnan et al., 2021) realizaron una investigación que tenía por objetivo establecer escenarios de optimización de las TDM para las ciudades de Hasselt en Bélgica y Bologna en Italia, a partir de modelos de crecimiento del parque automotor. Estos modelos permiten determinar que el comportamiento colectivo de los viajes realizados por los ciudadanos, está relacionado con su calidad de vida y que la optimización del transporte público genera un cambio del ciclista hacia este, con un resultado indeseable para las políticas de movilidad sostenible. La investigación utilizó un Modelo Basado en Agentes (ABM, por sus siglas en inglés) para simular y analizar las variables de tránsito que influyen en la movilidad de las ciudades. Debido a que los ABM requieren de un modelo de asignación para definir rutas de viaje, la asignación de tráfico tradicional provoca la pérdida de toda la información detallada, por lo que fue necesario usar el Modelo MATSIM para generar una integración adecuada, cuando se ejecuta un patrón individual de actividad-viaje.

De igual forma, análisis estadísticos que relacionan los niveles de congestión vehicular con la tasa de contagio de la Covid-19 realizados por (Urrego et al., 2020), permitieron respaldar las políticas de confinamiento durante la pandemia, restringiendo el uso de transporte privado y disminuyendo la tasa de ocupación del transporte privado. Los modelos estadísticos, se obtuvieron comparando la intensidad vehicular en días típicos pre-pandemia con la intensidad vehicular obtenida en los días con pandemia, obteniendo los niveles de congestión que representan un riesgo de contagio para una movilidad de la población superior al 35% (Urrego et al., 2020).

Desde una mirada ambiental y de salud pública, (Ceballos et al., 2019) en su investigación sobre la norma del P&P en la ciudad de Medellín y su efectividad en la mitigación de emisión de contaminantes mediante un modelo ABM, analizaron las tendencias de las diferentes variables involucradas en los problemas de congestión vehicular y contaminación ambiental derivadas de la implementación de la TDM. Así mismo, una investigación realizada por

(Fridstrøm et al., 2016), buscó identificar mediante el desarrollo de un modelo matemático, qué tan rápido se mitigarían los efectos adversos de gases de efecto invernadero y contaminantes derivados del parque automotor vigente, a través un proceso normal de renovación vehicular hacia vehículos más limpios. Este modelo matemático, presenta proyecciones de crecimiento en el horizonte 2050 bajo un escenario de política fiscal baja en carbono, concluyendo que dicha política marca una gran diferencia en términos de consumo de combustible a largo plazo y emisiones de CO₂. Finalmente, resalta la importancia de incluir en nuevos modelos de crecimiento del parque automotor, aspectos claves como la tasa de chatarrización, la incidentalidad, elección de viajes entre otros.

(Krempels & Ziefle, 2015), en su investigación sobre la gestión de la demanda realizada en Alemania en 2015, establecieron que los modelos ABM, son una herramienta adecuada para simular los efectos técnicos y económicos de las TDM debido a su capacidad para evaluar las interacciones entre variables heterogéneas complejas existentes en las redes de transporte, además de las rutinas diarias y los efectos de la congestión. Sin embargo, este mismo estudio aclara que la calidad de los resultados obtenidos de un modelo ABM, depende de la calidad de los datos subyacentes

Por otro lado, (Kim et al., 2004) en su investigación sobre la política de conversión de flota óptima desde la perspectiva del ciclo de vida en EE. UU, exploran una política de conversión de flota óptima basada en vehículos de motor de combustión interna de tamaño mediano, definida como aquella que minimiza las emisiones totales del ciclo de vida de toda la flota de vehículos nuevos y usados. Con el desarrollo de una modelación que investiga las políticas de conversión de flota para tres contaminantes regulados (CO, NMHC y NO_x) y para CO₂ a partir de un análisis multiobjetivo basado en métodos de valoración económica, para investigar las ventajas y desventajas entre las emisiones de diferentes contaminantes para políticas óptimas de conversión de flota. El estudio concluye que las políticas de desguace acelerado para reducir las emisiones reguladas son recomendables, pero pueden aumentar los gases de efecto invernadero.

Desde una mirada regional, los modelos a partir de encuestas Origen – Destino, permiten plantear soluciones para gestionar la demanda basadas en los patrones de viaje de los ciudadanos y los modos de transporte disponibles (Ho & Mulley, 2013). Dichos modelos obtienen información de los viajes típicos de los habitantes de un territorio, con base en cuestionarios de preferencia revelada y declarada realizados a un porcentaje de la población, que sirven de insumo para establecer patrones de viaje (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2017). Este tipo de investigaciones han sido la base para la implementación de políticas como el P&P en el Valle de Aburrá, permitiendo administrar la capacidad de la malla vial en los periodos diarios de mayor congestión (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2017). El distrito de Medellín, depende en parte de esta información para establecer estrategias de gestión de la demanda que mitiguen los efectos negativos de la congestión vehicular en la ciudad. Sin embargo, debido a las diferentes políticas nacionales para el ingreso y comercialización de vehículos nuevos, las condiciones topográficas del territorio, el crecimiento demográfico cambiante y la variabilidad de las estrategias implementadas en el Valle de Aburrá en los últimos años para restringir el uso del vehículo particular, resulta difícil realizar estimaciones del crecimiento del parque automotor que permitan definir políticas públicas claras para la planeación, en temas como infraestructura, movilidad y control territorial en los próximos años.

Finalmente, los modelos que caracterizan la composición vehicular de las ciudades en términos de tamaño, antigüedad, tipo de combustible y capacidad de la malla vial, son una opción para estimar el incremento del parque automotor y proponer escenarios alternativos para la implementación de TDM en un territorio (Litman, 2006). Investigaciones como las realizadas en Turquía por (Aydinalp Köksal et al., 2021), establecen la importancia de imponer incentivos a la chatarrización y la edad promedio de los vehículos como una estrategia para controlar el crecimiento del parque automotor e incentivar el uso de transporte público (Aydinalp Köksal et al., 2021).

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Diseñar un modelo del crecimiento del parque automotor que evalúe la variación en la cantidad de autos, motos y buses de transporte público en la ciudad de Medellín, a partir de la implementación de medidas de gestión de la demanda como la restricción por uso de placa y la chatarrización.

5.2. Objetivos específicos

- 5.2.1. Comparar la literatura relacionada con la estimación del crecimiento del parque automotor, con el fin de identificar las diferentes metodologías y variables empleadas.
- 5.2.2. Establecer las fuentes de información disponible que se relacionen con las variables identificadas, con el propósito de definir procedimientos e instrumentos de recolección fiables para el procesamiento y análisis.
- 5.2.3. Diseñar un modelo que permita establecer la influencia de las Medidas de Gestión de la Demanda basadas en la restricción por uso de placa y la chatarrización, en las proyecciones de crecimiento del parque automotor en la ciudad de Medellín.
- 5.2.4. Validar el modelo diseñado y proponer escenarios de crecimiento del parque automotor a mediano y largo plazo.

6. Metodología

Para dar cumplimiento al objetivo general y los objetivos específicos de la investigación, fue necesario realizar una construcción conceptual de la metodología a abordar en el desarrollo del trabajo de grado y la definición del método a utilizar, a partir de los resultados del análisis de la literatura, las variables identificadas y la información disponible.

6.1. Conocimiento científico

Con el objetivo de identificar el conocimiento científico desarrollado sobre el tema de interés en los últimos años, tal como se describió en el capítulo 2 del presente documento, se realizó una búsqueda a través de las diferentes bases de datos bibliográficas disponibles para la Universidad de Antioquia. Esta búsqueda, permite establecer y caracterizar de forma metodológica las publicaciones que tuvieran mayor relación con la investigación. Posteriormente se realiza una clasificación según el método primario utilizado para cumplir sus objetivos, la función y el nivel de implementación definido, permitiendo establecer si las publicaciones analizadas respondían a la necesidad de evaluar y proponer políticas públicas para el control del crecimiento del parque automotor a partir de argumentos cualitativos, análisis estadísticos y modelaciones.

6.2. Fuentes de información

A partir de la revisión de la literatura, se establecen las posibles variables que permiten estructurar, diseñar y validar un modelo que responda a los objetivos de la investigación (Ver Figura 11). Algunas de las variables identificadas en la literatura, que permiten caracterizar el comportamiento del parque automotor, se describen a continuación:

- Normatividad nacional y regional vigente.
- Crecimiento histórico del parque automotor nacional.
- Crecimiento histórico del parque automotor regional.
- Caracterización del parque automotor distrital.

- Estadísticas de pico y placa.
- Crecimiento demográfico.
- Incidentalidad.
- Cantidad de agentes de tránsito.

Figura 11

Variables disponibles y fuente de información



Nota: Elaboración propia.

Una vez identificadas las variables, se realizar una búsqueda y recopilación de información requerida, en las bases de datos públicas de las entidades responsables de producir y custodiar dichos datos:

- Ministerio de Transporte.
- Registro Único Nacional de Tránsito.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

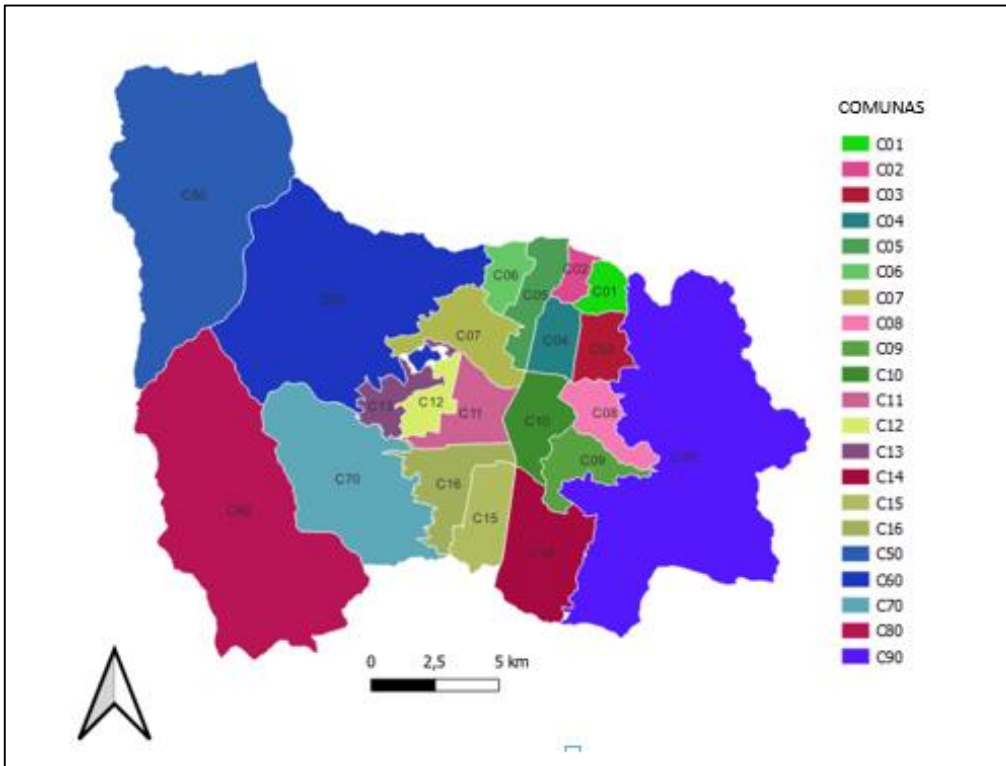
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- Gobernación de Antioquia.
- Distrito de Medellín.

6.2.1. Información geográfica de la ciudad de Medellín

Los datos geográficos suministrados por la Subsecretaría de Catastro del distrito de Medellín, corresponden a la capa que contiene proyecciones demográficas para cada una de las comunas de la ciudad. Durante la etapa de diseño del modelo, esta capa permitió cargar el mapa del distrito representado en la Figura 12, con cada una de sus comunas en la interfaz del modelo ABM.

Figura 12

Datos geográficos de la ciudad de Medellín QGIS 3.22.7



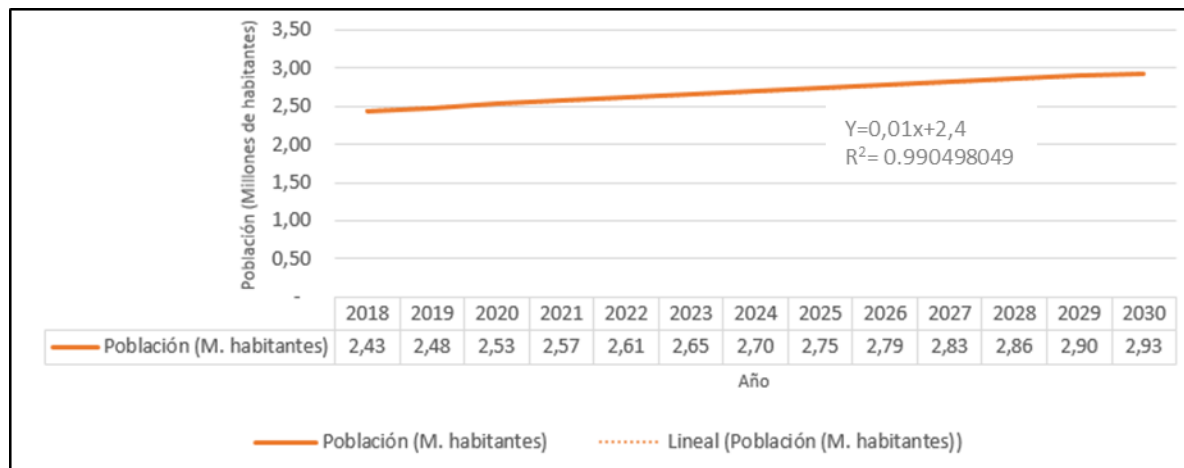
Nota. Fuente de la Subsecretaría de Catastro distrital de Medellín.

6.2.2. Información demográfica

A partir de los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV- 2018, fue posible obtener las proyecciones poblacionales calculadas para la ciudad de Medellín hasta el 2030 y definir la ecuación que represente su comportamiento en el tiempo.

Figura 13

Proyecciones demográficas de la ciudad de Medellín



Nota. Fuente de información del *Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV- 2018.*

De acuerdo con esta información, se puede observar en la Figura 13 que el crecimiento poblacional de la ciudad de Medellín para los próximos años se proyecta de forma lineal.

6.2.3. Registros del parque automotor nacional

A través del sistema de información RUNT, el cual registra, actualiza, centraliza, valida los registros de automotores, conductores, licencias de tránsito, empresas de transporte público, infractores, accidentes de tránsito en el país, fue posible obtener la información histórica sobre parque automotor de Colombia de los últimos años.

Como se observa en la Tabla 1, los registros del RUNT establecen que el rango de crecimiento del parque automotor en el país de los últimos años varía entre un 5% y 6%.

Tabla 1

Crecimiento del parque automotor en Colombia 2021

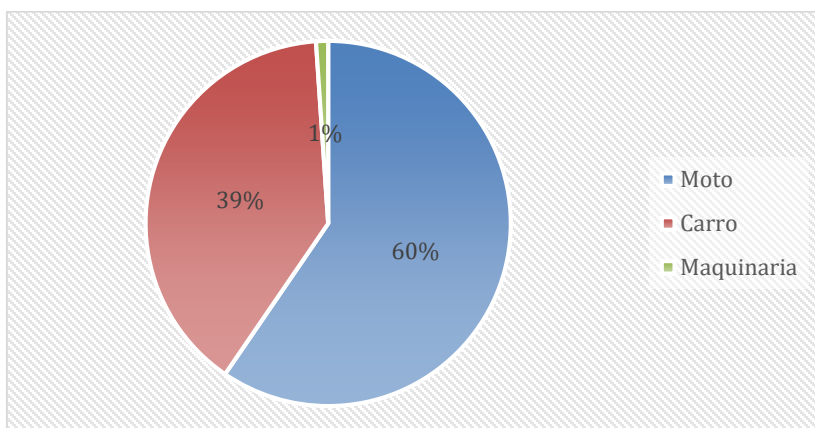
Año	2018	2019	2020	2021
Parque Automotor	14.549.309	15.337.965	16.042.336	17.020.451
Crecimiento anual		5%	5%	6%

Nota. Registro Único Nacional de Tránsito

También, esta misma fuente de información, clasifica la distribución modal del parque automotor en el país para el año 2021, con un 60% de motos, un 39% carros y un 1% de vehículos de carga y maquinaria, tal como se muestra en la Figura 14.

Figura 14

Distribución de los modos de transporte en Colombia 2021



Nota. Fuente del Registro Único Nacional de Tránsito.

Adicionalmente, de acuerdo con el boletín de prensa del RUNT No. 12 de 2021, la edad promedio de los autos en el país alcanzó los 17,5 años, mientras que las motos se encuentran en 11.1 años (RUNT, 2021a). En este mismo sentido, en la Tabla 2 se presentan la edad promedio del parque automotor en Colombia y Antioquia para el 2021.

Tabla 2

Edad promedio del parque Automotor en Colombia y Antioquia 2021

Años	0 a 5	6 a 10	11 a 15	> 16
Colombia	30%	27%	18%	25%
Antioquia	33%	27%	17%	22%

Nota. Datos del Registro Único Nacional de Tránsito.

En este mismo sentido, los registros del RUNT presentados en la Tabla 3 muestran que la adquisición de motocicletas en el país se ha duplicado con un crecimiento promedio de 7% en los últimos 5 años, siendo Antioquia uno de los departamentos con mayor cantidad de este tipo de vehículos.

Tabla 3

Crecimiento de las motos en Colombia 2012 - 2021

Año	Motos	Crecimiento anual
2017	7.745.184	7%
2018	8.288.262	7%
2019	8.889.228	7%
2020	9.405.619	6%
2021	10.130.407	8%

Nota. Fuente de los datos *Registro Único Nacional de Tránsito*

Finalmente, los datos nacionales de crecimiento del parque automotor de los últimos años, son usados para evaluar su nivel de correlación con el crecimiento poblacional de la ciudad de Medellín en el mismo periodo de la Tabla 1. Para ello, se estimó el coeficiente de correlación de Pearson entre la cantidad de habitantes y el número de vehículos para el mismo periodo temporal. Conceptualmente, este coeficiente varía de -1 a 1, donde si su valor es igual a 1, existe una correlación positiva perfecta (si una variable crece, la otra también). Para este caso, se obtuvo un coeficiente de 0,99, lo cual muestra el alto nivel de relación entre el crecimiento del parque automotor y el crecimiento poblacional (ver Tabla 4).

Tabla 4

Relación entre el crecimiento demográfico y el parque automotor

Año	Habitantes Medellín	Crecimiento PA
2018	2.427.129	14.549.309
2019	2.483.545	15.337.965
2020	2.533.424	16.042.336
2021	2.573.220	17.020.451
Coeficiente de correlación		0.990498049
R ²		0.981086385

Nota. Elaboración propia

6.2.4. Registros parque automotor distrital

Mediante los requerimientos de información realizados a la Secretaría de Movilidad de la ciudad de Medellín, fue posible determinar la distribución modal de los vehículos matriculados en la ciudad para 2019 y 2020 y su variación porcentual (Ver Tabla 5).

Tabla 5

Parque Automotor matriculado en el distrito de Medellín 2019 - 2020

Clase	Unidades		
	2019	2020	Variación
Auto	237.697	245.842	3%
Moto	27.976	28.531	2%
Vehículos públicos	23.687	23.823	1%
Camiones	12.372	12.518	1%
Buses, busetas, microbuses	9.875	9.912	0%
Vehículos oficiales	1.277	1.276	0%
Total	312.884	321.902	3%

Nota. Datos de la Secretaría de Movilidad de Medellín.

Con respecto a los vehículos de transporte público TPC, la cantidad de vehículos de este tipo que presta servicio para cada comuna de la ciudad, se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6

Vehículos TPC matriculado en el distrito de Medellín 2021

Comuna	Cantidad	%
01 Popular	180	5,3%
02 Santa Cruz	90	2,6%
03 Manrique	153	4,5%
04 Aranjuez	50	1,5%
05 Castilla	186	5,5%
06 Doce De Octubre	250	7,3%
07 Robledo	272	8,0%
08 Villa Hermosa	168	4,9%
09 Buenos Aires	523	15,4%
10 La Candelaria	46	1,4%
11 Laureles - Estadio	111	3,3%

Modelo del crecimiento del parque automotor en la ciudad de Medellín, a partir de la implementación de políticas públicas para la gestión de la demanda basadas en la restricción por uso de placa y la chatarrización.

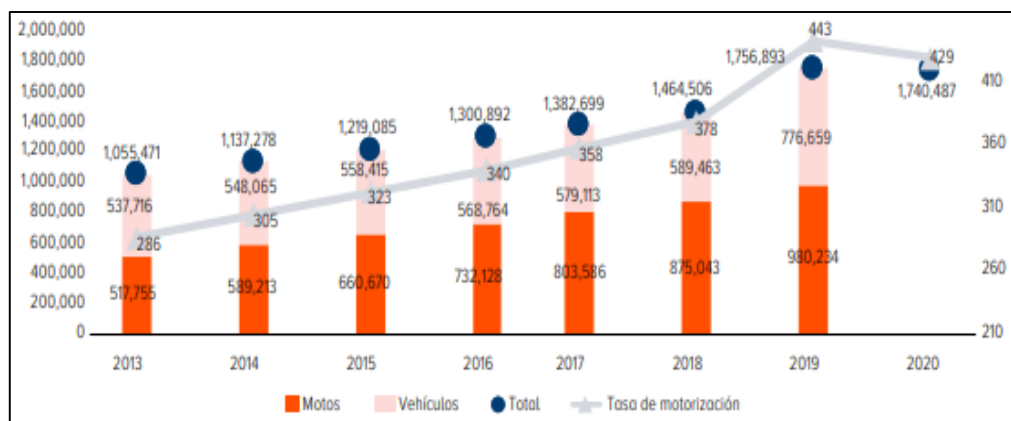
Comuna	Cantidad	%
12 La América	169	5,0%
13 San Javier	234	6,9%
14 El Poblado	215	6,3%
15 Guayabal	26	0,8%
16 Belén	116	3,4%
50 San Sebastián De Palmitas	1	0,1%
60 San Cristóbal	242	7,1%
70 Altavista	204	6,0%
80 San Antonio de Prado	83	2,3%
90 Santa Elena	83	2,4%

Nota. Datos de la Secretaría de Movilidad de Medellín.

Por su parte, el informe de calidad de vida Medellín 2020 mostrado en la Figura 15, presenta información sobre el comportamiento del parque automotor y tasa de motorización, 2013-2020 para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, que refleja la tendencia de crecimiento del parque automotor del territorio metropolitano en los últimos años.

Figura 15

Parque automotor y tasa de motorización, 2013-2020



Nota. Fuente de la infografía Medellín Cómo Vamos 2020.

Adicionalmente, para determinar el porcentaje de tenencia vehicular por comuna de la ciudad de Medellín, se tuvo en cuenta las encuestas de preferencia declarada realizados para la elaboración del informe de calidad de vida Medellín 2020, las cuales permitieron definir como se muestra en la Tabla 7, los porcentajes de tenencia vehicular por comuna. Esta

información fue incorporada dentro de la información geográfica que hace parte del modelo propuesto.

- Pregunta 213 ¿Cuántos vehículos particulares en funcionamiento tiene este hogar? (no incluye vehículo de servicio público o utilizado para generar ingresos).
- Pregunta 217 ¿Cuántos autos tiene este hogar?

Tabla 7
Tenencia vehicular promedio en Medellín 2020

Comuna	Pregunta_213		Pregunta_217		Promedio	
	Unidades	%	Unidades	%	Unidades	%
01 Popular	82	1%	82	1%	82	1%
02 Santa Cruz	103	2%	99	2%	101	2%
03 Manrique	230	3%	196	4%	213	4%
04 Aranjuez	227	3%	210	4%	219	4%
05 Castilla	195	3%	182	3%	189	3%
06 Doce De Octubre	221	3%	188	3%	205	3%
07 Robledo	368	6%	339	6%	354	6%
08 Villa Hermosa	214	3%	195	3%	205	3%
09 Buenos Aires	402	6%	364	7%	383	6%
10 La Candelaria	234	4%	207	4%	221	4%
11 Laureles - Estadio	944	14%	787	14%	866	14%
12 La América	438	7%	367	7%	403	7%
13 San Javier	218	3%	210	4%	214	4%
14 El Poblado	1.394	21%	984	18%	1.189	19%
15 Guayabal	116	2%	109	2%	113	2%
16 Belén	817	12%	696	12%	757	12%
50 Palmitas	30	0%	30	1%	30	0%
60 San Cristóbal	61	1%	61	1%	61	1%
70 Altavista	79	1%	71	1%	75	1%
80 San Antonio de Prado	163	2%	153	3%	158	3%
90 Santa Elena	48	1%	45	1%	47	1%

Nota. Encuesta calidad de vida distrito de Medellín 2020

6.2.5. Indicador de los Kilómetros - Vehículo Recorridos

Con el objetivo proponer dentro del modelo ABM una política que asocie la vida útil de un vehículo no solo con su edad operativa, sino también al desgaste generado por el kilometraje

de uso, fue necesario definir el indicador promedio de Kilómetros Vehículo Recorridos (KVR) estimado para los vehículos colombianos, el cual representa la cantidad de promedio de kilómetros que recorre un vehículo en un tiempo determinado.

En este sentido, un estudio realizado por la Comisión Europea que buscaba identificar posibles mejoras a la definición de kilometraje de por vida de los vehículos livianos, definió como línea base para la investigación una vida útil operativa de los vehículos de 15 años, estableciendo un rango de KVR entre 29.52 y 46.03 Km * Veh/día (Dun et al., 2015)

Por su parte, la Universidad Politécnica Salesiana realizó una investigación para determinar el KVR para la ciudad de Cuenca en México, cuyos resultados definieron un rango entre 31.11 y 41.09 Km * Veh/día (Sarango & Moncayo, 2016). De igual forma, un estudio para determinar del KVR para la ciudad el Cantón Cañar en Ecuador, definió un rango anual para la ciudad entre el 22.5 y el 36 Km * Veh/día. Adicionalmente presentó una referencia promedio de KVR para América Latina de 56.89 Km * Veh/día (Ortiz, 2012).

Para el caso de Colombia. actualmente no se tiene definida una cifra clara de KVR promedio para vehículos particulares. Sin embargó, varias empresas colombianas como *Motor*, *Siempreauto*, *Comautomotriz* y *Comprabien*, que se especializan en la compra, venta y mantenimiento de vehículos, han publicado informe que estiman un rango de kilometraje anual de los vehículos particulares entre el 10.000 y 20.000 Km/año, lo que corresponde a un KVR de 41.09 Km * Veh/día con una desviación estándar de 13.7 Km * Veh/día.

Tabla 8

Estimación del cálculo KVR

Fuente	KVR	KM –Vehículo recorridos anualmente
European Commission	29.52 - 46.03	10.775 - 16.8001
Universidad Politécnica Salesiana	31,11- 41.09	11.355 - 15.000
Universidad del Azuay	22.5 - 36.00	8.213 - 13.140
Autofac (Perú y México)	41.09 - 73.97	15.000 - 27.000

Fuente	KVR	KM –Vehículo recorridos anualmente
Artículo de revista Motor	27.40 - 32.88	10.000 - 12.000
Artículo revista Simpreauto	27.40	10.000
Artículo revista Comautomotriz	< 54.79	20.000
Artículo revista Comprabien	27.40 - 41.10	10.000 - 15.000

Nota. Elaboración propia a partir de diferentes fuentes de información.

Teniendo en cuenta los datos presentados en la Tabla 8, para la investigación se definió utilizar un KVR anual igual a 15.000 con una desviación de estandar de 5.000, ya que este valor está dentro del rango estimado para Colombia y a su vez se encuentra dentro de los estándares calculados internacionalmente.

Finalmente, dentro del modelo ABM propuesto, el indicador de KVR permite establecer un límite máximo de kilómetros recorridos para los vehículos, con base en la vida útil definida en cada uno de los escenarios.

6.2.6. Intensidad vehicular de circulación por Pico y placa

De acuerdo con los datos suministrados por el Centro de Control de Tránsito, la Secretaría de Movilidad de Medellín a estimado una disminución del 5% en la intensidad durante el periodo comprendido entre las 5:00 y las 20:00 (horario en el que se aplica la medida) con base en los datos registrados en una semana promedio de septiembre de 2021 (sin medida de pico y placa) y noviembre de 2021 (durante la medida de pico y placa de un dígito).

Tabla 9
Intensidad vehicular asociada al P&P 2021

Periodo	Horario (h)	Intensidad (Veh/h)		Variación
		Septiembre 2021	Noviembre 2021	
Antes de P&P	0:00 - 4:59	386.610	409.180	6%
Después de P&P	20:00 - 23:59	1.293.830	1.287.525	0%
Durante P&P	5:00 - 19:59	8.800.211	8.396.536	-5%

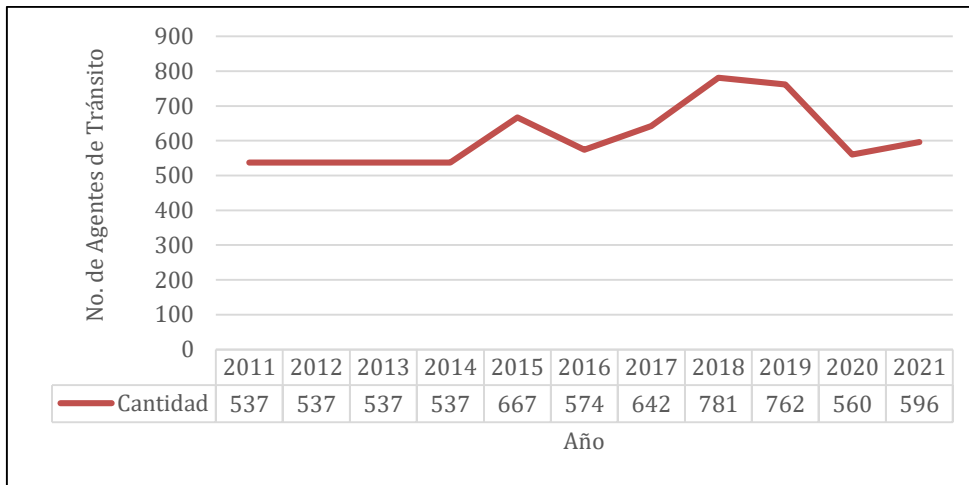
Nota. Datos obtenidos del Centro de Control de Tránsito de la Secretaría de Movilidad de Medellín

6.2.7. Agentes de tránsito

La Secretaría de Gestión Humana y Servicios a la Ciudadanía del distrito de Medellín, suministró para la investigación el histórico de agentes de tránsito contratados para operar en la ciudad desde el 2012 hasta el 2021, presentado en la Figura 16. Esta información y su posterior validación en las entrevistas con los expertos, permitió visualizar variaciones relevantes de la cantidad de agentes de tránsito asociadas a proyectos viales de gran impacto como Parque del Río Occidental entre las vigencias 2014 - 2016 y Parque del Río Oriental entre las vigencias 2017 – 2019. Sin embargo, con respecto a las cifras en condiciones normales de operación, se logró establecer que el crecimiento de los agentes de tránsito de la ciudad es de aproximadamente un 1% anual.

Figura 16

Histórico de agentes de tránsito de Medellín 2021



Nota. Fuente de datos de la *Secretaría de gestión Humana de Medellín.*

6.2.8. Incidentalidad

A través del observatorio de movilidad de Medellín, se obtuvieron los registros de incidentalidad de la ciudad de Medellín en 2021 discriminados para cada una de las comunas de la ciudad de Medellín, los cuales fueron incorporados dentro de la información geográfica suministrada por catastro (Ver Tabla 10).

Tabla 10
Incidentes viales en la ciudad de Medellín 2019-2021

Comuna	2019	2020	2021	Promedio	
	Cantidad	Cantidad	Cantidad	Cantidad	%
01 Popular	625	613	660	633	1,59%
02 Santa Cruz	623	543	640	602	1,51%
03 Manrique	1.276	1.067	1.296	1.213	3,05%
04 Aranjuez	2.817	2.038	2.626	2.494	6,26%
05 Castilla	4.344	3.023	4.143	3.837	9,64%
06 Doce De Octubre	1.067	769	1.047	961	2,41%
07 Robledo	3.038	2.068	3.116	2.741	6,88%
08 Villa Hermosa	1.171	1.070	1.177	1.139	2,86%
09 Buenos Aires	1.671	1.348	1.561	1.527	3,83%
10 La Candelaria	9.531	6.012	7.507	7.683	19,30%
11 Laureles - Estadio	4.797	3.037	4.055	3.963	9,95%
12 La América	1.613	1.122	1.367	1.367	3,43%
13 San Javier	753	590	806	716	1,80%
14 El Poblado	4.484	2.592	3.253	3.443	8,65%
15 Guayabal	3.388	2.298	2.884	2.857	7,17%
16 Belén	3.364	2.331	2.884	2.860	7,18%
50 Palmitas	121	90	122	111	0,28%
60 San Cristóbal	767	620	843	743	1,87%
70 Altavista	143	143	102	129	0,32%
80 San Antonio de Prado	437	407	438	427	1,07%
90 Santa Elena	424	293	394	370	0,93%
Total	46.454	32.074	40.921	39.816	100,00%

Nota. Datos del Observatorio de Movilidad de la Secretaría de Movilidad de Medellín

Obtener la información de incidentalidad para el diseño del modelo ABM, permitió construir una Ecuación 1, que utiliza el modelo ABM para proyectar la cantidad de incidentes que se generarían debido al crecimiento del parque automotor, con base en los incidentes en el año 0, la cantidad de vehículos disponibles para circular y la intensidad vehicular definida con los datos de P&P.

$$Incidentes_n = \frac{Incidentes_0}{Circulación\ P\&P_0} * Intensidad\ P\&P_n * PA_n \quad (1)$$

Donde,

$Incidentes_n$ = Incidentes proyectados para el año n.

$Incidentes_0$ = Incidentes presentados en el año 0.

Intensidad P&P_n = Número de vehículos matriculados en la ciudad de Medellín, que están habilitados para circular según la política de P&P definida por la ciudad. En la ecuación, este número de vehículos está expresado en porcentaje, respecto al total del parque automotor matriculado en la ciudad para el mismo periodo de tiempo.

Circulación P&P₀ = Cantidad de autos y motos matriculados en Medellín habilitados para circular en un día de P&P en el año 0.

PA_n = Parque automotor proyectado en el año n.

A partir de los datos obtenidos de incidentalidad promedio y el histórico de agentes de tránsito disponible para la ciudad de Medellín, fue posible establecer con la Ecuación 2 un indicador para el modelo ABM propuesto, que calcule la carga administrativa de los agentes de tránsito del distrito, para atender el parque automotor registrado en el distrito de Medellín y establecer propuestas a partir de los escenarios formulados.

$$Indice IA_n = \frac{Incidentes_n}{Agentes\ de\ tránsito_n} \quad (2)$$

Donde,

Índice IA = Cantidad promedio de incidentes que un agente de tránsito debe atender en el año n

Incidentes = Incidentes proyectados para el año n.

Agentes de tránsito = Cantidad de agentes de tránsito en el año n

6.2.9. Políticas de chatarrización vehicular en Colombia

Actualmente, las políticas colombianas para la renovación del Transporte Público Colectivo (TPC) se rigen por la Ley 105 de 1993, la cual dictan disposiciones básicas sobre el transporte, se redistribuyen competencias y recursos entre la Nación y las Entidades Territoriales, se reglamenta la planeación en el sector transporte y se dictan otras

disposiciones (Congreso de la Republica de Colombia, Ley 105 de 1993, Artículo 6). Esta ley definió el transporte público como aquel que se presta bajo la responsabilidad de una empresa de transporte legalmente constituida y debidamente habilitada en ésta modalidad y que recorre total o parcialmente una o más rutas legalmente autorizadas y estableció un periodo de vida útil de veinte (20) años para este tipo de vehículos, contados a partir del 31 de diciembre del año de matrícula. Sin embargo, el gobierno nacional en el año 2022 estableció algunas medidas de reactivación económica para el transporte público terrestre de pasajeros poscovid-19 (Congreso de la Republica de Colombia, Ley 2198 de 2022, Artículo 1), que incluyeron la ampliación de la vida útil por 4 años más para los vehículos TPC matriculados antes del año 2020, que no estuvieran en proceso de chatarrización.

Adicionalmente, para incentivar la chatarrización de particulares, en el año 2013 el gobierno nacional definió una exoneración tributaria sobre el impuesto de vehículos privados a las personas que desintegren físicamente autos modelo 2000 o anteriores (Congreso de la Republica de Colombia, Ley 1630 de 2013, Artículo 1). Esta Ley contempla esta exoneración durante dos años a partir de haberse firmado, lo que significa que este beneficio termina el 27 de mayo del 2015. En este sentido, la decisión de desintegrar un vehículo que no cumple con las condiciones técnicas y de seguridad para su circulación, continúa siendo una decisión discrecional de sus propietarios y no del Estado, por lo que se concluye que actualmente no existe una política de chatarrización para vehículos particulares como la que se propone en la presente investigación.

6.3. Construcción de la línea base del modelo

De acuerdo con la información registrada en el numeral 6.2 *Fuentes de información* y las entrevistas realizadas a los expertos de la Secretaría de Movilidad, en la Tabla 11 se definieron y consolidaron los datos de entrada que son parte de la construcción de modelo ABM propuesto para evaluar la variación del parque automotor, a partir de la implementación de medidas de gestión de la demanda como la restricción por uso de placa y la chatarrización.

Tabla 11
Resumen de información para línea base del modelo

Criterios	Unidad	Valor
Parque Autos año 0	Autos	280.000
Parque Motos año 0	Motos	30.000
Crecimiento anual autos	%	5
Crecimiento anual motos	%	7
% Intensidad P&P - 1 dígito	%	95
Incidentes viales Medellín año 0	Incidentes	39.816
No. Agentes de tránsito (AT) año 0	Agentes/turno	199
Crecimiento anual AT	%	1
Índice IA año 0	(Incidente/Agente)	200
TPC año 0	Buses	3.402
Crecimiento TPC año 0	%	0
Vida útil TPC	Años	20
KVR Colombia	Km/año	15.000 σ 5.000

Nota. Consolidación de datos numeral 6.2 *Fuentes de información.*

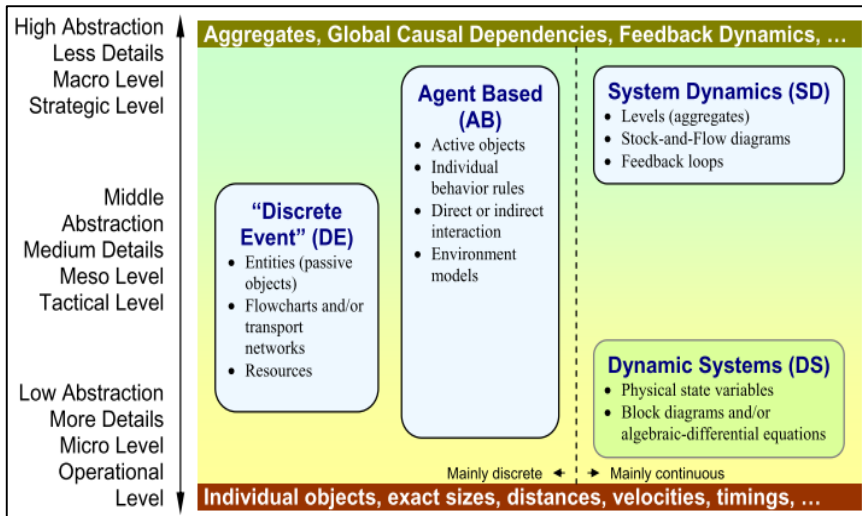
6.4. Diseño del modelo

Una vez definidas las variables, se evalúa el método más apropiado para la construcción del modelo conceptual. De acuerdo con los niveles de implementación identificados en el análisis de la literatura y las metodologías que se aproximan a la solución del problema descritas en el marco teórico y el estado del arte, se establece que el problema que busca afrontar la investigación puede ser abordado a partir del diseño de un modelo de interacción de individuos basado en agentes, ya que este tipo de modelos se enfoca en el individuo y el comportamiento global surge como resultado de interacciones de muchos comportamientos individuales, permitiendo generar los escenarios de simulación con una escala temporal graduada y una interacción geoespacial definida para la investigación (Borshchev & Filippov, 2004).

En el modelo AMB, los autos, motos, vehículos TPC fueron categorizados como individuos, a los cuales se les asignan propiedades de edad, vida útil y kilómetros de uso, dentro de una capa definida que circunscribe el distrito y sus comunas. Adicionalmente se caracteriza un individuo adicional dentro del modelo, que corresponde a los agentes de tránsito.

Figura 17

Enfoques en el modelado de simulación en escala de nivel de abstracción

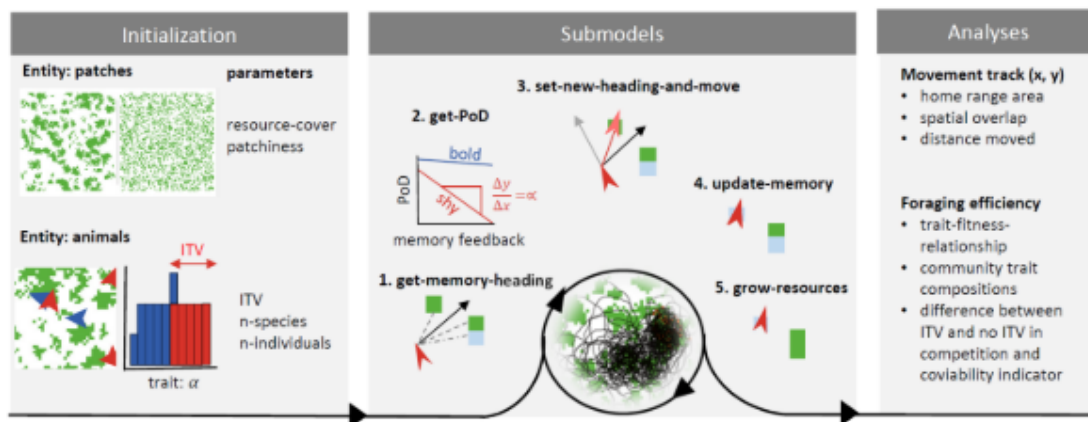


Nota. Fuente *From System Dynamics and Discrete Event and Agent-based Modeling And Geographical Information Systems*.

El modelo conceptual de la investigación se realiza usando el protocolo ODD (Overview, Design concepts and Details) presentado en la Figura 18, el cual es un formato estándar que permite describir modelos de simulación basada en agentes y facilita la interpretación de su estructura, la lectura y escritura, permitiendo la replicación de modelos simples y complejos de diferentes tópicos (Grimm et al., 2020).

Figura 18

Visualización conceptual de un modelo bajo el protocolo ODD



Nota. Fuente del artículo *The ODD protocol for describing agent-based and other simulation models: A second update to improve clarity, replication, and structural realism*.

6.4.1. Perspectiva (Overview)

- Propósito: El modelo ABM busca predecir la variación del parque automotor en la cantidad de autos, motos y buses de transporte público de la ciudad de Medellín a 30 años, a partir de la implementación de medidas de gestión de la demanda como la restricción por uso de placa y la chatarrización, utilizando datos gubernamentales.
- Entidades, variables de estado y escalas: A cada vehículo se le asigna un agente representado con un carro, una moto o un bus dentro del modelo ABM. Estos agentes toman decisiones basándose en las proyecciones de crecimiento vehicular, las políticas de chatarrización y de P&P definidas en una escala anual durante un máximo de 30 años a partir del año base.

Para trabajar con el modelo, se definen las siguientes variables globales con el fin de evaluar los efectos generados en el parque automotor proyectado a 30 años:

- Cantidad de autos año 0: Número de autos matriculados en la ciudad de Medellín para el año 0 del modelo:
- Cantidad de motos año 0: Número de motos matriculadas en la ciudad de Medellín para el año 0 del modelo.
- Cantidad de TPC año 0: Número de vehículos de transporte público matriculados en la ciudad de Medellín para el año 0 del modelo.
- Cantidad de agentes de tránsito año 0: Promedio del número de agentes de tránsito de la ciudad de Medellín en el año 0, que están disponibles para hacer controles de tránsito en las diferentes comunas.
- Crecimiento anual de los autos: Porcentaje promedio de crecimiento anual de los autos para la ciudad de Medellín para los próximos 30 años.
- Crecimiento anual de las motos: Porcentaje promedio de crecimiento anual de las motos para la ciudad de Medellín para los próximos 30 años.

- Intensidad vehicular P&P: Número de vehículos matriculados en la ciudad de Medellín, que están habilitados para circular según la política de P&P definida por la ciudad. Este número de vehículos está expresado en porcentaje, respecto al total del parque automotor matriculado en la ciudad para el mismo periodo de tiempo.
- Circulación Vehículos P&P: Número de vehículos matriculados en la ciudad de Medellín, que están habilitados para circular según la política de P&P definida por la ciudad.
- Vida útil vehicular: Número de años de operación definidos dentro de las políticas públicas para realizar la chatarrización de autos y motos.
- Periodo de implementación: Plazo máximo contado a partir del año 0, para la implementación de las políticas públicas de chatarrización, definido como el tiempo necesario para que los propietarios de autos y motos se preparen logística y económicamente para la implementación de la política pública.
- Porcentaje de crecimiento anual del TPC que se desea evaluar: Porcentaje promedio de crecimiento anual del TPC para la ciudad de Medellín en los próximos 30 años.
- Vida útil TPC: Número de años de operación definidos dentro de las políticas públicas para realizar la chatarrización del TPC. Actualmente el gobierno nacional lo tiene definido en 20 años.
- Crecimiento anual AT: Porcentaje promedio de crecimiento anual del número de agentes de tránsito disponibles para la ciudad de Medellín.
- Año (n): Año de evaluación de las políticas públicas. En el modelo ABM propuesto, cada tick corresponde al paso de un año dentro del periodo de 30 años de evaluación definido.
- Total parque automotor: Cálculo de la cantidad de vehículos (Autos y motos) proyectados en el año n, según las políticas públicas definidas para el año 0.
- Total PA chatarrizado: Cálculo de la cantidad de vehículos (Autos y motos) que serían chatarrizados en el año n, según las políticas públicas definidas para el año 0.

- Total Vehículos TPC: Cálculo de la cantidad de TPC proyectados en el año n, según las políticas públicas definidas para el año 0.
 - Total TPC chatarrizados: Cálculo de la cantidad de TPC que serían chatarrizados en el año n, según las políticas públicas definidas para el año 0.
 - Incidentes: Cálculo de la cantidad de incidentes que proyectados para el año n, según las proyecciones del parque automotor asociadas a las políticas públicas definidas en el año 0.
 - Índice IA: Indicador que permite calcular la carga administrativa anual de los agentes de tránsito del distrito, para atender su parque automotor registrado.
- Visión general del proceso y programación: El proceso de simulación se realiza mediante dos procesos jerárquicos que deben realizarse en orden para garantizar el resultado de la simulación.

El primer proceso corresponde con la inicialización del modelo, donde se carga la información geográfica de las comunas de la ciudad de Medellín. Debido a que el mapa con todos los datos geográficos de la ciudad de Medellín tiene un tamaño que no soporta el software NetLogo, se realizó el cargue de los datos desde el Sistema de Información Geográfica (SIG). Las comunas se cargan mediante la extensión SIG de NetLogo, permitiendo identificar las capas por comunas a partir del vector VCOMUNA en la interfaz del programa.

Posteriormente, se crean los agentes y se clasifican en autos, motos, buses de transporte público y agentes de tránsito, dentro de las capas definidas como comunas, de acuerdo con las políticas de crecimiento del parque automotor, chatarrización y P&P que se deseen evaluar. Las tortugas asociadas a autos y motos y buses, se les asigna atributos de energía (vida útil) y adicionalmente a los autos y las motos se les asigna propiedades uso (KVR).

Finalmente, al ejecutar la simulación se puede visualizar la variación del parque automotor en un periodo de 30 años con base en las políticas públicas definidas en el proceso inicial, obteniendo el cálculo de la cantidad de vehículos existentes y chatarrizados para el periodo de evaluación (año n), así como la cantidad de vehículos TPC y agentes de tránsito existentes para el mismo periodo de evaluación.

6.4.2. Conceptos de diseño (Design Concepts)

Estos conceptos permiten interpretar los resultados del modelo, asegurando que las decisiones importantes del diseño han sido hechas de manera consciente y que los lectores son conscientes de éstas decisiones.

- Principios básicos: El modelo evalúa la relación existente entre la cantidad disponible de vehículos y las políticas públicas que posibilitan el control de su crecimiento dentro de un área geográfica determinada (Viri et al., 2021). Para ello se determina una cantidad específica de vehículos (autos, motos y vehículos TPC) y se definen tasas de crecimiento de acuerdo con los datos históricos obtenidos para el área geográfica. Con esta información, se evalúa el comportamiento de la variación de los vehículos en el territorio estableciendo periodos de chatarrización asociados a la vida útil del vehículo, su uso e intensidad vehicular. Complementariamente, los datos obtenidos, posibilitan la evaluación de información de segundo orden como el requerimiento de agentes de tránsito en el territorio y proyecciones de incidentalidad vial.
- Aparición – Emergencia: Con la información de los porcentajes de tenencia vehicular por comuna, es posible segregar el cálculo total de los vehículos disponibles en el área geográfica por comunas, para cada año (n) evaluado. Es importante aclarar que el modelo cuenta un periodo de 5 a 8 años para el inicio de la implementación de la política de chatarrización, que busca que los propietarios de los vehículos cuenten

con un tiempo prudente para planear la modernización o cambio de su medio de transporte.

- Adaptación: Los agentes al ser datos geográficos estacionarios e interpretados como un corte trasversal de la base de datos no presentan adaptación. Los agentes no cuentan con reglas para tomar decisiones o modificar su comportamiento en respuesta a cambios en sí mismos o en el entorno.
- Objetivos: El modelo busca determinar la variación en la cantidad de autos, motos y buses de transporte público en la ciudad de Medellín, a partir de la implementación de medidas de gestión de la demanda como la restricción por uso de placa y la chatarrización.
- Aprendizaje: En el modelo los agentes no cambian los rasgos adaptativos a lo largo del tiempo como consecuencia de la experiencia.
- Predicción: En el modelo, los agentes utilizan las políticas públicas definidas en el proceso inicial de cargue, para establecer el crecimiento futuro, las cuales son constantes durante el periodo de evaluación.
- Detección: Las capas gráficas y los agentes del presente modelo detectan el entorno con base en los datos cargados desde la información SIG, teniendo en cuenta que cada agente contiene información geográfica específica, tales como la comuna y porcentaje de tenencia, se relaciona la información geográfica del entorno y la información espacial de los agentes en el modelo, permitiendo una relación SIG-Agente.
- Interacción: En el modelo, los agentes no presentan interacción, ya que son autómatas y su relación existe por las condiciones definidas por el modelador. Luego de que se validen las variables y las condiciones geográficas de los datos SIG, existe una

validación que tiene en cuenta la cantidad de autómatas de un mismo tipo alrededor del agente en cuestión. Esta relación está basada en los parámetros definidos por el modelador al momento de cargar la línea base de simulación.

- Estocasticidad: La vida útil de todos los agentes cargados al inicio del modelo con una aleatoriedad ligada al informe de la edad promedio del parque automotor en la región (RUNT, 2021a). Esta misma aleatoriedad se encuentra definida para la elección de la comuna por cada uno de los agentes que emergen dentro del modelo y para el uso anual de los vehículos (KVR) durante el periodo de evaluación de los diferentes escenarios.
- Colectivos: Son definidos dentro del modelo como un conjunto de entidades con sus propios atributos y comportamientos. El nivel de agregación del modelo presenta un nivel de colectivos clasificados en autos, motos, vehículos TPC y agente de tránsito.
- Observación: El modelo permite visualizar para cada año (n), la cantidad existente de vehículos, discriminando entre autos, motos, vehículos TPC, al igual que la cantidad de vehículos chatarrizados para ese mismo espacio temporal, a partir de las políticas públicas de chatarrización y de P&P establecidas en la inicialización del modelo.

6.4.3. Detalles (Details)

- Inicialización: En general, el estado inicial del modelo presentado en la Figura 19 es determinado por el usuario y cambia según la selección de políticas y escenarios a evaluar. En este sentido, para cargar las condiciones geográficas de los datos SIG de la ciudad de Medellín clasificado por comunas, es necesario que el modelador defina los siguientes criterios:

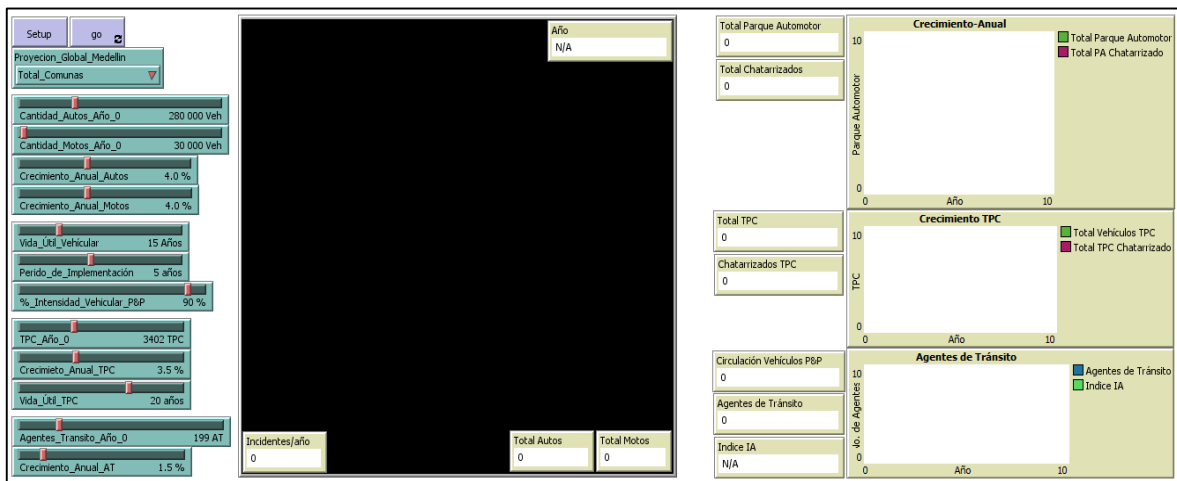
Cantidad de autos año 0.

Cantidad de motos año 0.

Cantidad de TPC año 0.

- Cantidad de agentes de tránsito año 0.
- Porcentaje de crecimiento anual de los autos.
- Porcentaje de crecimiento anual de las motos.
- % Intensidad P&P
- Porcentaje de crecimiento anual del TPC que se desea evaluar
- Vida útil de los vehículos particulares.
- Vida útil de vehículos TPC.
- Periodo de implementación de las políticas de chatarrización.
- No. Agentes de tránsito (AT) año 0.
- Crecimiento anual AT

Figura 19
Interfaz gráfica del ABM propuesto en la etapa de inicialización



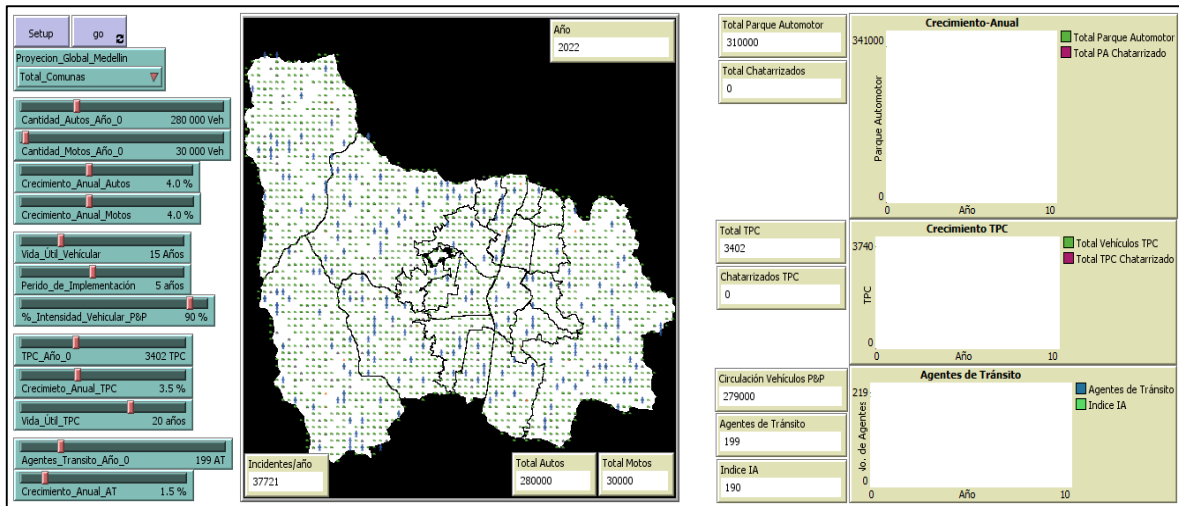
Nota. Elaboración propia a partir de Netlogo 6.1.1.

- Datos de entrada (Input data)

Una vez definidos los datos de entrada para la inicialización, estos permiten cargar las condiciones geográficas de los datos SIG de la ciudad de Medellín presentadas en la Figura 20, generando las capas de información requeridas para correr el modelo y permitiendo validar los datos de inicialización.

Figura 20

Interfaz gráfica del ABM propuesto en la etapa de datos de entrada



Nota. Elaboración propia a partir de Netlogo 6.1.1.

- Submodelos (Submodels)

Como se especificó en el aparte del protocolo ODD “Visión general del proceso y programación”, debido a que el mapa con todos los datos geográficos de la ciudad de Medellín tiene un tamaño que no soporta el software NetLog, para la inicialización del modelo ejecuta un submodelo que permite realizar la carga directa de los datos del Sistema de Información Geográfica (SIG). Las comunas se cargan mediante la extensión SIG de NetLogo, permitiendo discriminar las capas por comunas de acuerdo con la información de la variable COMUNA.

Una vez se tiene obtenido el modelo, se efectúa una parametrización, una verificación y una validación, que posibiliten proponer escenarios de solución al problema planteado y finalmente analizar los resultados.

6.5. Parametrización, verificación y validación del modelo

Una vez diseñado el modelo ABM, se procede a realizar su parametrización, verificación y una validación, con el fin de evaluar su comportamiento. La parametrización busca ajustar

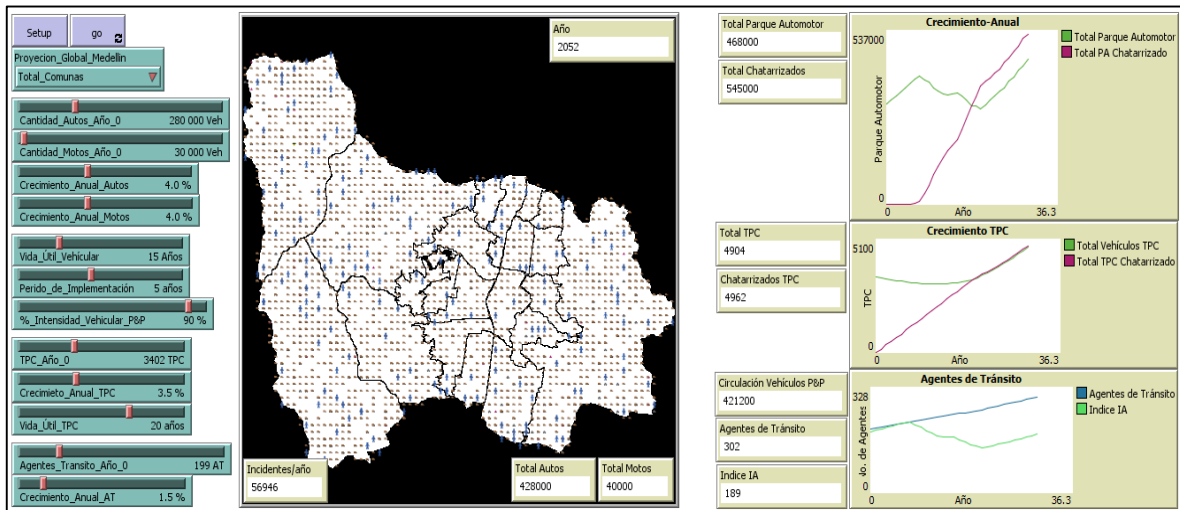
los criterios del modelo para que el comportamiento coincida estrechamente con las condiciones observadas. La verificación determinará si el modelo está libre de errores de programación que posiblemente afecten la correcta interpretación de los resultados. Finalmente, la validación determina si las salidas del modelo se ajustan correctamente a la realidad.

6.5.1. Parametrización

Teniendo en cuenta que los datos de inicialización del modelo, para la evaluación de los diferentes escenarios propuestos en el modelo ABM, fueron obtenidos a partir de fuentes de información oficiales, se considera que los criterios del modelo se encuentran parametrizados según los valores de la Figura 21 y la Tabla 12.

Figura 21

Interfaz gráfica del ABM propuesto en la etapa de datos de salida



Nota. *Elaboración propia a partir de Netlogo 6.1.1*

Tabla 12

Parametrización de criterios

Criterio	Unidad	Valor
Parque Autos	Autos	270000
Parque Motos	Motos	29000
Crecimiento Parque Autos	%	4 - 5
Crecimiento Parque Motos	%	4 - 7

Criterio	Unidad	Valor
Vida útil vehicular	Años	15 - 20 - 25
Periodo de implementación	Años	5 - 8 - 10
Circulación P&P	%	95 - 90
TPC	Buses	3240
Crecimiento TPC	%	4 - 5
Vida útil TPC	Años	20
Agentes de tránsito (AT)	Agentes/turno	199.0
Crecimiento AT	%	1.0 -1.5

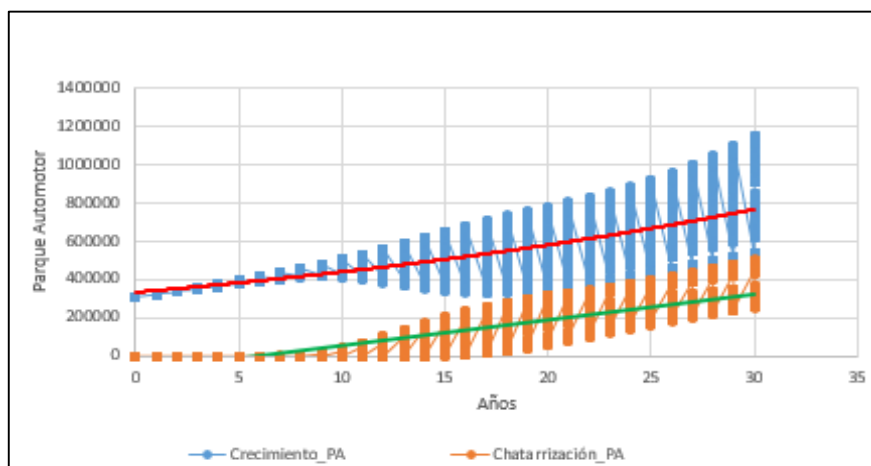
Nota. Elaboración propia.

6.5.2. Verificación

Con el rango de datos definido en la Tabla 12, se exploraron 2.400 escenarios dentro del modelo ABM a fin de observar el rango de resultados obtenidos para las diferentes interacciones entre variables. En la Figura 22, las líneas verticales muestran el rango de dispersión de los resultados de la modelación, y las líneas de tendencia se ajustan al universo de escenarios explorados, permitiendo verificar si pequeños cambios generados en la inicialización del modelo generan variaciones significativas de los resultados. Como resultado de correr cada una de las iteraciones, se obtiene una validación de la gráfica del comportamiento general de los diferentes escenarios, que permite observar líneas de tendencia sin cambios abruptos.

Figura 22

Proyección del parque automotor para los escenarios evaluados a 30 años



Nota. Elaboración propia a partir de resultado del modelo ABM.

6.5.3. Validación

Para la validación del Modelo ABM, se realiza un ejercicio de retroalimentación de los resultados preliminares de varios escenarios, con expertos de la Secretaría de Movilidad, buscando validar la congruencia de los resultados obtenidos con el modelo. En los diferentes encuentros, se evaluaron conceptos técnicos sobre la vida útil de los vehículos particulares del país, los periodos adecuados para una posible implementación de las políticas de chatarrización, el crecimiento del parque automotor del distrito y la capacidad del distrito para ejercer control sobre el parque automotor existente con el cuerpo de agentes de tránsito actual. Como resultado de esta retroalimentación, fue posible identificar mejoras en el modelo ABM inicialmente planteado, en factores como la influencia del índice KVR en la vida útil de los vehículos particulares, las políticas actuales que rigen el TPC y el déficit actual en la cantidad de agentes de tránsito del distrito. Adicionalmente, dichos conceptos permitieron definir las políticas públicas para 6 escenarios de proyección del parque automotor dentro del modelo ABM propuesto.

Registro fotográfico 1

Entrevista con el Secretario de Movilidad de Medellín y su líder de la Unidad de Planeación y Prospectiva, 2022



Modelo del crecimiento del parque automotor en la ciudad de Medellín, a partir de la implementación de políticas públicas para la gestión de la demanda basadas en la restricción por uso de placa y la chatarrización.

Registro fotográfico 2

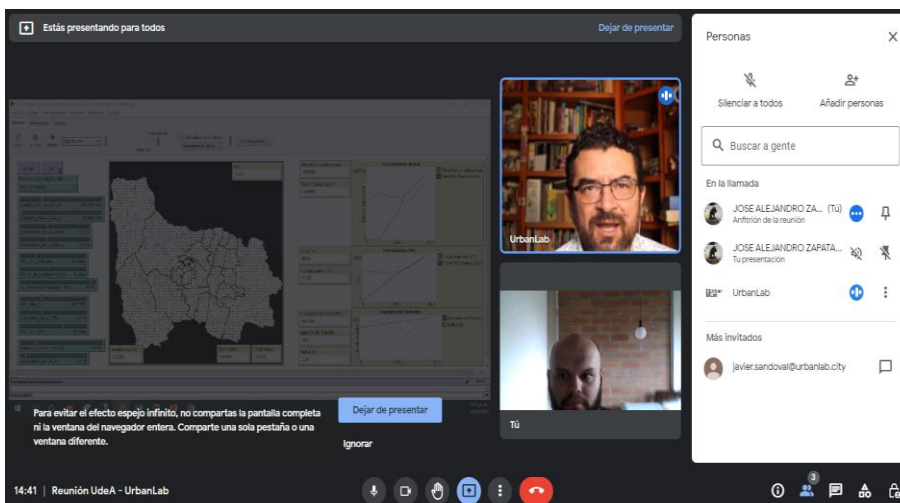
Entrevista con el comandante del cuerpo de agentes de tránsito de Medellín y coordinadores de zona, 2022



Complementariamente, el modelo ABM fue presentado al profesor Javier Sandoval Félix, fundador del laboratorio urbanos de políticas públicas UrbanLab en México y quien también es el creador de la escuela en línea de Simulación Basada en Agentes. La reunión permitió generar una retroalimentación sobre los resultados del modelo y su aplicabilidad real, a partir de la experiencia del profesor Sandoval con UrbanLab.

Registro fotográfico 3

Reunión con el doctor Javier Sandoval Félix, 2022



Finalmente, con el diseño del modelo parametrizado, verificado y validado, se procede a explorar los resultados de los escenarios de simulación de crecimiento del parque automotor representativos.

7. Resultados

Es este capítulo, se plantean los escenarios de proyección del parque automotor en la ciudad de Medellín presentados en la Tabla 13, con el fin de evaluar su variación a partir de la implementación de diferentes medidas de gestión de la demanda como la restricción por uso de placa y la chatarrización.

Tabla 13
Escenarios evaluados con el modelo ABM propuesto

Críterios	Unidad	Escenario base	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Parque Autos año 0	Autos	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000
Parque Motos año 0	Motos	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
Crecimiento Parque Autos	%	5	4	5	5	5	5
Crecimiento Parque Motos	%	7	4	7	7	7	7
Vida útil vehicular	Años	30	15	15	15	20	20
Periodo de implementación	Años	30	5	5	8	5	8
Intensidad P&P	%	95	90	95	95	95	95
Agentes de tránsito	Agentes/turno	199	199	199	199	199	199
Crecimiento AT	%	1	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0
IA	(Incidente/AT*año)	200	190	200	200	200	200
Parque Automotor año 30	Vehículos	1.467.000	471.000	824.000	830.000	973.000	978.000
Autos año 30	Carros	1.239.000	432.000	673.000	681.000	800.000	806.000
Motos año 30	Motos	228.000	39.000	151.000	149.000	173.000	172.000
PA Chatarrizados año 30	Vehículos	18.000	542.000	661.000	655.000	512.000	507.000
Circulación Vehículos P&P	Vehículos	1.393.650	423.900	782.800	788.500	924.350	929.100
Agentes de tránsito año 30	Agentes/turno	260	302	260	260	260	260
Índice IA año 30	(Incidente/AT*año)	721	187	408	406	484	485

Nota. Elaboración propia.

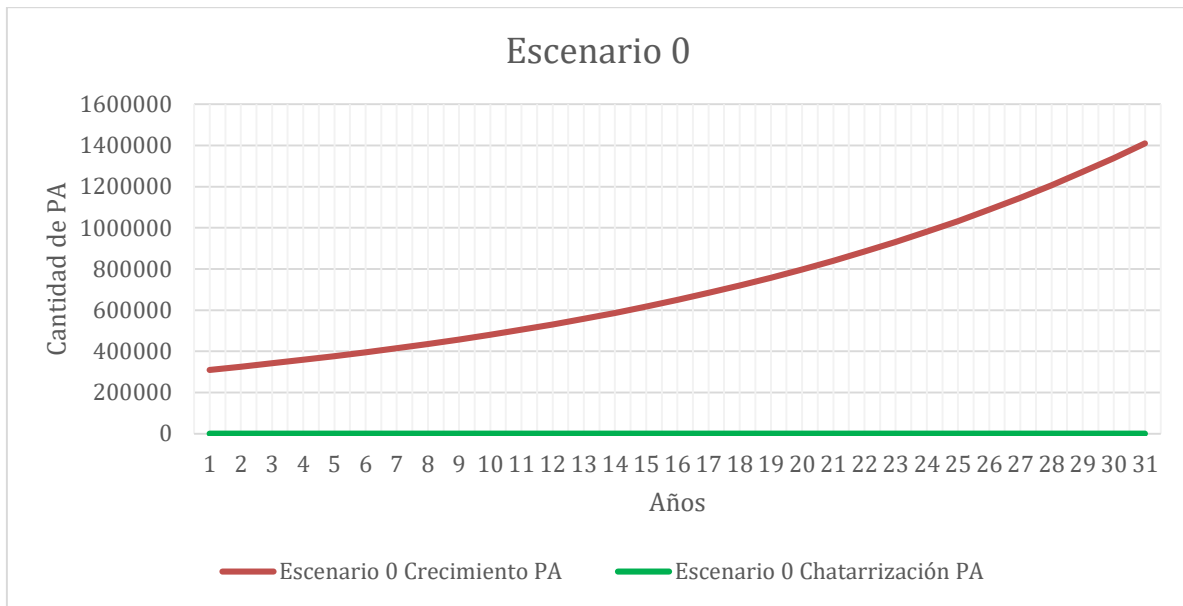
7.1. Escenario base

Este escenario presenta las condiciones actuales de motorización de la ciudad de Medellín proyectadas a 30 años sin incluir políticas de chatarrización. Para evaluar este escenario, se establece una vida útil del parque automotor superior a los 30 años y sus KVR equivalentes, con un periodo de gracia para la implementación de la política no inferior a los 30 años y

medidas complementarias de P&P de 1 dígito durante el mismo periodo de evaluación. Como se observa en la Tabla 13 y la Figura 23, su efectividad para controlar el crecimiento del parque automotor en los próximos 30 años, refleja un incremento del 373% con respecto al año 0. Adicionalmente el escenario base presenta un indicador IA igual a 200 para el año 0 y de 721 para el año 30, lo que supone un incremento en el indicador del 260%

Figura 23

Escenario base de proyección del Parque Automotor a 30 años



Nota. Elaboración propia a partir de resultado del modelo ABM.

7.2. Escenario No. 1

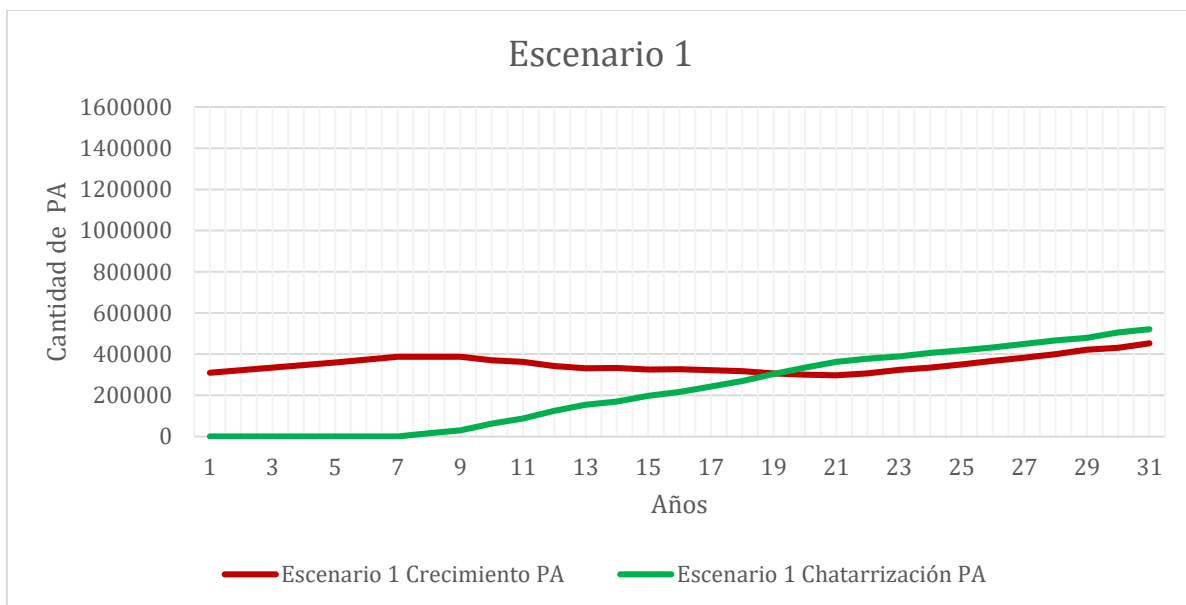
Escenario propuesto por los líderes de la Secretaría de Movilidad, como el más ambicioso y con mayor rigurosidad para controlar el parque automotor de la ciudad en los próximos 30 años. Proponer políticas públicas que permitan controlar los indicadores de crecimiento del parque automotor en un 4%, a partir de diferentes estrategias de seguridad vial y control (L. Suarez, comunicación personal, 26 de julio de 2022)

El modelo AMB lo define como el mejor escenario para una política de chatarrización de vehículos privados con una vida útil superior a los 15 años o sus KVR equivalentes, con un

periodo de gracia para la implementación de la política no superior a los 5 años y medidas complementarias de P&P de 2 dígitos. Como se observa en la Tabla 13 y la Figura 24, su efectividad para controlar el crecimiento del parque automotor en los próximos 30 años, resulta en un incremento del 50% con respecto al año 0 y una disminución del 68% respecto el escenario base. Sin embargo, este este escenario se basa en supuestos de crecimiento del parque automotor que los datos recopilados en el capítulo 3 del presente documento, no reflejan como condiciones actuales de movilidad en la ciudad. Adicionalmente el escenario No. 1 presenta un indicador IA para el año 30 igual a 197 para el año 30, lo que supone una disminución del 1% en el indicador.

Figura 24

Escenario No. 1 de proyección del Parque Automotor a 30 años



Nota. Elaboración propia a partir de resultado del modelo ABM.

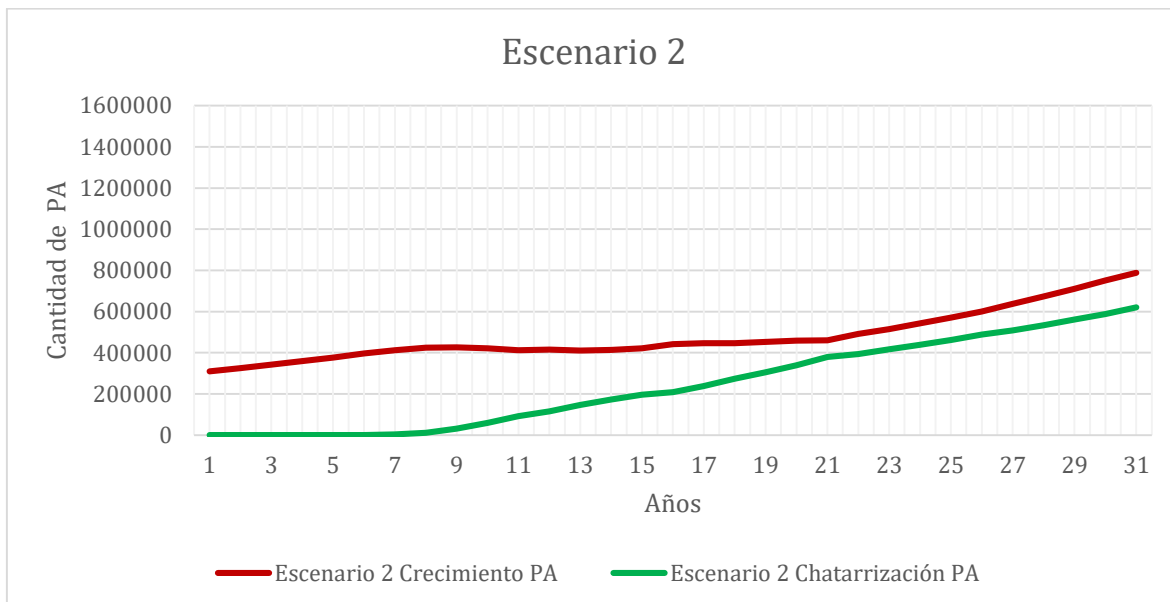
7.3. Escenario No. 2

Escenario propuesto como una política pública rigurosa para controlar el parque automotor en los próximos 30 años, que se basa en los indicadores del crecimiento identificados en las fuentes de información. Al igual que en el escenario No. 1, el modelo lo establece una política de chatarrización para vehículos con una vida útil superior a los 15 años o sus KVR

equivalentes, con un periodo de gracia para la implementación de la política no superior a los 5 años y medidas complementarias de P&P de 1 dígito. Como se observa en la Tabla 13 y la Figura 25, con respecto al año 0 los resultados muestran un incremento del parque automotor para la ciudad de Medellín de un 166% en el año 30 y respecto al escenario base presenta una disminución del 47%. Adicionalmente el escenario No. 2 presenta un indicador IA para el año 30 igual a 408 para el año 30, lo que supone un aumento del 104% en el indicador.

Figura 25

Escenario No. 2 de proyección del Parque Automotor a 30 años



Nota. Elaboración propia a partir de resultado del modelo ABM.

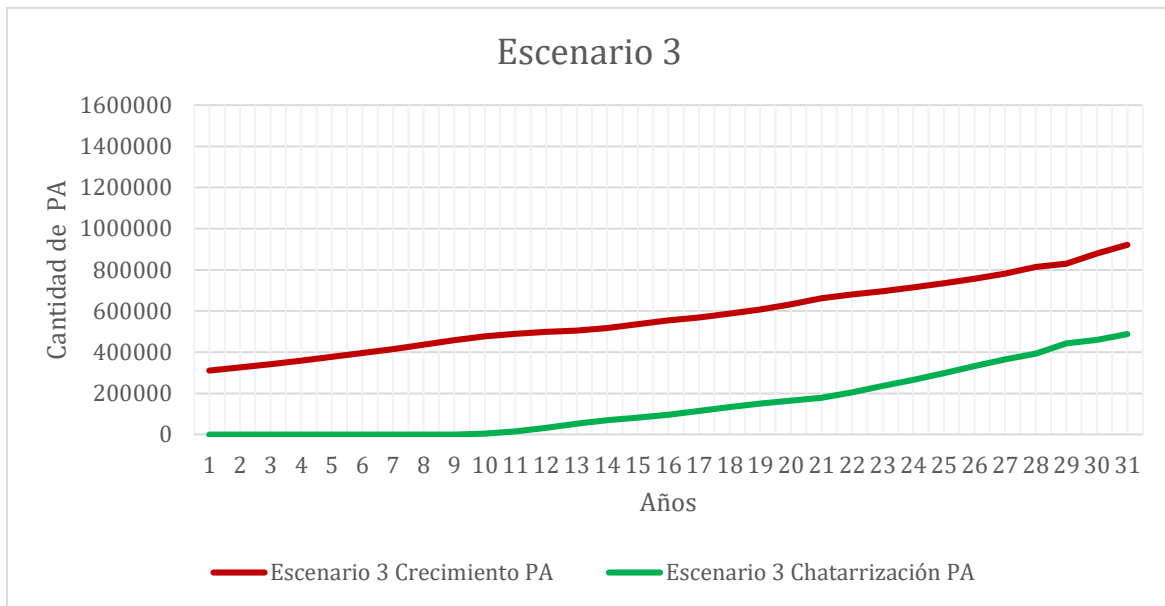
7.4. Escenario No. 3

Este escenario propone políticas similares a las definidas en el escenario No. 2 para controlar el parque automotor en los próximos 30 años, pero aumentando a 8 años el periodo de implementación de dichas políticas. Como se observa en la Tabla 13 y la Figura 26, con respecto al año 0 los resultados presentan un incremento del parque automotor para la ciudad de Medellín de un 168% en el año 30 y una disminución del 44% respecto al escenario base, mostrando resultados similares al escenario No. 2. Por lo anterior, se evidencia que aumentar

el periodo de implementación de la política de chatarrización, no influye considerablemente en el crecimiento de parque automotor a 30 años, si se mantienen constantes los indicadores de crecimiento. Adicionalmente el escenario No. 3 presenta un indicador IA para el año 30 igual a 406 para el año 30, lo que supone un aumento del 103% en el indicador.

Figura 26

Escenario No. 3 de proyección del Parque Automotor a 30 años



Nota. Elaboración propia a partir de resultado del modelo ABM.

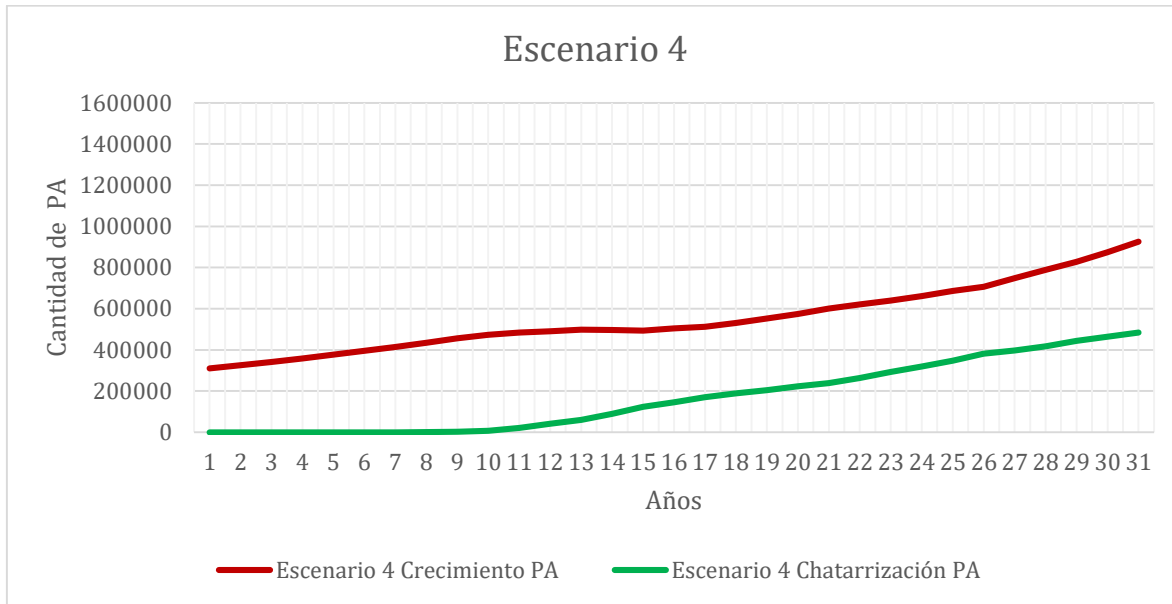
7.5. Escenario No. 4

Escenario propuesto como una política pública conservadora para controlar el parque automotor en los próximos 30 años, que se basa en los indicadores del crecimiento identificados en las fuentes de información. El modelo lo establece una política de chatarrización para vehículos con una vida útil superior a los 20 años o sus KVR equivalentes, conservando un periodo de gracia para la implementación de la política no superior a los 5 años. Como se observa en la Tabla 13 y la Figura 27, con respecto al año 0 los resultados muestran un incremento del parque automotor para la ciudad de Medellín de un 213% en el año 30 y una disminución del 34% respecto al escenario base. Adicionalmente

el escenario No. 4 presenta un indicador IA para el año 30 igual a 484 para el año 0, lo que supone un aumento del 142% en el indicador.

Figura 27

Escenario No. 4 de proyección del Parque Automotor a 30 años



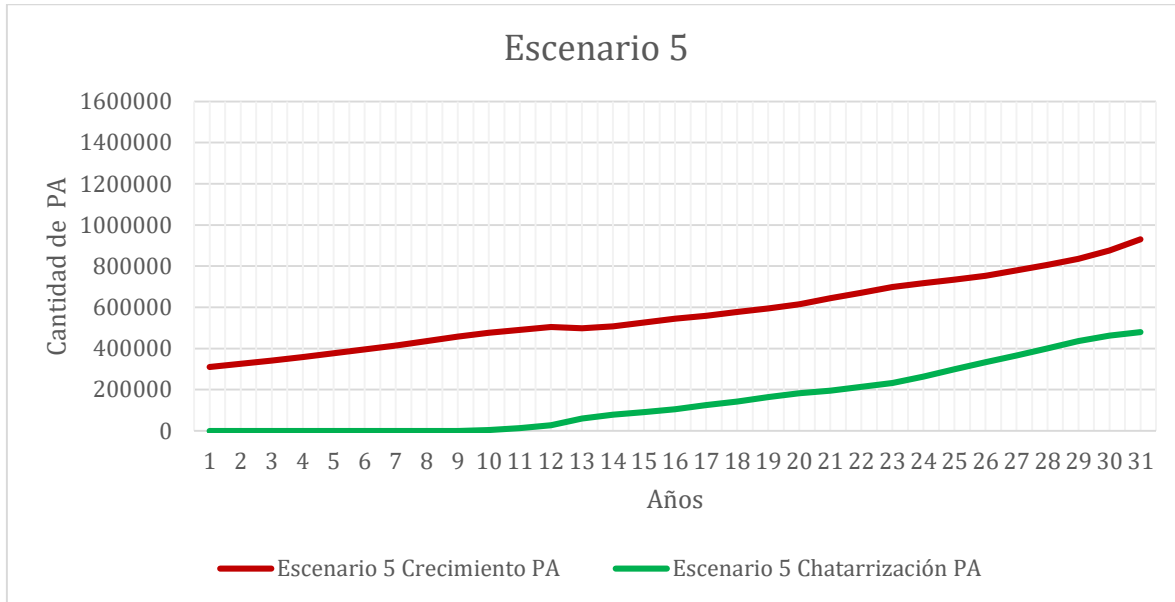
Nota. Elaboración propia a partir de resultado del modelo ABM.

7.6. Escenario No. 5

Este escenario propone políticas similares a las definidas en el escenario No. 4 para controlar el parque automotor en los próximos 30 años, pero aumentando a 8 años el periodo de implementación de dichas políticas. Como se observa en la Tabla 13 y la Figura 28, con respecto al año 0 los resultados presentan un incremento del parque automotor para la ciudad de Medellín de un 215% en el año 30 y una disminución del 33% respecto al escenario base, mostrando resultados similares al escenario No. 4. Por lo anterior y al igual que para los escenarios No. 2 y No. 3, se refuerza la hipótesis de que aumentar el periodo de implementación de la política de chatarrización, no influye considerablemente en el crecimiento de parque automotor a 30 años, si se mantienen constantes los indicadores de crecimiento. Adicionalmente el escenario No. 5 presenta un indicador IA para el año 30 igual a 485 para el año 0, lo que supone un aumento del 142% en el indicador.

Figura 28

Escenario No. 5 de proyección del Parque Automotor a 30 años



Nota. Elaboración propia a partir de resultado del modelo ABM.

De acuerdo con los resultados de todos los escenarios propuestos, el escenario propuesto por la Secretaría de Movilidad, presenta los indicadores más favorables de proyección del parque automotor para los próximos 30 años. Sin embargo, por los tiempos requeridos para el establecimiento de una política pública como la que propone el escenario No. 1, muy posiblemente el escenario No. 5 representa la opción más conservadora frente a la proyección de motorización en la ciudad de Medellín en los próximos años.

7.7. Escenarios de crecimiento por comuna

A partir de los registros de tenencia vehicular para la ciudad de Medellín presentados en el numeral 6.2 *fuentes de información* y asumiendo que dichas relaciones porcentuales continuarán con variaciones mínimas durante los 30 años de evaluación del modelo, es posible obtener las proyecciones de crecimiento del parque automotor que se presentan en la Tabla 14, para cada una de las 21 comunas del territorio.

Tabla 14
Escenarios Parque Automotor por comuna

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Comuna 1	6.365	11.261	11.315	13.274	13.219
Comuna 2	7.816	13.828	13.894	16.299	16.232
Comuna 3	16.380	28.980	29.120	34.160	34.020
Comuna 4	16.895	29.891	30.035	35.234	35.089
Comuna 5	14.555	25.751	25.875	30.354	30.229
Comuna 6	15.725	27.821	27.955	32.794	32.659
Comuna 7	27.331	48.355	48.589	56.998	56.765
Comuna 8	15.772	27.904	28.038	32.891	32.756
Comuna 9	29.578	52.330	52.582	61.683	61.430
Comuna 10	16.988	30.056	30.202	35.429	35.284
Comuna 11	66.596	117.824	118.394	138.885	138.316
Comuna 12	30.982	54.814	55.078	64.611	64.346
Comuna 13	16.567	29.311	29.453	34.550	34.409
Comuna 14	90.839	160.715	161.491	189.442	188.665
Comuna 15	8.705	15.401	15.475	18.154	18.079
Comuna 16	58.266	103.086	103.584	121.512	121.014
Comuna 50	2.340	4.140	4.160	4.880	4.860
Comuna 60	4.727	8.363	8.403	9.858	9.817
Comuna 70	5.803	10.267	10.317	12.102	12.053
Comuna 80	12.215	21.611	21.715	25.474	25.369
Comuna 90	3.557	6.293	6.323	7.418	7.387

Nota. Elaboración propia a partir de resultado del modelo ABM.

Los resultados muestran un alto crecimiento del parque automotor para *La Comuna 14 (Poblado)*, *la Comuna 16 (Belén)* y *la Comuna 11 (Laureles – Estadio)*, lo cual se relaciona con el estrato socioeconómico de sus moradores, su capacidad adquisitiva, el estado de la infraestructura vial disponible para la circulación vehicular. Estos mismos condicionantes muestran que a los corregimientos de la ciudad como las zonas con menor crecimiento del parque automotor.

Por otro lado, aunque las comunas periféricas del nororiente y el noroccidente la ciudad de Medellín, presenten un crecimiento diferencial menor con respecto a comunas como *la 14 (Poblado)*, un crecimiento mínimo del parque automotor en estas comunas pueden tener

mayores impactos negativos sobre la congestión, los tiempos de viaje y la calidad de vida de sus residentes, ya que estas zonas se encuentran en alta pendiente y no cuentan con una infraestructura vial adecuada para atender volúmenes vehiculares mayores.

7.8. Escenarios vehículos TPC

Respecto a las políticas de crecimiento del Transporte Público Colectivo (TPC), con la información recaudada se evaluaron los condicionales actuales que tiene el país para regular el crecimiento del parque automotor de este tipo de vehículos en la ciudad de Medellín. En este sentido, la renovación del Transporte Público Colectivo (TPC) existente, operan bajo el Ley 105 de 1993, la cual dicta disposiciones básicas sobre el transporte, reglamenta la planeación en el sector transporte y establece una vida útil para la reposición de vehículos TPC de 20 años. Sin embargo, con la Ley 2198 de 2022 el gobierno nacional estableció algunas medidas de reactivación económica para el transporte público terrestre de pasajeros, que incluyó la ampliación de la vida útil de los vehículos TPC por 4 años más.

Con base en estos cambios, se propuso dentro del modelo evaluar los efectos derivados de la ampliación de la vida útil de los vehículos TPC, en el parque automotor de la ciudad.

Tabla 15

Escenarios evaluados vehículos TPC

Criterios	Unidad	Escenario 1 TPC	Escenario 2 TPC	Escenario 3 TPC	Escenario 4 TPC	Escenario 5 TPC	Escenario 6 TPC
TPC año 0	Buses	3.402	3.402	3.402	3.402	3.402	3.402
Crecimiento TPC	%	3,5	4	5	3,5	4	5
Vida útil TPC	Años	20	20	20	24	24	24
TPC año 30	Buses	4.904	6.229	9.609	5.540	6.988	10.639
Chatarrizados año 30	Buses	4.962	5.234	5.813	4.326	4.475	4.783

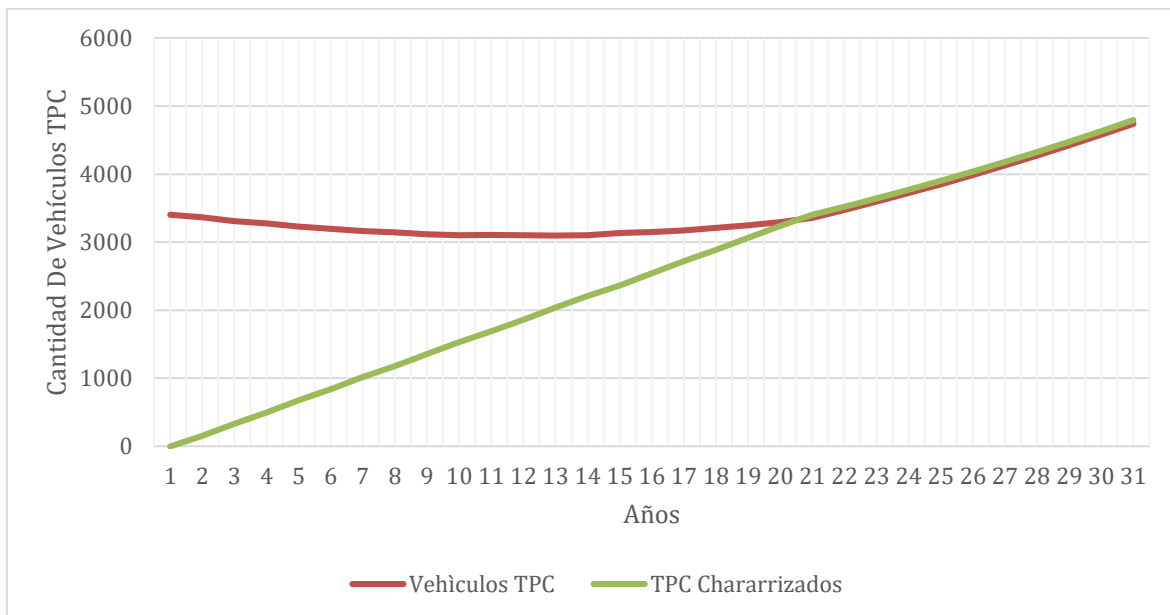
Nota. Elaboración propia a partir de resultado del modelo ABM.

En la Tabla 15, el escenario No. 1_{TPC} representa una condición de crecimiento de los vehículos TPC que guardar una relación entre el parque automotor TPC existente y

chatarrizado para una vida útil proyectada a 20 años, mientras que los escenarios No. 2_{TPC} y No. 3_{TPC} proponen un crecimiento más ambicioso para ampliar la cobertura de este tipo de servicio de transporte. Por su parte, el escenario 4_{TPC} presenta un crecimiento de los vehículos TPC con una vida útil de 24 años el cual rompe la relación entre el parque automotor TPC existente y la cantidad de unidades chatarrizadas. Los escenarios 5_{TPC} y 6_{TPC} corresponden a una propuesta un crecimiento más ambicioso para ampliar la cobertura de este tipo de servicio de transporte, bajo un escenario a 24 años.

Figura 29

Escenario 1 de proyección de vehículos TPC



Nota. Elaboración propia a partir de resultado del modelo ABM.

Teniendo en cuenta lo anterior, la Figura 29 muestra como el escenario No. 1_{TPC} representa las políticas más coherentes frente a las necesidades de crecimiento de los vehículos TPC en la ciudad y las obligaciones de las empresas transportadoras de generar una chatarrización en los plazos establecidos por las leyes colombianas, permitiendo propiciar no solo la renovación vehicular, sino también un crecimiento y modernización de los vehículos TPC, que mejore la oferta del servicio de transporte público e incentive el cambio modal de los propietarios de vehículos privados.

8. Conclusiones

La revisión de la literatura muestra como los modelos ABM representan una oportunidad para las instituciones públicas y académicas que buscan formular y evaluar políticas públicas de movilidad y transporte en un territorio, debido a su practicidad para establecer diferentes escenarios con múltiples variables, que permiten identificar problemáticas y proponer estrategias de solución.

El modelo ABM propuesto muestra la importancia de acompañar Medidas de Gestión de la Demanda como la restricción por uso de placa, con políticas públicas para el control de la edad promedio del parque automotor por parte del Gobierno Nacional, a través de estrategias como la chatarrización de los vehículos particulares que han finalizado su vida útil, con el objetivo de equilibrar la relación entre el crecimiento poblacional, el parque automotor existente y el parque automotor futuro y a su vez desincentivar el uso del vehículo particular adquirido, con un fortalecimiento en la infraestructura y operación del sistema de transporte público. Así mismo, la estrategia de incluir el indicador de KVR dentro de los factores de chatarrización de los vehículos, permitiría desincentivar en el uso del vehículo privado como opción principal de viaje, ya que sus propietarios estarían motivados a ampliar el factor KVR dentro del periodo de vida útil definido para su vehículo.

Las proyecciones de crecimiento del parque automotor en las comunas periféricas de la ciudad de Medellín con una topografía de alta pendiente y una infraestructura vial y de control de tránsito limitada, representan un reto importante para los futuros gobiernos, quienes tendrá la obligación de implementar políticas públicas que de manera efectiva incentiven el cambio modal con una oferta de transporte público de calidad, ya que a futuro las políticas de chatarrización y TDM por si solas será insuficientes frente al inevitable crecimiento demográfico en las comunas periféricas, las cuales no cuentan con una infraestructura vial adecuada para la operación de los vehículos TPC.

Es necesario proponer una actualización de las políticas de renovación del TPC existente, que actualmente operan bajo el Ley 105 de 1993, para que permita no solo la renovación de este tipo de vehículos a modos más limpios, sino también su incremento anual de mínimo el 3.5% en los próximos años, con el fin de mejorar la oferta, la calidad y la cobertura del servicio para los propietarios de vehículos privado que motiven su cambio modal. Esto implicará al gobierno nacional, proponer estrategias de subsidio para las empresas transportadoras, que equilibren el flujo de caja operacional.

Se deben impulsar políticas que permitan apoyar a través de herramientas tecnológicas, el control del tránsito en tiempo real de la ciudad, especialmente en las periferias y en zonas de difícil acceso para los agentes de tránsito, ya que sumado al déficit de agentes manifestado por los expertos durante las entrevistas, el modelo estima para los próximos 30 años una demanda de agentes de tránsito superior al 30%, con sus consecuentes cargas administrativas y financieras para el distrito.

9. Recomendaciones

Es necesario continuar explorando nuevos escenarios del modelo ABM a partir de información complementaria, que permitan evaluar con mayor detalle el impacto de cada una de las variables identificadas y posiblemente ampliar la zona de estudio al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, lo cual implica un reto en la recopilación de información de los demás municipios que la conforman.

También, es recomendable para futuras investigación, definir un indicador KVR para los diferentes modos de transporte en Colombia, ya que este indicador puede ser relevante para la adopción de múltiples políticas públicas en el país, mejorando los resultados del modelo ABM propuesto en la presente investigación.

Finalmente, se considera pertinente evaluar el efecto que tiene las plataformas tecnológicas relacionadas con la movilidad en el crecimiento del parque automotor, ya que este tipo de tecnología viene tomando fuerza en el mundo y su principal oferta se realiza a través de vehículos privados.

10. Eventos científicos de circulación del conocimiento

Congreso Colombiano de Investigación Operativa ASOCIO-IISE-2022

Fecha inicio del evento: 5 de septiembre de 2022

Fecha fin del evento: 9 de septiembre de 2022

Fecha de presentación: 7 de septiembre de 2022.

Lugar del evento: Bogotá - Colombia

Nombre ponencia: Modelo del crecimiento del parque automotor en la ciudad de Medellín, a partir de la implementación de políticas públicas para la gestión de la demanda basadas en la restricción por uso de placa y la chatarrización.

Institución organizadora: Universidad de la Sabana – Universidad de los Andes – Universidad Sergio Arboleda - Instituto de Ingenieros Industriales y de Sistemas.

Tipo de evento: Internacional

XIV International Conference Virtual City and Territory

Fecha inicio del evento: 26 de septiembre de 2022

Fecha fin del evento: 30 de septiembre de 2022

Fecha de presentación: 27 de septiembre de 2022.

Lugar del evento: Bogotá - Colombia

Nombre ponencia: Modelo del crecimiento del parque automotor en la ciudad de Medellín, a partir de la implementación de políticas públicas para la gestión de la demanda basadas en la restricción por uso de placa y la chatarrización.

Institución organizadora: Universidad Politécnica de Cataluña - Universidad Jorge Tadeo Lozano

Tipo de evento: Internacional

EXPOIngeniería2022

Fecha inicio del evento: 27 de octubre de 2022

Fecha fin del evento: 29 de octubre de 2022

Fecha de presentación: 27 de octubre de 2022.

Modelo del crecimiento del parque automotor en la ciudad de Medellín, a partir de la implementación de políticas públicas para la gestión de la demanda basadas en la restricción por uso de placa y la chatarrización.

Lugar del evento: Medellín - Colombia

Nombre ponencia: Car fleet growth model in Medellín city: Exploratory review the implementation of public policies for the transportation demand management based on the restriction due to the use of plates and scrapping.

Institución organizadora: Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería - ACOFI

Tipo de evento: Internacional

11. Bibliografía

- Adnan, M., Outay, F., Ahmed, S., Brattich, E., di Sabatino, S., & Janssens, D. (2021). Integrated agent-based microsimulation framework for examining impacts of mobility-oriented policies. *Personal and Ubiquitous Computing*, 25(1), 205–217.
<https://doi.org/10.1007/s00779-020-01363-w>
- Alonso Romero, G., & Lugo-Morín, D. R. (2018). El estado del arte de la movilidad del transporte en la vida urbana en ciudades latinoamericanas. *Revista Transporte y Territorio*, 19(19), 157. <https://doi.org/10.34096/rtt.i19.5329>
- Alzate, J. (2012). *Medios de transporte , accidentes de tránsito y legislación en Medellín (Colombia) durante las tres primeras décadas del siglo XX*. 4(8), 238.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2015). *Plan Maestro Metropolitano de la Bicicleta del Valle de Aburrá*. 162.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2017). *Plan Maestro de Movilidad para el Valle de Aburrá*.
- Asociación Colombiana de Petróleo. (2020). Evolución Y Perspectivas 2020 – 2021 Del Mercado De Combustibles Líquidos En Colombia. *Informe Económico*, 1–14.
<https://acp.com.co/web2017/es/informes/690-informe-economico-avances-y-perspectiva-para-la-exploracion-de-petroleo-y-gas-2020-2021/file>
- Aydinalp Köksal, M., Tekeli, E., Ara Aksoy, S., Kızıltan, A., Kızıltan, M., Duran, N., Aslanoğlu, S. Y., Öztürk, F., Özyürek, N., Doğan, P., Yılmaz, A. G., Köksal, C. E., Çetintürk Gürtepe, İ., Yereli, A. B., Birpınar, M. E., & Güllü, G. (2021). Long term characterization of the vehicle stock in Turkey. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102988>
- Banco de Desarrollo de America Latina. (2011). *Desarrollo urbano y movilidad en américa latina*.
- Banco de Desarrollo de America Latina. (2018). *Medidas de gestión de la demanda de transporte en ciudades de América Latina*. 46.
- Bartley, B. (2020). *Mobility impacts , reactions and opinions : traffic demand management options in Europe : the MIRO project*. January 1995, 8.

- Borshchev, A., & Filippov, A. (2004). From System Dynamics and Discrete Even to Practical Agent Based Modeling. *The 22nd International Conference of the System Dynamics Society*.
- Ceballos, Y. F., Osorio, P. C., & Gomez, C. A. (2019). Análisis de la norma “pico y placa” en la ciudad de Medellín y su efectividad en mitigación de emisión de contaminantes mediante simulación basada en agentes. *Prospectiva*, 17(1), 32.
<https://doi.org/10.15665/rp.v17i1.1764>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2003). Congestion De Transito: El Problema Y Cómo Enfrentarlo Cepal. In *United Nations Publications.: Vol. (No. 87)*.
<https://repositorio.cepal.org/handle/11362/27813>
- CONPES. (2020). *Política Nacional de Movilidad Urbana y Regional - Conpes 3991 de 2020*. 84.
- Duk, C. N., Rubinstein, E., Guevara, Á., & Vidal, R. M. (2020). *Análisis del estado del arte y experiencias de gestión de demanda de transporte urbano en América Latina y el Caribe.pdf* (p. 69).
- Dun, C., Horton, G., & Kollamthodi, S. (2015). Improvements to the definition of lifetime mileage of light duty vehicles – Report for European Commission – DG Climate Action. *Report for European Commission – DG Climate Action, 1*.
https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/transport/vehicles/docs/ldv_mileage_improvement_en.pdf
- Fridstrøm, L., Østli, V., & Johansen, K. W. (2016). A stock-flow cohort model of the national car fleet. *European Transport Research Review*, 8(3), 1–15.
<https://doi.org/10.1007/s12544-016-0210-z>
- Gibsone, C. D., Jolly, J. F., Vilches, A. M., & Parra, F. R. (2011). *Algunas reflexiones sobre la movilidad urbana en Colombia desde la perspectiva del desarrollo humano*. 16(2), 485–514.
- Grimm, V., Railsback, S. F., Vincenot, C. E., Berger, U., Gallagher, C., Deangelis, D. L., Edmonds, B., Ge, J., Giske, J., Groeneveld, J., Johnston, A. S. A., Milles, A., Nabe-Nielsen, J., Polhill, J. G., Radchuk, V., Rohwäder, M. S., Stillman, R. A., Thiele, J. C., & Ayllón, D. (2020). The ODD protocol for describing agent-based and other

- simulation models: A second update to improve clarity, replication, and structural realism. *Jasss*, 23(2). <https://doi.org/10.18564/jasss.4259>
- Ho, C., & Mulley, C. (2013). *Tour-based mode choice of joint household travel patterns on weekend and weekday*. July, 29. <https://doi.org/10.1007/s11116-013-9479-0>
- Juhász, M. (2013). *Travel Demand Management – Possibilities of influencing travel behaviour*. 1, 45–50.
- Kim, H. C., Ross, M. H., & Keoleian, G. A. (2004). Optimal fleet conversion policy from a life cycle perspective. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 9(3), 229–249. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2004.02.004>
- Krempels, K., & Ziefle, M. (2015). *Agent-based Transportation Demand Management Demand Effects of Reserved Parking Space and Priority Lanes in Comparison and Combination Agent-based Transportation Demand Management Demand Effects of Reserved Parking Space and Priority Lanes in Comparison a*. July, 7. <https://doi.org/10.5220/0005411503170323>
- Lee, H., Park, S. J., Lee, G. R., Kim, J. E., Lee, J. H., Jung, Y., & Nam, E. W. (2020). The relationship between trends in COVID-19 prevalence and traffic levels in South Korea. *International Journal of Infectious Diseases*, 96, 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.05.031>
- Litman, T. (2006). Mobility management innovative management strategies to transport problems. *25th Annual Southern African Transport Conference, SATC 2006 - 2010: Will Transport Infrastructure and Systems Be Ready, 2006*(July).
- Llewellyn, R., Tricker, R., & Paton, D. (2014). Travel plans: A critical comparison of the application of land use planning processes in England and Scotland. *Transport*, 29(3), 235–247. <https://doi.org/10.3846/16484142.2014.913260>
- Luo, M., Ma, Z., Zhao, W., Enoch, M., & I-Jy Chien, S. (2022). An ex-post evaluation of the public acceptance of a license plate-based restriction policy: A case study of Xi'an, China. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 155(October 2021), 259–282. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.10.024>
- Ma, H., Hadden-Loh, T., Yang, X., Sun, Z., & Shi, Q. (2008). Evolution and effect of transportation policy on public transit: Lessons from Beijing. *Transportation Research*

- Record*, 2063, 176–182. <https://doi.org/10.3141/2063-21>
- Muley, D., Ghanim, M. S., Mohammad, A., & Kharbeche, M. (2021). Quantifying the impact of COVID–19 preventive measures on traffic in the State of Qatar. *Transport Policy*, 103(April), 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.01.018>
- Ortiz, R. S. (2012). *Determinación del índice KVR (kilómetros vehículos recorrido) para el cantón Cañar Trabajo*.
- RUNT. (2021a). *¿Cual es la edad del parque automotor en el país? 2*.
<https://www.runt.com.co/sites/default/files/Boletín de Prensa 012 de 2021.pdf>
- RUNT. (2021b). RUNT en cifras. *Corte 31 de Diciembre de 2021*, 1–9.
- Sarango, D., & Moncayo, P. (2016). *Determinación del indicador kilómetros-vehículo recorrido (KVR) para la ciudad de Cuenca*. 94.
<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12152/1/UPS-CT006103.pdf>
- Todd Litman, V., & Transport Policy Institute. (2012). *Gestión de la movilidad para México*.
- Tyler, N., Acevedo Bohorquez, J., Bocarejo Suescun, J. P., & Velásquez, J. M. (2013). Cobros de congestión en ciudades Colombianas. *University College London, Embajada Británica Bogotá, Universidad de Los Andes*, 5–6, 67.
- Urrego, L. F., Bocarejo, J. P., & Ramírez, S. A. (2020). COVID-19, una oportunidad para repensar la gestión de la demanda para una movilidad más eficiente. *Revista de Ingeniería*, 53. <https://doi.org/10.16924/revinge.50.5>
- Vidal, R. M., Duk, C. N., Guevara, Á., & Rubinstein, E. (2020). *Análisis del estado del arte y experiencias de gestión de demanda de transporte urbano en América Latina y el Caribe. 1*, 67.
- Viri, R., Mäkinen, J., & Liimatainen, H. (2021). Modelling car fleet renewal in Finland: A model and development speed-based scenarios. *Transport Policy*, 112(August), 63–79. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.08.012>
- Wang, X., Rodríguez, D. A., & Mahendra, A. (2021). Support for market-based and command-and-control congestion relief policies in Latin American cities : Effects of mobility , environmental health , and city-level factors. *Transportation Research Part A*, 146(February), 91–108. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.12.004>

12. Anexo

Archivo que contiene el modelo de simulación en formato del software NetLogo (.nlogo)