



**Evaluación de Políticas públicas de Movilidad en el Valle de Aburra
por Medio de un Modelo de Dinámica de Sistemas**

Harleng Edilson Torres Nieto
Santiago León Macia Palacio

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Industrial

Modalidad de Práctica
Trabajo de Grado

Seleccione tipo de orientador(es)
asesor interno

Yony Fernando Ceballos del asesor interno, Doctor (PhD) en Ingeniería

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

2025

Cita	(Torres Nieto & Macia Palacio, 2025)
Referencia	Torres Nieto, H. E., & Macia Palacio, S. L. (2025). <i>Evaluación de Políticas públicas de Movilidad en el Valle de Aburra por Medio de un Modelo de Dinámica de Sistemas</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



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.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi madre, Luz Nidia Nieto Oviedo, quien con su ejemplo me enseñó a ser perseverante, disciplinado y la importancia del estudio. Gracias por creer en mí, incluso en situaciones en las que yo mismo dudé en lograrlo.

Harleng Edilson Torres Nieto

Dedico este logro a mi familia, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental para la culminación de mis estudios. A mi padre, Guillermo Macia, por ser un ejemplo de integridad y compromiso para hacer las cosas. A mi madre, Marta Palacio, por inculcarme el espíritu de superación y brindarme siempre su respaldo.

Santiago León Macia Palacio

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios, por abrir caminos difíciles y permitirme culminar esta meta tan importante para mí crecimiento personal. A mi familia por su comprensión y apoyo a lo largo de este camino. A la Universidad de Antioquia por abrirme sus puertas y brindarme esta experiencia transformadora, que trajo consigo una serie de cambios en mi forma de comprender nuestro entorno.

Harleng Edilson Torres Nieto

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia por su apoyo y acompañamiento incondicional. A mis compañeros de trabajo, por su comprensión y respaldo, que facilitaron la continuidad de mis estudios. A la Universidad de Antioquia, por brindarme los conocimientos que han contribuido a mi formación no solo profesional, sino también personal, inculcándome como principal valor humanismo.

Santiago León Macia Palacio

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1. Conceptos básicos.....	13
1.1. Objetivos	13
1.1.1. Objetivo General	13
1.1.2. Objetivo Específico	13
1.2. Definición del problema.....	13
2. Marco teórico.....	14
2.1. Situación Actual	14
2.1.1. Introducción al problema ambiental.....	14
2.1.2. Marco regulatorio y normativo	15
2.1.3. Monitoreo y datos históricos.....	18
2.1.4. Fuentes de Emisión y Movilidad.....	19
2.1.5. Simulación y su aplicación.....	21
2.1.6. Modelos de Dinámica de Sistemas.....	22
2.2. Estado del arte	22
2.2.1. Evaluación De Políticas Sobre La Contaminación Del Aire.....	25
2.2.2. Modelos De Calidad Del Aire.....	26
3. Desarrollo del modelo.....	28
3.1. Realización Hipótesis dinámica o diagrama causal del problema	28
3.1.1. Definición de variables.....	29
3.1.2. Relaciones Causales	31
3.1.3. Políticas del sistema	33
3.1.4. Paso de tiempo y fronteras del sistema	34
3.2. Ciclos del sistema.....	36
3.2.1. Ciclo crecimiento vehículo y parque automotor	36
3.2.2. Ciclo de crecimiento vehículo no contaminantes.....	37
3.3. Diagrama de Flujos y Niveles.	38

3.3.1.	Ilustración del Diagrama	38
3.3.2.	Recolección de información y construcción del modelo	53
3.3.3.	Variables de Nivel	67
3.3.4.	Variables de Flujos.....	69
3.3.5.	Variables Auxiliares	72
4.	Validación y Resultados	82
4.1.	Validación del modelo	82
4.2.	Resultados	83
4.2.1.	Análisis Escenario Base: Política de vigentes a 2024.	83
4.2.2.	Análisis Escenario Tendencial 1: Política de Conversión.....	84
4.2.3.	Análisis Escenario Tendencial 2: Política de Pico y Placa	85
4.2.4.	Análisis Escenario Tendencial 3: Política de Chatarrización.....	86
4.2.5.	Análisis Escenario Tendencial 4: Políticas simultaneas	88
4.2.6.	Resumen de los datos con sus escenarios.....	89
5.	Conclusiones	93
	Referencias	95
	Anexos.....	¡Error! Marcador no definido.

Lista de tablas

Tabla 1 Niveles máximos permitidos de contaminantes en el aire.	16
Tabla 2 Niveles máximos permisibles año 2030.	16
Tabla 3 Puntos de corte Índice calidad del aire.	17
Tabla 4 Red de monitoreo de calidad del aire.	19
Tabla 5 Base de datos bibliográficas utilizadas.	23
Tabla 6 Palabras claves y ecuaciones de búsqueda utilizadas.	23
Tabla 7 Factores de emisión de los diferentes tipos de vehículos.	63
Tabla 8 Variación de la concentración porcentual del mes de referencia.	65
Tabla 9 Variables de Nivel.	67
Tabla 10 Variables de Flujos.	69
Tabla 11 Variables Auxiliares.	72
Tabla 12 Validación de modelo.	82
Tabla 13 Cantidad de PM2.5 en el AMVA (ton/año)	89
Tabla 14 Promedio de concentración PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	90
Tabla 15 Número de muertes asociadas a incremento concentración PM2,5.	91
Tabla 16 Costo medico acumulado atribuible a pm2,5 (x1'000.000 pesos)	92

Lista de figuras

Figura 1 Contaminación del área metropolitana 2018.	20
Figura 2 Evolución del número de vehículos y consumo de combustible.....	20
Figura 3 Revisión sistemática de literatura	24
Figura 4 Diagrama causal del modelo.....	28
Figura 5 Ciclo parque automotor contaminante.....	36
Figura 6 Ciclo de crecimiento vehículo no contaminantes	37
Figura 7 Diagrama de flujos y niveles.	38
Figura 8 Conjunto del Diagrama de Buses Especiales.....	39
Figura 9 Conjunto del Diagrama de Buses Especiales.....	40
Figura 10 Conjunto del Diagrama de Población	41
Figura 11 Conjunto del Diagrama de concentración de PM2.5	42
Figura 12 Conjunto del Diagrama de Buses	43
Figura 13 Conjunto del Diagrama de Muertes y Costos por el PM2.5	44
Figura 14 Conjunto del Diagrama de Camiones	45
Figura 15 Conjunto del Diagrama de Políticas	46
Figura 16 Conjunto del Diagrama de Tractocamiones	47
Figura 17 Conjunto del Diagrama de Metroplús.....	48
Figura 18 Conjunto del Diagrama de Políticas	49
Figura 19 Conjunto del Diagrama de Autos Servicios Especiales.....	50
Figura 20 Conjunto del Diagrama de Autos	51
Figura 21 Conjunto del Diagrama de Volquetas.....	52
Figura 22 Crecimiento de la población Área Metropolitana Valle de Aburra.....	53
Figura 23 Comportamiento histórico de la tasa de motorización en el AMVA.....	54
Figura 24 Comportamiento histórico tasa de motorización motos (4T) en el AMVA	55
Figura 25 Comportamiento histórico cantidad de camiones en el AMVA	56
Figura 26 Comportamiento histórico cantidad de volquetas en el AMVA.....	57
Figura 27 Comportamiento histórico de la cantidad de buses de servicio especial en el AMVA	58
Figura 28 Comportamiento histórico de la cantidad de buses en el AMVA	59
Figura 29 Comportamiento histórico cantidad tractocamiones	60
Figura 30 Comportamiento histórico autos de servicio especial AMVA	61
Figura 31 Comportamiento histórico cantidad de buses Metroplús en el AMVA.....	62
Figura 32 Relación entre concentración estación 12 y emisión total AMVA.....	64
Figura 33 Comportamiento de la concentración en estaciones de monitoreo AMVA 2018	65
Figura 34 Número de muertes naturales en el AMVA	66
Figura 35 Escenario Base: Política de vigentes a 2024.....	83
Figura 36 Escenario Tendencial 1: Política de Conversión.	84
Figura 37 Escenario Tendencial 2: Política de Pico y Placa.....	86
Figura 38 Escenario Tendencial 3: Política de Chatarrización	87
Figura 39 Escenario Tendencial 4: Políticas simultaneas	88

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AQG	Air Quality Guidelines
AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburra.
ALRI	Infecciones Agudas por las vías Respiratorias Inferiores
BRT	Bus Rapid Transit
CMAQ	Community Multiscale Air Quality
DNP	Departamento Nacional de Planeación
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
HIREM	(High-Resolution Emission Model
ICA	Índice de Calidad del Aire
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
PIB	Producto Interno Bruto
PM2.5	Material Particulado no mayores a 2.5mm
PM10	Material Particulado no mayores a 10mm
OMS	Organización Mundial de la Salud
SIATA	Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá
UdeA	Universidad de Antioquia
WRF	Weather Research and Forecasting

Resumen

El presente trabajo se propone evaluar las políticas públicas de movilidad en el Valle de Aburrá mediante un modelo de dinámica de sistemas. La contaminación del aire, especialmente por partículas PM2.5, es un problema significativo en esta región debido a su topografía montañosa y la alta densidad de fuentes de emisión, tanto fijas como móviles. El crecimiento del parque automotor y la deficiencia en el transporte público contribuyen considerablemente a la contaminación, afectando la salud pública y el medio ambiente. Utilizando el software Vensim®, se desarrolló un modelo de simulación para analizar diversos escenarios y prever el impacto de las políticas públicas en la calidad del aire. La metodología incluye una revisión de la literatura, la definición de las variables clave y la conceptualización del modelo, la recopilación de información relevante y la elaboración del modelo formal. Así mismo, se lleva a cabo un diseño experimental para analizar distintos escenarios de intervención. Este enfoque permite no solo entender mejor la dinámica de las emisiones, sino también ofrecer recomendaciones para la formulación de políticas más efectivas que contribuyan a la mejora de la calidad del aire y, por ende, a la calidad de vida en el Valle de Aburrá.

Palabras clave: Valle de Aburrá, Cuenca atmosférica, Calidad del aire, Partículas PM2.5, Simulación, Dinámica de sistemas

Abstract

This study aims to evaluate public mobility policies in the Aburrá Valley using a system dynamics model. Air pollution, particularly caused by PM2.5 particles, is a significant issue in this region due to its mountainous topography and high density of both stationery and mobile emission sources. The growth of the vehicle fleet and deficiencies in public transportation contribute significantly to pollution, affecting public health and the environment. Using Vensim® software, a simulation model was developed to analyze various scenarios and forecast the impact of public policies on air quality. The methodology includes a literature review, the definition of key variables and model conceptualization, the collection of relevant data, and the development of a formal model. Additionally, an experimental design is carried out to assess different intervention scenarios. This approach does not only provide a better understanding of emission dynamics but also offer recommendations for more effective policymaking, aimed at improving air quality and, consequently, the quality of life in the Aburrá Valley.

Keywords: Valle de Aburrá, Atmospheric basin, Air quality, PM2.5 particles, Simulation, System dynamics

Introducción

Los tiempos modernos se caracterizan por la aceleración de los cambios que se presentan en los diferentes ámbitos de la sociedad, como el entorno económico, el entorno poblacional, la tecnología, las tendencias de consumo, entre otros (Sterman, 2002); todos estos cambios tienen unos efectos positivos y negativos, lo cual conlleva a que las políticas públicas estén orientadas a enfrentar los efectos nocivos de estos cambios. La contaminación del aire con material particulado es uno de esos efectos de las nuevas dinámicas sociales y debido a que sus factores causales son muchos, hace que sea un problema complejo para abordar. Es frente a estas situaciones que la modelación es útil, ya que permite realizar una representación abstracta de un sistema complejo con el fin de estudiarlo y entenderlo, una vez que el modelo ha sido desarrollado y validado puede ser utilizado para investigar una amplia variedad de preguntas entorno al sistema real (Banks, 2005) este entendimiento permite una toma de decisiones más acertada, evitando efectos contraproducentes en las políticas públicas, en este caso específico, políticas de movilidad.

Las características topográficas de los diez municipios que conforman el Valle de Aburrá hacen que este se constituya como una cuenca atmosférica. Debido a los fenómenos climatológicos y a las emisiones de contaminantes, tanto de fuentes fijas (industria), como de fuentes móviles (vehículos), se estableció mediante el Acuerdo Metropolitano No. 008 (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2011) que esta cuenca fuese clasificada como área fuente de contaminación de material particulado.

Estas partículas son nocivas para la salud y algunos organismos como la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos han establecido límites promedio de exposición diaria y anual a estos contaminantes, con el fin de prevenir enfermedades respiratorias. A nivel nacional, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible por medio de la Resolución 2254 de 2017 estableció los niveles máximos permitidos.

Actualmente el área metropolitana cuenta con una red de 43 puntos de monitoreo de la calidad del aire. Cada hora se realiza un reporte con el fin de informar oportunamente a la ciudadanía el estado del aire que respiran. Esta misma red permite obtener información histórica, la cual evidencia a grandes rasgos que entre 2015 y 2022 el Índice de Calidad del Aire (ICA) ha estado principalmente en niveles de Moderado y, en algunos meses del año, en niveles de Dañino para la salud (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2022) Estas mediciones están enfocadas en

partículas PM2.5, las cuales son más perjudiciales para el sistema respiratorio debido a que pueden llegar fácilmente a los pulmones dado a su diminuto tamaño (<2.5 micrómetros). Un aspecto importante para tener en cuenta es que el parámetro normativo utilizado por el Área Metropolitana es el planteado por el Ministerio de Ambiente. Este límite de exposición durante un periodo de 24 horas es un 5,7% superior al establecido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) (US EPA, 2014) y un 146,7% superior al AQG Level (nivel de las Directrices de Calidad del Aire) establecido por la OMS, el cual se considera seguro para la salud humana a largo plazo según la evidencia científica (World Health Organization, 2021)

De acuerdo con el inventario de emisiones de fuente móviles y el inventario de fuentes fijas del Área Metropolitana del Valle de Aburra, para el año 2022 las fuentes móviles representaron aproximadamente el 95% de las toneladas de material particulado PM2.5 emitido. Estas fuentes móviles están representadas por camiones, volquetas, buses, motos, taxis, el servicio Metro, entre otros (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2023b). Un aspecto para tener en cuenta cuando se observa que las fuentes móviles son la principal fuente de emisiones es la tendencia creciente del parque automotor en los últimos años, Entre 2011 y 2020, el parque automotor (carros y motos) del Valle de Aburrá ha crecido con una variación de 9% promedio anual (Medellín Cómo Vamos, 2022). De continuar la tendencia de crecimiento del parque automotor y con ello un posible incremento de las emisiones de material particulado difícilmente se logrará alcanzar los niveles ideales de calidad del aire.

Observando que esta situación es compleja y que en ella intervienen diferentes variables de forma simultánea, el presente trabajo tiene como finalidad analizar tendencias en la cantidad de material particulado PM2.5 y los efectos de las políticas públicas en el Valle de Aburra por medio del análisis escenarios, esto a partir de un modelo de simulación de dinámica de sistemas.

Este trabajo se desarrollará en siete etapas en un lapso de seis meses calendario, estas etapas corresponden a la definición del problema, la definición de las variables y conceptualización del modelo de simulación, la recopilación de la información, la elaboración del modelo formal, el diseño experimental, la ejecución de corridas y análisis, y la documentación de los hallazgos de la simulación. Para la construcción del modelo de simulación se utilizará el software Vensim®.

1. Conceptos básicos

1.1. Objetivos

1.1.1. *Objetivo General*

Modelar el comportamiento de las emisiones de material particulado PM2.5 en el área metropolitana del valle de aburra con el fin de evaluar diferentes políticas públicas de movilidad

1.1.2. *Objetivo Específico*

- Realizar una revisión de literatura acerca de las diferentes herramientas utilizadas para modelar y simular el comportamiento de emisiones de material particulado PM2.5.
- Diseñar una hipótesis dinámica que represente la situación problemática.
- Diseñar un modelo de simulación de dinámica de sistemas acorde a la hipótesis dinámica planteada.
- Realizar un análisis de escenarios con el modelo construido.

1.2. Definición del problema

El Área Metropolitana del Valle de Aburra enfrenta una problemática ambiental debido a su configuración como cuenca atmosférica, que dificulta la dispersión de contaminantes, agravada además por fenómenos meteorológicos que ocurren estacionalmente 2 veces al año que incrementan la concentración de PM2.5 (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2018). Estas partículas afectan a la población, causando enfermedades respiratorias, cardiovasculares y altos índices de mortalidad infantil (Organización Panamericana de la Salud, 2017). Es una situación no deseada que exige acciones para mitigar sus impactos en la salud y economía.

2. Marco teórico

2.1. Situación Actual

2.1.1. *Introducción al problema ambiental*

Descripción del Valle de Aburrá como Cuenca Atmosférica

La región metropolitana del Valle de Aburrá cuenta con unas características particulares respecto a su topografía y clima, ya que se encuentra en un espacio geográfico delimitado parcial o totalmente por elevaciones montañosas más otros atributos naturales, propiciando la concentración y reacción de gases y partículas de aire. Esta configuración constituye una condición geográfica adversa para la circulación horizontal de las masas de aire, favoreciendo la acumulación de contaminantes y dificulta su remoción. Además, se le suma a este desfavorecimiento dos fenómenos meteorológicos que anualmente se presenta, uno en marzo donde hay una transición entre la temporada seca y las primeras lluvias, se caracteriza por la presencia de nubes de baja altura que ocasionan la acumulación de contaminantes en la atmosfera, durante este fenómeno se registran niveles de concentración alto en material particulado PM10 y PM2,5. El otro fenómeno se presenta en el mes de noviembre en la transición de temporada de lluvia a temporada seca, donde también se registra nuevamente un incremento de concentración de material particulado. Es por esta razón que el valle de aburra cumple con las condiciones de cuenca atmosférica, concepto acogido por el Acuerdo Metropolitano N°008 del año 2011 (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2018)

Contaminación por Material Particulado

El material particulado o PM es un término usado para definir la mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire. Algunas partículas como el polvo, la suciedad, hollín, o el humo, son lo suficientemente grandes y oscuras como para verlas a simple vista. Otras son tan pequeñas que solo pueden ser detectadas con herramientas como un microscopio electrónico. Existen varias formas de ser registradas y analizadas, pero las más conocidas son las PM10 que son partículas inhalables que tienen un diámetro inferior a 10 micrómetros y también el PM2.5 que son partículas finas con un diámetro inferior a 2.5 micrómetros. Para tener una

referencia, el PM2.5 tiene un tamaño 30 veces menor que el grosor del cabello humano (US EPA, 2018).

Los riesgos y efectos a la salud de este material no están distribuidos de manera equitativa en la población, ya que los niños menores de 5 años y los adultos mayores entre 50 y 75 años son los más afectados. Las mayorías de muertes atribuibles a la contaminación atmosférica en la población general está relacionada con las enfermedades no transmitibles. En efecto, el 36% de las muertes por cáncer de pulmón, el 35% de la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (COPD), el 34% de los accidentes cerebrovasculares y el 27% de las cardiopatías isquémicas son atribuibles a este tipo de contaminantes. Sin embargo, un dato preocupante es la mortalidad infantil ya que más de la mitad de la muerte de niños menores de 5 años se les atribuye a infecciones agudas por las vías respiratorias inferiores (ALRI), y esto debido a la contaminación del aire generada por la combustión de sólidos. (Organización Panamericana de la Salud, 2017)

En Colombia, de acuerdo con el Departamento Nacional de Planeación – DPN, para el año 2015 se produjo 8.052 muertes atribuidas a la mala calidad del aire, generando un costo aproximado de 12,2 billones de pesos, una cifra que representa el 1.5% del PIB de ese entonces (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

2.1.2. Marco regulatorio y normativo

Normativa nacional

En Colombia existen varias regulaciones frente a la contaminación del aire, el decreto 1076 del año 2015 compila y racionaliza las normas reglamentarias de carácter general que rigen en Colombia sobre el sector ambiental y desarrollo sostenible, dicta unas disposiciones generales sobre las normas de calidad de aire, niveles de contaminación, emisiones contaminantes y ruido. La resolución 2254 de 2017 es más específica en cuanto al establecimiento de normas y procedimientos a la gestión ambiental, buscando minimizar los riesgos a la salud humana y el impacto ambiental. En esta resolución se dictan los niveles máximos permisibles de contaminación, entre ellos se encuentra el PM2.5 cuyos valores máximos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1

Niveles máximos permitidos de contaminantes en el aire.

Contaminante	Nivel máximo Permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición
PM₁₀	50	Anual
	100	24 horas
PM_{2.5}	25	Anual
	50	24 horas
SO₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO₂	60	Anual
	200	1 hora
O₃	100	8 horas
CO	5.000	8 horas
	35.000	1 hora

Fuente. (Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible, 2017)

También se dictan cuáles serán los niveles máximos permisibles para el año 2030

Tabla 2

Niveles máximos permisibles año 2030.

Contaminante	Nivel máximo Permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición
PM₁₀	30	Anual
PM_{2.5}	15	Anual
SO₂	20	24 horas
NO₂	40	Anual

Fuente. (Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible, 2017)

En esta resolución también se exige a las autoridades locales la implementación de herramientas para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, además de tener en su funcionamiento una declaratoria de niveles de prevención, alertas o emergencias. Este tipo de alertas se generan de acuerdo con las siguientes concentraciones:

Tabla 3

Puntos de corte Índice calidad del aire.

Índice de Calidad del Aire			Puntos de corte del ICA						
ICA	Color	Categoría	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO	SO ₂	NO ₂	O ₃	O ₃
			µg/m ³ 24 horas	µg/m ³ 24 horas	µg/m ³ 8 horas	µg/m ³ 1 hora	µg/m ³ 1 hora	µg/m ³ 8 horas	µg/m ³ 1 hora
0 - 50	Verde	Buena	0 - 54	0 - 12	0 - 5094	0 - 93	0 - 100	0 - 106	
51 - 100	Amarillo	Aceptable	55 - 154	13 - 37	5095 - 10819	94 - 197	101 - 189	107 - 138	
101 - 150	Naranja	Dañina a la salud de Grupos Sensibles	155 - 254	38 - 55	10820 - 14254	198 - 486	190 - 677	139 - 167	245 - 323
151 - 200	Rojo	Dañina a la salud	255 - 354	56-150	14255 - 17688	487 - 797	678 - 1221	168 - 207	324 - 401
201 - 300	Púrpura	Muy dañina a la salud	355 - 424	151 - 250	17689 - 34862	798 - 1583	1222 - 2349	208 - 393	402 - 794
301 - 500	Marrón	Peligrosa	425 - 604	251 - 500	34863 - 57703	1584 - 2629	2350 - 3853	394	795 - 1185

Fuente. (Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible, 2017)

Estos cálculos se hacen con la ecuación ICA:

$$ICA_p = \frac{I_{Alto} - I_{bajo}}{PC_{Alto} - PC_{bajo}} \times (C_p - PC_{bajo}) + I_{bajo}$$

En donde:

 ICA_p = Índice de calidad del aire para el contaminante p. C_p = Concentración medida para el contaminante p. PC_{Alto} = Punto de corte mayor o igual a C_p PC_{bajo} = Punto de corte menor o igual a C_p I_{Alto} = Valor del ICA correspondiente al PC_{Alto} I_{bajo} = Valor del ICA correspondiente al PC_{bajo}

Normativa local

La entidad Área Metropolitana de Valle de Aburra expide en el año 2011 el acuerdo metropolitano N°008 (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2011), el cual aprueba y adopta el plan de descontaminación del aire en la región metropolitana del Valle de Aburra. En este acuerdo clasifican La cuenca del Valle de Aburrá como área fuente de contaminación por material

particulado PM10, y en consecuencia se busca su reducción. Para esto adoptan un plan maestro de movilidad adoptado en el Acuerdo metropolitano N°42 del 2007 (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2007), donde se determina que actuaciones planteadas en materia de movilidad, infraestructura y planeación están orientadas a lograr el desarrollo de los municipios del Valle de Aburrá en condiciones ambientales adecuadas.

También se establecen programas, acciones y medidas de reducción de contaminación atmosférica, como la modernización del parque automotor, conversiones de vehículos a combustible más limpio, integración de desarrollo urbano, transporte y calidad de aire, control de emisiones vehiculares, mejoramiento de calidad del combustible diésel y gasolina, diseño de sistema integrado de transporte con un enfoque bajo en emisiones, entre otras facultades con miras al plan de descontaminación del aire.

2.1.3. Monitoreo y datos históricos.

Red de Monitoreo de Calidad del Aire

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales o más conocido como el IDEAM, acreditó con la resolución 0159 del 14 de febrero de 2019 al Valle de Aburrá para producir información cuantitativa física y química para el estudio y análisis ambientales requeridos por las autoridades ambientales competentes y de carácter oficial, relacionadas con la calidad del medio ambiente y de los recursos naturales renovables. Esta acreditación fue el resultado de un proceso que realizó la entidad a través del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA). El SIATA está dividido en 3 equipos que trabajan coordinadamente para hacer posible la entrega de datos de monitoreo en tiempo real. Los equipos son de Mantenimiento, Análisis de datos, logística y calidad de procesos. (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2019)

La red de monitoreo de la calidad de aire se conforma por 43 estaciones de monitoreo y 62 analizadores de contaminantes que están en diferentes puntos estratégicos en el Valle de Aburra. Los cuales se distribuyen de la siguiente manera:

Tabla 4

Red de monitoreo de calidad del aire.

Elemento de medición	Herramienta
Ozono en la atmosfera O ₃	9 analizadores
Óxido de Nitrógeno NO _x	7 analizadores
Monóxido de carbono CO	1 analizador
Dióxido de azufre SO ₂	1 analizador
Carbono negro C	1 analizador
Materia particulado PM _{2.5}	22 automáticas, 1 manual
Material particulado PM ₁₀	9 automáticas, 10 manuales
Material particulado PM ₁	1 automática

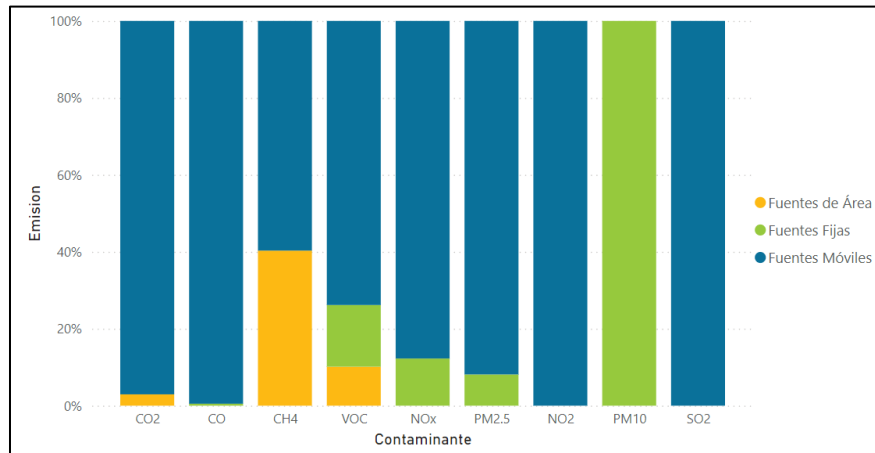
Fuente. (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2019)

La página del SIATA ofrece también información en formato CSV, donde contiene una base de datos del comportamiento histórico de los registros sobre la contaminación en la ciudad. Es accesible al público y solo se requiere la creación de un usuario. En el momento de descargar se debe ingresar datos como el intervalo de fecha, que estaciones y el motivo de descarga de esta.

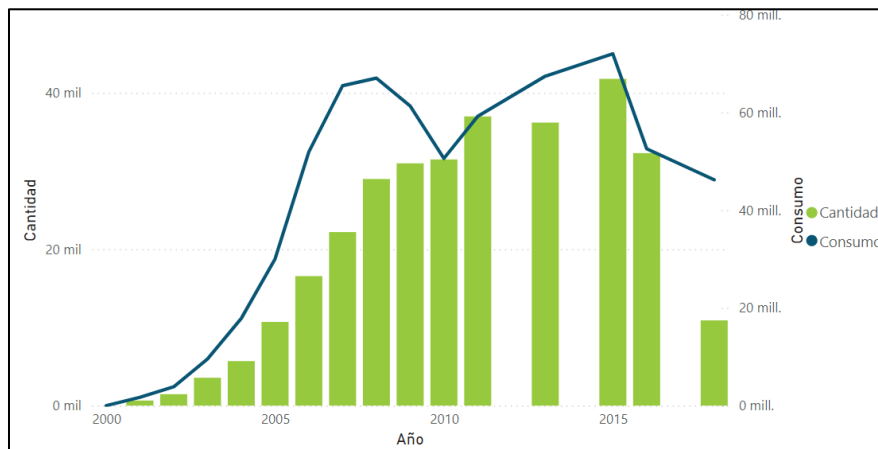
2.1.4. Fuentes de Emisión y Movilidad

Para los casos de estudio y análisis, se requiere de un recuento de la cantidad de contaminante liberados a la atmosfera, en este caso es necesario realizar un inventario de emisiones, con el objetivo de contener todas las emisiones contaminantes del aire generadas en el Valle de Aburra. Para esto hay que tener en cuenta la contribución de las fuentes fijas que son aquella fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa y fuentes móviles que son las fuentes de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024)

Existen diversos recursos informativos que pueden proporcionar datos sobre la cantidad de fuentes de contaminación fijas y móviles, la página área metropolitana ofrece datos históricos de estas fuentes desde el año 2000 hasta el año 2018, donde se puede obtener por ejemplo las siguientes graficas:

Figura 1*Contaminación del área metropolitana 2018.*

Fuente. (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2023a)

Figura 2*Evolución del número de vehículos y consumo de combustible.*

Fuente. (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2023a)

Se observa que la mayor fuente de contaminación proviene de las fuentes móviles y que generan un alto porcentaje de PM 2.5, información útil para el presente estudio, también se observa un crecimiento en los últimos años de vehículos, lo que genera una necesidad creciente de consumo energético y como consecuencia se genera una mayor contaminación del aire.

2.1.5. Simulación y su aplicación

La simulación es una ayuda para la toma de decisiones, la cual puede adaptarse a las complejidades y cambios de los negocios modernos y que puede desarrollarse y comunicarse eficientemente (Calderón, 1979). Dado que el comportamiento de un sistema cambia a lo largo del tiempo, es posible estudiarlo por medio de un modelo de simulación (Banks, 2005). Este modelo toma la forma de un conjunto de suposiciones en torno al funcionamiento de un sistema, estas suposiciones son expresadas en relaciones matemáticas, lógicas y simbólicas entre los objetos de interés del sistema. El modelo matemático construido para los propósitos de la simulación es usualmente de naturaleza diferente de uno construido para solución por técnicas analíticas. Cuando se construye un modelo para encontrar la solución analíticamente, es necesario considerar el conjunto de restricciones impuestas por la técnica analítica y evitar complicar demasiado el modelo. Un modelo de simulación puede construirse más libremente (Calderón, 1979).

Es recomendado utilizar la simulación en los siguientes casos:

- Para estudiar sistemas complejos, en los cuales no es posible expresar un conjunto de ecuaciones que permitan llegar a una solución analítica
- Cuando no es posible replicar el sistema en el mundo real
- Para experimentar nuevos diseños de políticas públicas antes de su implementación
- Para estudiar el comportamiento de las variables de salida cuando se alteran las variables de entrada de un sistema
- Para adquirir conocimiento y sugerir alternativas de mejora en el sistema bajo estudio

Algunas áreas de aplicación de la simulación son:

- Manufactura
- Ingeniería de la construcción y gestión de proyectos
- Aplicaciones militares
- Aplicaciones en logística y cadena de suministro
- Tráfico y modos de transporte
- Salud

2.1.6. Modelos de Dinámica de Sistemas

La dinámica de sistemas es un método para mejorar el aprendizaje en sistemas complejos. Es un tipo de simulación por computadora que ayuda a aprender no solo la complejidad de los sistemas, sino que también permite entender las fuentes de resistencia a las políticas sociales, además, ayuda al diseño de políticas más efectivas. Es esencialmente interdisciplinaria, ya que se basa en la teoría de la dinámica no lineal y el control de retroalimentación, desarrollado en las matemáticas, la física y la ingeniería. Es aplicable a sistemas físicos, técnicos y otras ciencias como la psicología cognitiva y social, y la economía entre otras (Sterman, 2002). Esta metodología de simulación fue creada en los años 60 por Jay Forrester en el Instituto Tecnológico de Massachussets.

2.2. Estado del arte

Esta revisión de literatura es parte del trabajo de grado titulado Evaluación de Políticas públicas de Movilidad en el Valle de Aburra por Medio de un Modelo de Dinámica de Sistemas, y tiene por objeto hacer un análisis del estado del arte de las metodologías implementadas para evaluar políticas públicas encaminadas a la gestión de la calidad del aire, y explorar los diversos modelos utilizados para simular el comportamiento de las emisiones en entornos urbanos. Al examinar estos dos enfoques, esta revisión busca brindar una visión de como las políticas públicas y los modelos de simulación pueden complementarse para una adecuada gestión de este problema, también, contribuye de manera significativa al trabajo de investigación que se adelanta con el fin de modelar por medio de la dinámica de sistemas el comportamiento de material particulado en el valle de Aburra y por medio de este evaluar las políticas de movilidad.

La revisión inicia realizando una exploración de diferentes estudios sobre políticas públicas relacionadas con la calidad del aire, como restricciones de tráfico, mejoras en el transporte público y sistemas de monitoreo, su evaluación e impacto en el tiempo. Seguidamente, se analizan los diferentes modelos que se han utilizado para modelar las emisiones, pasando por enfoques estadísticos, técnicas de Machine Learning, Simulaciones, parametrizaciones físicas y métodos basados en dinámica de sistemas. El estudio de todos estos tipos de modelos brinda una comprensión de las ventajas, limitaciones, complejidad y aplicaciones de estos mismos en ambientes urbanos.

Se utilizaron fuentes de información de revistas académicas que tuviesen convenio con la Universidad de Antioquia con el fin de tener acceso completo al documento. Debido a que la búsqueda abarca los temas de contaminación del aire, modelación, y evaluación de políticas públicas. Las bases de datos utilizadas son las siguientes:

Tabla 5*Base de datos bibliográficas utilizadas*

Base de datos	Sitio Web	Motivo
DIALNET	https://dialnet.unirioja.es/	Abarca temas de ingeniería y ciencias sociales
Emerald	https://www.emerald.com/insight/	Por su amplio catálogo con énfasis en sostenibilidad ambiental.
IEEE	https://ieeexplore.ieee.org/	Cubre temas de ingeniería y ciencias de computación
Sciadirect	https://www.sciencedirect.com/	Incluye ciencias exactas e ingeniería
Scopus	https://www.scopus.com/	Cobertura en temas de ingeniería y ciencias sociales
SpringerLink	https://link.springer.com/	Contiene temas de ingeniería y ciencias de la computación

Nota. Tabla de autoría propia.

Se utilizó las siguientes palabras claves con sus respectivas ecuaciones de búsqueda:

Tabla 6*Palabras claves y ecuaciones de búsqueda utilizadas*

Palabras claves	Base de datos	Ecuación
Air	DIALNET	("Air Pollution" OR "Particulate Matter") AND ("Modelling" OR "Simulation" OR "System Dynamics")
Air quality		public AND policy AND evaluation AND model AND pollution AND air
Pollution	Scopus	MODEL AND "AIR QUALITY" AND NOT ("PREDICTION" OR "FORECASTING")
Particulate Matter		public AND policy AND evaluation AND model AND pollution AND air
Modelling	Sciadirect	MODEL AND "AIR QUALITY" NOT ("FORECAST" OR "PREDICTION")
Simulation		("public policy" OR "policy evaluation" OR "políticas públicas") AND ("air pollution" OR "contaminación del aire") AND ("PM2.5" OR "particulate matter" OR "material particulado") AND "model"
System Dynamics		
Prediction	IEEE	"MODEL" AND "AIR QUALITY" NOT ("PREDICTION" OR "PREDICTIVE" OR "FORECAST" OR "FORECASTING")
Forecasting		
Public Policy		"PUBLIC" AND "POLICY" AND "EVALUATION" AND "MODEL" AND "POLLUTION" AND "AIR"
Policy evaluation	SpringerLink	"AIR QUALITY" AND "MODEL" AND "URBAN"
PM2.5		"PUBLIC" AND "POLICY" AND "EVALUATION" AND "MODEL" AND "POLLUTION" AND "AIR"
Model		
Evaluation		
Urban		

Nota. Tabla de autoría propia.

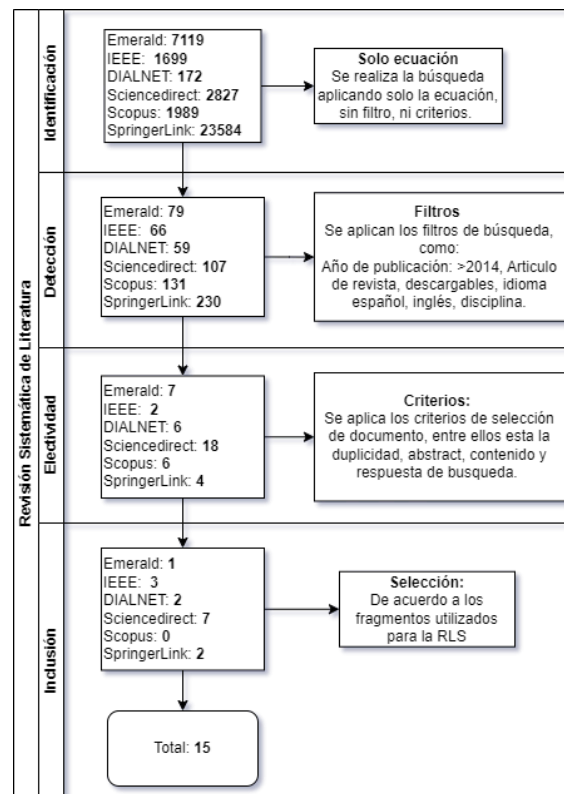
En esta revisión de literatura se aplicaron los siguientes filtros al proceso de búsqueda:

- Tipo de documento: Artículo de investigación
- Año de publicación: 2014-2024
- Áreas de conocimiento: Ingeniería y ciencias de la computación (para el modelamiento de las emisiones), así mismo ciencias sociales (para la evaluación de políticas públicas)

Una vez realizado el proceso de filtrado, se aplicaron los criterios de exclusión. Se excluyeron artículos de los cuales no fuese posible el acceso al documento completo y que en su resumen no trataran de forma directa el tema abordado o que tuvieran un enfoque distinto al que se busca con el trabajo de investigación que se adelanta para el modelamiento del material particulado para el valle de aburra.

Figura 3

Revisión sistemática de literatura



Nota. Imagen de autoría propia.

2.2.1. Evaluación De Políticas Sobre La Contaminación Del Aire

La calidad del aire es una preocupación creciente alrededor del mundo y las políticas aplicadas para solucionar este problema han sido muchas y de todas las formas posibles. Uno de los objetivos de esta revisión de literatura es realizar un análisis del estado del arte sobre la implementación y evaluación de políticas contra la contaminación del aire alrededor del mundo, analizando como se ha aplicado en diferentes contextos, las condiciones que han llevado a aplicar estas políticas, métodos de evaluación utilizados y finalmente los resultados obtenidos en términos de reducción de la contaminación del aire. De igual manera, es necesario revisar que tipos de modelos y técnicas se han utilizado para modelar la calidad del aire en el ámbito urbano y que dichos modelos sean útiles al momento de evaluar las políticas de movilidad.

La evaluación de políticas destinadas a la mejora de calidad del aire es fundamental, ya que nos permite conocer su efectividad y alcance, ya que sirve para diseñar estrategias efectivas y de referencia para su replicación en otras regiones afectadas por este problema que atenta contra la salud pública. En la revisión de literatura se encontró varias evaluaciones de políticas relacionadas. Una de ellas es la evaluación sobre el impacto que ha tenido el sistema de transporte Bus Rapid Transit (BRT) ubicado en la ciudad de México, Utilizando una base de datos historia, se evaluó de manera cuantitativa la calidad del aire antes y después de la implementación de este sistema de transporte, y cuyos resultados demostraron un impacto positivo ya que se demostró una disminución significativa en los niveles de contaminación, lo que indica la efectividad de esta política. Aunque en la misma investigación recalca que es necesario combinar medidas de transporte con otras políticas ambientales para lograr una mejora de sostenida en la calidad del aire (Bel & Holst, 2018).

La restricción de tráfico en zonas urbanas de china es otra medida utilizada como política. Según el estudio realizado por Lu et al., donde analiza los efectos sobre la calidad del aire usando un enfoque de modelado para evaluar como esta reducción del tráfico no local influyó en la contaminación del aire, los hallazgos mostraron que esta política podía mejorar la calidad del aire, pero su efectividad dependía de factores como la adherencia a las restricciones y la movilidad alternativa disponible (Lu et al., 2022).

Sun et al., realizó un análisis de la política sobre la restricción de tráfico aplicado en la ciudad de Beijing. El objetivo de esta política era mejorar el tráfico y la reducción de contaminación

del aire, se encontró que, aunque hubo una mejora significativa en la calidad del aire a corto plazo, la efectividad de la misma a largo plazo se iba limitando, ya que se creaba un comportamiento de adaptabilidad de los conductores, ya que resolvían la restricción de transitar en el vehículo particular, adquiriendo uno adicional (Sun et al., 2014).

Hubo políticas en las que se evaluó la efectividad de la implementación de los sistemas automáticos de monitoreo de contaminación del aire y la divulgación corporativa en China, por medio de un experimento natural. Los hallazgos indicaron que la transparencia de la divulgación pública de datos sobre la contaminación del aire era necesaria y puede impulsar la responsabilidad corporativa, motivando a mejorar las prácticas ambientales y a su vez la calidad del aire (H. Chen et al., 2023).

Otro experimento aplicado para la evaluación de políticas también se llevó a cabo en china, examinando el impacto de las políticas de ciudades saludables en la calidad de aire urbano en china. Esta metodología permitió evaluar los efectos de la política en tiempo real y sus resultados demostró mejoras significativas en la calidad del aire, la cual resalta la importancia de políticas integradas de salud pública y ambiental (Guo & Zhang, 2024).

El artículo de Slovic & Ribeiro, ofrece un análisis exhaustivo sobre la implementación de políticas en contra de la contaminación del aire, ya que compara a 3 ciudades importantes como son Sao Paulo, Nueva York y Paris. En este estudio se usó un enfoque comparativo de análisis de políticas para diferenciar la implementación y efectividad entre estas ciudades que manejan un contexto socioeconómico y regulatorio diferentes. Los resultados de este estudio sugieren que las políticas deben adaptarse al contexto local para ser efectivas y que una combinación de medidas regulatorias y económicas ayudaría a una tendencia más satisfactoria (Slovic & Ribeiro, 2018) .

2.2.2. Modelos De Calidad Del Aire

Un ámbito igualmente relevante y necesario en esta revisión de literatura es indagar acerca de los tipos de modelos, enfoques y técnicas que se han utilizado para modelar la calidad del aire en las ciudades y que los mismos se hayan tenido en cuenta al momento de evaluar las políticas de movilidad.

Se identificaron modelos basados en estadística y Machine Learning, como es el caso de Farhadi et al., quienes aplicaron técnicas de aprendizaje automático para evaluar intervenciones en políticas de transporte y su impacto en la calidad del aire, con el objetivo de reducir los niveles de dióxido

de nitrógeno. Sus resultados mostraron que el Machine Learning puede identificar patrones y correlaciones que son difíciles de detectar mediante métodos de modelación tradicional (Farhadi et al., 2023). Por su parte Gupta et al. (Gupta et al., 2020) y Buya et al. (Buya et al., 2024), utilizaron modelos de interpolación estadística, principalmente utilizaron técnicas de regresión lineal. En ambos estudios midieron sus modelos por medio del R² con el fin de determinar la técnica más adecuada; en el caso de Gupta et al., encontraron que el Modelo de regresión con vectores de soporte del tipo eps basado en kernel radial (modelo basado en Machine Learning) fue el más útil para resolver las complejidades geofísicas y poder estimar con mayor precisión ambos tipos de material particulado (Gupta et al., 2020).

También se encontraron modelos de simulación con aplicación en estudios de calidad del aire, es el caso de Patiño et al., (Patiño et al., 2024) quienes evaluaron la idoneidad de tres diferentes modelos de dispersión para la evaluación de la calidad del aire y la planificación urbana en contextos europeos. En su estudio en particular, el modelo PALM 6.0 (Parallelized Large-Eddy Simulation Model) fue el que pudo simular mejor la distribución la concentración del material particulado. La complejidad de los modelos empleados destaca la importancia de elegir la herramienta de modelado adecuada para el contexto específico de cada ciudad. Así mismo, Soler et al. (Soler et al., 2016), Desarrollaron un modelo para simular la calidad del aire en el noreste de España a escalas regionales y locales denominado. El modelo, denominado ARAMIS, es una combinación de modelos meteorológicos y químicos utilizados para la predicción de la calidad del aire, WRF (Weather Research and Forecasting), HIREM (High-Resolution Emission Model) y CMAQ (Community Multiscale Air Quality). Este estudio sugiere que los modelos regionales pueden proporcionar una base sólida para el desarrollo de políticas a nivel municipal.

Adoptando un enfoque desde la física, más específicamente la física estadística, se encontró el estudio desarrollado por Bessagnet et al. (Soler et al., 2016), quienes utilizaron parametrizaciones físicas y químicas para mejorar los procesos de Machine Learning de las simulaciones de la calidad del aire. Este modelo ofrece la posibilidad de realizar evaluaciones detalladas a bajo costo computacional, lo que es beneficioso para realizar múltiples simulaciones bajo diferentes escenarios de políticas.

Por último, se encontraron estudios que involucran la Dinámica de sistemas y sus aplicaciones entorno a la gestión de la calidad del aire. En el caso de Z. Chen et al. examinaron el efecto de las políticas de restricción del tráfico urbano sobre la mejora de la calidad del aire utilizando un modelo

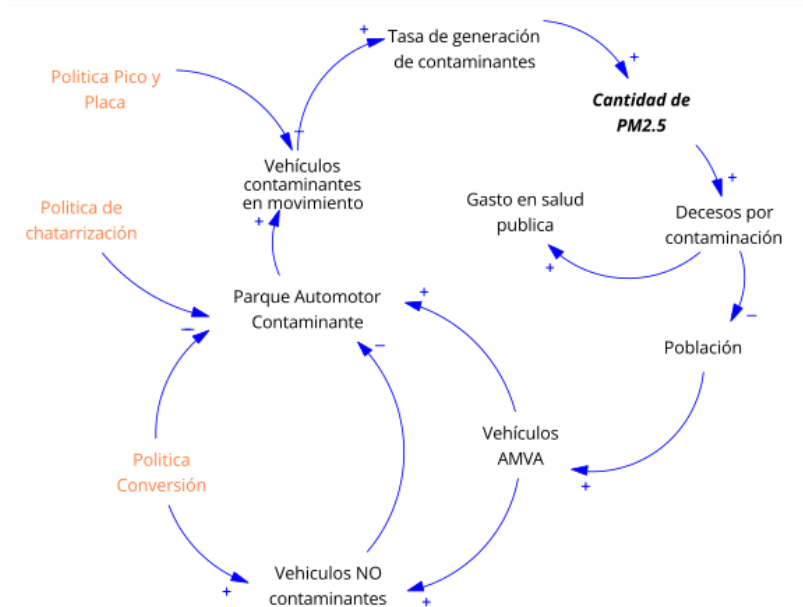
de dinámica de sistemas combinado con un modelo gris no homogéneo. Este enfoque destaca cómo la dinámica de sistemas puede capturar las complejidades de las intervenciones políticas en entornos urbanos densamente poblados y como las personas reaccionan en el corto y largo plazo a los cambios en estas políticas (Z. Chen et al., 2022). De igual manera Prieto-Mostacero et al., desarrollaron un modelo de dinámica de sistemas para evaluar las emisiones vehiculares en la carretera Central de Lima, Perú. En su investigación se enfatizó en la relevancia de tener en cuenta las características locales del tráfico y la topografía para modelar con precisión este tipo de emisiones (Prieto-Mostacero et al., 2023). Finalmente se encontró que el trabajo realizado por parte de Sánchez Céspedes et al., por medio de un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas fue relevante al momento de estudiar los efectos de las políticas en el largo plazo sobre los niveles de PM10 en la ciudad de Bogotá. Este último estudio resulta ser importante para el trabajo de investigación en curso ya que se emplea un enfoque y un marco metodológico similar al que se propone para el Área Metropolitana del Valle de Aburra (Sanchez Céspedes et al., 2022).

3. Desarrollo del modelo

3.1. Realización Hipótesis dinámica o diagrama causal del problema

Figura 4

Diagrama causal del modelo



Nota. Imagen de autoría propia.

3.1.1. Definición de variables

Cantidad de PM2.5

Esta es nuestra variable objetivo de análisis y se refiere a la concentración de partículas finas en el aire ya que no miden más de 2.5 milímetros. Este tipo de material particulado es perjudicial para la salud humana, ya que puede penetrar profundamente en los pulmones o en el torrente sanguíneo, aumentando el riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Es una variable clave para evaluar la calidad del aire.

Decesos por contaminación

Se refiere a la cantidad de muertes relacionadas con la contaminación del aire y que tuvo un efecto directo con enfermedades del sistema respiratorio

Gasto en salud pública

Se refiere al gasto que debe asumir el sistema de salud pública para tratar enfermedades, en este caso a la exposición de contaminantes del aire, que causan enfermedades cardio respiratorias.

Parque automotor contaminante

Se refiere al conjunto de vehículos que actualmente se encuentran disponibles en un lugar específico, en este caso en el Valle de Aburrá y que contribuyen significativamente a la contaminación del aire, en particular aquellos que utilizan motores de combustión interna y emiten grandes cantidades de gases contaminantes, incluido en este caso el PM2.5.

Población

Se refiere a la cantidad de personas que habitan en el Área Metropolitana del Valle de Aburra.

Política de chatarrización

Es un conjunto de medidas implementadas por el gobierno para retirar de circulación vehículos, en algunos casos por antiguos, otro por mal estado y otros por no cumplir con normativas

de emisiones. En algunos casos las políticas generan incentivos para financiar a los propietarios el cambio de vehículo.

Política de conversión

Es un conjunto de medidas implementadas para cambio de tecnología limpias sobre los vehículos que actualmente circulan un ejemplo de cambio de tecnología es la conversión a gas natural vehicular, vehículos híbridos y eléctricos. Estas tecnologías reducen la tasa de generación de contaminantes en el aire como el PM2.5.

Política de Pico y Placa

Esta medida regula el uso de vehículos privados en días o franjas horarias específicas, el objetivo es reducir el número de vehículos en movimiento que a la vez reduce las emisiones.

Tasa de generación de contaminantes

Es el efecto total de la suma del factor de emisión de todos los vehículos en circulación. Este factor depende del tipo de fuente de energía de cada vehículo, como el gas natural vehicular, el Diesel, la gasolina, electricidad, entre otros, la distribución porcentual del tipo de vehículo utilizado depende directamente de los incentivos de políticas públicas encaminadas a la adquisición de determinado tipo de vehículo.

Vehículos en AMVA

Se refiere al total de vehículos que se encuentran en circulación en todo el Área Metropolitana del Valle de Aburra.

Vehículos en movimiento contaminante

Se refiere al subconjunto del parque automotor, vehículos que se encuentran en circulación y que generan emisiones contaminantes debido a su actividad y al uso de combustibles fósiles.

Vehículos NO contaminantes

Representa la cantidad de vehículos impulsado por motores eléctricos o carros impulsados por GNV, estos carros no emiten gases contaminantes, lo que su adopción lo convierte en una alternativa sobre los vehículos contaminantes.

3.1.2. Relaciones Causales

A continuación, se declaran cada una de las variables utilizadas en el modelo y sus respectivas variables con las que conecta, además la acompaña un signo que representa el tipo de relación: positiva (+) que se da cuando el aumento de la variable causa un aumento en la otra, y negativa (-) que se da cuando el aumento de una variable provoca una disminución en otra.

Cantidad de PM2.5

- (+) Decesos por contaminación: Entre mayor sea la contaminación por PM2.5, mayor serán la cantidad de personas enfermas por contaminación del aire.

Decesos por contaminación:

- (+) Gasto en salud pública: Entre mayor sea la cantidad de personas con que fallecen por enfermedades respiratorias debido a la contaminación del aire, mayor será el gasto de recursos por parte del estado para mitigar los daños a la salud pública.
- (-) Población: Entre mayor sea la cantidad de personas enfermas por la contaminación del aire, mayor será la cantidad de personas que fallecen en el área metropolitana del Valle de Aburra.

Parque automotor contaminante

- (+) Vehículos en movimiento contaminantes: Entre mayor sea la cantidad de vehículos en el parque automotor contaminante, mayor será la cantidad de vehículos que contaminan en todos sus desplazamientos por el Valle de Aburra.

Política de chatarrización

- (-) Parque automotor contaminante: Entre mayor sea la cantidad y rigurosidad de las políticas de chatarrización, menor será la cantidad de vehículos del parque automotor contaminante por su salida de circulación.

Política de conversión

- (-) Parque automotor contaminante: Entre mayor sea la cantidad y rigurosidad de las políticas de conversión, menor será la cantidad de vehículos del parque automotor contaminante por su salida de circulación.
- (-) Vehículos NO contaminantes: Entre mayor sea la cantidad de políticas de conversión, más vehículos no contaminantes entraran a circular en el AMVA.

Política de Pico y Placa

- (-) Vehículos en movimiento contaminantes: Entre mayor sea la cantidad y rigurosidad de las políticas de pico y placa, menor será la cantidad de vehículos en movimiento que contaminan en su circulación por el Valle de Aburra.

Recursos económicos propietarios de vehículo

- (+) Vehículos NO contaminantes: Entre mayor sea los recursos económicos de parte del propietario de vehículo, mayor será la facilidad para acceder al cambio a un vehículo NO contaminante, lo que hace que incremente su cantidad.

Tasa de generación de contaminantes

- (+) Cantidad de PM2.5: Entre mayor sea la tasa de generación de contaminantes, mayor será la cantidad de PM2.5 en el aire, producto de esta contaminación.

Vehículos en movimiento contaminantes

- (+) Tasa de generación de contaminantes: Entre mayor sea la cantidad de vehículos en movimiento contaminantes en circulación, mayor será la tasa de generación de contaminantes.

Vehículos NO contaminantes

- (-) Parque automotor contaminante: Entre mayor sea la cantidad de vehículos No contaminantes, menor será la cantidad de vehículos del parque automotor contaminante, siendo una alternativa de reemplazo.

3.1.3. Políticas del sistema

En el sistema se busca evaluar el impacto de 3 políticas públicas de movilidad en el valle de aburra, ya que las fuentes móviles son quienes generan mayor contaminante PM2.5, aproximadamente 95% del total emitido de acuerdo con el inventario de emisiones del año 2022 en el Valle de Aburra.

Política de conversión

la conversión vehicular es una política orientada al reemplazo paulatino de vehículos cuyo proceso de combustión genera material particulado, por vehículos cuyas emisiones son menores o incluso no generan. Esta conversión se da porque existen los incentivos para que los propietarios de los vehículos decidan cambiar de vehículo o porque realizan una modificación al proceso de combustión del vehículo, implementando nuevas tecnologías. Esta conversión se analiza sobre el parque automotor como un todo, es decir, la tasa de generación de PM2.5 del parque automotor disminuye en la medida que la cantidad de vehículos Diesel son reemplazados por vehículos eléctricos o de Gas natural vehicular, por ejemplo.

Política de chatarrización

Consiste en una política orientada a sacar de circulación aquellos vehículos que tienen determinada antigüedad y que por esta misma condición generen una mayor cantidad de material particulado. El artículo 1079 de 2015 establece que los vehículos de servicio de transporte público deben tener una antigüedad como máximo en 20 años. El objetivo de esta política es aplicar a cabalidad esta norma. De igual manera, en esta política se plantea un escenario en el que se aplica la salida de circulación para vehículos particulares a los 20 años.

Política de Pico y placa

Es una política vigente en el Valle de Aburra y lo que pretende es reducir el número de vehículos que circulan en el área metropolitana en las horas pico, entre las 5 de la mañana y las 8 de la noche. Aplica para carros particulares, motos 2 tiempos y 4 tiempos. A cada día hábil de la semana le corresponde dos números que representan cada uno el último dígito de la placa de los vehículos que tienen prohibido transitar en el horario descrito. Para efectos del modelo se analizarán variaciones en esta política con el fin de estudiar su impacto en la cantidad de PM2.5.

3.1.4. Paso de tiempo y fronteras del sistema

Paso de Tiempo

El límite temporal del sistema se extiende hasta el año 2040, un horizonte que ofrece la posibilidad de analizar los efectos de diferentes políticas a mediano y largo plazo. Este periodo facilita la simulación de escenarios futuros, incluyendo los cambios proyectados en la población, el parque automotor y la implementación de nuevas tecnologías y normativas.

El análisis se centrará en la simulación de escenarios futuros, considerando los cambios proyectados en la población, la evolución de la composición vehicular, la implementación de nuevas tecnologías y el impacto de las políticas y normativas. Esto permitirá evaluar los efectos de diferentes políticas a mediano y largo plazo, con el objetivo de analizar cómo estas intervenciones contribuyen a la reducción de las emisiones de material particulado PM2.5.

Fronteras del sistema

El modelo de dinámica de sistemas propuesto para evaluar políticas públicas de movilidad en relación con las emisiones de material particulado PM2.5 tiene como límite espacial el área metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), conformada por los diez municipios que integran esta región. Este alcance geográfico permite considerar las características específicas de la movilidad y las emisiones en la zona, donde las dinámicas de tráfico, densidad poblacional y actividades económicas tienen un impacto directo en la calidad del aire.

Dentro del sistema se incluyen componentes clave relacionados con la población y la movilidad en el AMVA. Estos comprenden la población total y su crecimiento, el parque vehicular dividido por categorías (buses, buses especiales, motos, camiones, tractocamiones, taxis,

Metroplús, automóviles particulares, automóviles de servicios especiales y volquetas) y las políticas públicas implementadas para reducir emisiones de PM_{2.5}. Estos elementos son fundamentales para representar las fuentes de emisión y las medidas de intervención en el sistema.

Factores externos que afectan el sistema pero que no son modelados directamente incluyen el crecimiento vehicular y poblacional, la tasa de motorización de los vehículos, y la relación entre las emisiones y su concentración en el aire. Asimismo, se consideran factores externos de impacto en salud, como el incremento en la tasa de mortalidad relacionada con la contaminación y los costos asociados al gasto médico. Estas variables exógenas se integran como entradas al modelo para explorar su influencia en los resultados.

El modelo se alimenta de datos disponibles y confiables, como los inventarios del parque automotor, tasas de motorización, factores de emisión por tipo de vehículo y distribución de combustible. Además, se incluye información sobre la relación entre emisiones y concentraciones de PM_{2.5}, y la conexión entre estas concentraciones con las tasas de mortalidad y los costos en salud. La inclusión de estos datos asegura que el modelo represente fielmente las dinámicas reales del AMVA y proporcione una base sólida para la evaluación de escenarios.

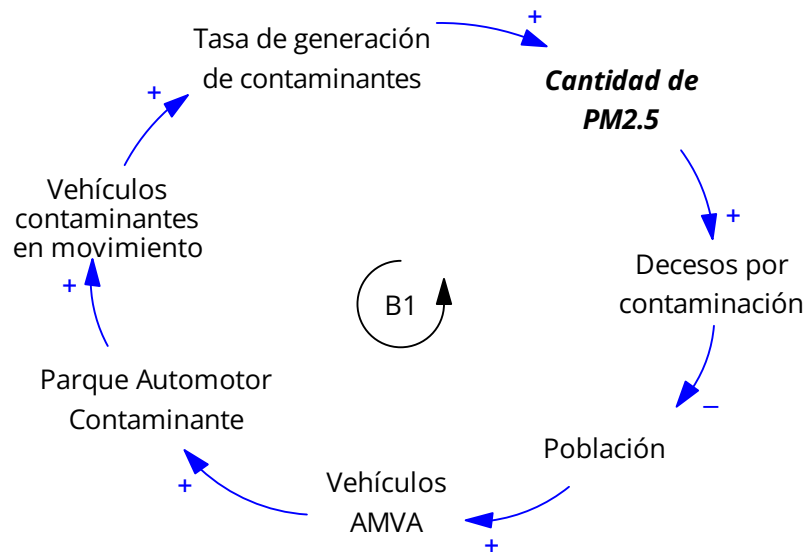
Quedan fuera del sistema otras posibles fuentes de emisión de PM_{2.5} no relacionadas con la movilidad, como actividades industriales o quema de biomasa, así como factores climáticos específicos que puedan influir en la dispersión de partículas. Estas exclusiones se realizan para mantener el enfoque del modelo en las políticas de movilidad, simplificando el análisis sin comprometer la validez de los resultados para el objetivo planteado.

3.2.Ciclos del sistema

3.2.1. Ciclo crecimiento vehículo y parque automotor

Figura 5

Ciclo parque automotor contaminante



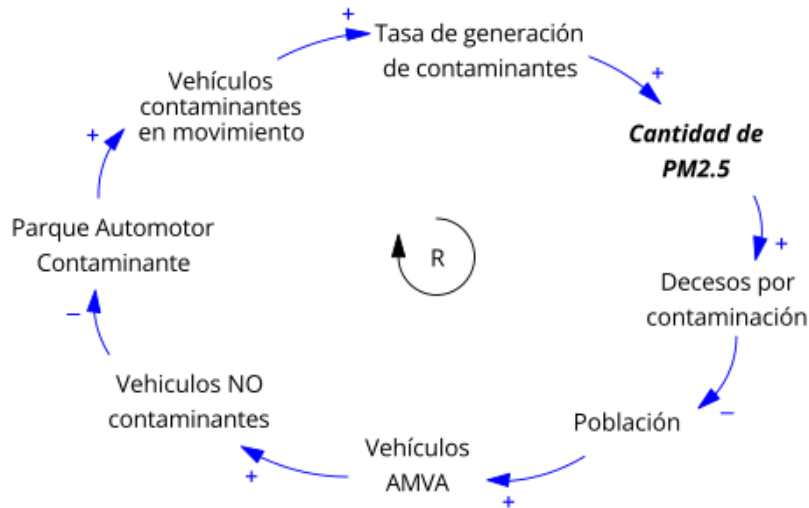
Nota. Imagen de autoría propia.

Este ciclo representa como el incremento de la población genera un aumento en la cantidad de vehículos en el área metropolitana del valle de aburra lo que a su vez incrementa el tamaño del parque automotor contaminante y esto consecuentemente hace que haya una mayor cantidad de vehículos contaminantes circulando, por ende, la tasa total de generación de material particulado incrementa, esto provoca que se libere una mayor cantidad de PM2.5 y se tiene como consecuencia que se presente un incremento en las muertes asociadas a la contaminación del aire. A su vez estos decesos impactan negativamente en el crecimiento poblacional del área metropolitana, de esta forma se completa este ciclo de balance.

3.2.2. Ciclo de crecimiento vehículo no contaminantes

Figura 6

Ciclo de crecimiento vehículo no contaminantes



Nota. Imagen de autoría propia.

Este ciclo representa el crecimiento de los vehículos no contaminantes en el área metropolitana del valle de aburra. Al incrementar la población, aumenta los vehículos AMVA lo que hará que los vehículos No contaminantes también aumenten, disminuyendo los vehículos que hacen parte del parque automotor contaminantes, repercutiendo directamente y aumentando la tasa total de generación de material particulado, lo que resulta en la liberación de una mayor cantidad de PM2.5. Esto, a su vez, ocasiona un incremento en las muertes relacionadas con la contaminación del aire. Estas defunciones afectan el crecimiento poblacional del área metropolitana, cerrando así el ciclo de realimentación.

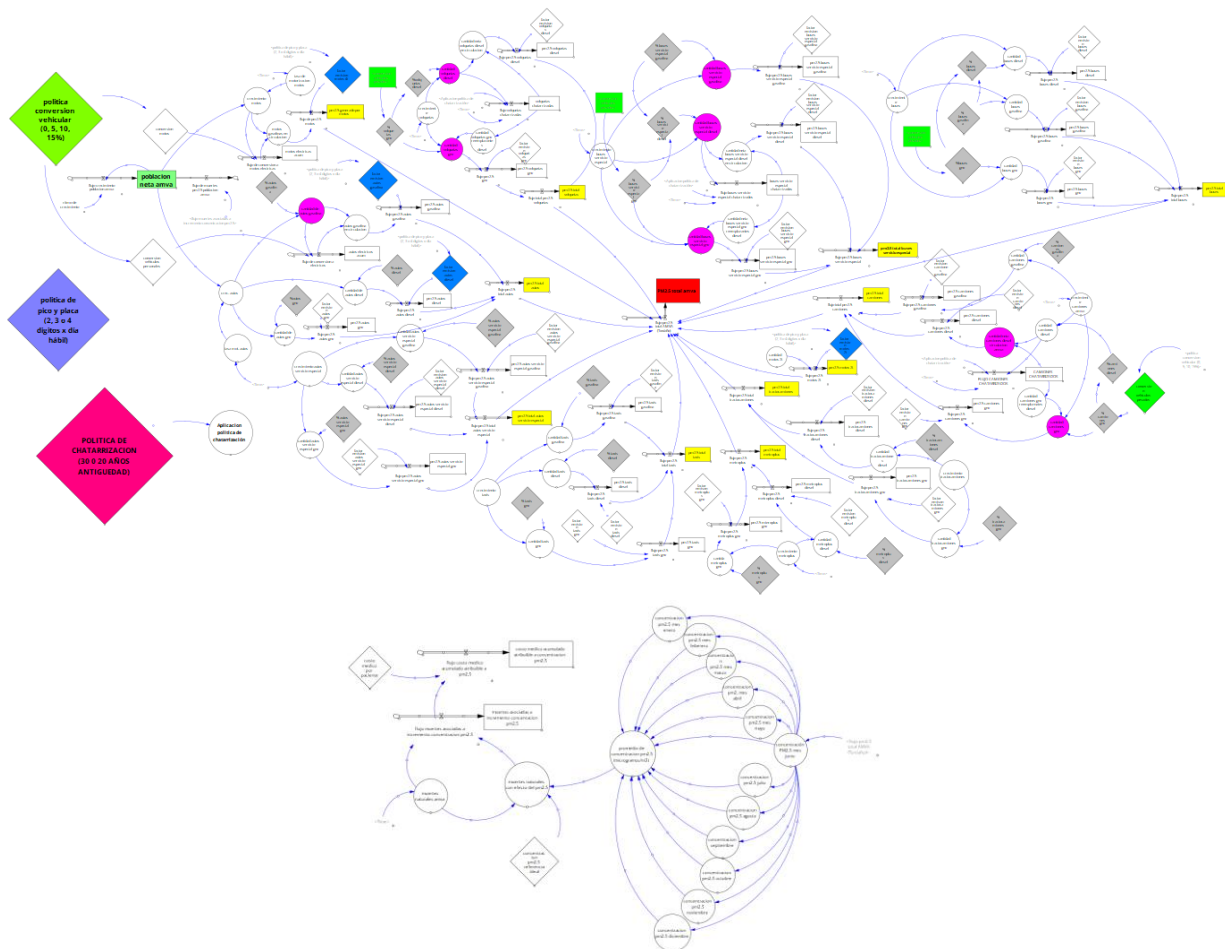
3.3. Diagrama de Flujos y Niveles.

3.3.1. Ilustración del Diagrama

En la Figura 7 está plasmado todo el modelo propuesto, pero debido a la cantidad de variables e información robusta que debe manejar el modelo, presentar todo en una sola imagen dificulta su visualización y lectura. Es por esta razón que a continuación se muestra el modelo por conjuntos para una mejor comprensión.

Figura 7

Diagrama de flujos y niveles.



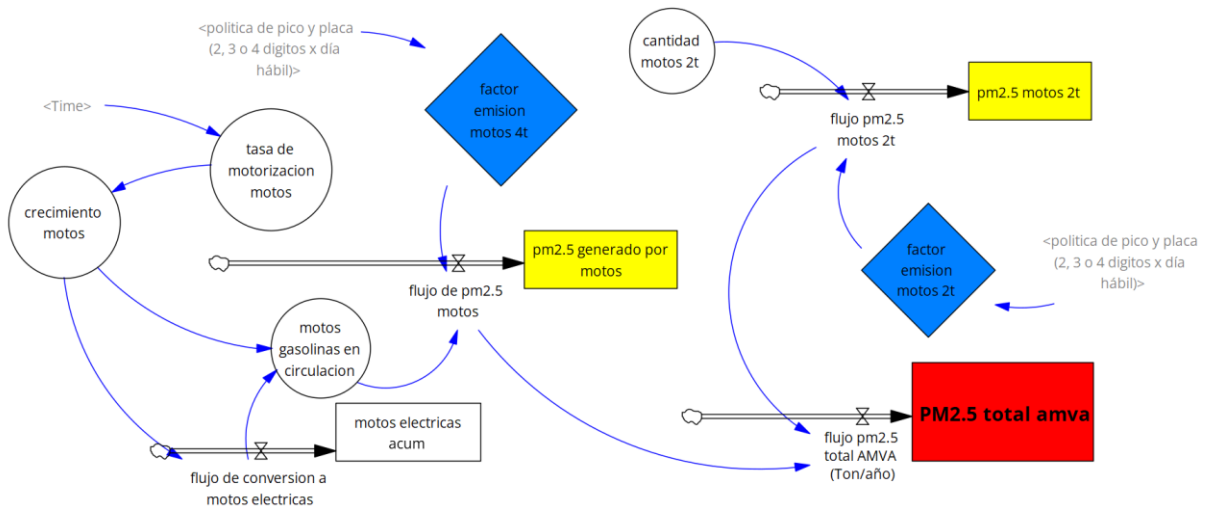
Nota. Imagen de autoría propia.

Conjunto del Diagrama de Motos

El conjunto de variables, flujos y niveles representado en la figura 9 agrupa a las motos de 2 tiempos, 4 tiempos y eléctricas. Inicia por la cantidad de motos que se encuentran en el año que se simula en el AMVA, cuanto aporta cada una al flujo de PM2.5, cuantas son convertidas de gasolina a eléctricas (según la política de conversión) aportando al flujo de conversión, para finalizar cuanto aportan cada uno al flujo total de PM2.5 en el AMVA.

Figura 9

Conjunto del Diagrama de Motos



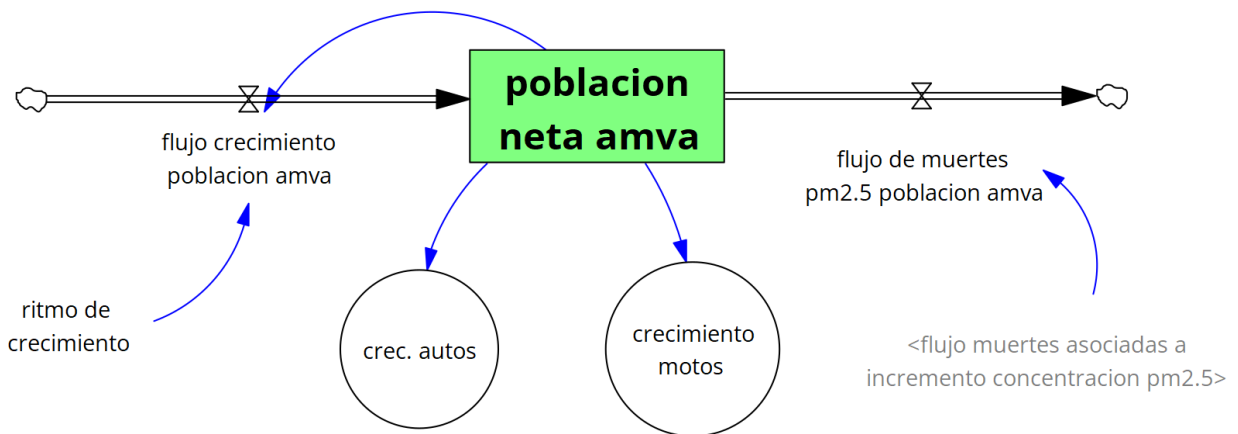
Nota. Imagen de autoría propia.

Conjunto del Diagrama de Población

El conjunto de variables, flujos y niveles ilustrado en la figura 10 tiene como objetivo calcular el total de la población existente en el año que se simula en el AMVA. Para esto se tiene la cantidad de personas que ingresan y salen del nivel de la población y como esta cantidad afecta el crecimiento de autos y motos en el AMVA.

Figura 10

Conjunto del Diagrama de Población



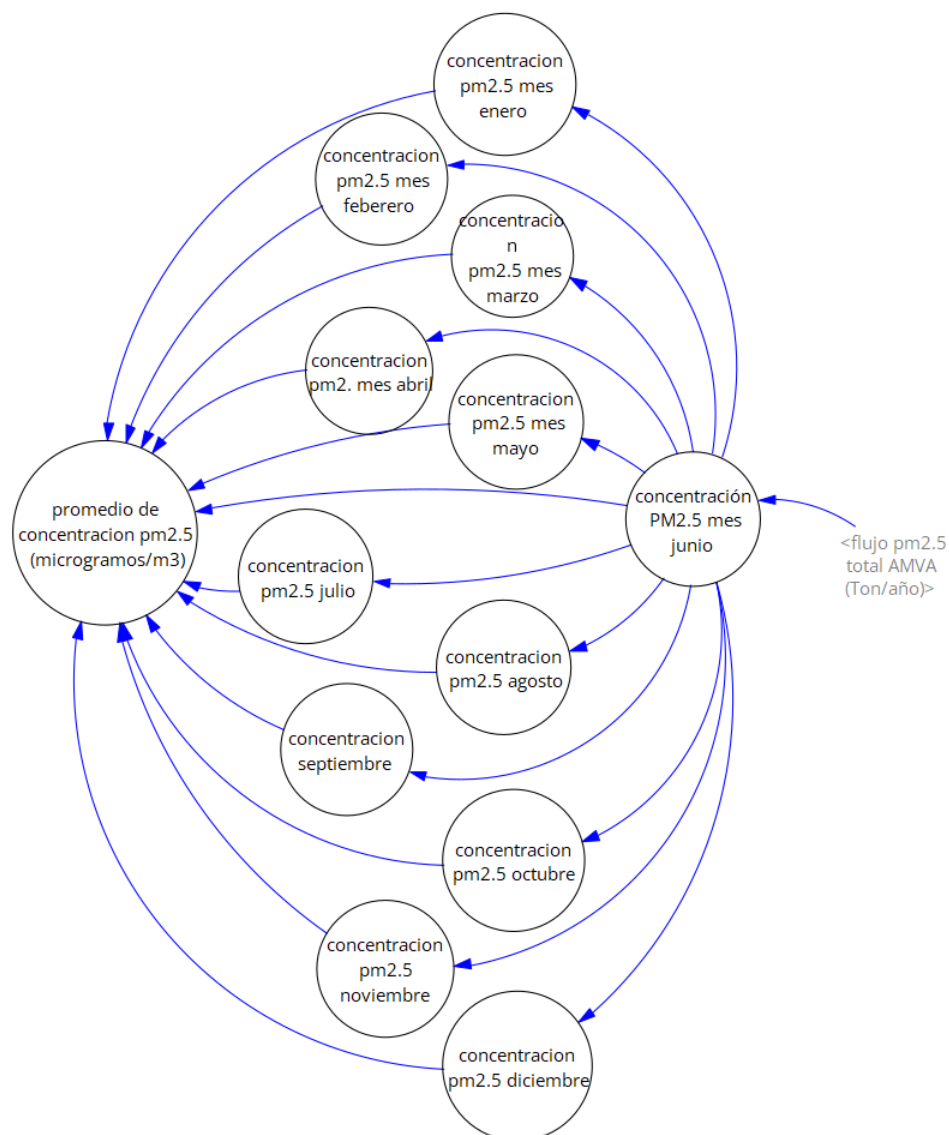
Nota. Imagen de autoría propia.

Conjunto de Diagrama de concentración de PM2.5

El conjunto de variables, flujos y niveles representado en la figura 11 contiene la concentración de PM2.5 aportada por cada uno de los meses, teniendo como base de información el flujo de toneladas/año, esto con el objetivo de calcular y obtener un promedio general de *microgramos/m³*.

Figura 11

Conjunto de Diagrama de concentración de PM2.5



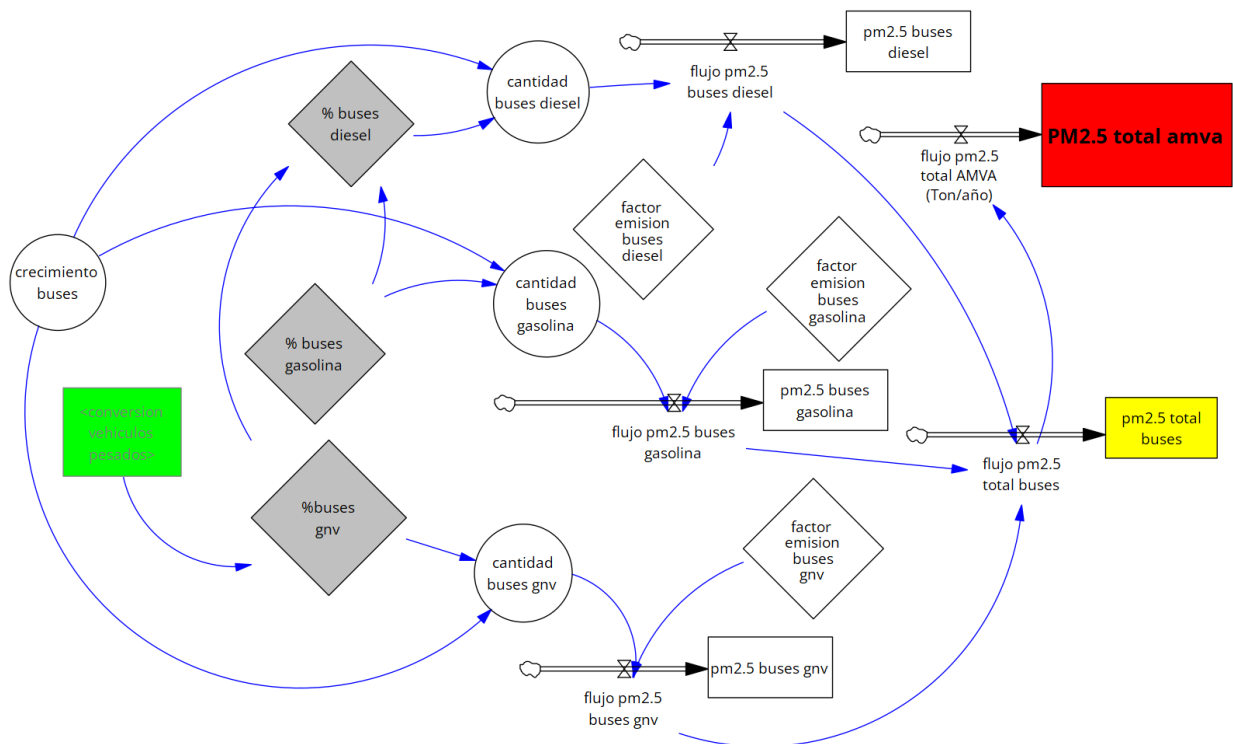
Nota. Imagen de autoría propia.

Conjunto del Diagrama de Buses

Al igual que el conjunto de Buses especiales, el conjunto de variables, flujos y niveles representado en la figura 12 agrupa a todos los buses y los diferentes tipos de combustible que utilizan como son el diésel, gasolina y GNV. Inicia por la cantidad de buses que se encuentran en el año que se simula en el AMVA, cuanto aportan cada uno en su medida al flujo de PM2.5, también existe un flujo de vehículos chatarrizados, de esta manera se genera un flujo de PM2.5 total del conjunto de buses que al final van a aportar al flujo total de PM2.5 en el AMVA.

Figura 12

Conjunto del Diagrama de Buses



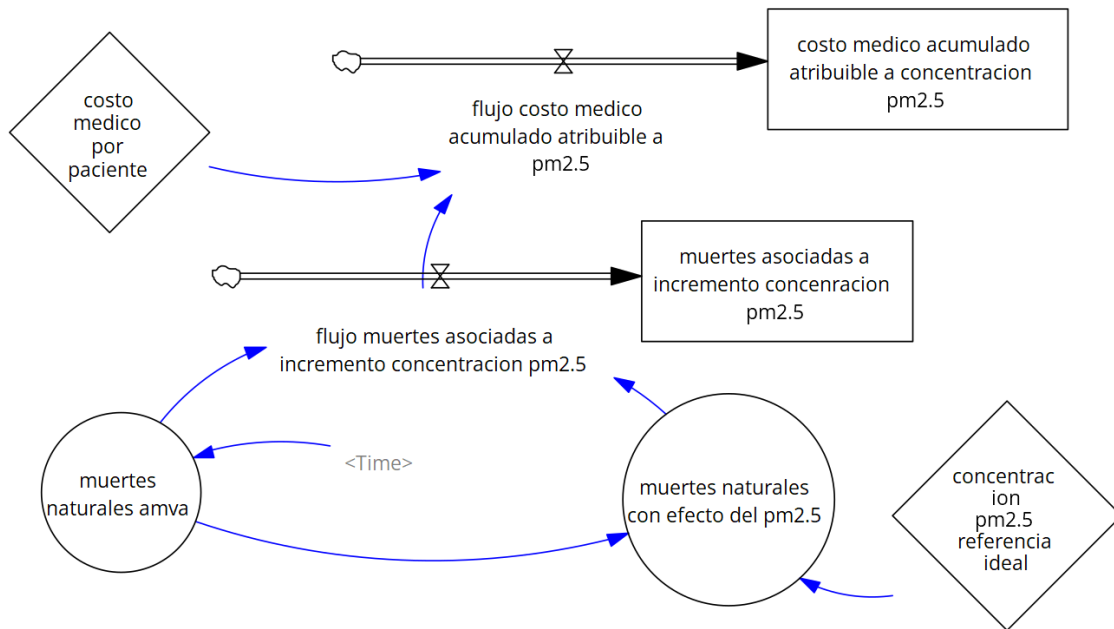
Nota. Imagen de autoría propia.

Conjunto del Diagrama de Muertes y Costos por el PM2.5

El conjunto de variables, flujos y niveles de la figura 13 contiene la cantidad de muertes que se generan al año por la contaminación de PM2.5, teniendo la cantidad de personas presentes en el AMVA y el calculo de cuantas mueren a causa de la concentración de PM2.5. A su vez, se calcula cual es el costo que representa estas muertes al sistema de salud a causa de esta contaminación.

Figura 13

Conjunto de Diagrama de Muertes y Costos por el PM2.5

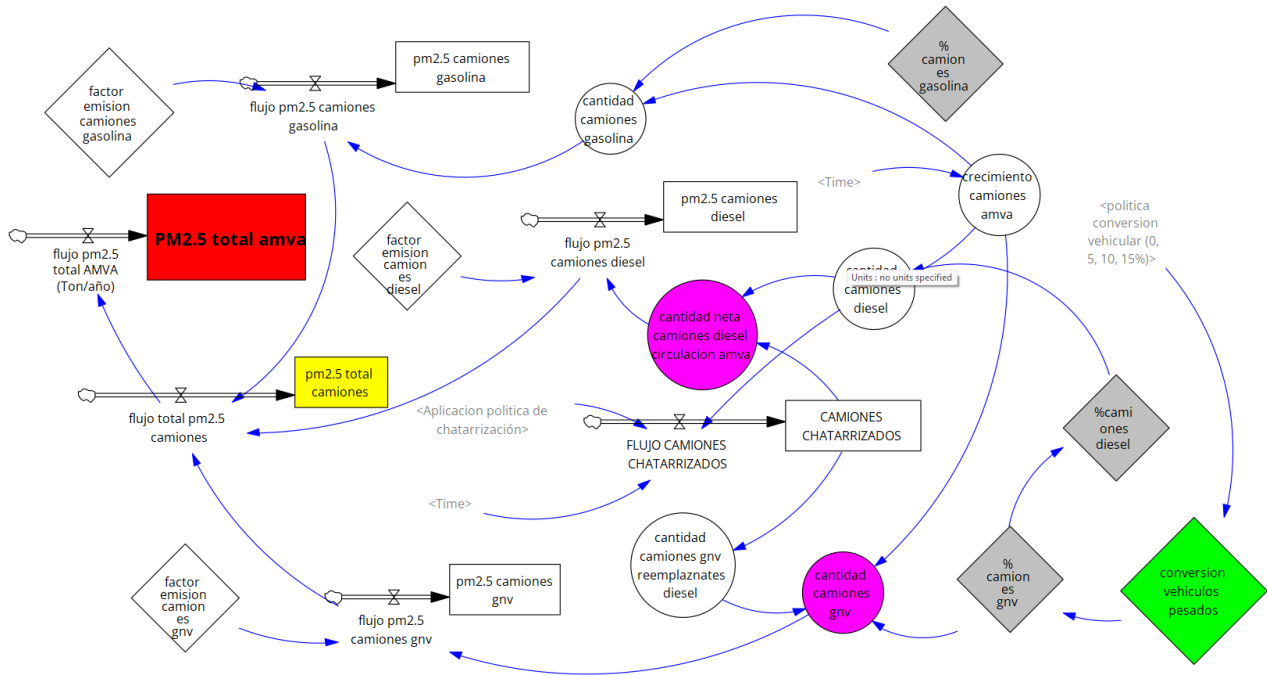


Nota. Imagen de autoría propia.

Conjunto del Diagrama de Camiones

El conjunto de variables, flujos y niveles de la figura 14 agrupa a todos los camiones y sus diferentes tecnologías de combustión: gasolina, diésel y GNV. Cuantos de estos se pueden chatarrizar aportando al flujo de chatarrización y también cuanto aporta cada uno a la contaminación en el flujo de PM2.5, todo esto para calcular el flujo total de PM2.5 que estos aportan al AMVA.

Figura 14
Conjunto del Diagrama de Camiones



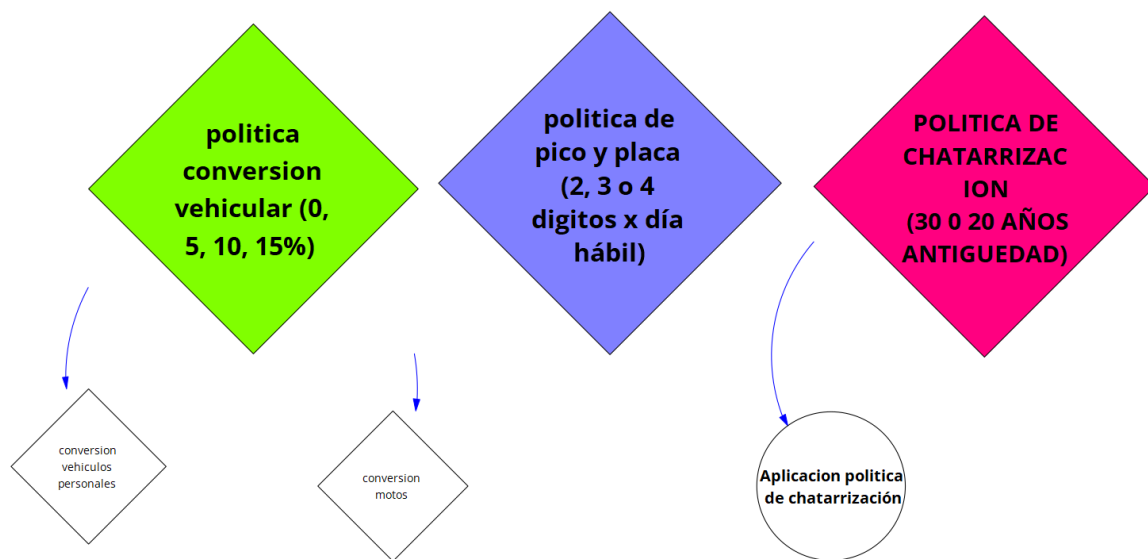
Nota. Imagen de autoría propia.

Conjunto del Diagrama de Políticas

El conjunto de variables exógenas representados en la figura 15 contiene los parámetros para calcular la generación de PM_{2.5} de acuerdo con las políticas implementadas de forma cuantitativa en función de porcentaje de cantidad de vehículos con conversión vehicular y de motos, cantidad de dígitos según el día de pico y placa, por ultimo los años de antigüedad permitidos para circular en la ciudad.

Figura 15

Conjunto del Diagrama de Políticas



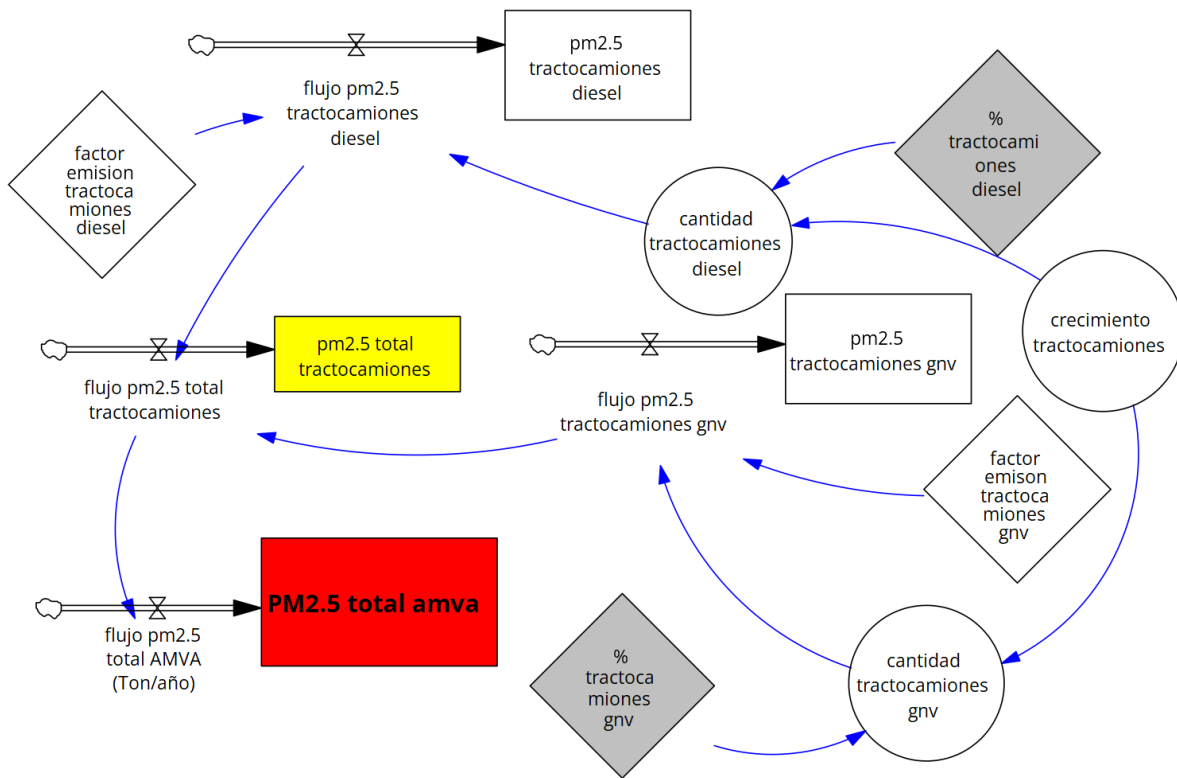
Nota. Imagen de autoría propia.

Conjunto del Diagrama de Tractocamiones

El conjunto de variables, flujos y niveles de la figura 16 agrupa todos los tractocamiones que funcionan a diésel y GNV, estos no se afectan por alguna política aplicada en el modelo, ya que las políticas se aplicaron a aquellos vehículos de carga pesada que estuvieran en el grupo que genera el 80 de material particulado, siguiendo el principio de Pareto. Solo se calcula el flujo de generación de PM_{2.5} y como este aporta al total generado en el AMVA.

Figura 16

Conjunto del Diagrama de Tractocamiones



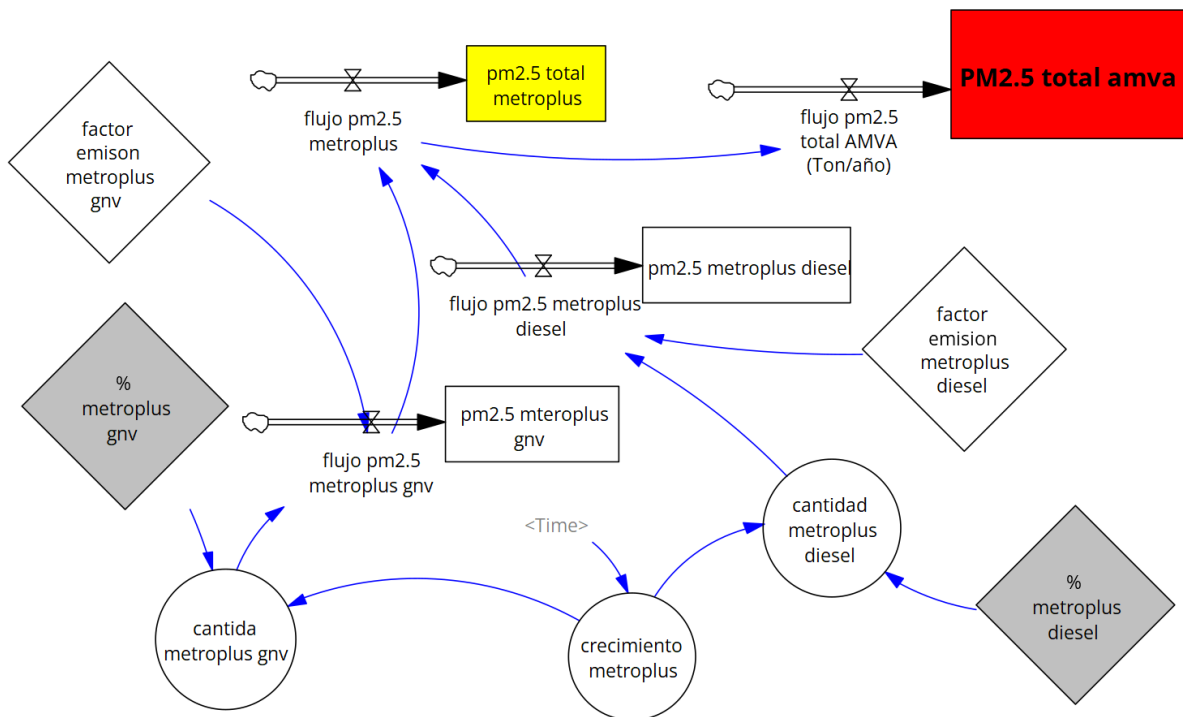
Nota. Imagen de autoría propia.

Conjunto del Diagrama de Metroplús

El conjunto de variables, flujos y niveles representado en la figura 17 se calcula la cantidad de PM2.5 generado por el Metroplús según su tecnología de combustión, ninguna de las políticas usadas en el modelo afecta a este conjunto, ya que su aporte a las emisiones totales es mínima comparada con otras fuentes. Se calcula como cada uno de los tipos de Metroplús aporta al total del PM2.5 generados en el AMVA.

Figura 17

Conjunto del Diagrama de Metroplús



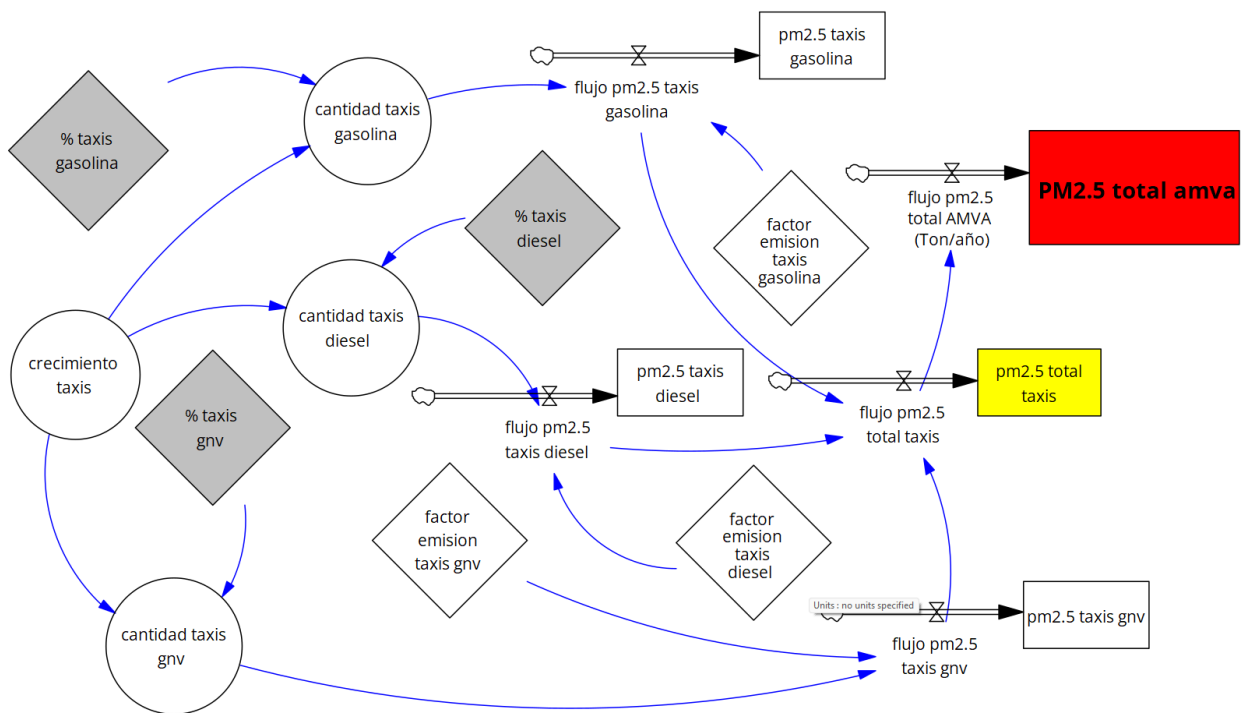
Nota. Imagen de autoría propia.

Conjunto del Diagrama de Taxis

El conjunto de variables, flujos y niveles de la figura 18 agrupa todos los taxis que se encuentran en el AMVA, como aporta cada uno según su tecnología al PM2.5 y como todas suman al flujo total de PM2.5 generados en el AMVA. Ninguna de las políticas usadas en el modelo afecta a este conjunto.

Figura 18

Conjunto del Diagrama de Taxis



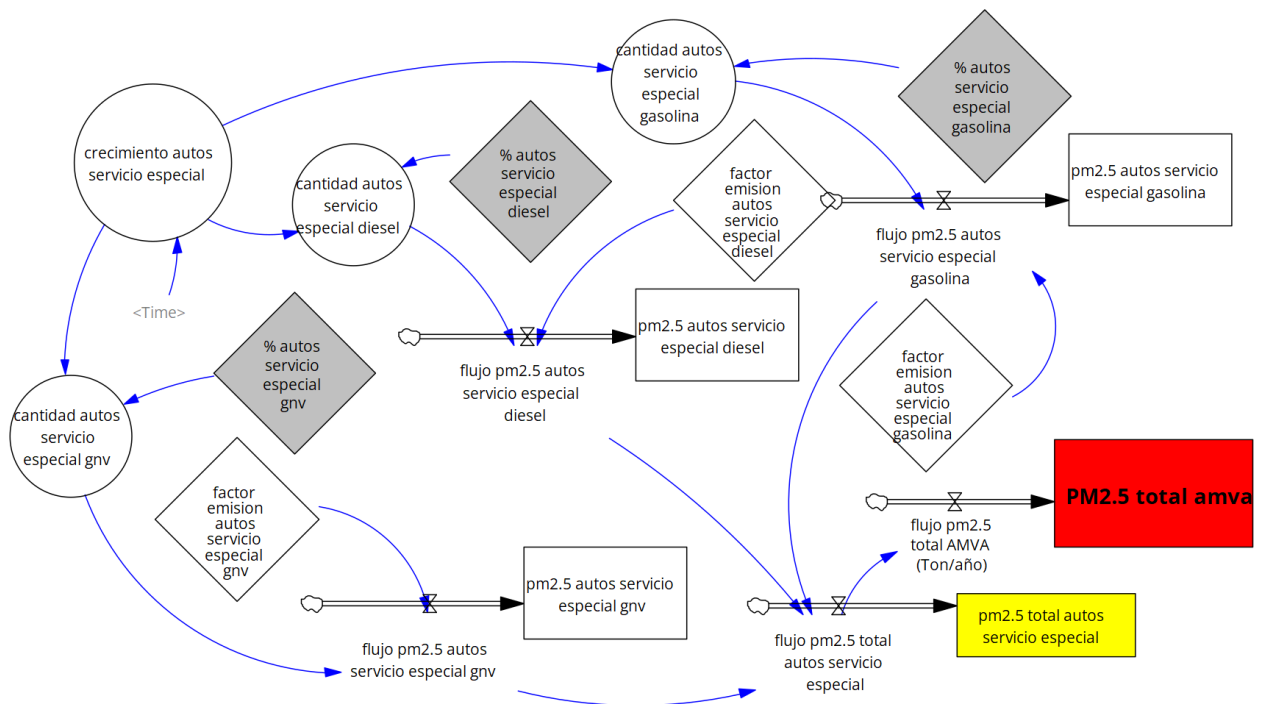
Nota. Imagen de autoría propia.

Conjunto del Diagrama de Autos Servicios Especiales

El conjunto de variables, flujos y niveles de la figura 19 agrupa todos los Autos de Servicios Especiales, discriminados según su tecnología de combustión: Diésel, gasolina y GNV, calculando cuanto aporta cada uno al total del PM2.5 generados en el AMVA. Ninguna de las políticas usadas en el modelo afecta a este conjunto.

Figura 19

Conjunto del Diagrama de Autos Servicios Especiales



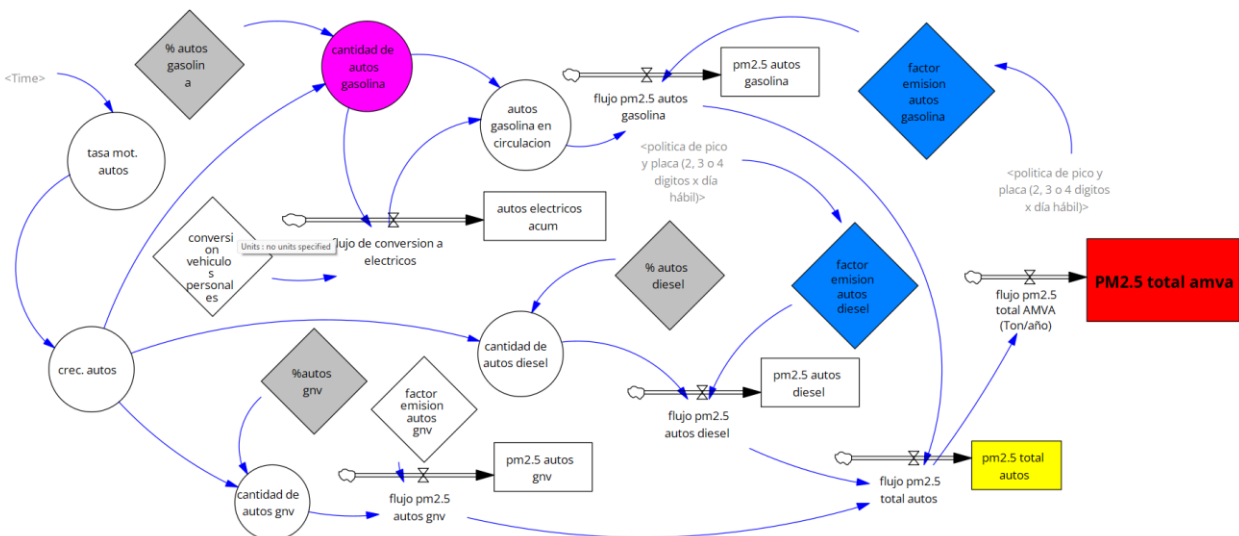
Nota. Imagen de autoría propia.

Conjunto del Diagrama de Autos

El conjunto de variables, flujos y niveles de la figura 20 que representa los autos de uso particular es uno de los más afectados por las políticas, contiene todos los automóviles particulares con sus respectivas tecnologías de combustión, como son el diésel, gasolina, GNV y eléctricos, con el aporte de cada uno de estos en la generación del PM2.5 total. También hay unos flujos de conversión vehicular a tecnologías eléctricas.

Figura 20

Conjunto del Diagrama de Autos



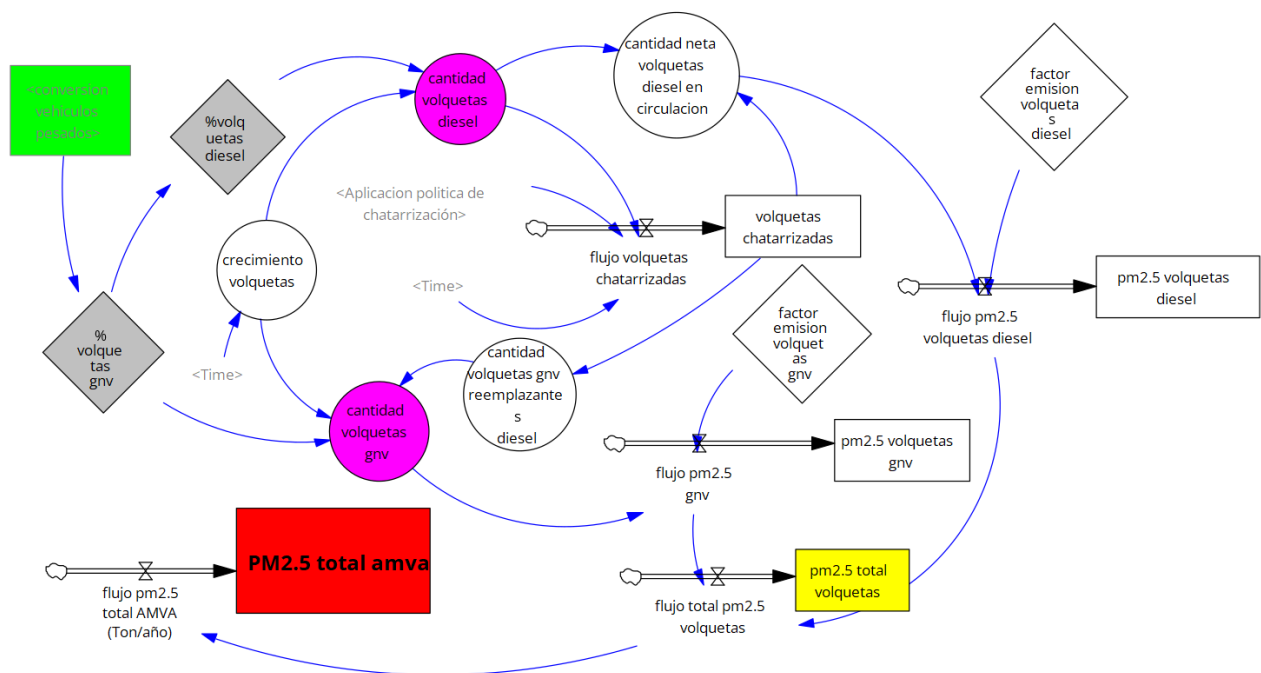
Nota. Imagen de autoría propia.

Conjunto del Diagrama de Volquetas

El conjunto de variables, flujos y niveles de la figura 21 agrupa a todas las volquetas y sus diferentes tecnologías de combustión: diésel y GNV. Cuantos de estos se pueden chatarrizar aportando al flujo de chatarrización y también cuanto aporta cada uno a la contaminación en el flujo de PM2.5, todo esto para calcular el flujo total de PM2.5 que estos aportan al AMVA.

Figura 21

Conjunto del Diagrama de Volquetas



Nota. Imagen de autoría propia.

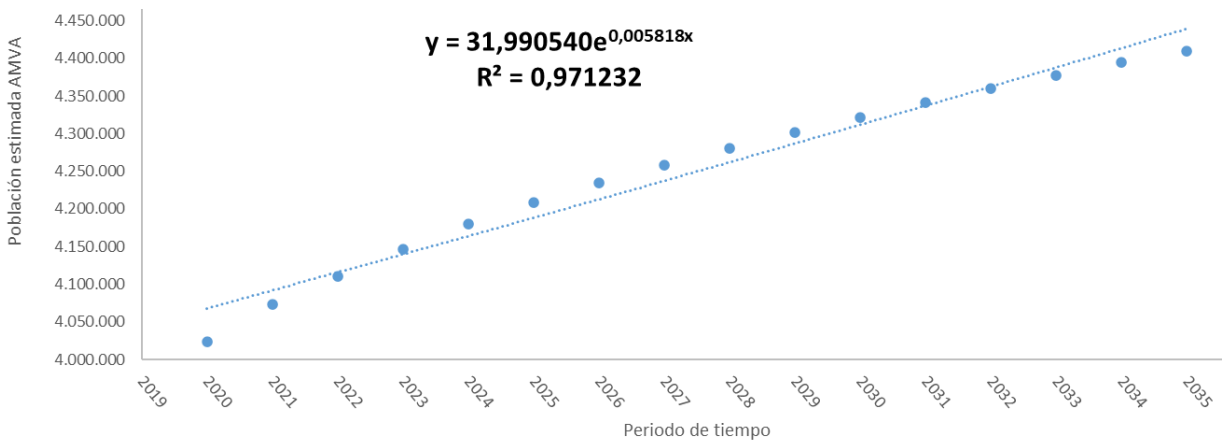
3.3.2. Recolección de información y construcción del modelo

Para la construcción del diagrama de flujos y niveles fue necesario tomar datos de diferentes fuentes de información y a partir de estos construir ecuaciones y relaciones matemáticas. A continuación, se presentan los procedimientos realizados.

Población del área metropolitana

Figura 22

Crecimiento de la población Área Metropolitana Valle de Aburra



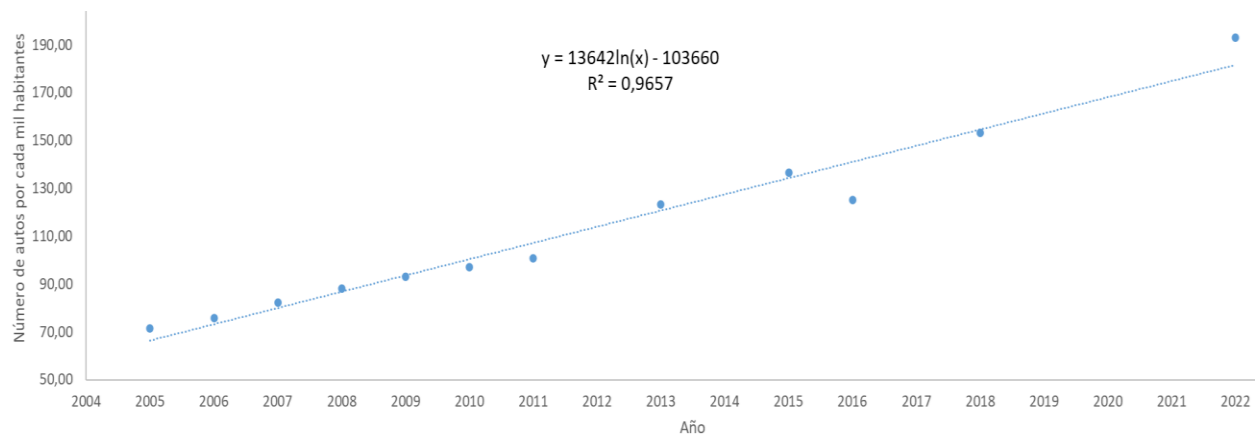
Nota. Imagen de autoría propia.

Se tomaron las proyecciones de población a nivel municipal para el periodo 2020 – 2035 del DANE para cada uno de los 10 municipios que conforman el valle de aburra (*DANE - Proyecciones de población, 2024*), se sumaron estas cantidades para obtener el total del área metropolitana. Dado que las proyecciones solo van hasta el 2035, por medio de regresión exponencial se estimó el ritmo de crecimiento (pendiente) de la población total, con el fin de que a partir de dicha pendiente se pudiera simular la cantidad de habitantes entre 2024 y 2040 en el modelo de simulación dinámica, ya que este es el periodo que se determinó a estudiar en el presente trabajo.

Tasa motorización autos

Figura 23

Comportamiento histórico de la tasa de motorización en el AMVA



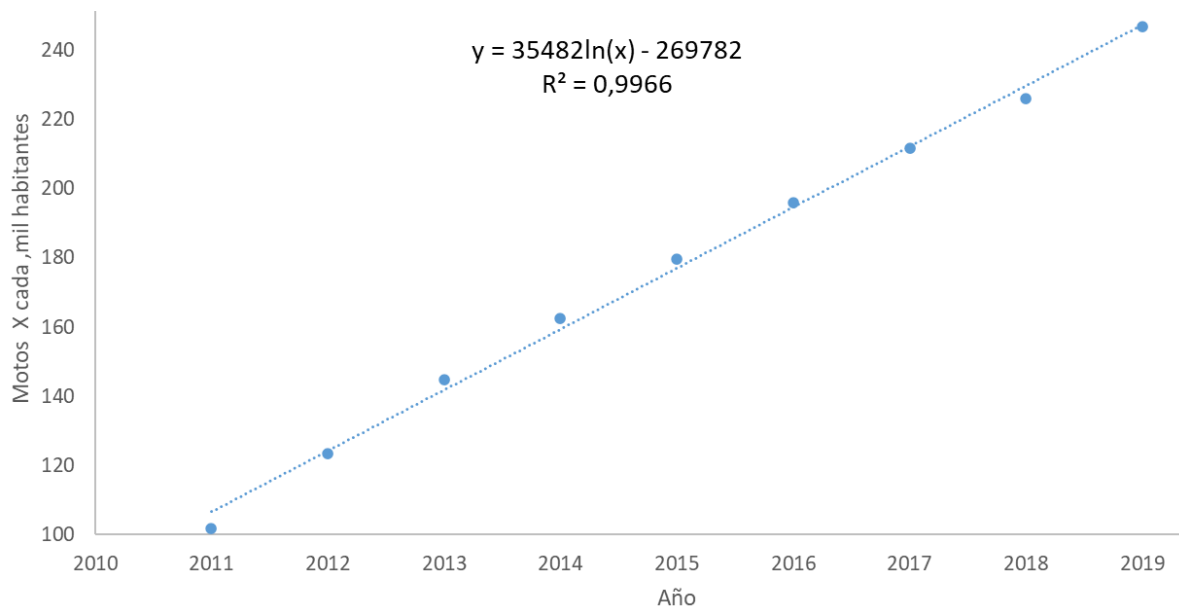
Nota. Imagen de autoría propia.

La tasa de motorización es la cantidad de autos por cada mil habitantes, para construir esta tasa se tomó la cantidad de habitantes en el valle de aburra a partir de las retroproyecciones del DANE (*DANE - Proyecciones de población, 2024*) entre 2005 y 2022, se tomó la cantidad de autos particulares tomando como referencia los datos del sistema para la gestión de la calidad del aire de la Universidad Pontificia Bolivariana (Universidad Pontificia Bolivariana, 2022) Una vez tenida la población y el número de autos, se graficó el comportamiento histórico de la tasa de motorización para observar su comportamiento. Se estableció una regresión lineal logarítmica para estimar la tasa de motorización entre los años 2024 y 2040.

Tasa motorización motos (4T)

Figura 24

Comportamiento histórico tasa de motorización motos (4T) en el AMVA



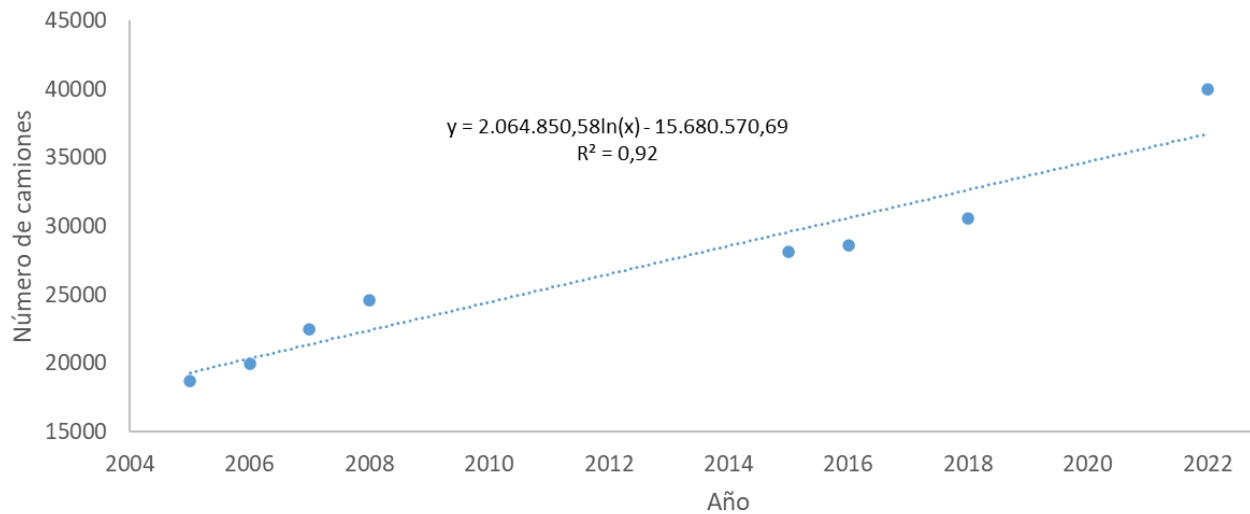
Nota. Imagen de autoría propia.

Para construir esta tasa se tomó la cantidad de habitantes en el valle de aburra a partir de las retroproyecciones del DANE (*DANE - Proyecciones de población, 2024*) entre 2011 y 2019, la cantidad de motocicletas se obtuvo tomando como referencia los datos suministrados en el informe de calidad de vida de Medellín 2020 (*Medellín Cómo Vamos, 2021*). Una vez obtenida la población y el número de motocicletas, se graficó el comportamiento histórico de la tasa de motorización. Se estableció una regresión logarítmica para estimar esta tasa entre los años 2024 y 2040.

Cantidad de camiones

Figura 25

Comportamiento histórico cantidad de camiones en el AMVA



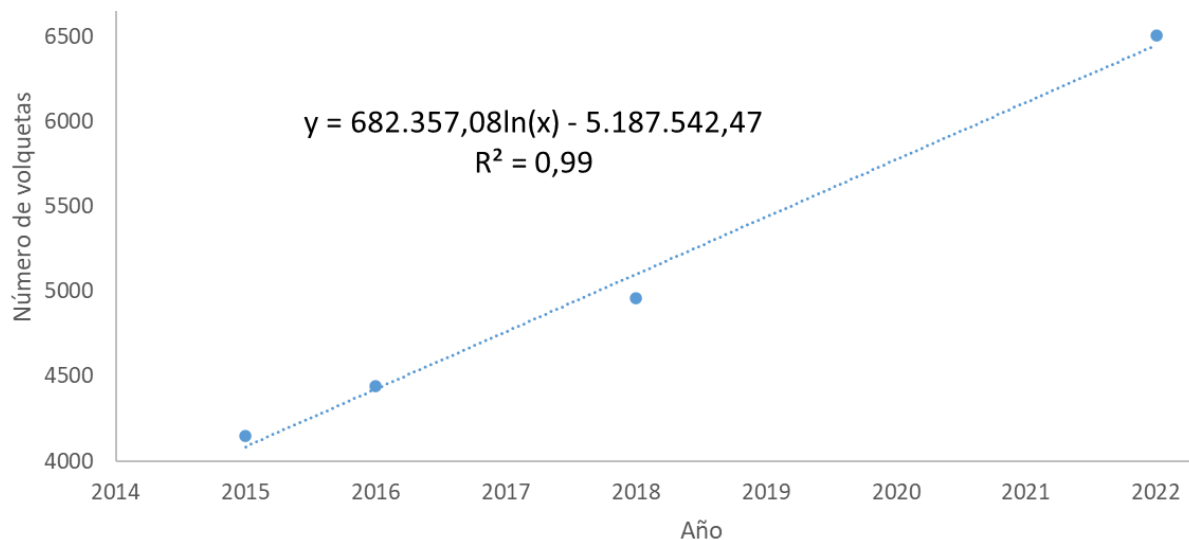
Nota. Imagen de autoría propia.

Para representar la cantidad de camiones en el Valle de Aburra, se utilizó una regresión logarítmica a partir del inventario de camiones del parque automotor, tomando como referencia las cantidades reportadas entre 2005 y 2022 en el sistema integral para la gestión de la calidad del aire de la Universidad Pontificia Bolivariana (Universidad Pontificia Bolivariana, 2022) Esta regresión se utilizó para estimar el crecimiento de la cantidad de camiones para el periodo de simulación 2024-2040.

Cantidad de volquetas

Figura 26

Comportamiento histórico cantidad de volquetas en el AMVA



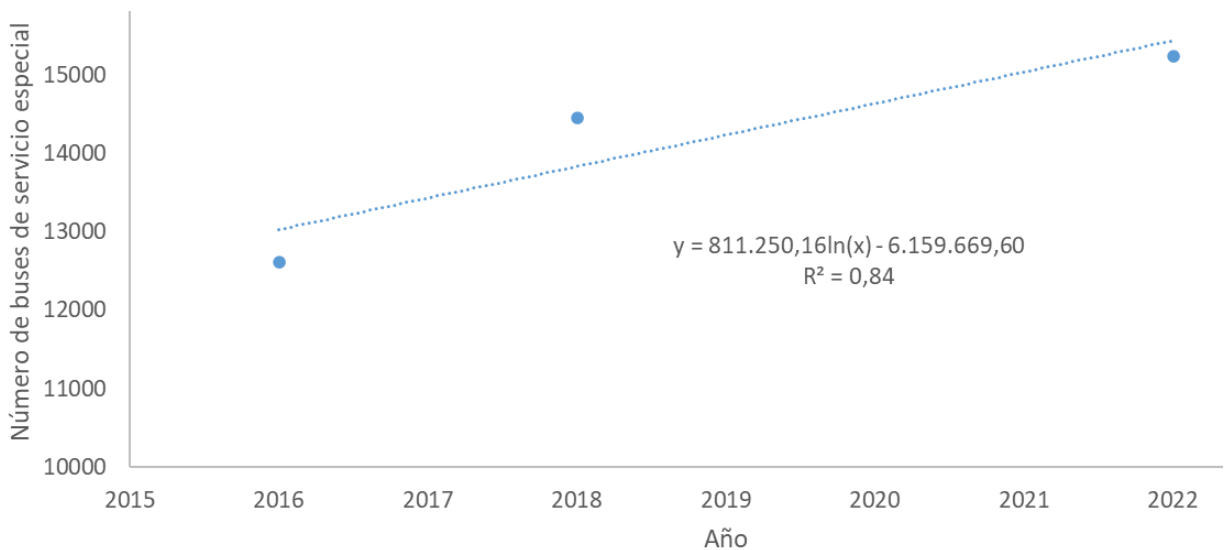
Nota. Imagen de autoría propia.

Para representar la cantidad de volquetas en el Valle de Aburra, se utilizó una regresión logarítmica a partir del inventario de volquetas del parque automotor, tomando como referencia las cantidades reportadas entre 2015 y 2022 en el sistema integral para la gestión de la calidad del aire de la Universidad Pontificia Bolivariana (Universidad Pontificia Bolivariana, 2022) Esta regresión se utilizó para estimar el crecimiento de la cantidad de volquetas para el periodo de simulación 2024-2040.

Cantidad de buses de servicio especial

Figura 27

Comportamiento histórico de la cantidad de buses de servicio especial en el AMVA



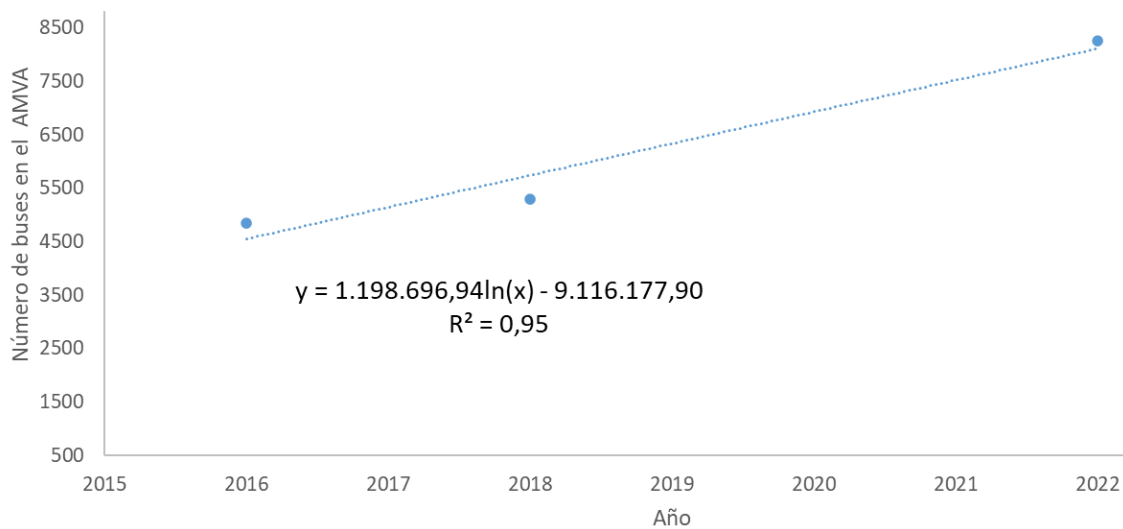
Nota. Imagen de autoría propia.

Para representar la cantidad de buses de servicio especial en el Valle de Aburra, se utilizó una regresión logarítmica a partir del inventario de buses de servicio especial del parque automotor, tomando como referencia las cantidades reportadas en 2016, 2018 y 2022 en el sistema integral para la gestión de la calidad del aire de la Universidad Pontificia Bolivariana (Universidad Pontificia Bolivariana, 2022). Esta regresión se utilizó para estimar el crecimiento de la cantidad de volquetas para el periodo de simulación 2024-2040.

Cantidad de buses

Figura 28

Comportamiento histórico de la cantidad de buses en el AMVA



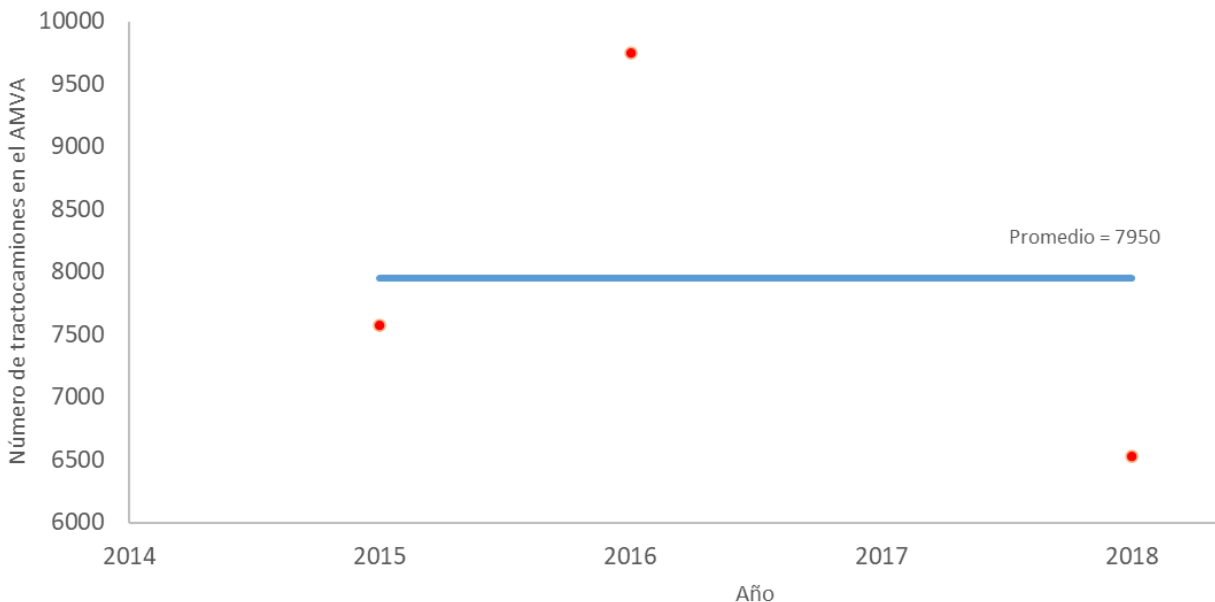
Nota. Imagen de autoría propia.

Para representar la cantidad de buses en el Valle de Aburra, se utilizó una regresión logarítmica a partir del inventario de buses del parque automotor, tomando como referencia las cantidades reportadas entre 2016 y 2022 en el sistema integral para la gestión de la calidad del aire de la Universidad Pontificia Bolivariana (Universidad Pontificia Bolivariana, 2022). Esta regresión se utilizó para estimar el crecimiento de la cantidad de volquetas para el periodo de simulación 2024-2040.

Cantidad de tractocamiones

Figura 29

Comportamiento histórico cantidad tractocamiones



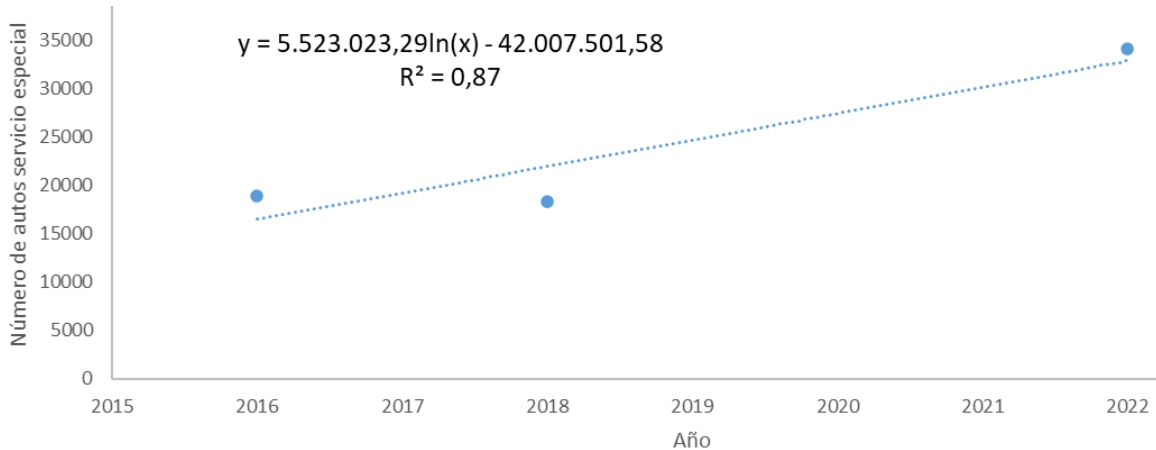
Nota. Imagen de autoría propia.

Para representar la cantidad de tractocamiones se utilizó el promedio simple como valor constante para el periodo de la simulación dinámica, este valor se obtuvo a partir de las cantidades reportadas en el años 2015, 2016 y 2018 en el sistema integral para la gestión de la calidad del aire de la Universidad Pontificia Bolivariana (Universidad Pontificia Bolivariana, 2022). Se determinó este valor fijo para no crear ruidos o comportamientos atípicos que sea alejaran de la realidad.

Cantidad de autos de servicio especial

Figura 30

Comportamiento histórico autos de servicio especial AMVA



Nota. Imagen de autoría propia.

Para representar la cantidad de autos de servicio especial en el Valle de Aburra, se utilizó una regresión logarítmica a partir del inventario de autos de servicio especial del parque automotor, tomando como referencia las cantidades reportadas en 2016, 2018 y 2022 en el sistema integral para la gestión de la calidad del aire de la Universidad Pontificia Bolivariana (Universidad Pontificia Bolivariana, 2022). Esta regresión se utilizó para estimar el crecimiento de la cantidad de autos de servicio especial para el periodo de simulación 2024-2040.

Cantidad de motos 2T

La cantidad de motos 2T para el periodo de tiempo simulado se dejó fijo, tomando el valor de 19.765, ya que esta es la cantidad reportada en inventario de fuentes móviles del año 2022. Esto se hizo con el fin de asumir una estimación conservadora.

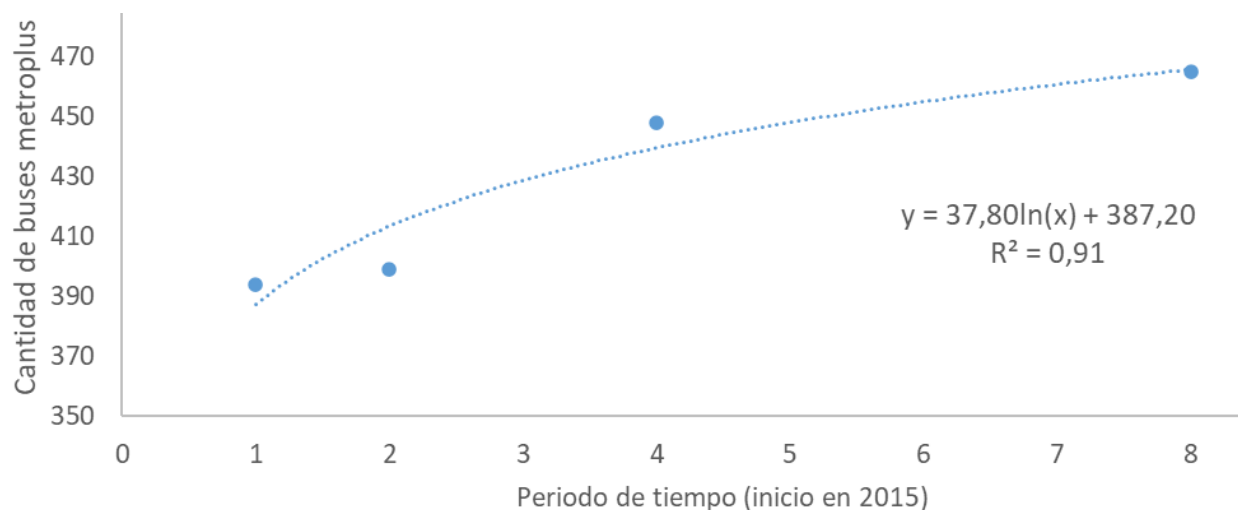
Cantidad de taxis

Dado que la cantidad de taxis en el área metropolitana está sujeto a normativas y disponibilidad de cupos, se decidió dejar la cantidad fija que se presentó en el inventario de fuentes móviles del año 2022, la cual fue 38.273.

Cantidad buses Metroplús

Figura 31

Comportamiento histórico cantidad de buses Metroplús en el AMVA



Nota. Imagen de autoría propia.

Para representar la cantidad de buses del sistema Metroplús, se utilizó una regresión logarítmica construida a partir de los datos de la cantidad de buses del año 2015, 2016, 2018 y 2022, tomando como fuente de información las cantidades reportadas en el sistema integral para la gestión de la calidad del aire de la Universidad Pontificia Bolivariana (Universidad Pontificia Bolivariana, 2022) y el inventario de emisión del 2022. Se utilizó el tiempo expresado en periodos y no directamente en el año, ya que de esta manera se obtiene un mejor ajuste de la regresión. Esta regresión se utilizó para estimar el crecimiento de la cantidad de buses Metroplús para el periodo de simulación 2024-2040.

Factores de emisión y distribución por clase de combustible según el tipo de vehículo

Tabla 7

Factores de emisión de los diferentes tipos de vehículos

Vehículo	Cantidad por tipo de vehículo	Clase de combustible	Porcentaje del tipo de vehículos que usan este combustible	Cantidad de vehículos por clase de combustible	Distancia promedio en un año (Km)	Factor de Emisión (f.e= g/Km)	F.E ANUAL Ton/año= (Km*F.E)/1.000.000	Emisión por tipo de vehículo (ton/año)	Emisión Total (ton/año)
Camiones	40029	Gasolina	16,20%	6483	25000	0,2500	0,0063	40,52	1281,27
		Diesel	82,89%	33181	34000	1,0998	0,037	1240,69	
		GNV	0,91%	366	43000	0,0040	0,00017	0,06	
Volquetas	6509	Diesel	99,73%	6491	38000	3,6254	0,14	894,27	894,29
		GNV	0,27%	18	42500	0,0300	0,0013	0,02	
Buses servicio especial	15233	Gasolina	29,24%	4455	25000	0,1230	0,0031	13,70	781,49
		Diesel	69,60%	10602	35000	2,0690	0,072	767,77	
		GNV	1,15%	176	48000	0,0030	0,00014	0,03	
Buses	8264	Gasolina	2,98%	246	48000	0,1230	0,006	1,45	252,49
		Diesel	96,60%	7983	48000	0,6551	0,031	251,03	
		GNV	0,42%	35	49000	0,0030	0,00015	0,01	
motos 4T	1245485	Gasolina	100,00%	1245485	12500	0,0075	0,000094	117,29	117,29
		Gasolina	92,79%	736449	11500	0,0054	0,000063	46,06	
Autos	793681	Diesel	5,99%	47538	12500	0,0900	0,0011	53,48	100,27
		GNV	1,22%	9694	25000	0,0030	0,00008	0,73	
		Diesel	99,20%	9636	6000	1,1833	0,0071	68,42	
Tracto camiones	9714	GNV	0,80%	78	8500	0,0030	0,000026	0,00	68,42
		Gasolina	65,12%	22194	40000	0,0054	0,00022	4,83	
Autos servicio especial	34081	Diesel	31,95%	10889	44000	0,0318	0,001400	15,24	20,22
		GNV	2,93%	998	50000	0,0030	0,00015	0,15	
		Gasolina	97,80%	37429	44000	0,0012	0,000054	2,03	
Taxis	38273	Diesel	0,36%	137	40000	0,0900	0,0036	0,49	2,63
		GNV	1,85%	708	50000	0,0030	0,0001500	0,11	
		Gasolina	100,00%	19765	8000	0,0010	0,00008095	0,16	
Moto 2T	19765	Diesel	14,48%	67	41000	0,0114	0,00046841	0,03	0,09
		GNV	85,52%	398	49000	0,0030	0,000147	0,06	
Metro plus	465								
EMISIONES TOTALES INVENTARIO FUENTES MOVILES AMVA 2022									3518,62

Fuente. (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2023)

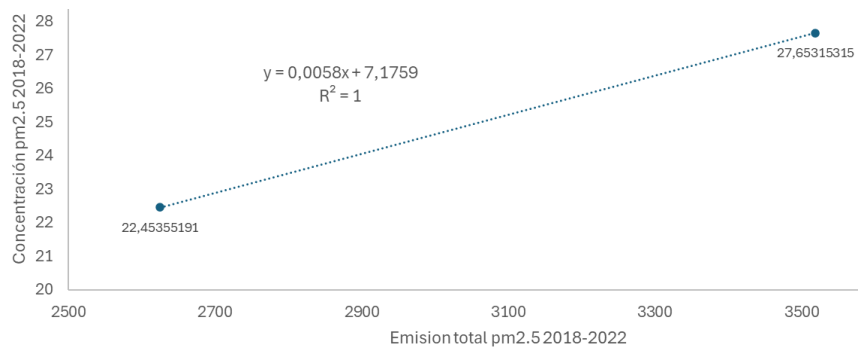
El factor de emisión es la cantidad de material particulado PM2.5 expresado en gramos que emite cada tipo de vehículo de acuerdo a la clase de combustible utilizado, para efectos prácticos de la simulación se estimó este factor a partir de la información brindada en el informe de emisiones de fuentes móviles del valle de aburra para el año 2022; también a partir de esta informé se tomó la distribución porcentual de las diferentes clases de combustibles de los diferentes tipos de vehículos, para efectos de la simulación dinámica este porcentaje permanece constante en el periodo simulado, siempre que no se esté aplicando ninguna de las políticas de movilidad a evaluar.

Relación entre emisión y concentración de PM2.5

Una vez obtenido el factor de emisión y las cantidades de vehículos por clase de combustible, es posible obtener las emisiones totales de PM2.5 por año, expresado en toneladas que son liberadas en la cuenca del valle de aburra. Es necesario establecer una relación entre esta emisión y los niveles de concentración, ya que, de acuerdo con la organización mundial de la salud, la tasa mortalidad asociada al material particulado está relacionado con niveles de concentración, que se expresa en Microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Para esto se tomó la concentración promedio del mes de junio de la estación 12 en los años 2018 y 2022 con los datos del SIATA, y la emisiones totales en el valle de aburra con referencia en el sistema integral para la gestión de la calidad del aire de la Universidad Pontificia Bolivariana (Universidad Pontificia Bolivariana, 2022). De esta forma se estableció una relación lineal tomando como referencia los datos de esta estación y la concentración de los meses de junio. En el modelo de simulación se tiene entonces como referente la concentración de la estación anteriormente mencionada.

Figura 32

Relación entre concentración estación 12 y emisión total AMVA



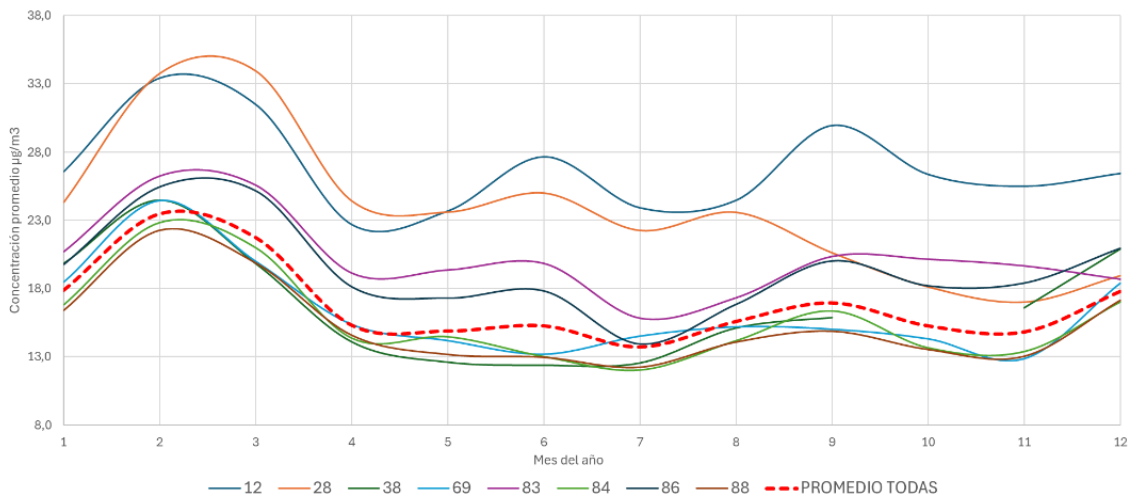
Nota. Imagen de autoría propia.

Dado que se tomó como referencia el promedio de concentración para el mes de junio, fue necesario contemplar la variación estacional que presenta esta concentración a lo largo del año, es por esto que teniendo como base el mes de junio, donde la concentración es mayor, se estimó como sería el comportamiento del promedio de los demás meses del año tomando como referencia el mes de junio, se expresó cada mes como una proporción respecto al mes de referencia, y esta variación

se estableció a partir de la observación del comportamiento de la concentración en el año 2018, año en el que se pudo obtener toda la información necesaria.

Figura 33

Comportamiento de la concentración en estaciones de monitoreo AMVA 2018



Fuente. (SIATA, 2024)

De acuerdo con lo anterior se establecieron los siguientes parámetros para las concentraciones promedio de las simulaciones, teniendo como referencia la concentración resultante del mes de junio de cada año simulado, teniendo como referente el comportamiento promedio de concentración en el año de todas las estaciones de monitoreo del año 2022.

Tabla 8

Variación de la concentración porcentual del mes de referencia

Mes del año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Concentración promedio todas las estaciones	17,9	23,5	21,7	15,3	14,9	15,3	13,7	15,6	17,0	15,3	14,8	17,8
Variación porcentual (%) respecto a junio (referencia)	14,62	34,98	29,77	0,26	-2,54	0,00	11,27	2,09	9,92	-0,01	-2,97	14,24

Nota. Tabla de autoría propia con datos de SIATA.

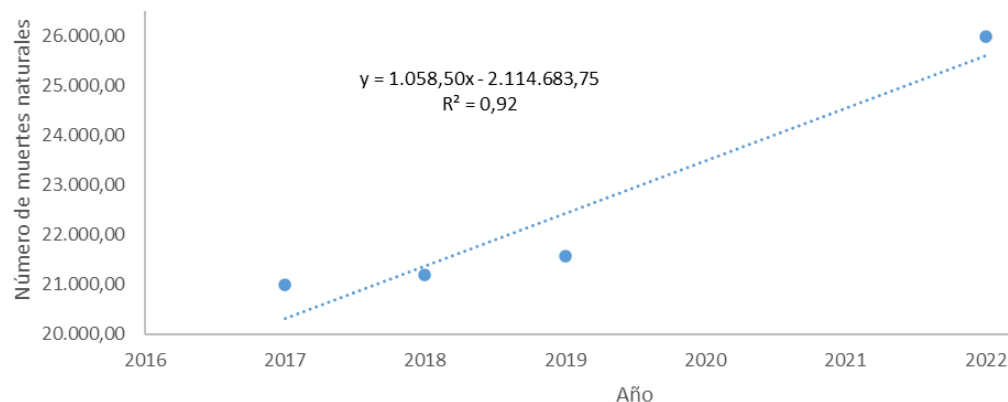
Relación de la concentración con el incremento en tasa de mortalidad natural

De acuerdo con la Organización mundial de la salud, si una población expuesta a un nivel de calidad del aire ideal, que es de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una determinada tasa de mortalidad, existe un

riesgo en incremento en la tasa de mortalidad debida al incremento de la concentración, establece una razón de un incremento del 8% en la tasa de mortalidad por cada aumento $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$. por medio de esta relación lineal y conociendo la estimación de las muertes naturales en los habitantes del valle de aburra que están expuestos a la concentración estimada, es posible realizar un cálculo aproximado de cuantas personas de esas que fallecen podrían ser evitables en caso de contar con un nivel de calidad de aire adecuado. La OMS establece cuatro objetivos intermedios antes de alcanzar el nivel ideal de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$; para este trabajo se tomó como referencia el objetivo intermedio 4, el cual es de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tomando este nivel de concentración de referencia se procedió a hacer la estimación de las muertes asociadas al incremento en la concentración del material particulado en el valle de aburra. Muertes que podrían ser evitadas si se redujeran los niveles de concentración.

Figura 34

Número de muertes naturales en el AMVA



Nota. Imagen de autoría propia. con proyección de muertes del DANE

Con las proyecciones de muertes naturales en el Valle de Aburra, se realizó una regresión lineal simple para estimar el comportamiento en los años 2024 a 2040. Una vez tenida esta cantidad de muertes naturales proyectadas es posible estimar en cuanto podrían incrementar porcentualmente si se deteriora la calidad del aire en contraste con el nivel de referencia, que para el caso de este estudio es el objetivo intermedio 4, $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Relación de la mortalidad con el gasto médicos.

Adicional al estudio del comportamiento de las muertes asociadas al PM2.5, también se estimó el impacto que se genera en el sistema de salud en cuanto a nivel de gasto asociado las muertes por material particulado. Para realizar esta aproximación al gasto en salud, se tomó como supuesto que toda persona que fallece en cada año tuvo una atención hospitalaria, y que esta atención tuvo un valor económico. Se tomó como valor de referencia el presentado en el estudio titulado *Costos económicos de la infección respiratoria aguda en un Municipio de Colombia* (Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia et al., 2017). Esta cantidad presentada aquí para una Infección respiratoria agua se ajustó por inflación a pesos de 2023, obteniendo un valor de \$1.308.188,41. Esta cantidad se dejó fija en el periodo de simulación, es decir, que el impacto económico en el modelo está presentado en pesos colombianos de 2023.

3.3.3. Variables de Nivel

En la tabla 9 se explica las variables de nivel usadas en el modelo con su respectiva ecuación, valor inicial y su unidad de medida:

Tabla 9

Variables de Nivel

N°	Variable	Ecuación	Valor Inicial	Unidad de medida
1	autos eléctricos acum	<i>flujo de conversión a eléctricos</i>	0	Vehículos
2	buses servicio especial chatarrizados	<i>flujo buses servicio especial chatarrizados</i>	0	vehículos
3	camiones chatarrizados	<i>flujo camiones chatarrizados</i>	0	Vehículos
4	costo medico acumulado atribuible a concentración pm2.5	<i>flujo costo medico acumulado atribuible a pm2.5</i>	0	Pesos
5	motos eléctricas acum	<i>flujo de conversión a motos eléctricas</i>	0	Vehículos
6	muertes asociadas a incremento concentración pm2.5	<i>flujo muertes asociadas a incremento concentración pm2.5</i>	0	Personas
7	pm2.5 autos diésel	<i>flujo pm2.5 autos diésel</i>	0	Toneladas
8	pm2.5 autos gasolina	<i>flujo pm2.5 autos gasolina</i>	0	Toneladas
9	pm2.5 autos GNV	<i>flujo pm2.5 autos GNV</i>	0	Toneladas
10	pm2.5 autos servicio especial diésel	<i>flujo pm2.5 autos servicio especial diésel</i>	0	Toneladas
11	pm2.5 autos servicio especial gasolina	<i>flujo pm2.5 autos servicio especial gasolina</i>	0	Toneladas
12	pm2.5 autos servicio especial GNV	<i>flujo pm2.5 autos servicio especial GNV</i>	0	Toneladas
13	pm2.5 buses diésel	<i>flujo pm2.5 buses diésel</i>	0	Toneladas
14	pm2.5 buses gasolina	<i>flujo pm2.5 buses gasolina</i>	0	Toneladas
15	pm2.5 buses GNV	<i>flujo pm2.5 buses GNV</i>	0	Toneladas
16	pm2.5 buses servicio especial diésel	<i>flujo pm2.5 buses servicio especial diésel</i>	0	Toneladas
17	pm2.5 buses servicio especial gasolina	<i>flujo pm2.5 buses servicio especial gasolina</i>	0	Toneladas
18	pm2.5 buses servicio especial GNV	<i>flujo pm2.5 buses servicio especial GNV</i>	0	Toneladas
19	pm2.5 camiones diésel	<i>flujo pm2.5 camiones diésel</i>	0	Toneladas
20	pm2.5 camiones gasolina	<i>flujo pm2.5 camiones gasolina</i>	0	Toneladas

N°	Variable	Ecuación	Valor Inicial	Unidad de medida
21	pm2.5 camiones GNV	<i>flujo pm2.5 camiones GNV</i>	0	Toneladas
22	pm2.5 generado por motos	<i>flujo pm2.5 motos</i>	0	Toneladas
23	pm2.5 Metroplús diésel	<i>flujo pm2.5 Metroplús diésel</i>	0	Toneladas
24	pm2.5 motos 2t	<i>flujo pm2.5 motos 2t</i>	0	Toneladas
25	pm2.5 Metroplús GNV	<i>flujo pm2.5 Metroplús GNV</i>	0	Toneladas
26	pm2.5 taxis diésel	<i>flujo pm2.5 taxis diésel</i>	0	Toneladas
27	pm2.5 taxis gasolina	<i>flujo pm2.5 taxis gasolina</i>	0	Toneladas
28	pm2.5 taxis GNV	<i>flujo pm2.5 taxis GNV</i>	0	Toneladas
29	PM2.5 total AMVA	<i>flujo pm2.5 total AMVA</i>	0	Toneladas
30	pm2.5 total autos servicio especial	<i>flujo pm2.5 total autos servicio especial</i>	0	Toneladas
31	pm2.5 total autos	<i>flujo pm2.5 total autos</i>	0	Toneladas
32	pm2.5 total buses servicio especial	<i>flujo pm2.5 buses servicio especial</i>	0	Toneladas
33	pm2.5 total buses	<i>flujo pm2.5 total buses</i>	0	Toneladas
34	pm2.5 total camiones	<i>flujo pm2.5 total camiones</i>	0	Toneladas
35	pm2.5 total Metroplús	<i>flujo pm2.5 Metroplús</i>	0	Toneladas
36	pm2.5 total taxis	<i>flujo pm2.5 total taxis</i>	0	Toneladas
37	pm2.5 total tractocamiones	<i>flujo pm2.5 total tractocamiones</i>	0	Toneladas
38	pm2.5 total volquetas	<i>flujo pm2.5 total volquetas</i>	0	Toneladas
39	pm2.5 tractocamiones diésel	<i>flujo pm2.5 tractocamiones diésel</i>	0	Toneladas
40	pm2.5 tractocamiones GNV	<i>flujo pm2.5 tractocamiones GNV</i>	0	Toneladas
41	pm2.5 volquetas diésel	<i>flujo pm2.5 volquetas diésel</i>	0	Toneladas
42	pm2.5 volquetas GNV	<i>flujo pm2.5 volquetas GNV</i>	0	Toneladas
43	población neta AMVA	<i>flujo crecimiento población AMVA-flujo de muertes pm2.5 población AMVA</i>	4,15E+06	Personas
44	volquetas chatarrizadas	<i>flujo volquetas chatarrizadas</i>	0	Vehículos

Nota. Tabla de autoría propia.

3.3.4. Variables de Flujos

En la tabla 10 se explican las variables de flujo usadas en el modelo, con su respectiva ecuación y unidad de medida:

Tabla 10

Variables de Flujos

N°	Variable	Ecuación	Unidades
1	flujo de conversión a eléctricos	<i>cantidad de autos gasolina*conversión vehículos personales</i>	Vehículos/Año
2	flujo buses servicio especial chatarrizados	<i>IF THEN ELSE(Time=2030, cantidad buses servicio especial diésel*aplicación política de chatarrización ,</i> <i>IF THEN ELSE(Time>2030:AND:aplicacion política de chatarrización>0, cantidad buses servicio especial diésel*0.01 , 0))</i>	Vehículos/Año
3	flujo camiones chatarrizados	<i>IF THEN ELSE(Time=2030, cantidad camiones diésel*aplicación política de chatarrización , IF THEN ELSE(Time>2030:AND:aplicacion política de chatarrización>0, cantidad camiones diésel*0.01 , 0))</i>	Vehículos/Año
4	flujo costo medico acumulado atribuible a pm2.5	<i>costo medico por paciente*"flujo muertes asociadas a incremento concentración pm2.5"</i>	Pesos/Año
5	flujo de conversión a motos eléctricas	<i>crecimiento motos*conversión motos</i>	Vehículos/Año
6	flujo muertes asociadas a incremento concentración pm2.5	<i>muertes naturales con efecto del pm2.5-muertes naturales AMVA</i>	Personas/Año
7	flujo pm2.5 autos diésel	<i>cantidad de autos diésel*factor emisión autos diésel</i>	Toneladas/Año
8	flujo pm2.5 autos gasolina	<i>autos gasolina en circulación*factor emisión autos gasolina</i>	Toneladas/Año
9	flujo pm2.5 autos GNV	<i>cantidad de autos GNV*factor emisión autos GNV</i>	Toneladas/Año
10	flujo pm2.5 autos servicio especial diésel	<i>cantidad autos servicio especial diésel*factor emisión autos servicio especial diésel</i>	Toneladas/Año
11	flujo pm2.5 autos servicio especial gasolina	<i>cantidad autos servicio especial gasolina*factor emisión autos servicio especial gasolina</i>	Toneladas/Año
12	flujo pm2.5 autos servicio especial GNV	<i>cantidad autos servicio especial GNV*factor emisión autos servicio especial GNV</i>	Toneladas/Año
13	flujo pm2.5 buses diésel	<i>cantidad de autos diésel*factor emisión autos diésel</i>	Toneladas/Año
14	flujo pm2.5 buses gasolina	<i>cantidad buses gasolina*factor emisión buses gasolina</i>	Toneladas/Año
15	flujo pm2.5 buses GNV	<i>cantidad buses GNV*factor emisión buses GNV</i>	Toneladas/Año

N°	Variable	Ecuación	Unidades
16	flujo pm2.5 buses servicio especial diésel	$\text{cantidad neta buses servicio especial diésel en circulación} * \text{factor emisión buses servicio especial diésel}$	Toneladas/Año
17	flujo pm2.5 buses servicio especial gasolina	$\text{cantidad buses servicio especial gasolina} * \text{factor emisión buses servicio especial gasolina}$	Toneladas/Año
18	flujo pm2.5 buses servicio especial GNV	$\text{cantidad buses servicio especial GNV} * \text{factor emisión buses servicio especial GNV}$	Toneladas/Año
19	flujo pm2.5 camiones diésel	$\text{cantidad neta camiones diésel circulación AMVA} * \text{factor emisión camiones diésel}$	Toneladas/Año
20	flujo pm2.5 camiones gasolina	$\text{cantidad camiones gasolina} * \text{factor emisión camiones gasolina}$	Toneladas/Año
21	flujo pm2.5 camiones GNV	$\text{cantidad camiones GNV} * \text{factor emisión camiones GNV}$	Toneladas/Año
22	flujo pm2.5 motos	$\text{motos gasolinas en circulación} * \text{factor emisión motos 4t}$	Toneladas/Año
23	flujo pm2.5 Metroplús diésel	$\text{cantidad Metroplús diésel} * \text{factor emisión Metroplús diésel}$	Toneladas/Año
24	flujo pm2.5 motos 2t	$\text{cantidad motos 2t} * \text{factor emisión motos 2t}$	Toneladas/Año
25	flujo pm2.5 Metroplús GNV	$\text{cantidad Metroplús GNV} * \text{factor emisión Metroplús GNV}$	Toneladas/Año
26	flujo pm2.5 taxis diésel	$\text{cantidad taxis diésel} * \text{factor emisión taxis diésel}$	Toneladas/Año
27	flujo pm2.5 taxis gasolina	$\text{cantidad taxis gasolina} * \text{factor emisión taxis gasolina}$	Toneladas/Año
28	flujo pm2.5 taxis GNV	$\text{cantidad taxis GNV} * \text{factor emisión taxis GNV}$	Toneladas/Año
29	flujo pm2.5 total AMVA	$\text{flujo pm2.5 total camiones} + \text{"flujo pm2.5 total volquetas"} + \text{"flujo pm2.5 buses servicio especial"} + \text{"flujo pm2.5 total buses"} + \text{"flujo pm2.5 motos"} + \text{"flujo pm2.5 total autos"} + \text{"flujo pm2.5 total tractocamiones"} + \text{"flujo pm2.5 total autos servicio especial"} + \text{"flujo pm2.5 total taxis"} + \text{"flujo pm2.5 motos 2t"} + \text{"flujo pm2.5 Metroplús"}$	Toneladas/Año
30	flujo pm2.5 total autos servicio especial	$\text{flujo pm2.5 autos servicio especial gasolina} + \text{"flujo pm2.5 autos servicio especial diésel"} + \text{"flujo pm2.5 autos servicio especial GNV"}$	Toneladas/Año
31	flujo pm2.5 total autos	$\text{flujo pm2.5 autos gasolina} + \text{"flujo pm2.5 autos diésel"} + \text{"flujo pm2.5 autos GNV"}$	Toneladas/Año
32	flujo pm2.5 buses servicio especial	$\text{flujo pm2.5 buses servicio especial gasolina} + \text{"flujo pm2.5 buses servicio especial diésel"} + \text{"flujo pm2.5 buses servicio especial GNV"}$	Toneladas/Año
33	flujo pm2.5 total buses	$\text{flujo pm2.5 buses gasolina} + \text{"flujo pm2.5 buses diésel"} + \text{"flujo pm2.5 buses GNV"}$	Toneladas/Año
34	flujo pm2.5 total camiones	$\text{flujo pm2.5 camiones gasolina} + \text{"flujo pm2.5 camiones diésel"} + \text{"flujo pm2.5 camiones GNV"}$	Toneladas/Año

N°	Variable	Ecuación	Unidades
35	flujo pm2.5 Metroplús	$\text{flujo pm2.5 Metroplús diésel} + \text{"flujo pm2.5 Metroplús GNV"}$	Toneladas/Año
36	flujo pm2.5 total taxis	$\text{flujo pm2.5 taxis gasolina} + \text{"flujo pm2.5 taxis diésel"} + \text{"flujo pm2.5 taxis GNV"}$	Toneladas/Año
37	flujo pm2.5 total tractocamiones	$\text{flujo pm2.5 tractocamiones diésel} + \text{"flujo pm2.5 tractocamiones GNV"}$	Toneladas/Año
38	flujo pm2.5 total volquetas	$\text{flujo pm2.5 volquetas GNV} + \text{"flujo pm2.5 volquetas diésel"}$	Toneladas/Año
39	flujo pm2.5 tractocamiones diésel	$\text{cantidad tractocamiones diésel} * \text{factor emisión tractocamiones diésel}$	Toneladas/Año
40	flujo pm2.5 tractocamiones GNV	$\text{cantidad tractocamiones GNV} * \text{factor emisión tractocamiones GNV}$	Toneladas/Año
41	flujo pm2.5 volquetas diésel	$\text{cantidad neta volquetas diésel en circulación} * \text{factor emisión volquetas diésel}$	Toneladas/Año
42	flujo pm2.5 volquetas GNV	$\text{cantidad volquetas GNV} * \text{factor emisión volquetas GNV}$	Toneladas/Año
43	flujo crecimiento población AMVA	$\text{población neta AMVA} * \text{ritmo de crecimiento}$	Personas/Año
44	flujo de muertes pm2.5 población AMVA	$\text{flujo muertes asociadas a incremento concentración pm2.5}$	Personas/Año
45	flujo volquetas chatarrizadas	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Time}=2030, \text{cantidad volquetas diésel} * \text{aplicación política de chatarrización}, \text{IF THEN ELSE}(\text{Time}>2030:\text{AND}:\text{aplicacion política de chatarrización}>0, \text{cantidad volquetas diésel} * 0.01, 0))$	Vehículos/Año

Nota. Tabla de autoría propia.

3.3.5. Variables Auxiliares

En la tabla 11 se explican las variables de tipo auxiliar usadas en el modelo con su respectiva ecuación o valor asignado, su unidad de medida y por último la fuente de información de donde se obtuvo dicha ecuación o valor para el desarrollo del modelo:

Tabla 11

Variables Auxiliares

N°	Variable	Ecuación/Valor	Unidad de medida	Fuente Información
1	% autos diésel	0.059896	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
2	% autos gasolina	0.92789	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
3	% autos GNV	0.012214	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
4	% autos servicio especial diésel	0.319494	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
5	% autos servicio especial gasolina	0.651224	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
6	% autos servicio especial GNV	0.029282	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
7	% buses diésel	1-(" buses gasolina")-(" buses GNV")	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
8	% buses gasolina	0.029784	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
9	% buses GNV	IF THEN ELSE(conversión vehículos pesados<0.004192 , 0.004192 , conversión vehículos pesados)	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022. El porcentaje varía según la política de conversión vehicular
10	% buses servicio especial diésel	1-(" buses servicio especial gasolina")-(" buses servicio especial GNV")	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022. El porcentaje varía según la política de conversión vehicular
11	% buses servicio especial gasolina	0.29244	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
12	% buses servicio especial GNV	IF THEN ELSE(conversión vehículos pesados<0.011543, 0.011543 , conversión vehículos pesados)	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022. El porcentaje varía según la política de conversión vehicular
13	% camiones diésel	1-" camiones GNV"	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022. El porcentaje varía según la política de conversión vehicular
14	% camiones gasolina	0.161956	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
15	% camiones GNV	IF THEN ELSE(conversión vehículos pesados>0.009132, conversión vehículos pesados , 0.009132)	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022. El porcentaje varía según la política de conversión vehicular
16	% Metroplús diésel	0.144827	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
17	% Metroplús GNV	0.855173	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022

N°	Variable	Ecuación/Valor	Unidad de medida	Fuente Información
18	% taxis diésel	0.00357574	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
19	% taxis gasolina	0.977957	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
20	% taxis GNV	0.0184873	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
21	% tractocamiones diésel	0.992	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
22	% tractocamiones GNV	0.008	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022
23	% volquetas diésel	1-" volquetas GNV"	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022. El porcentaje varía según la política de conversión vehicular
24	% volquetas GNV	IF THEN ELSE(conversión vehículos pesados>0.002741, conversión vehículos pesados , 0.002741)	Porcentaje	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022. El porcentaje varía según la política de conversión vehicular
25	aplicación política de chatarrización	IF THEN ELSE("POLITICA DE CHATARRIZACION (30 Y 20 AÑOS ANTIGUEDAD)">10, IF THEN ELSE("POLITICA DE CHATARRIZACION (30 Y 20 AÑOS ANTIGUEDAD)"=20, 0.35 , 0.25) , 0)	Porcentaje	Los porcentajes para cada política de chatarrización 20 y 30 años antigüedad entregan un valor porcentual equivalente a la cantidad de autos del parque automotor que tienen dicha antigüedad
26	autos gasolina en circulación	cantidad de autos gasolina-flujo de conversión a eléctricos	Vehículos/año	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022. La cantidad varía según la política de conversión vehicular
27	cantidad Metroplús GNV	crecimiento Metroplús*" % Metroplús GNV"	Vehículos/año	Porcentaje basado en Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022. Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaware.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
28	cantidad autos servicio especial diésel	crecimiento autos servicio especial*" autos servicio especial diésel"	Vehículos/año	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022 y Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaware.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
29	cantidad autos servicio especial gasolina	crecimiento autos servicio especial*" autos servicio especial gasolina"	Vehículos/año	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022 y Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaware.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
30	cantidad autos servicio especial GNV	crecimiento autos servicio especial*" autos servicio especial GNV"	Vehículos/año	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022 y Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaware.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
31	cantidad buses diésel	crecimiento buses*" buses diésel"	Vehículos/año	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022 y Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaware.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/

N°	Variable	Ecuación/Valor	Unidad de medida	Fuente Información
32	cantidad buses gasolina	crecimiento buses*" buses gasolina"	Vehículos/año	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022 y Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
33	cantidad buses GNV	crecimiento buses*" buses GNV"	Vehículos/año	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022 y Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
34	cantidad buses servicio especial diésel	crecimiento buses servicio especial*" buses servicio especial diésel"	Vehículos/año	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022 y Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
35	cantidad buses servicio especial gasolina	crecimiento buses servicio especial*" buses servicio especial gasolina"	Vehículos/año	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022 y Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
36	cantidad buses servicio especial GNV	(crecimiento buses servicio especial*" buses servicio especial GNV")+cantidad neta buses servicio especial GNV reemplazantes diésel	Vehículos/año	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022 y Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
37	cantidad camiones diésel	crecimiento camiones AMVA*" camiones diésel"	Vehículos/año	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022 y Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
38	cantidad camiones gasolina	camiones gasolina*crecimiento camiones AMVA	Vehículos/año	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022 y Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
39	cantidad camiones GNV	(crecimiento camiones AMVA*" camiones GNV")+ (cantidad camiones GNV reemplazantes diésel)	Vehículos/año	Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022 y Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
40	cantidad camiones GNV reemplazantes diésel	camiones chatarrizadas	Vehículos/año	Variable explicativa. La cantidad de camiones GNV es igual a la cantidad de camiones chatarrizadas

N°	Variable	Ecuación/Valor	Unidad de medida	Fuente Información
41	cantidad de autos diésel	$\text{crec. autos} * \% \text{ autos diésel}$	Vehículos/año	Porcentaje tomado de Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022. Regresión lineal de la tasa de motorización elaborada con Retro proyecciones del DANE disponible en https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion y datos del parque automotor tomados de https://calidadelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
42	cantidad de autos gasolina	$(\text{"crec. autos"} * \% \text{ autos gasolina})$	Vehículos/año	Porcentaje tomado de Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022. Regresión lineal de la tasa de motorización elaborada con Retro proyecciones del DANE disponible en https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion y datos del parque automotor tomados de https://calidadelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
43	cantidad de autos GNV	$\text{crec. autos} * \% \text{ autos GNV}$	Vehículos/año	Porcentaje tomado de Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022. Regresión lineal de la tasa de motorización elaborada con Retro proyecciones del DANE disponible en https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion y datos del parque automotor tomados de https://calidadelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
44	cantidad Metroplús diésel	$\text{crecimiento Metroplús} * \% \text{ Metroplús diésel}$	Vehículos/año	Porcentaje basado en Inventario emisiones fuentes móviles AMVA 2022. Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
45	cantidad motos 2t	19765	Vehículos/año	Valor fijo tomado del inventario de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.
46	cantidad neta buses servicio especial diésel en circulación	$\text{cantidad buses servicio especial diésel} - \text{buses servicio especial chatarrizadas}$	Vehículos/año	
47	cantidad neta buses servicio especial GNV reemplazantes diésel	$\text{buses servicio especial chatarrizadas}$	Vehículos/año	Variable explicativa. La cantidad de buses GNV es igual a la cantidad de buses chatarrizadas
48	cantidad neta camiones diésel circulación AMVA	$\text{cantidad camiones diésel} - \text{camiones chatarrizadas}$	Vehículos/año	
49	cantidad neta volquetas diésel en circulación	$\text{cantidad volquetas diésel} - \text{volquetas chatarrizadas}$	Vehículos/año	

N°	Variable	Ecuación/Valor	Unidad de medida	Fuente Información
50	cantidad taxis diésel	crecimiento taxis*"% taxis diésel"	Vehículos/año	Se considera una cantidad fija de taxis en el AMVA tomando como referencia la cantidad del inventario de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.
51	cantidad taxis gasolina	crecimiento taxis*"% taxis gasolina"	Vehículos/año	Se considera una cantidad fija de taxis en el AMVA tomando como referencia la cantidad del inventario de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.
52	cantidad taxis GNV	crecimiento taxis*"% taxis GNV"	Vehículos/año	Se considera una cantidad fija de taxis en el AMVA tomando como referencia la cantidad del inventario de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.
53	cantidad tractocamiones diésel	crecimiento tractocamiones*"% tractocamiones diésel"	Vehículos/año	Promedio simple de tractocamiones por año entre 2015 y 2018 tomado de https://calidaddelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
54	cantidad tractocamiones GNV	crecimiento tractocamiones*"% tractocamiones GNV"	Vehículos/año	Promedio simple de tractocamiones por año entre 2015 y 2018 tomado de https://calidaddelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
55	cantidad volquetas diésel	crecimiento volquetas*"% volquetas diésel"	Vehículos/año	Regresión logarítmica de la cantidad de volquetas por año a partir de los datos tomados de https://calidaddelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/ Proporción correspondiente al inventario de fuentes móviles AMVA 2022
56	cantidad volquetas GNV	(crecimiento volquetas*"% volquetas GNV")+cantidad volquetas GNV reemplazantes diésel	Vehículos/año	Regresión logarítmica de la cantidad de volquetas por año entre 2015 y 2022 a partir de los datos tomados de https://calidaddelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/ Proporción correspondiente al inventario de fuentes móviles AMVA 2023
57	cantidad volquetas GNV reemplazantes diésel	volquetas chatarrizadas	Vehículos/año	Variable explicativa. La cantidad de volquetas GNV es igual a la cantidad de volquetas chatarrizadas
58	concentración pm2.5 mes abril	1.00259*"%concentración PM2.5 mes junio"	µg/m3 promedio mes	Variación porcentual promedio con respecto al mes de junio que se estimó por regresión lineal
59	concentración pm2.5 mes agosto	1.02087*"%concentración PM2.5 mes junio"	µg/m3 promedio mes	Variación porcentual promedio con respecto al mes de junio que se estimó por regresión lineal
60	concentración pm2.5 mes diciembre	1.14241*"%concentración PM2.5 mes junio"	µg/m3 promedio mes	Variación porcentual promedio con respecto al mes de junio que se estimó por regresión lineal
61	concentración pm2.5 mes enero	1.146205*"%concentración PM2.5 mes junio"	µg/m3 promedio mes	Variación porcentual promedio con respecto al mes de junio que se estimó por regresión lineal
62	concentración pm2.5 mes febrero	1.34977*"%concentración PM2.5 mes junio"	µg/m3 promedio mes	Variación porcentual promedio con respecto al mes de junio que se estimó por regresión lineal
63	concentración pm2.5 mes julio	0.887269*"%concentración PM2.5 mes junio"	µg/m3 promedio mes	Variación porcentual promedio con respecto al mes de junio que se estimó por regresión lineal

N°	Variable	Ecuación/Valor	Unidad de medida	Fuente Información
64	concentración pm2.5 mes junio	$(0.0058 * \text{flujo pm2.5 total AMVA (Ton/año)}) + 7.1759$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio mes	Estimación por regresión lineal de la relación entre concentración de material particulado y la cantidad total emitida en un año, tomando como referencia el comportamiento de la estación 12 entre 2018 y 2022. Datos de concentración tomados de https://siata.gov.co/ Datos de emisiones totales tomados de Informe fuentes móviles AMVA 2022 y https://calidaddelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
65	concentración pm2.5 mes marzo	$1.29768 * \text{concentración PM2.5 mes junio}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio mes	Variación porcentual promedio con respecto al mes de junio que se estimó por regresión lineal
66	concentración pm2.5 mes mayo	$0.974626 * \text{concentración PM2.5 mes junio}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio mes	Variación porcentual promedio con respecto al mes de junio que se estimó por regresión lineal
67	concentración pm2.5 mes noviembre	$0.970333 * \text{concentración PM2.5 mes junio}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio mes	Variación porcentual promedio con respecto al mes de junio que se estimó por regresión lineal
68	concentración pm2.5 mes octubre	$0.999917 * \text{concentración PM2.5 mes junio}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio mes	Variación porcentual promedio con respecto al mes de junio que se estimó por regresión lineal
69	concentración pm2.5 referencia ideal	10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio año	Objetivo intermedio 4 presentado en la guía de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud.
70	concentración pm2.5 septiembre	$1.0992 * \text{concentración PM2.5 mes junio}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio mes	Variación porcentual promedio con respecto al mes de junio que se estimó por regresión lineal
71	conversión motos	$\text{RAMP}((2 * \text{política conversión vehicular (0, 5, 10, 15\%)}) / 14, 2026, 2040)$	Sin unidades	Variable rampa en la cual se tiene como objetivo a 2040 determinado porcentaje pasen a ser motos eléctricas. Inicia en e2026 y crece anualmente de forma constante hasta alcanzar el porcentaje objetivo. Esta política es del doble que el de autos de uso porcentual por el gran incremento de motos
72	conversión vehículos personales	$\text{RAMP}(\text{política conversión vehicular (0, 5, 10, 15\%)}) / 14, 2026, 2040)$	Sin unidades	Variable rampa en la cual se tiene como objetivo a 2040 determinado porcentaje pasen a ser autos eléctricos. Inicia en e2026 y crece anualmente de forma constante hasta alcanzar el porcentaje objetivo.
73	conversión vehículos pesados	$\text{política conversión vehicular (0, 5, 10, 15\%)} * 2$	Sin unidades	La conversión vehicular para vehículos pesados es del doble de porcentaje que para autos personales ya que este tipo de vehículos son los que más generan pm2.5
74	costo medico por paciente	1,31E+06	Pesos (Moneda)	Se asume el costo médico de un paciente con enfermedad respiratoria con referencia en Costos económicos de la infección respiratoria aguda en un Municipio de Colombia (Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia et al., 2017)

N°	Variable	Ecuación/Valor	Unidad de medida	Fuente Información
75	crec. autos	("tasa moto. autos"/1000)*población neta AMVA	Vehículos/año	Cantidad de habitantes en el AMVA por la cantidad de autos por cada mil habitantes estimadas por regresión lineal
76	crecimiento autos servicio especial	5.52302e+06*LN(Time)-4.20075e+07	Vehículos/año	Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidaddelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
77	crecimiento buses	1.1987e+06*LN(Time)-9.11618e+06	Vehículos/año	Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidaddelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
78	crecimiento buses servicio especial	811250*LN(Time)-6.15967e+06	Vehículos/año	Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidaddelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
79	crecimiento camiones AMVA	2.06485e+06*LN(Time)-1.56806e+07	Vehículos/año	Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidaddelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
80	crecimiento Metroplús	37.8*LN((Time-2014))+387.2	Vehículos/año	Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidaddelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
81	crecimiento motos	(tasa de motorización motos/1000)*población neta AMVA	Vehículos/año	Cantidad de habitantes en el AMVA por la cantidad de motos por cada mil habitantes estimadas por regresión lineal
82	crecimiento taxis	38273	Vehículos/año	Valor fijo del total de taxis de cualquier tipo. Tomado del inventario de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.
83	crecimiento tractocamiones	7950	Vehículos/año	Valor fijo del total de taxis de cualquier tipo. Tomado del inventario de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.
84	crecimiento volquetas	682357*LN(Time)-5.18754e+06	Vehículos/año	Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidaddelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
85	factor emisión autos diésel	0.001125*(IF THEN ELSE("política de pico y placa (2, 3 o 4 dígitos x día hábil)"=2, 1 , IF THEN ELSE("política de pico y placa (2, 3 o 4 dígitos x día hábil)"=3, 0.923, 0.846)))		Valor fijo del total de taxis de cualquier tipo. Tomado del inventario de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.El factor varía según la política de pico y placa ya que esto afecta el kilómetro promedio recorrido.
86	factor emisión autos gasolina	6.25467e-05*(IF THEN ELSE("política de pico y placa (2, 3 o 4 dígitos x día hábil)"=2, 1 , IF THEN ELSE("política de pico y placa (2, 3 o 4 dígitos x día hábil)"=3, 0.923, 0.846)))	Ton/vehículo	Valor fijo del total de taxis de cualquier tipo. Tomado del inventario de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.El factor varía según la política de pico y placa ya que esto afecta el kilómetro promedio recorrido.

N°	Variable	Ecuación/Valor	Unidad de medida	Fuente Información
87	factor emisión autos GNV	7,50E-05	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022
88	factor emisión autos servicio especial diésel	0.00139979	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022
89	factor emisión autos servicio especial gasolina	0.000217554	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022
90	factor emisión autos servicio especial GNV	0.00015	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022
91	factor emisión buses diésel	0.0314449	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022
92	factor emisión buses gasolina	0.005904	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022
93	factor emisión buses GNV	0.000147	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022
94	factor emisión buses servicio especial diésel	0.0724142	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022
95	factor emisión buses servicio especial gasolina	0.003075	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022
96	factor emisión buses servicio especial GNV	0.000144	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022
97	factor emisión camiones diésel	0.0373921	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022
98	factor emisión camiones gasolina	0.00625	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022
99	factor emisión camiones GNV	0.000172	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022
100	factor emisión Metroplús diésel	0.000468407	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022

N°	Variable	Ecuación/Valor	Unidad de medida	Fuente Información
101	factor emisión motos 2t	8.09512e-06*(IF THEN ELSE("política de pico y placa (2, 3 o 4 dígitos x día hábil)"=2, 1 , IF THEN ELSE("política de pico y placa (2, 3 o 4 dígitos x día hábil)"=3, 0.923, 0.846)))	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022. El factor varía según la política de pico y placa
102	factor emisión motos 4t	9.4172e-05*(IF THEN ELSE("política de pico y placa (2, 3 o 4 dígitos x día hábil)"=2, 1 , IF THEN ELSE("política de pico y placa (2, 3 o 4 dígitos x día hábil)"=3, 0.923, 0.846)))	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022. El factor varía según la política de pico y placa
103	factor emisión taxis diésel	0.0036	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.
104	factor emisión taxis gasolina	5,42672e-05	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.
105	factor emisión taxis GNV	0.00015	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.
106	factor emisión tractocamiones diésel	0.00710004	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.
107	factor emisión volquetas diésel	0.137767	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.
108	factor emisión volquetas GNV	0.001275	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.
109	factor emisión Metroplús GNV	0.000147	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.
110	factor emisión tractocamiones GNV	2,55E-05	Ton/vehículo	Estimación a partir de los datos presentados en el informe de emisiones fuentes móviles AMVA 2022.
111	motos gasolinas en circulación	crecimiento motos-flujo de conversión a motos eléctricas	Vehículos/año	
112	muertes naturales AMVA	1058.5*Time-2.11468e+06	Personas/año	Regresión exponencial a partir de las proyecciones del DANE
113	muertes naturales con efecto del pm2.5	(1.08^(("promedio de concentración pm2.5 (microgramos/m3)" - "concentración pm2.5 referencia ideal")/10))*muertes naturales AMVA	Personas/año	Ecuación elaborada a partir de la relación entre concentración de PM2.5 y el incremento en la tasa de mortalidad. Elaborada con datos de la guía de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud
114	política conversión vehicular (0, 5, 10, 15)	0,5,10,15	Sin unidades	
115	POLITICA DE CHATARRIZACION (30 Y 20 AÑOS ANTIGUEDAD)	0,10,20,30	Sin unidades	

N°	Variable	Ecuación/Valor	Unidad de medida	Fuente Información
116	política de pico y placa (2, 3 o 4 dígitos x día hábil)	2,3,4	Sin unidades	
117	promedio de concentración pm2.5 (microgramos/m3)	("concentración pm2. mes abril"+"concentración pm2.5 mes agosto"+"concentración pm2.5 mes diciembre"+"concentración pm2.5 mes julio"+"concentración pm2.5 mes enero"+"concentración pm2.5 mes febrero"+"concentración pm2.5 mes marzo"+"concentración pm2.5 mes mayo"+"concentración pm2.5 mes noviembre"+"concentración pm2.5 mes octubre"+"concentración mes septiembre"+"concentración PM2.5 mes junio")/12	µg/m3 promedio año	Es el promedio simple de cada uno de los meses
118	ritmo de crecimiento	0.005818	Sin unidades	Es la pendiente de crecimiento poblacional, estimada a partir de las proyecciones del DANE
119	tasa de motorización motos	$35482 * \ln(\text{Time}) - 269782$	Sin unidades	Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/
120	tasa mot. autos	$13642 * \ln(\text{Time}) - 103660$	Sin unidades	Regresión Logarítmica elaborada con datos del parque automotor tomado de https://calidadelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/

Nota. Tabla de autoría propia.

4. Validación y Resultados

4.1. Validación del modelo

En la tabla 12 se presentan los parámetros y sus respectivas fuentes de información, utilizados para la construcción del modelo

Tabla 12

Validación de modelo

<i>Dato</i>	<i>Fuente</i>
<i>Cantidad de vehículos por tipo de vehículo</i>	<i>Inventario de emisiones fuentes móviles Área Metropolitana Valle de Aburra (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2023b)</i>
<i>Kilómetros promedios por tipo de vehículo</i>	<i>Inventario de emisiones fuentes móviles Área Metropolitana Valle de Aburra (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2023b)</i>
<i>Factor de emisión por tipo de vehículo</i>	<i>Estimación a partir de los datos del Inventario de emisiones fuentes móviles Área Metropolitana Valle de Aburra (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2023b)</i>
<i>Población AMVA</i>	<i>Retroproyecciones y proyecciones del DANE para cada municipio (DANE - Proyecciones de población, 2024)</i>
<i>Histórico de concentración PM2.5 2022</i>	<i>Datos del Sistema de Información de Alerta Temprana (SIATA, 2024)</i>
<i>Concentración mensual PM2.5</i>	<i>Relación con la emisión total por medio de regresión lineal (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2023b)</i>
<i>Concentración ideal de referencia</i>	<i>Guía de Calidad del aire global de la Organización Mundial de la salud. Objetivo intermedio 4 (World Health Organization, 2021)</i>
<i>Muertes naturales población AMVA</i>	<i>Colombia Estadísticas Vitales 2022. DANE (DANE - Proyecciones de población, 2024)</i>
<i>Muertes asociadas a la concentración PM2.5</i>	<i>Relación de regresión lineal establecida en la Guía de Calidad del aire global de la Organización Mundial de la salud (World Health Organization, 2021)</i>
<i>Costo médico fallecido por enfermedad respiratoria</i>	<i>Artículo Científico: Costos económicos de la infección respiratoria aguda en un Municipio de Colombia (Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia et al., 2017)</i>
<i>Histórico del parque automotor en el AMVA</i>	<i>Sistema de información en línea sobre el comportamiento histórico del parque automotor (Universidad Pontificia Bolivariana, 2022)</i>
<i>Cantidad de motocicletas (4T)</i>	<i>Informe de calidad de vida Medellín 2020 (Medellín Cómo Vamos, 2021)</i>

Nota. Tabla de autoría propia.

Como parámetros iniciales a vigencia del año 2024 no hay una política de conversión vehicular, que motive a la población de AMVA aplicar un cambio de tecnología a su vehículo, además de los costos que estos deben asumir. La política de pico y placa actualmente funciona con 2 dígitos por semana. Y por último con respecto a la política de chatarrización, solo hay una que obliga a las empresas transportistas de servicio público renovar constantemente su flota, pero estos siguen circulando en el AMVA para otros fines, y para camiones aplica la chatarrización a vehículos de más de 20 años de antigüedad.

4.2. Resultados

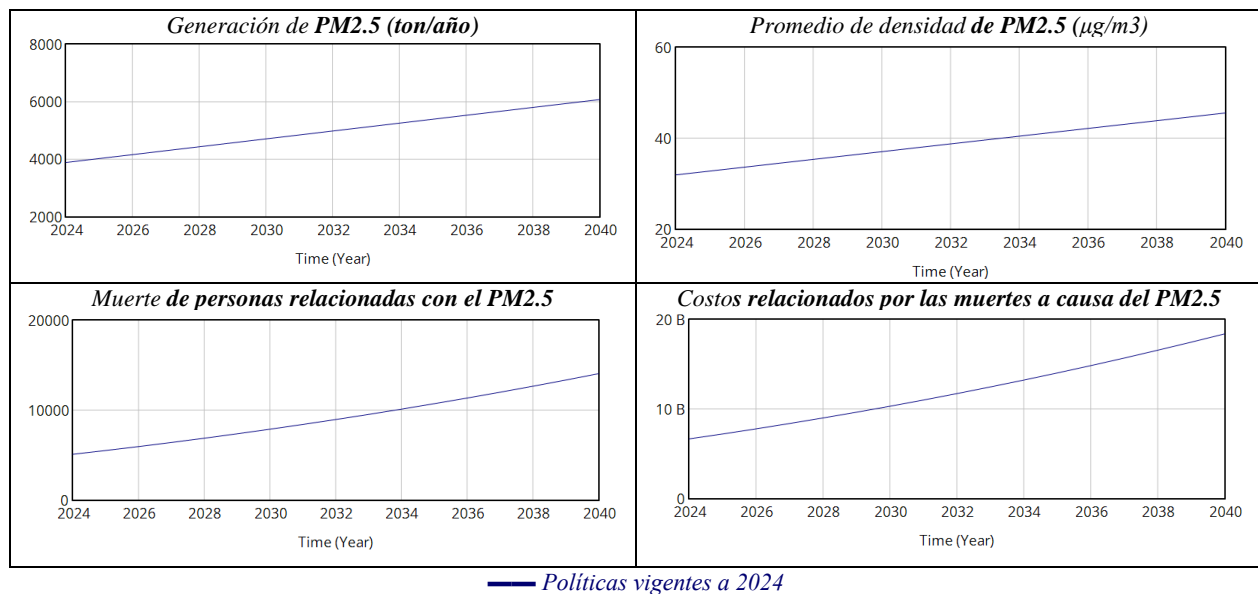
El modelo incluye numerosas variables y elementos que podrían ser sometidos a un análisis robusto. Sin embargo, se realizó un análisis enfocado únicamente en cuatro elementos clave relacionados con nuestro caso de estudio: La cantidad de PM2.5 en toneladas, el promedio de PM2.5 generado, las muertes causadas por la contaminación de PM2.5 y sus costos asociados.

4.2.1. Análisis Escenario Base: Política de vigentes a 2024.

Al correr el modelo con los parámetros de las políticas vigentes, se obtiene un resultado base, el cual ayuda a tener una referencia con respecto a la aplicación de las políticas. Los resultados de las cuatro variables de estudio se ilustran en la figura 35

Figura 35

Escenario Base: Política de vigentes a 2024.



Nota. Imagen de autoría propia.

La cantidad de PM2.5 del AMVA se calcula para el año 2024 un total de 3887,2 ton/año con un crecimiento constante, estimando que para el año 2040 sea de un total de 6076,13 ton/año, representando un incremento del 56,31% sobre lo que actualmente se genera. La cantidad promedio de material particulado para el AMVA en el año 2024 se calcula en $31,9282 \mu\text{g}/\text{m}^3$, además se estima que para el año 2040 este lograría tener un valor de $45,57 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cabe recordar

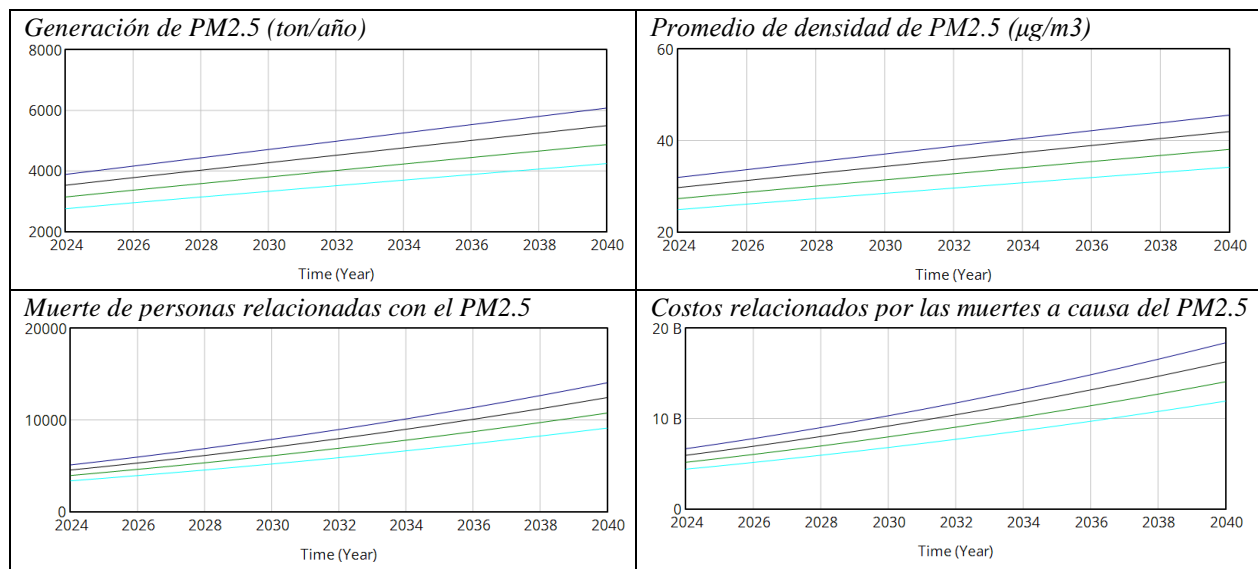
que la OMS recomienda una exposición a $PM_{2.5}$ inferior a $5\mu g/m^3$ anuales. Se calcula que la cantidad de fallecidos en el AMVA relacionados con la contaminación de material particulado para el año 2024 es de 5.097 personas y que para el año 2040 se estima que incrementará a 14.061 personas, un incremento cercano a 176% con respecto a 2024. Estos fallecimientos representan en costos médico para el año 2024 cercano a 6.667 millones de pesos colombianos y de 18.394 millones de pesos colombianos para el año 2040.

4.2.2. Análisis Escenario Tendencial 1: Política de Conversión.

En esta política busca forzar a los habitantes del AMVA a cambiar la tecnología de las fuentes móviles de combustión fósil por otra más amigable con el medio ambiente y que aportan mínimamente o casi nulo en material particulado. Para esta política se usan 3 parámetros que son: Forzar al 5%, 10% y por último el 15% de la cantidad total de vehículos a cambiarse de tecnología, estos valores representan el porcentaje de la cantidad total de vehículos que actualmente circulan en el AMVA y que se retirarían gradualmente en un tiempo definido hasta 2040. Después de ejecutar el modelo se obtienen los resultados que se observan en la figura 36.

Figura 36

Escenario Tendencial 1: Política de Conversión.



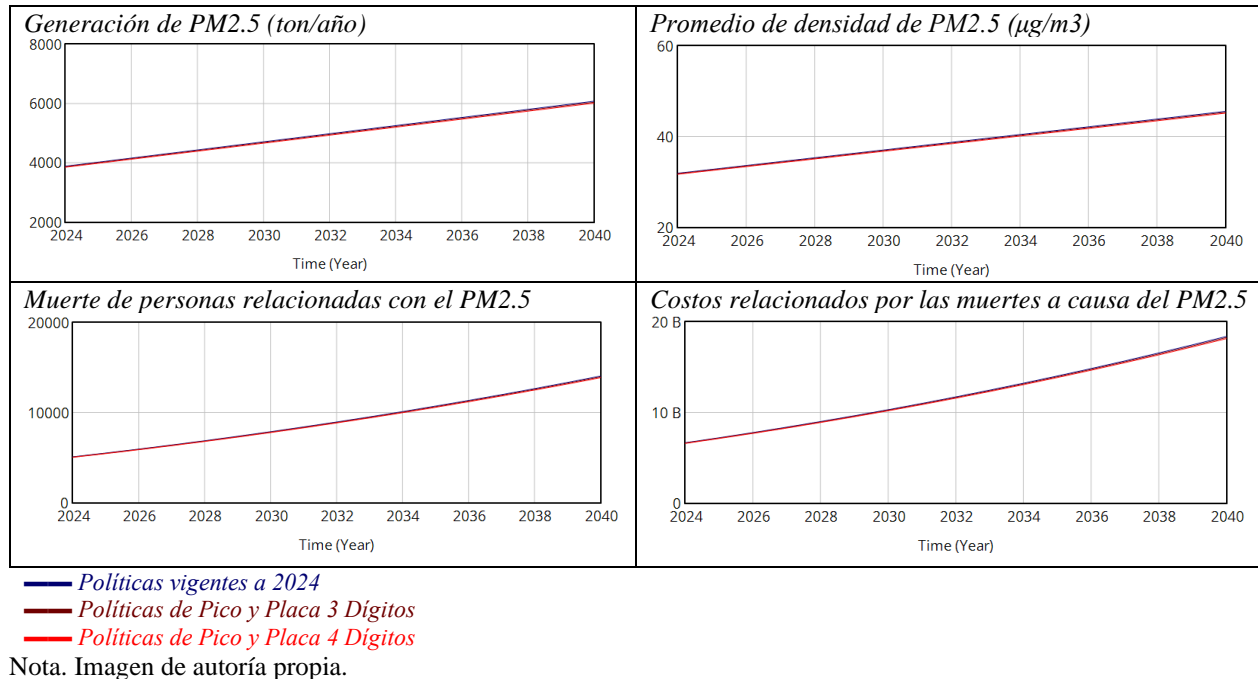
— Políticas vigentes a 2024
 — Políticas de conversión del 5% a 2040
 — Políticas de conversión del 10% a 2040
 — Políticas de conversión del 15% a 2040

Nota. Imagen de autoría propia.

Como se observa en la figura 36, al aplicar la política de conversión de tecnología vehicular, esta tiene impactos significativos así solo se aplique al 5% de la cantidad de vehículos. Aplicando el parámetro del 15%, se obtiene una reducción de la contaminación en el 2040 a 4243,65 ton/año a diferencia de continuar con las políticas vigentes que son 6076,13 ton/año, representando una reducción del 43,11% con respecto a las políticas vigentes. También se obtiene una reducción el promedio de la densidad de PM_{2.5} que pasa de 45,56 µg/m³ con las políticas vigentes a 34,14 µg/m³, repercutiendo en una disminución de muertes que pasan de 14.061 personas a 9.122 personas respectivamente. Según los datos obtenidos por el modelo, esta es la política de mayor impacto frente a la disminución de contaminación del PM_{2.5} en el AMVA.

4.2.3. Análisis Escenario Tendencial 2: Política de Pico y Placa

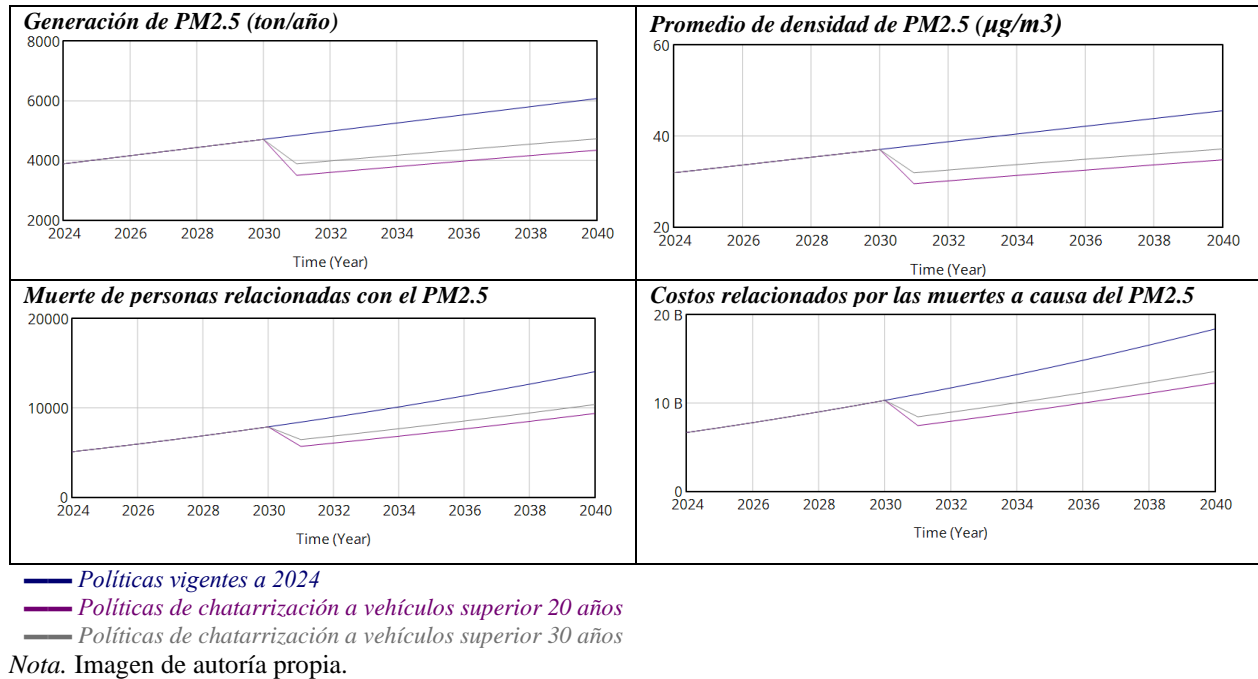
Esta es una de las políticas más conocidas que actualmente se aplica en el AMVA, ya que quien la incumpla será sancionado económicamente por las autoridades y sistema de monitoreo automático con cámaras en los diferentes puntos del Área, actualmente está vigente la aplicación del pico y placa para dos dígitos por semana. Para el análisis de esta política se usa dos parámetros más de aplicación, política con tres dígitos por semana y política con cuatro dígitos por semana. Los resultados obtenidos al aplicar esta política se observan en la figura 37.

Figura 37*Escenario Tendencial 2: Política de Pico y Placa*

Se observa en la figura 37 que la aplicación de la política de Pico y Placa es la que menor impacto tiene en comparación con las demás políticas propuestas en el modelo en cuanto a la contaminación por PM2.5 en el AMVA, la curva modelada usando esta política de 3 y 4 dígitos por semana es similar en comparación a la política vigente de 2 dígitos por semana. Por lo que se infiere que no es una política que se use en búsqueda de mejorar la calidad del aire, medido desde el pm2.5. No es necesario profundizar en el análisis de esta política ya que no proporciona datos significativos.

4.2.4. Análisis Escenario Tendencial 3: Política de Chatarrización

Este escenario busca en el AMVA sacar de circulación los vehículos que cumplan un tiempo de vida definido por la política, que en este caso se manejan 2 parámetros: Sacar de circulación los vehículos que tienen más de 30 años y sacar aquellos que tienen más de 20 años de circulación. Al simular estas políticas se obtuvieron los resultados presentados en la figura 38.

Figura 38*Escenario Tendencial 3: Política de Chatarrización*

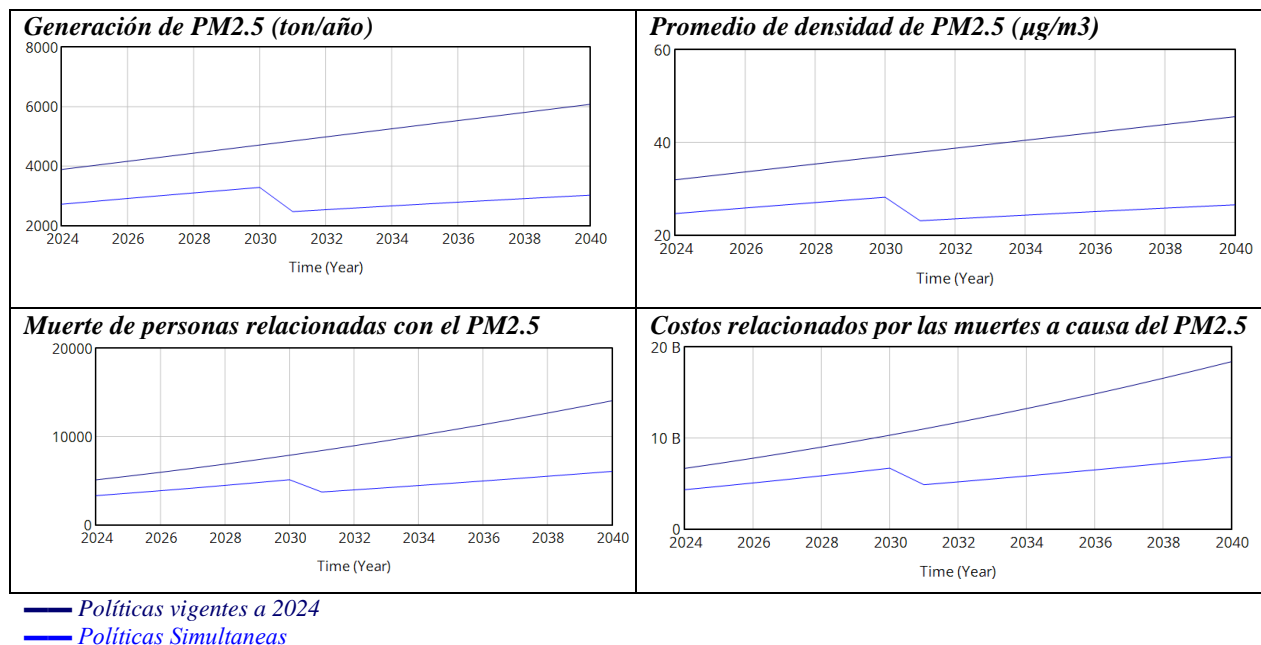
El comportamiento de las variables observado en la figura 38 es peculiar, porque se observa una disminución abrupta, pero lo que esto significa es que, al implementar la política, esta va a tener un tiempo mientras se concientiza a los ciudadanos del AMVA a ella y cuya implementación se daría en el año 2030. Al ejecutarse esta política, se tiene un año de duración para cumplir sobre el total de vehículos que sobrepasen la edad de circulación. Luego de la chatarrización y sacado de circulación la línea va a seguir creciendo con una pendiente menor a las políticas vigentes. Se estima que para el año 2040 al implementar la política de chatarrización de vehículos con más de 20 años habrá una reducción de 6.076,13 ton/año con respecto a las políticas vigentes a 4.344,27 ton/año, también se obtiene una disminución en la concentración de 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 33,09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aproximadamente, logrando una disminución de muertes de 14.061 a 9.382 personas, convirtiendo a esta en la segunda política con mayor impacto de reducción del PM2.5 en el AMVA en este modelo.

4.2.5. Análisis Escenario Tendencial 4: Políticas simultaneas

Para el análisis de este escenario se ajustan los parámetros para buscar la mayor disminución del PM2.5, es por esta razón que se eligen los parámetros de cada política que mayor impacto tienen con respecto a la disminución de la cantidad de PM2.5 y se implementan las políticas de manera simultánea, convirtiendo a este escenario en una condición ideal siempre que no se tuviera un efecto adverso en los ciudadanos. Su aplicación no sería bien acogida por parte de los ciudadanos ya que implica cambios drásticos en la rutina de movilidad y en el uso de vehículos particulares, pero para nuestro caso de estudio es pertinente ya que nos muestra una idea de lo que pasaría si se aplican todas estas 4 políticas juntas en sus niveles de mayor impacto positivo en la calidad del aire. En la política de conversión se selecciona 15% de los vehículos AMVA, en la política de pico y placa, se selecciona la de 4 dígitos por semana y por último en el caso de chatarrización, se selecciona la chatarrización de todos los vehículos que tengan más de 20 años. Al ejecutar el modelo se obtienen los resultados ilustrados en la figura 39.

Figura 39

Escenario Tendencial 4: Políticas simultaneas



Nota. Imagen de autoría propia.

La información arrojada por el modelo es muy relevante e inspirador, ya que se obtendrían unos resultados necesarios si lo que se busca es la disminución de la contaminación de PM2.5, según el modelo se estima que la disminución del PM2.5 para el año 2040 sería de 3020,92 ton/año representando un 50,28% menos que con las políticas vigentes. En la concentración de PM2.5 se encontraría con una densidad aproximada a 26,53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cerca de lo recomendado por la OMS, respecto a las muertes también habría una disminución significativa pasando de 14061 a 6059 personas fallecidas, representa una disminución de 56% sobre las políticas vigentes.

4.2.6. Resumen de los datos con sus escenarios

A continuación, se realiza un resumen general de los resultados obtenidos por el modelo Vensim®, para una fácil comprensión y lectura de datos, visualizar su comportamiento de acuerdo con cada política utilizada. Como ya se mencionó, cada tabla es una variable seleccionada de interés para nuestro caso de estudio.

En la tabla 13 *Cantidad de PM2.5 en el AMVA*, se observa los valores generados en el AMVA en toneladas por año. Con estos datos se obtiene que la política más contundente desde su implementación es cuando se aplica la política de conversión del 15% con un valor de 2753,58 ton/año además es la mejor a largo plazo (según las estimaciones del modelo a 2040).

Tabla 13

<i>Cantidad de PM2.5 en el AMVA</i>	BASE	CONV_5%	CONV_10%	CONV_15%	CHATARR 20 AÑOS	CHATARR 30 AÑOS	PICO-PLACA 4DIG	PICO-PLACA 3DIG	PICO-PLACA 3DIG	SIMULTANEAS
2024	3887,2	3529,73	3141,66	2753,58	3887,2	3887,2	3851,38	3869,29	3869,29	2717,77
2025	4024,09	3654,4	3253,21	2852,02	4024,09	4024,09	3986,51	4005,3	4005,3	2814,43
2026	4160,99	3779,08	3364,79	2950,51	4160,99	4160,99	4121,64	4141,31	4141,31	2911,12
2027	4297,89	3902,49	3473,83	3045,17	4297,89	4297,89	4256,76	4277,33	4277,33	3004,58
2028	4434,8	4025,8	3582,66	3139,51	4434,8	4434,8	4391,88	4413,34	4413,34	3097,75
2029	4571,7	4148,99	3691,26	3233,51	4571,7	4571,7	4526,98	4549,34	4549,34	3190,63
2030	4708,6	4272,07	3799,63	3327,17	4708,6	4708,6	4662,07	4685,34	4685,34	3283,22
2031	4845,49	4395,02	3907,76	3420,48	3502,34	3886,1	4797,14	4821,32	4821,32	2468,28
2032	4982,36	4517,85	4015,66	3513,44	3600,01	3983,71	4932,19	4957,28	4957,28	2533,74
2033	5119,21	4640,54	4123,31	3606,03	3696,65	4080,29	5067,22	5093,22	5093,22	2598,19
2034	5256,04	4763,1	4230,72	3698,27	3792,27	4175,84	5202,21	5229,13	5229,13	2661,64
2035	5392,83	4885,52	4337,87	3790,13	3886,86	4270,35	5337,17	5365	5365	2724,08
2036	5529,59	5007,79	4444,76	3881,61	3980,42	4363,82	5472,09	5500,84	5500,84	2785,49
2037	5666,3	5129,91	4551,38	3972,71	4072,94	4456,25	5606,97	5636,64	5636,64	2845,89
2038	5802,97	5251,87	4657,73	4063,42	4164,42	4547,64	5741,8	5772,39	5772,39	2905,27
2039	5939,58	5373,67	4763,81	4153,74	4254,87	4637,97	5876,57	5908,08	5908,08	2963,61
2040	6076,13	5495,3	4869,61	4243,65	4344,27	4727,26	6011,28	6043,71	6043,71	3020,92

Nota. Tabla de autoría propia.

El modelo también proporciona los datos presentados en la tabla 14 *Promedio de concentración de PM2.5* en el aire en el año, se observa que de nuevo la política más efectiva a corto y largo plazo sería la conversión vehicular al 15% con un promedio 24,86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 34,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. También, a largo plazo está la política de chatarrización de vehículos de 20 años de antigüedad con un valor de 34,77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 14

Promedio de concentración PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

<i>Time (Year)</i>	<i>BASE</i>	<i>CONV_5%</i>	<i>CONV_10%</i>	<i>CONV_15%</i>	<i>CHATARR 20 AÑOS</i>	<i>CHATARR 30 AÑOS</i>	<i>PICO-PLACA 4DIG</i>	<i>PICO-PLACA 3DIG</i>	<i>PICO-PLACA 3DIG</i>	<i>SIMULTANEAS</i>
2024	31,9282	29,7009	27,283	24,8651	31,9282	31,9282	31,705	31,8166	31,8166	24,6419
2025	32,7811	30,4777	27,978	25,4784	32,7811	32,7811	32,5469	32,664	32,664	25,2442
2026	33,634	31,2545	28,6733	26,092	33,634	33,634	33,3889	33,5114	33,5114	25,8466
2027	34,487	32,0234	29,3527	26,6819	34,487	34,487	34,2307	34,3589	34,3589	26,4289
2028	35,34	32,7917	30,0307	27,2696	35,34	35,34	35,0726	35,2063	35,2063	27,0094
2029	36,193	33,5593	30,7073	27,8553	36,193	36,193	35,9144	36,0537	36,0537	27,5881
2030	37,046	34,3261	31,3825	28,4388	37,046	37,046	36,7561	36,901	36,901	28,165
2031	37,8989	35,0922	32,0563	29,0202	29,5303	31,9213	37,5976	37,7483	37,7483	23,0875
2032	38,7517	35,8575	32,7286	29,5994	30,1388	32,5295	38,4391	38,5954	38,5954	23,4953
2033	39,6043	36,6219	33,3993	30,1763	30,741	33,1312	39,2804	39,4424	39,4424	23,8969
2034	40,4568	37,3856	34,0685	30,751	31,3367	33,7265	40,1215	40,2892	40,2892	24,2922
2035	41,3091	38,1483	34,7361	31,3233	31,9261	34,3154	40,9623	41,1358	41,1358	24,6812
2036	42,1612	38,9101	35,4021	31,8933	32,509	34,8978	41,803	41,9821	41,9821	25,0639
2037	43,013	39,671	36,0664	32,4609	33,0854	35,4737	42,6433	42,8282	42,8282	25,4402
2038	43,8645	40,4309	36,7291	33,0261	33,6554	36,0431	43,4834	43,674	43,674	25,8101
2039	44,7157	41,1897	37,39	33,5888	34,219	36,6059	44,3231	44,5195	44,5195	26,1737
2040	45,5665	41,9476	38,0491	34,1491	34,776	37,1622	45,1625	45,3645	45,3645	26,5307

Nota. Tabla de autoría propia.

Otra de las variables importantes en este estudio es estimar la cantidad de personas que fallecen a causa de la contaminación de PM2.5, el modelo proporciona la información presentada en la tabla 15 *Número de muertes asociadas a incremento concentración PM2.5*, con la cual se puede observar que la política más efectiva a corto y a largo plazo con respecto a la disminución de muertes, es de nuevo la política de convertir el 15% de los vehículos AMVA de tecnología vehicular, con un efecto inmediato para el año 2024 de 3.360 muertes para el año, 1736 menos muertes que con las políticas vigentes. Se estima que para el año 2040 con las políticas vigentes se

obtengan una cantidad de muertes aproximada de 14000 personas por la contaminación del aire con PM2.5.

Tabla 15

Número de muertes asociadas a incremento concentración PM2,5

<i>Time (Year)</i>	<i>BASE</i>	<i>CONV_5%</i>	<i>CONV_10%</i>	<i>CONV_15%</i>	<i>CHATARR 20 AÑS</i>	<i>CHATARR 30 AÑS</i>	<i>PICO-PLACA 4DIG</i>	<i>PICO-PLACA 3DIG</i>	<i>PICO-PLACA 3DIG</i>	<i>SIMULTANEAS</i>
2024	5097	4539	3944	3360	5097	5097	5040	5069	5069	3307
2025	5516	4913	4271	3641	5516	5516	5454	5485	5485	3583
2026	5953	5303	4612	3934	5953	5953	5885	5919	5919	3871
2027	6408	5707	4963	4233	6408	6408	6335	6371	6371	4165
2028	6882	6127	5327	4543	6882	6882	6802	6842	6842	4470
2029	7374	6563	5704	4864	7374	7374	7287	7331	7331	4786
2030	7885	7016	6095	5195	7885	7885	7791	7838	7838	5113
2031	8415	7484	6500	5538	8415	8415	8314	8364	8364	5473
2032	8964	7969	6918	5892	8964	8964	8855	8909	8909	5811
2033	9532	8470	7350	6257	9532	9532	9415	9473	9473	6141
2034	10119	8988	7796	6634	10119	10119	9994	10057	10057	6474
2035	10726	9523	8255	7021	10726	10726	10593	10660	10660	6809
2036	11353	10074	8729	7419	11353	11353	11211	11282	11282	7159
2037	12000	10642	9216	7828	12000	12000	11848	11924	11924	7524
2038	12667	11227	9717	8248	12667	12667	12505	12586	12586	7895
2039	13354	11829	10232	8680	13354	13354	13182	13268	13268	8270
2040	14061	12448	10760	9122	14061	14061	13879	13970	13970	8659

Nota. Tabla de autoría propia.

Por último, se obtuvo la información presentada en la Tabla 16 *Costo medico acumulado atribuible a pm2,5*. Como se puede observar, de nuevo la política de pico y placa de 4 dígitos es la más efectiva, representando para el año 2024 un valor de 4326 millones de pesos a diferencia de las políticas vigentes que se espera un costo medico cercano a 6.6 mil millones de pesos. Para el año 2040 se espera con las políticas vigentes, un gasto medico aproximado de 18,4 mil millones de pesos solo atribuibles al PM2.5.

Tabla 16*Costo medico acumulado atribuible a pm2,5 (x1'000.000 pesos)*

<i>Time (Year)</i>	<i>BASE</i>	<i>CONV_5%</i>	<i>CONV_10%</i>	<i>CONV_15%</i>	<i>CHATARR 20 AÑS</i>	<i>CHATARR 30 AÑS</i>	<i>PICO-PLACA 4DIG</i>	<i>PICO-PLACA 3DIG</i>	<i>PICO-PLACA 3DIG</i>	<i>SIMULTANEAS</i>
2024	6667,48	5937,79	5159,65	4395,87	6667,48	6667,48	6593,80	6630,62	6630,62	4326,09
2025	7215,60	6427,21	5587,32	4763,44	7215,60	7215,60	7134,82	7175,19	7175,19	4687,05
2026	7787,33	6937,62	6033,32	5146,79	7787,33	7787,33	7699,06	7743,17	7743,17	5063,43
2027	8382,90	7466,27	6491,98	5537,51	8382,90	8382,90	8286,74	8334,80	8334,80	5448,13
2028	9002,53	8015,75	6968,23	5942,71	9002,53	9002,53	8898,06	8950,27	8950,27	5847,20
2029	9646,45	8586,21	7462,12	6362,40	9646,45	9646,45	9533,25	9589,82	9589,82	6260,62
2030	10314,90	9177,79	7973,72	6796,58	10314,90	10314,90	10192,50	10253,70	10253,70	6688,43
2031	11008,00	9790,62	8503,10	7245,24	7454,51	8446,55	10876,10	10942,00	10942,00	4870,51
2032	11726,10	10424,90	9050,31	7708,38	7937,40	8963,97	11584,10	11655,10	11655,10	5181,86
2033	12469,30	11080,60	9615,42	8185,99	8433,85	9495,17	12316,90	12393,10	12393,10	5500,77
2034	13237,90	11758,00	10198,50	8678,05	8943,67	10040,00	13074,60	13156,20	13156,20	5827,02
2035	14032,20	12457,20	10799,50	9184,54	9466,69	10598,20	13857,50	13944,80	13944,80	6160,39
2036	14852,20	13178,40	11418,70	9705,46	10002,70	11169,60	14665,70	14758,90	14758,90	6500,67
2037	15698,30	13921,60	12055,90	10240,80	10551,60	11754,00	15499,50	15598,80	15598,80	6847,63
2038	16570,60	14687,00	12711,30	10790,50	11113,10	12351,30	16359,00	16464,80	16464,80	7201,04
2039	17469,40	15474,70	13384,80	11354,50	11687,00	12961,20	17244,60	17356,90	17356,90	7560,69
2040	18394,80	16284,80	14076,60	11932,80	12273,10	13583,40	18156,30	18275,50	18275,50	7926,33

Nota. Tabla de autoría propia.

5. Conclusiones

El uso del modelo de dinámica de sistemas por medio del software Vensim® es de gran ayuda para entender las complejas interacciones entre movilidad, emisiones y la calidad del aire. Como herramienta demostró ser fundamental para analizar el comportamiento del PM2.5 en los diferentes escenarios para prever el impacto a mediano y largo plazo de las políticas, antes de su implementación.

Las fuentes móviles son responsables de aproximadamente el 95% de las emisiones de material particulado PM2.5 en el Valle de Aburrá, lo que las convierte en el principal foco de intervención para cualquier política pública de movilidad orientada a mejorar la calidad del aire y reducir el riesgo de enfermedades respiratorias. Estas políticas deben ser multimodales, es decir, abarcar diversas estrategias dentro del ámbito de la movilidad, ya que así se logra una mayor reducción en las emisiones totales en comparación con la implementación de medidas aisladas.

Entre las políticas analizadas, se evidenció que la conversión a fuentes de energía con menor factor de emisión, como el gas natural y la electricidad, es una de las medidas más efectivas para reducir emisiones en el mediano y largo plazo. Sin embargo, su efectividad depende de un incremento sostenido en la tasa de conversión, con énfasis en la necesidad urgente de priorizar los vehículos de carga pesada, que son grandes generadores de emisiones. Esta estrategia se complementa con la implementación de políticas de chatarrización, las cuales también demostraron resultados positivos, aunque su éxito está condicionado a la disponibilidad de incentivos adecuados y factores económicos externos, especialmente en los sectores industrial y de transporte público, responsables de la operación de maquinaria pesada y buses.

Por otro lado, se constató que el pico y placa, aunque reduce temporalmente las emisiones, tiene un impacto limitado a largo plazo. Si no se complementa con otras medidas de movilidad, su efecto es insuficiente para lograr reducciones significativas en los niveles de material particulado.

Cuando las políticas son efectivas y ayudan a disminuir las concentraciones de PM2.5, se reduce el impacto en la salud pública en términos de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, disminuyendo a su vez los costos asociados al sistema de salud, resaltando la importancia de integrar estrategias de movilidad con objetivos de salud pública. Es necesario el compromiso de parte de las autoridades locales, departamentales y nacionales para una efectiva implementación de las políticas, por ejemplo, los incentivos económicos para la adopción de tecnologías limpias y

la modernización del transporte público como medidas esenciales para garantizar la sostenibilidad del mejoramiento de la calidad del aire.

Referencias

- Área Metropolitana del Valle de Aburra. (2007). *Acuerdo Metropolitano 42 De 2007*.
https://alphasig.metropol.gov.co/normograma/compilacion/docs/pdf/a_amva_0042_2007.pdf
- Área Metropolitana del Valle de Aburra. (2011). *Acuerdo metropolitano No. 8*.
<https://www.metropol.gov.co/acuerdosmetropolitanos/2011/ACUERDO008.pdf>
- Área Metropolitana del Valle de Aburra. (2018). *Condiciones especiales del valle de aburrá*.
<https://www.metropol.gov.co/ambientales/calidad-del-aire/generalidades/condiciones-especiales>
- Área Metropolitana del Valle de Aburra. (2019). *Red de Monitoreo de Calidad del Aire*.
<https://www.metropol.gov.co/Paginas/Noticias/elmetropolitano-ambiental/red-de-monitoreo-de-calidad-del-aire.aspx>
- Área Metropolitana del Valle de Aburra. (2022). *Qué es el ICA*.
<https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Generalidades/ICA.aspx>
- Área Metropolitana del Valle de Aburra. (2023a). *Inventario de Emisiones Fuentes Fijas 2022*.
<https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Inventario-de-emisiones/Inventario-Emisiones-Fuentes-Fijas-2022.pdf>
- Área Metropolitana del Valle de Aburra. (2023b). *Inventario de Emisiones Fuentes Mviles 2022*.
<https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Herramientas-de-gestion/Inventario-de-emisiones-atmosfericas.aspx>
- Banks, J. (2005). *Discrete-Event System Simulation*. Pearson Education India.
- Bel, G., & Holst, M. (2018). Evaluation of the impact of Bus Rapid Transit on air pollution in Mexico City. *Transport Policy*, 63, 209-220. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.01.001>

-
- Buya, S., Gokon, H., Dam, H. C., Usanavasin, S., & Karnjana, J. (2024). Estimating Ground-Level Hourly PM_{2.5} Concentrations in Thailand Using Satellite Data: A Log-Linear Model With Sum Contrast Analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *17*, 8203-8212. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3384964>
- Calderón, B. (1979). *Introducción a la simulación*. Asidua.
- Chen, H., Liu, S., Yang, D., & Zhang, D. (2023). Automatic air pollution monitoring and corporate environmental disclosure: A quasi-natural experiment from China. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, *14*(3), 538-564. <https://doi.org/10.1108/SAMPJ-07-2022-0385>
- Chen, Z., Zan, Z., & Jia, S. (2022). Effect of urban traffic-restriction policy on improving air quality based on system dynamics and a non-homogeneous discrete grey model. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *24*(8), 2365-2384. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02319-9>
- DANE - *Proyecciones de población*. (2024). www.dane.gov.co. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- Farhadi, F., Palacin, R., & Blythe, P. (2023). Machine Learning for Transport Policy Interventions on Air Quality. *IEEE Access*, *11*, 43759-43777. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3272662>
- Guo, Z., & Zhang, X. (2024). Has the healthy city pilot policy improved urban air quality in China? Evidence from a quasi-natural experiment. *Energy Economics*, *129*, 107260. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107260>

-
- Gupta, A., Moniruzzaman, M., Hande, A., Rousta, I., Olafsson, H., & Mondal, K. K. (2020). Estimation of particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀) concentration and its variation over urban sites in Bangladesh. *SN Applied Sciences*, 2(12), 1993. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03829-1>
- Lu, K.-F., Wang, H.-W., Li, X.-B., Peng, Z.-R., He, H.-D., & Wang, Z.-P. (2022). Assessing the effects of non-local traffic restriction policy on urban air quality. *Transport Policy*, 115, 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.11.005>
- Medellín Cómo Vamos. (2021). *Informe de Calidad de Vida de Medellín 2020* (Movilidad y espacio público). <https://www.medellincomovamos.org/system/files/2021-09/docuprivados/Movilidad%20y%20espacio%20p%C3%ABAblico%20Informe%20de%20Calidad%20de%20Vida%20de%20Medell%C3%ADn%2C%202020.pdf>
- Medellín Cómo Vamos. (2022). *Sostenibilidad Futura Del Sistema De Transporte Público Del Valle De Aburrá*. https://www.medellincomovamos.org/system/files/2022-04/docuprivados/Sostenibilidad%20Futura%20del%20Sistema%20de%20Transporte%20Masivo%20del%20Valle%20de%20Aburra_0.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Contaminación Atmosférica en Colombia*. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/contaminacion-atmosferica/>
- Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible. (2017, noviembre 1). *Resolución 2254 de 2017*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-2254-de-2017.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). *Emisiones Atmosféricas Contaminantes*.

<https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/emisiones-atmosfericas-contaminantes/>

Organización Panamericana de la Salud. (2017). *Calidad del Aire Ambiente—OPS/OMS /*

Organización Panamericana de la Salud. <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire/calidad-aire-ambiente>

Patiño, W. R., Vlček, O., Bauerová, P., Belda, M., Bureš, M., Eben, K., Fuka, V., Geletič, J., Jareš,

R., Karel, J., Keder, J., Krč, P., Radović, J., Řezníček, H., Šindelářová, A., & Resler, J.

(2024). On the suitability of dispersion models of varying degree of complexity for air quality assessment and urban planning. *Building and Environment*, 264, 111892.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111892>

Prieto-Mostacero, K. A., Ordoñez Luera, I. S., & Fernandez Rojas, J. H. (2023). Emisiones

vehiculares mediante modelo dinámico de sistemas en la carretera Central en la ciudad de

Lima—Perú noviembre 2020. *Inge CuC*, 19(1).

<https://doi.org/10.17981/ingecuc.19.1.2023.07>

Sanchez Cespedes, J. M., Gaona Barrera, A., & Dallos Parra, D. L. (2022). Modelo de simulación

para evaluación de políticas ambientales mediante la caracterización de la contaminación

del aire en la ciudad de Bogotá usando dinámica de sistemas. *INGENIERÍA Y*

COMPETITIVIDAD, 24(02). <https://doi.org/10.25100/iyc.v0i00.11573>

SIATA. (2024). *SIATA - Sistema de Alerta Temprana del valle de Aburrá*. siata.gov.co.

https://siata.gov.co/sitio_web/index.php/nosotros

-
- Slovic, A. D., & Ribeiro, H. (2018). Policy instruments surrounding urban air quality: The cases of São Paulo, New York City and Paris. *Environmental Science & Policy*, *81*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.12.001>
- Soler, M. R., Gámez, P., & Olid, M. (2016). Aramis un modelo regional para la gestión de la calidad del aire. Evaluación y validación. *Física de La Tierra*, *27(0)*, 111-136. https://doi.org/10.5209/rev_FITE.2015.v27.51196
- Sterman, J. D. (2002). *System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. MIT Sloan School of Management.
- Sun, C., Zheng, S., & Wang, R. (2014). Restricting driving for better traffic and clearer skies: Did it work in Beijing? *Transport Policy*, *32*, 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.12.010>
- Universidad Pontificia Bolivariana. (2022). *ANGULAR Sistema para la gestión de la calidad del aire*. <https://calidaddelaire.upb.edu.co/austro/amva/fuentesmoviles/>
- Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia, Bernal-Aguirre, C., Carvajal-Sierra, H., Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia, Alvis-Zakzuk, N. J., Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia, & ALZAK Foundation. Cartagena. Bolívar, Colombia. (2017). Costos económicos de la infección respiratoria aguda en un Municipio de Colombia. *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud*, *49(3)*, 470-477. <https://doi.org/10.18273/revsal.v49n3-2017005>
- US EPA, O. (2014). *NAAQS Table [Other Policies and Guidance]*. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>

US EPA, O. (2018). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*

[Overviews and Factsheets]. <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>

World Health Organization. (2021). *OMS PM2.5.pdf* (Global Air Quality Guidance).

<https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>