

# Infecciones respiratorias agudas (IRA) por efecto de las emisiones y escorrentía superficial de PM10 atribuidos al parque automotor en Bogotá

IRA cases due to the effect of PM10 emissions and surface  
runoff attributed to the automotive park in Bogotá

Angie Katherin Lache Peñaranda\*, Gabriel Ernesto Castelblanco Bolívar\*\*  
y Juan David Barón Prada\*\*\*

---

---

## Cómo citar:

Lache Peñaranda, A. K., Castelblanco Bolívar, G. E., & Barón Prada, J. D. (2020). Infecciones respiratorias agudas (IRA) por efecto de las emisiones y escorrentía superficial de PM10 atribuidos al parque automotor en Bogotá. *Ingeciencia*, 5, 57-80.

\* Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Correo: alachep@ucentral.edu.co  
\*\* Docente de la Universidad Central. Correo: gabrielecb@gmail.com  
\*\*\* Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Correo: jbaronp@ucentral.edu.co

## Resumen

Bogotá ha sobrepasado los límites de concentración de PM10 recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), lo que agudiza sus impactos en la salud y el medio ambiente. Esta investigación busca modelar el impacto de las emisiones de PM10 por el parque automotor en Bogotá sobre los casos de infección respiratoria aguda (IRA) y la concentración de metales pesados (plomo, cobre, zinc y cadmio) en el agua superficial mediante un modelo de dinámica de sistemas en el *software* Vensim. Con este fin, se modelaron tres escenarios. El primero se basa en la continuidad de las condiciones actuales; el segundo contempla una flota 100% eléctrica, y el tercer escenario, intermedio, consiste en una flota pública (1% Euro V, 15% articulados eléctricos y 84% Euro VI) y una flota privada (50% de carros y motos eléctricos). En cada escenario se confirmó un impacto proporcional a las emisiones de PM10. Se demuestra que conviene incrementar la proporción de vehículos que trabajan con motores eléctricos o híbridos para disminuir el nivel de contaminación atmosférica e hídrica, así como los casos de IRA.

**Palabras clave:** dinámica de sistemas, escorrentía urbana, infecciones respiratorias agudas (IRA), metales pesados, parque automotor, PM10.

## Abstract

Bogotá has exceeded the PM10 concentration limits recommended by the World Health Organization (WHO), which exacerbates its impacts on health and the environment. This research means to model the impact of PM10 emissions from the automotive fleet in Bogotá on ARI cases and the concentration of heavy metals (lead, copper, zinc, and cadmium) in surface using a system dynamics model in the Vensim software. To this end, three modeling scenarios were proposed. The first is based on the continuity of the current conditions; the second contemplates a 100% electric fleet; and an intermediate scenario, consisting of a public fleet: 1% Euro V, 15% electric articulated and 84% Euro VI, and 50% of electric cars and motorcycles. For each of the scenarios, the proportional impact to emissions were confirmed. The present study demonstrates the urgency of increasing the proportion of electric or hybrid vehicles to reduce the cases of ARI, and the atmospheric and water pollution.

**Keywords:** acute respiratory infections (ARI), heavy metal, PM10, system dynamics, urban runoff, vehicle fleet.

## 1. Introducción

De acuerdo con un comunicado de prensa, en Ginebra, Suiza, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2016) estimó que cerca del 90% de las muertes relacionadas con la contaminación del aire se producen en países de ingresos bajos y medianos, y casi dos de cada tres suceden en las regiones de Asia Sudoriental y del Pacífico Occidental. En América Latina y el Caribe, más de cien millones de personas están expuestas a niveles de contaminación del aire por encima de los recomendados por la OMS (Cifuentes *et al.*, 2005).

Los grupos más vulnerables a los efectos dañinos de una mala calidad del aire incluyen niños, adultos mayores, personas con problemas previos de salud y población de bajos estratos socioeconómicos. De hecho, se ha establecido que para el 2050 la contaminación del aire será el principal causante de mortalidad prematura. Esto no solo afecta la salud, sino también la economía de cada país, pues las pérdidas por dichas emisiones pueden llegar a representar hasta el 2% del Producto Interno Bruto (PIB) de cada nación, justificados en gastos médicos y pérdida de productividad (Clean Air Institute, 2013).

Debido al enorme deterioro de la calidad del aire en Bogotá, la afectación a la salud respiratoria constituye el efecto más significativo en la salud (Leal & Castelblanco, 2020). Estos niveles de contaminación generan efectos cuantificados y no cuantificados en la calidad de vida, por lo cual las autoridades ambientales y de salud pública de la ciudad han buscado limitarla de distintas formas. Al respecto se puede consultar el trabajo de Torres (2010), quien realizó un diagnóstico de los altos y persistentes niveles de material particulado (PM) emitidos por fuentes móviles en Bogotá.

Según la Secretaría Distrital de Movilidad (2017), en un día hábil se realizan 13 325 901 viajes, principalmente entre hogar, estudio y trabajo; de las personas que viven en la ciudad, aproximadamente el 43% usa transporte público SITP-TPC, el 23% lo hace de forma peatonal, el 12% en automóvil y el 5% en motocicleta (Clean Air Institute, 2013). Además, Gaitán *et al.* (2007) demostraron que las concentraciones atmosféricas de material particulado superan los valores establecidos por la reglamentación ambiental de la ciudad.

Adicionalmente, la concentración de la población mundial en las ciudades y su consecuente expansión han tenido un gran impacto en el drenaje urbano (Harremoës, 1997). Dicho proceso acelerado de urbanización ha impactado de diversas maneras las cuencas urbanas, principalmente en el aumento de los caudales por los altos volúmenes de escorrentía, debido a una enorme disminución de las tasas de infiltración, por efecto de la impermeabilización del suelo (Fletcher *et al.*, 2013).

Cuando ocurre un evento de precipitación, parte del material particulado se traslada de la atmósfera a la escorrentía (Hvitved-Jacobsen *et al.*, 2010), lo cual afecta las aguas superficiales (Walsh & Kunapo, 2009) y a los mantos acuíferos (Gromaire-Mertz *et al.*, 1999). Del mismo modo, las aguas lluvias de escorrentía sobre superficies urbanas son consideradas la mayor fuente de distribución de metales pesados en las aguas superficiales (Zhang *et al.*, 2012). Como consecuencia, la contaminación causada por el agua de escorrentía constituye un gran problema en las áreas urbanas y cuerpos de agua adyacentes a las ciudades, ya que las emisiones de los vehículos incluyen diferentes contaminantes, como metales pesados, aceite y grasa, partículas de fuentes como combustibles, desgaste de las pastillas de freno y de los neumáticos y basura (Kim *et al.*, 2005).

La escorrentía urbana se considera una fuente de contaminación de difícil localización, ya que se origina en áreas extensas; su vertido es intermitente, ligado a un fenómeno aleatorio, la lluvia, variable en el tiempo, difícil de muestrear en origen y relacionada con el uso del suelo (Lee *et al.*, 2020); por esto, es reconocida como una de las principales fuentes de contaminación difusa en las ciudades.

La presente investigación aborda el diagnóstico y los antecedentes respecto a la cantidad de emisiones de PM10 del parque automotor en Bogotá y su relación con la presencia de metales pesados en los cuerpos de agua superficiales como plomo (Pb), cadmio (Cd), cobre (Cu) y zinc (Zn); así mismo, la incidencia en el aumento de casos de Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) en la ciudad. Para dicho propósito se construyó un modelo de simulación que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de dinámica de sistemas sobre la emisión de PM10.

## 2. Materiales y métodos

La metodología empleada para definir el modelo está basada en la metodología de dinámica de sistemas según Bilash *et al.* (2017). A continuación, se describen las etapas de la investigación.

### 2.1 Identificación del problema y análisis del comportamiento

El paso más importante en el modelado es identificar el problema, puesto que se enfoca en caracterizar qué aspectos del funcionamiento del sistema es necesario atender. Con este fin se describen las variables clave de entrada para el sistema y se establecen los límites de acuerdo con las preguntas específicas para las cuales se busca una respuesta. Específicamente, la pregunta de investigación fue: ¿Cómo se asocian las emisiones de PM10 y el crecimiento del parque automotor que fomentan, alteran o provocan desequilibrio en el ambiente, con la calidad del aire, la salud de los habitantes y la calidad de las aguas superficiales?

### 2.2 Desarrollo de una hipótesis dinámica que explique la causa del problema

La hipótesis que se plantea es que, en Bogotá, el flujo masivo de los medios de transporte que utilizan fuentes de gasolina y biodiésel para funcionar son sistemas que producen co-lateralmente PM10, el cual crece progresivamente y se asocia con el incremento de casos de IRA y la presencia de metales pesados en los cuerpos de agua superficiales.

### 2.3 Estimación de parámetros

El objetivo de la estimación de parámetros es obtener los valores de los efectos directos incluidos en el modelo. Para el cálculo de las emisiones de PM10 se utilizó el factor de emisión (t/km\*vehículo), factor de actividad (km/año) y la cantidad de vehículos por categorías. Estos valores se multiplican para encontrar la emisión (ecuación 1), de tal forma que:

$$\text{Toneladas de PM10} = \frac{\text{t}}{\text{km} * \text{vehículo}} \cdot \frac{\text{km}}{\text{año}} \cdot \text{Vehículo} \quad \text{Ecuación 1}$$

En el caso de la relación entre el crecimiento de la población y el parque automotor, se empleó la ecuación 2, de correlación, a partir del historial de ambas variables desde el año 2007 hasta el año 2017 con un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) alto, en donde el parque automotor es la variable dependiente y la población es la variable independiente.

$$\text{Parque automotor} = 1,3085 \text{ Población} - 8E+06, R^2 = 0,9912 \quad \text{Ecuación 2}$$

## 2.4 Validación de modelos, análisis de sensibilidad y análisis de políticas

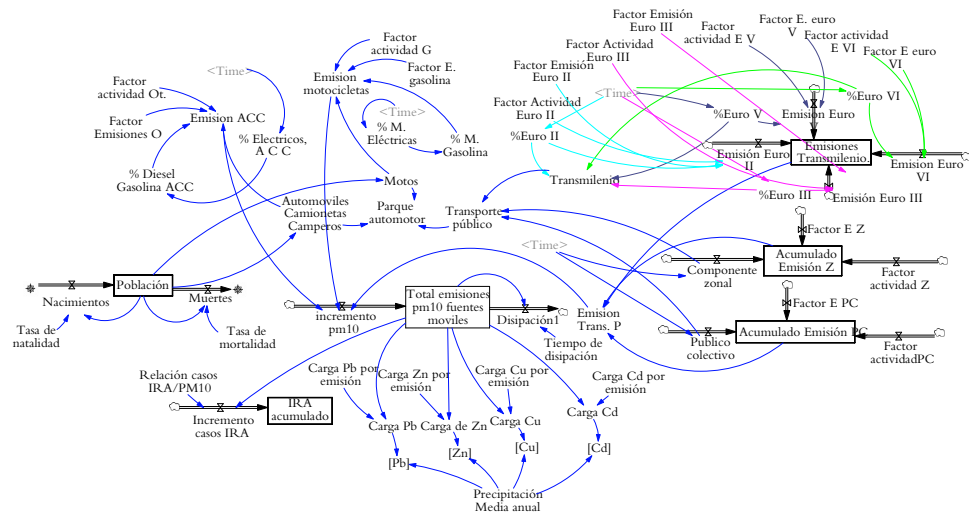
Las pruebas para fomentar la confianza en el modelo de dinámica de sistemas consisten en validación, análisis de sensibilidad y análisis de políticas de modelos de dinámica de sistemas. El objetivo de esta fase es generar confianza en el modelo. Se verifica la sintaxis y la coherencia dimensional del conjunto de ecuaciones sistémicas que constituyen el modelo; se valida que el modelo responde al comportamiento especificado con los modos de referencia y se analiza la sensibilidad del modelo.

## 3. Resultados

El modelo de simulación realizado en este estudio fue postulado con base en las emisiones de material particulado de 10 micrómetros o menos aportados por la relación existente entre el crecimiento de la población y el parque automotor, con el fin de determinar la influencia de las emisiones sobre la afectación a la salud pública de acuerdo con los casos de Infección Respiratoria Aguda (IRA) y la concentración de los metales Pb, Zn, Cu y Cd en la escorrentía en la ciudad de Bogotá.

### 3.1 Definición de las variables del modelo y diagrama Forrester

Se identificaron datos relacionados con las emisiones de PM10 del parque automotor en el período de 2007 al 2017, lo cual permitió estructurar un modelo que refleja la situación actual y viabilizar proyecciones más acertadas de acuerdo con la alta correlación esperada entre el historial de la población y el historial del parque automotor en la ciudad de Bogotá (figura 1). Dichos datos fueron relacionados en la estructura del modelo como variables de flujo o variables auxiliares, junto con variables calculadas mediante ecuaciones que integran las regresiones realizadas en Excel (tabla 1).



**Figura 1.** Diagrama Forrester con relaciones múltiples de causa (Emisión de PM10 por fuentes móviles en Bogotá) – efecto (Contaminación de cuerpos hídricos por efecto de escorrentía y afectación a salud con casos de Infección Respiratoria Aguda) desde 2007 hasta 2017. Fuente: elaboración propia.

**Tabla 1.** Asignación de variables y fuentes de información

Variables	Fórmula	Unidades	Valor	Fuente de datos
Tasa de natalidad	12,1411 / 1000	Habitantes / 1000 habitantes	0,012	DANE
Tasa de mortalidad	4,5368 / 1000	Habitantes / 1000 habitantes	0,005	DANE
Nacimientos	Población * Tasa de natalidad	Habitantes / año	100290	DANE
Muertes	Población * Tasa de mortalidad	Habitantes / año	36661	DANE
Población	INTEG (nacimientos – muertes)	Habitantes	8 080 731	DANE
Tasa de morización	(Parque automotor * 1000) / Población	Vehículos / 1000 habitantes	0,146	Secretaría Distrital de Ambiente
Parque automotor	Automóviles, camperos, camionetas + motos + transporte público	Vehículos	2217970	Secretaría Distrital de Ambiente
Automóviles, camionetas y camperos	Diésel gasolina ACC + eléctricos ACC	Vehículos	1737200	Secretaría Distrital de Movilidad
% diésel y gasolina ACC	100 – % eléctricos ACC	Vehículos	1832510	Secretaría Distrital de Movilidad
Factor de emisión O		Ton/km * veh	4,32E-6	Secretaría Distrital de Movilidad
Factor de actividad O		km/año	49142	Secretaría Distrital de Movilidad

VARIABLES	Fórmula	Unidades	Valor	Fuente de datos
Emisión O	Diésel gasolina ACC * Factor de emisión O * Factor de actividad O	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad
% eléctricos ACC	0.0005 * (Time^2) – 0.002 * Time + 0.0019	Vehículos	843	Secretaría Distrital de Movilidad
Emisión E	Eléctricos ACC*- Factor de emision E*Factor de activi- dad E	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad
Emisiones Automoviles	Emisión E + emisión O	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad
Motos	0.3912*Población – 3e + 06	Vehículos	464 634	Secretaría Distrital de Movilidad
% Motos eléctricas	0.0042 * Time +0.0004	Vehículos	550	Secretaría Distrital de Movilidad
Emision E	M eléctricas * Factor E eléctricas * Factor actividad E	t/año	0	Secretaría Distrital de Movilidad
% M gasolina	100 – “% M. eléc- tricas”	Vehículos	549 986	Secretaría Distrital de Movilidad
Factor E gasolina		t/km * veh	2,54E-7	Secretaría Distrital de Movilidad
Factor actividad G		km/año	16 457	Secretaría Distrital de Movilidad
Emisión G	Factor E gasolina * Factor actividad G * M Gasolina	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad
Emisiones de las motocicletas	“% M. gasolina” * Factor actividad G * “Factor E. gasolina” * Motos	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad
Transporte público	Componente Zonal + Público colectivo + Taxis + Trasmilenio	Vehículos		Secretaría Distrital de Movilidad
Trasmilenio	Renovación flota -Salida por reno- vación	Vehículos	2851	Secretaría Distrital de Movilidad
Renovación de la flota	Euro VI + Euro V	Vehículos	1441	Trasmilenio S.A.
Salida por renovación	Euro II + Euro III	Vehículos	1162	Trasmilenio S.A.
Euro II		Vehículos	724	Trasmilenio S.A.
Euro III		Vehículos	438	Trasmilenio S.A.
Euro V		Vehículos	700	Trasmilenio S.A.
Factor E euro V		t/km * veh	1,41E-7	Trasmilenio S.A.
Factor actividad E V		km/año	156 339	Trasmilenio S.A.

VARIABLES	Fórmula	Unidades	Valor	Fuente de datos
Emisión V	$\text{Euro V} * \text{Factor actividad E V} * \text{Factor E. euro V}$	t/año		Transmilenio S.A.
Euro VI		Vehículos	741	Transmilenio S.A.
Factor E euro VI		t/km * veh	4,30E-8	Transmilenio S.A.
Factor actividad E VI		km/año	156339	Transmilenio S.A.
Emisión VI	$\text{Euro VI} * \text{Factor actividad E VI} * \text{Factor E Euro VI}$	t/año		Transmilenio S.A.
Emisiones Trasmilenio	$\text{Emisión Euro V} + \text{Emisión Euro VI}$	t/año	4768	Transmilenio S.A.
Componente zonal	$\text{IF THEN ELSE} ( (2435,1 * \text{LN}(\text{Time}) - 1959,6) < 988, 988, (2435,1 * \text{LN}(\text{Time}) - 1959,6) )$	Vehículos	6678	Transmilenio S.A.
Factor E Z		t/km * veh	3,37E-7	Transmilenio S.A.
Factor actividad zonal		km/año	128564	Transmilenio S.A.
Acumulado emisión Z	$\text{Componente Zonal} * \text{Factor actividad Z} * \text{Factor E.}$	Ton/año	2349	Transmilenio S.A.
Público colectivo	$6017 * \text{logaritmo natural}(\text{Time}) + 21967$	Vehículos	5835	Transmilenio S.A.
Factor EPC		t/km * veh	8,98E-7	Transmilenio S.A.
Factor actividad colectivo		km/año	45484	Transmilenio S.A.
Acumulado emisión PC	$\text{Factor actividad PC} * \text{Factor E PC} * \text{Público colectivo}$	t/año	2561	Transmilenio S.A.
Taxis	$41.628 * \text{LN}(\text{Time}) + 51515$	Vehículos		Secretaría Distrital de Movilidad
Factor E taxis		t/km * veh	2,30E-6	Secretaría Distrital de Movilidad
Factor actividad taxis		km/año	78932	Secretaría Distrital de Movilidad
Acumulado emisión taxis	$\text{Factor actividad taxis} * \text{Factor E taxis} * \text{Taxis}$	t/año	2978	Secretaría Distrital de Movilidad
Emisión transporte público	$\text{Acumulado emisión PC} + \text{Acumulado emisión Z} + \text{Acumulado emisión Taxis} + \text{Emisiones Trasmilenio}$	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad
Incremento PM10	$\text{Emisión motocicletas} + \text{Emisión transporte público} + \text{Emisión ACC}$	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad



VARIABLES	FÓRMULA	UNIDADES	VALOR	FUENTE DE DATOS
Total emisiones PM10 fuentes móviles	INT(incremento pm10 – Disipación1)	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad
Disipación	Total emisiones pm10 fuentes móviles / Tiempo de disipación	pm10/año		Secretaría Distrital de Movilidad
Tiempo de disipación		año	109	Secretaría Distrital de Movilidad
Relación de casos IRA/PM10		Casos/pm10	4	Secretaría Distrital de Movilidad
Incremento de casos IRA	Relación casos IRA / PM10 * Total emisiones pm10 fuentes móviles	Casos		Secretaría Distrital de Movilidad
IRA acumulado	Incremento casos IRA	Casos	272	Secretaría Distrital de Movilidad
Carga Pb por emisión		mg/t	0,173	Secretaría Distrital de Movilidad
Carga Zn por emisión		mg/t	0,334	Secretaría Distrital de Movilidad
Carga Cu por emisión		mg/t	0,060	Secretaría Distrital de Movilidad
Carga Cd por emisión		mg/t	0,329	Secretaría Distrital de Movilidad
Carga Pb	Carga Pb por emisión * Total emisiones pm10 fuentes móviles	mg/año		Autores
Carga Zn	Carga Zn por emisión * Total emisiones pm10 fuentes móviles	mg/año		Autores
Carga Cu	Carga Cu por emisión * Total emisiones pm10 fuentes móviles	mg/año		Autores
Carga Cd por emisión	Carga Cd por emisión * Total emisiones pm10 fuentes móviles	mg/año		Autores
[Pd]	(Carga Pb / Precipitación Media anual) / 1000	mg/L		Autores
[Zn]	(Carga Zn / Precipitación media anual) / 1000	mg/L		Autores
[Cu]	(Carga Cu / Precipitación media anual) / 1000	mg/L		Autores

VARIABLES	Fórmula	Unidades	Valor	Fuente de datos
[Cd]	(Carga Cd / Precipitación media anual) / 1000	mg/L		Autores
Precipitación Media Anual		L	0,719	Ideam

Fuente: elaboración propia.

### 3.2 Definición del modelo formal en dinámica de sistemas

Como resultado del modelo de simulación, se plantearon diferentes escenarios para determinar y comprender las causas estructurales del comportamiento del sistema, así como para mostrar la afectación directa a la salud pública por el aumento de IRA atribuida al PM10 emitido por el parque automotor y también las grandes concentraciones de metales pesados como Pb, Zn, Cu y Cd que llegan a los cuerpos hídricos por efecto de la escorrentía cuando se combina la lluvia y la emisión de estas partículas. Esto implica aumentar el conocimiento sobre el papel de cada elemento del sistema y ver cómo diferentes acciones, efectuadas sobre partes del sistema, acentúan o atenúan las tendencias de comportamiento implícitas en este.

### 3.3 Definición de escenarios de análisis del modelo

Para evaluar los impactos en el largo plazo de las emisiones de PM10 se propusieron tres escenarios en el modelo. El primero asume que la tendencia histórica de emisiones de PM10 y del comportamiento del parque automotor entre el 2007 y el 2017 se sostiene en el tiempo. Los resultados de la simulación demuestran que si la mayoría de los vehículos sigue haciendo uso de combustibles fósiles, los casos de IRA aumentarán; este escenario es el menos deseable. Variables como % Diésel ACC, % Eléctricos ACC, % Diésel motos, % Eléctricos motos, Euro V y Euro VI demuestran el desfavorable escenario o estado actual de la problemática y las posibles alternativas en el cambio del parque automotor.

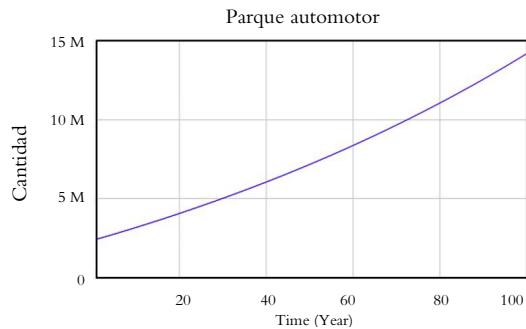
El segundo escenario consiste en una transición paulatina hacia la sostenibilidad del parque automotor, hasta que el 100% del este funcione con motores eléctricos. Esta posibilidad se proyecta a largo plazo, debido a que actualmente no se ha generado mayor interés en Colombia para poder realizar esta renovación. La simulación y los datos muestran cómo la disponibilidad de coches eléctricos y el factor de adquisición o accesibilidad económica en Bogotá y en Colombia, en general, no es el mismo que en países desarrollados.

El tercero es un escenario intermedio, denominado en la simulación como “alcanzable”. Específicamente, plantea un parque automotor con las siguientes características: en primera instancia, flota pública: 1% Euro V, 15% articulados eléctricos y 84% Euro VI, y en segunda instancia, flota privada: 50% de carros y motos eléctricos. En este escenario se hace más que evidente que la cantidad de los buses colectivos disminuirá y pasarán a ser reemplazados por el Sistema Integrado de Transporte Público (SITP), de manera que lo ideal sería contemplar un escenario de movilidad con tecnología Euro VI y eléctrico. Se considera que es un escenario alcanzable, debido a que la transición es más realista y se puede financiar por etapas, además se espera que los costos para adquirir esta tecnología sean menores.

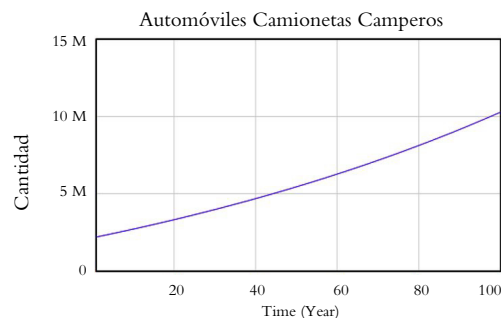
### 3.4 Simulación por escenarios

#### 3.4.1 Crecimiento del parque automotor en función de la población

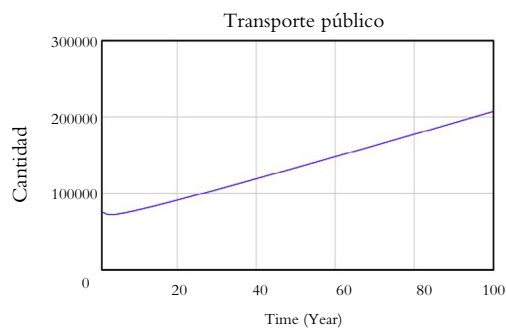
El crecimiento del parque automotor se relaciona directamente con el crecimiento poblacional. Como se ve en las figuras 2 a 8, el sector con mayor aumento serán los automóviles, camperos y camionetas y las motos, seguido por el transporte público, en el cual se espera una renovación de tecnología que tendrá como consecuencia la reducción de los buses colectivos zonales.



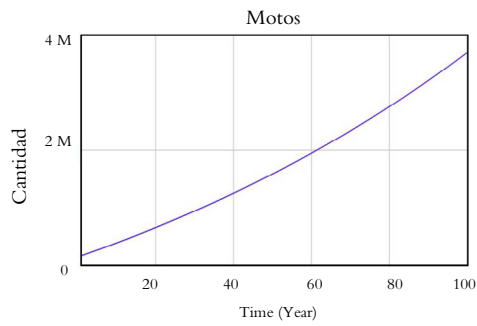
**Figura 2.** Proyección del crecimiento del parque automotor a cien años.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 3.** Proyección a cien años del crecimiento en el número de automóviles, camionetas y camperos.  
Fuente: elaboración propia.

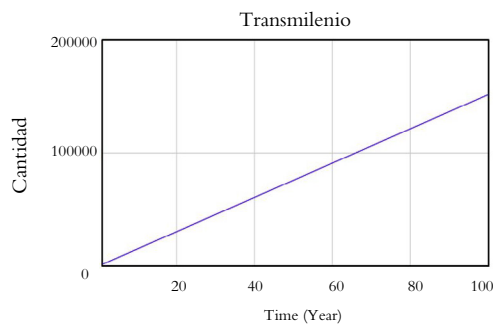


**Figura 4.** Proyección del crecimiento del transporte público a cien años.  
Fuente: elaboración propia.



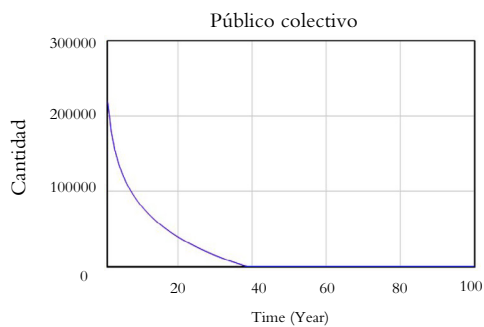
**Figura 5.** Proyección a cien años del crecimiento en el número de motos.

**Fuente:** elaboración propia.



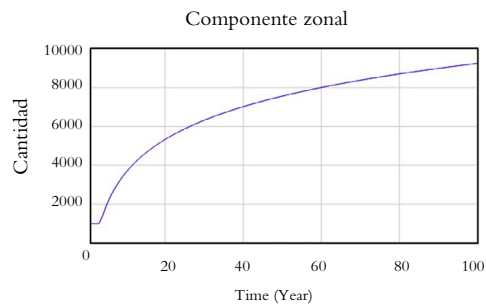
**Figura 6.** Proyección a cien años del crecimiento del número de buses de Transmilenio.

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 7.** Proyección a cien años del comportamiento del transporte público colectivo.

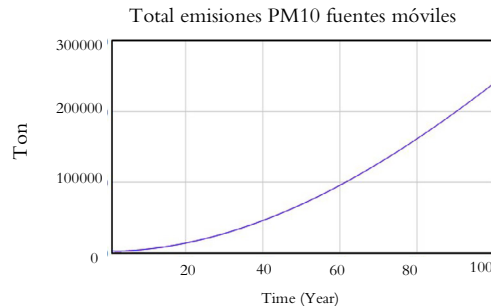
**Fuente:** elaboración propia.



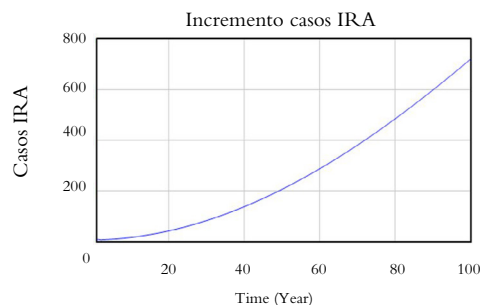
**Figura 8.** Proyección del crecimiento de componente zonal a cien años.  
Fuente: elaboración propia.

### 3.4.1.1 Escenario 1

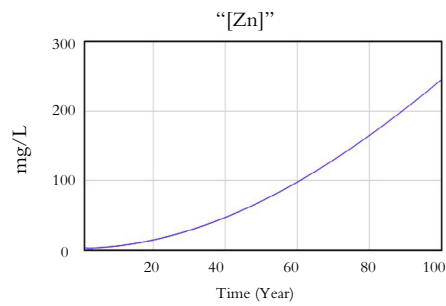
La modelación del primer escenario muestra un aumento sistemático de emisiones de PM10 por parte del parque automotor (figuras 9 a 14), el cual cada año será mayor si las tasas de crecimiento de los vehículos con combustibles convencionales aumentan más que el crecimiento de vehículos con motor eléctrico. Es decir, si la cantidad de vehículos con las mismas características investigadas del 2017 continúa aumentando, el sistema de transporte seguirá aportando significativas cantidades de PM10 en Bogotá, hasta llegar a un valor aproximado de 238 000 toneladas de PM10 en el año 2117 (figura 9), una cifra muy alarmante de cara al futuro.



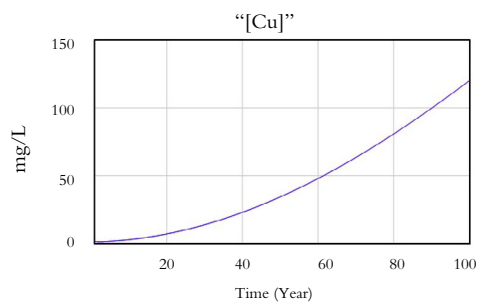
**Figura 9.** Proyección a cien años de emisiones de PM10 en el primer escenario.  
Fuente: elaboración propia.



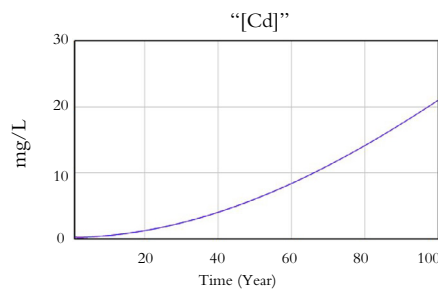
**Figura 10.** Proyección a cien años de los casos de IRA en el primer escenario.  
Fuente: elaboración propia.



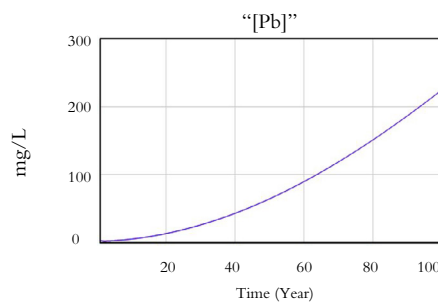
**Figura 11.** Proyección a cien años de la concentración de Zn en el primer escenario.  
**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 12.** Proyección a cien años de la concentración de Cu en el primer escenario.  
**Fuente:** elaboración propia.



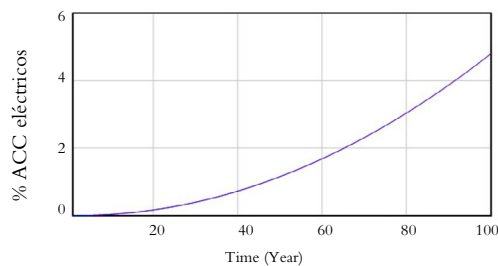
**Figura 13.** Proyección a cien años de la concentración de Cd en el primer escenario.  
**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 14.** Proyección a cien años de la concentración de Pb en el primer escenario.  
**Fuente:** elaboración propia.

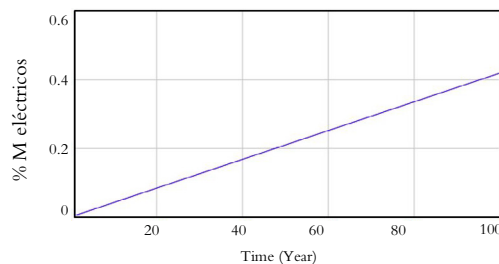
Así como aumentan los casos de IRA (figura 10) debido a la gran cantidad de PM10 emitido por el parque automotor, también se incrementa la concentración de los metales en la escorrentía urbana que se dirige al río Bogotá (figuras 11 a 14). Los valores más altos de metales pesados son los de Zn, aproximado de 240 mg/L (figura 11), seguido del Pb, con 220 mg/L (figura 14), Cu, con 125 mg/L (figura 12), y en menor cantidad el Cd, con 20 mg/L (figura 13). El valor del aumento en los casos de IRA es preocupante, pues de acuerdo con el modelo realizado, en cien años la tasa anual podrá ser de ochocientos por cada mil habitantes, es decir que el 80% de la población sufriría de esta enfermedad, la cual, si no es controlada, puede llegar a ser cancerígena.

Mediante la simulación se observa que la tasa de compra de vehículos eléctricos e híbridos en Colombia es muy baja (figuras 15 a 18), de hecho, llega a porcentajes realmente bajos en el período simulado. En el país, al inicio del año 2020 se han registrado 489 vehículos eléctricos y 376 híbridos en un parque de cinco millones de vehículos. Por otro lado, solo hay 1100 motos eléctricas de las siete millones registradas. Una de las razones por las cuales la adquisición de vehículos eléctricos e híbridos es muy baja en Colombia es que su costo no es competitivo frente a uno convencional de combustión fósil.



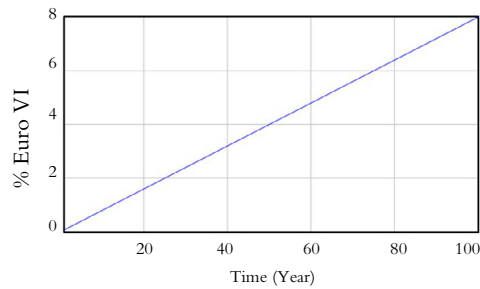
**Figura 15.** Proyección a cien años del %ACC eléctricos en el primer escenario.

**Fuente:** elaboración propia.

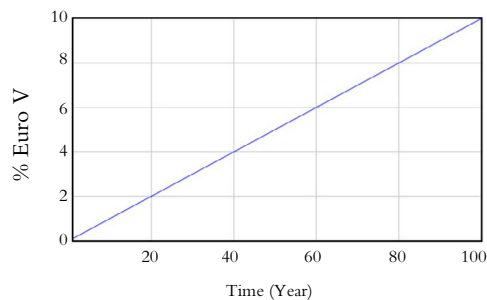


**Figura 16.** Proyección a cien años del %M eléctricas en el primer escenario.

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 17.** Proyección a cien años del % Euro VI en el escenario 1.  
Fuente: elaboración propia.

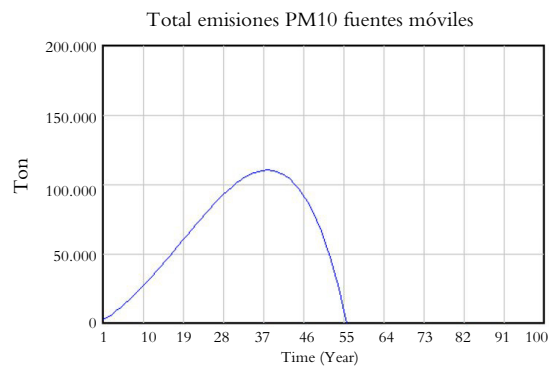


**Figura 18.** Proyección a cien años del % Euro V en el escenario 1.  
Fuente: elaboración propia.

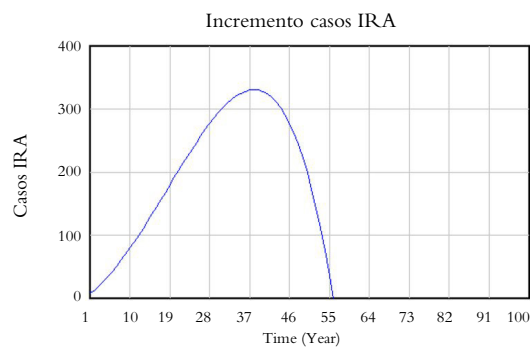
### 3.4.1.2 Escenario 2

En el segundo escenario se aumentó la cantidad de vehículos y motos eléctricos en 100%, y de igual forma en el transporte público, lo cual significa que se llegaría a un valor máximo de aproximadamente 110 000 toneladas en el año 2055 (figura 19). Esto representa una disminución paulatina de emisión de PM10 del más del 50% con respecto al que se proyectaba para el 2117 en el primer escenario. Cuando la transición de uso de combustible fósil a motor eléctrico se haya realizado según lo planteado, la tasa anual de los casos de IRA atribuidos a la emisión de PM10 será de 83 por cada 1000 habitantes (figura 20); este pico ocurrirá en el año 2055 y luego los casos empezarán a disminuir. También es notoria la disminución de las concentraciones de metales pesados en la escorrentía, pues pasan de un nivel máximo esperado de 240 mg/L a 51 mg/L de Zn (figura 21). También habría una disminución en la concentración de metales pesados (figuras 22 a 24).

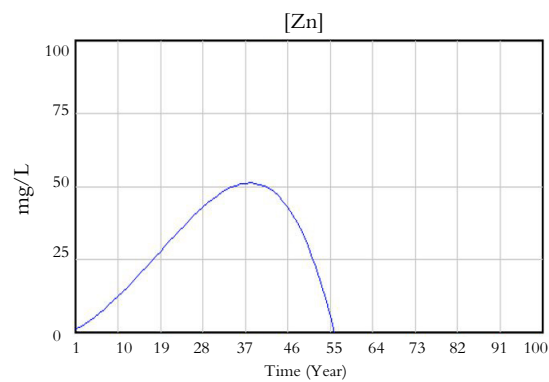




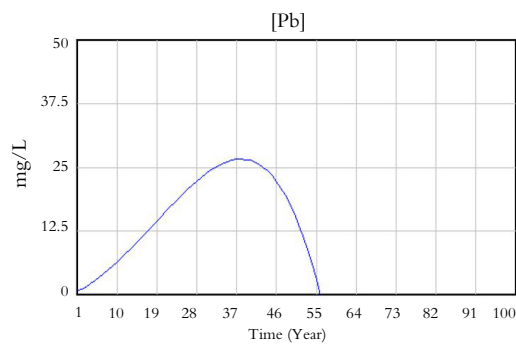
**Figura 19.** Proyección a cien años de las emisiones de PM10 en el segundo escenario.  
Fuente: elaboración propia.



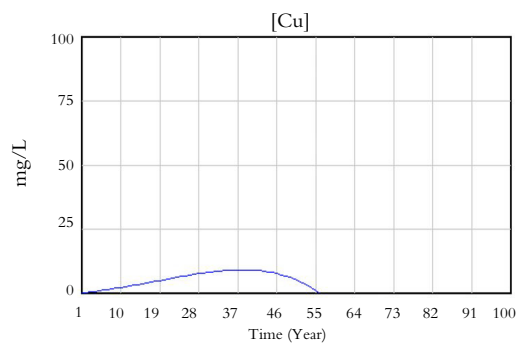
**Figura 20.** Proyección a cien años en los casos de IRA en el segundo escenario.  
Fuente: elaboración propia.



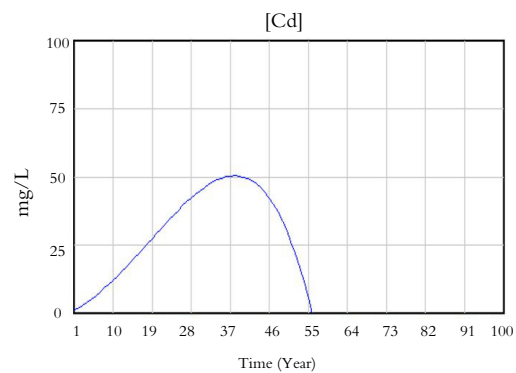
**Figura 21.** Proyección a cien años de las concentraciones de Zn en el segundo escenario.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 22.** Proyección a cien años de la concentración de Pb en el segundo escenario.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 23.** Proyección a cien años de la concentración de Cu en el segundo escenario.  
Fuente: elaboración propia.



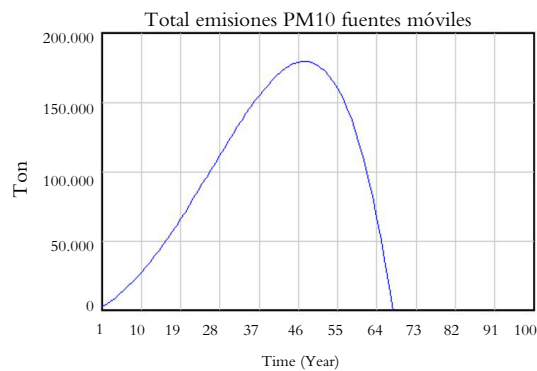
**Figura 24.** Proyección a cien años de la concentración de Cd en el segundo escenario.  
Fuente: elaboración propia.

Este segundo escenario es el que más se desea, pero el más difícil de lograr, puesto que requiere inversiones muy elevadas, de mayor interés social y de nuevas resoluciones y políticas para conseguir un sistema de transporte con esta tecnología. Esto se vería reflejado en un parque automotor más eficiente y sostenible que reduciría el costo en materia de salud pública ocasionado por las emisiones contaminantes y contribuiría a la competitividad del país.

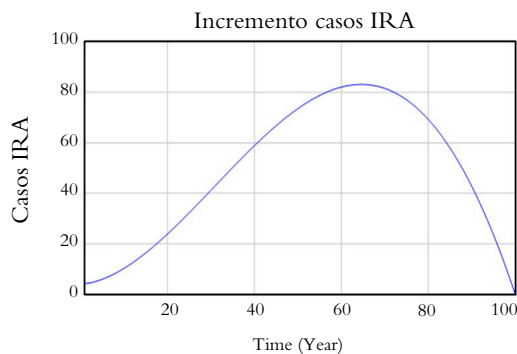
### 3.4.1.3 Escenario 3

El cambio en el parque automotor evaluado en el tercer escenario refleja una situación intermedia, con probabilidades de que se logre, en la cual se irán haciendo cambios progresivos en proporción de la flota eléctrica. El comportamiento del crecimiento del parque automotor eléctrico en el sector privado, a pesar de su impacto, no cuenta aún con suficiente apoyo de las entidades gubernamentales para que estos procesos de conversión a un sistema de movilidad cero emisiones sea posible, y es aquí donde representamos las demoras y brechas en el tiempo (figura 25).

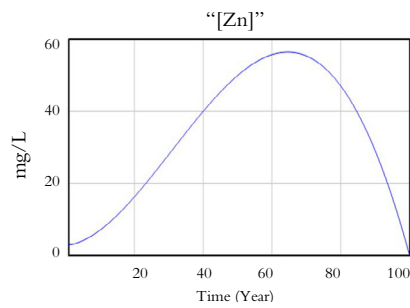
Así pues, este escenario contempla que existe un incremento al 50% de vehículos y motos eléctricas. Debido a estas condiciones, se espera que los casos de IRA disminuyan (figura 26) a una tasa anual mínimo de 331 por cada 1000 habitantes, lo cual representa el 8,3%. La concentración de metales pesados llegaría a valores máximos en el año 2081, aproximadamente de 57 mg/L de Zn (figura 27), 50 mg/L de Pb (figura 28), 28 mg/L de Cu (figura 29) y 4,7 mg/L de Cd (figura 30). Esta disminución se atribuye a que los vehículos con motores eléctricos no emiten PM10 y a que la tecnología Euro VI sí posee filtro, el cual reduce entre el 85% y el 99,9% las emisiones de material particulado de la flota reemplazada (Transmilenio, 2019).



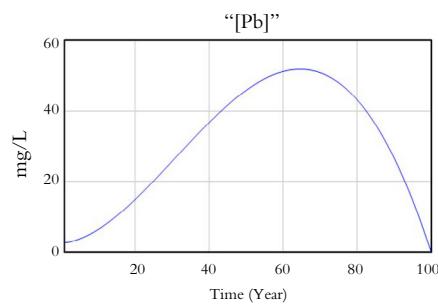
**Figura 25.** Proyección a cien años de las emisiones de PM10 en el tercer escenario.  
Fuente: elaboración propia.



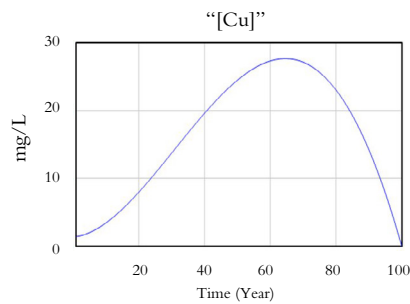
**Figura 26.** Proyección a cien años de los casos de IRA en el tercer escenario.  
Fuente: elaboración propia.



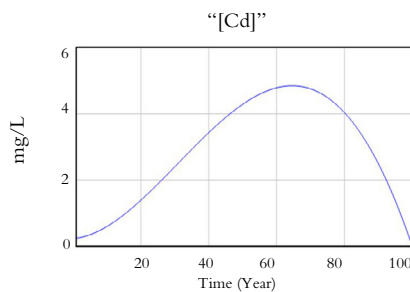
**Figura 27.** Proyección a cien años de la concentración de Zn en el tercer escenario.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 28.** Proyección a cien años de la concentración de Pb en el tercer escenario.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 29.** Proyección a cien años de la concentración de Cu en el tercer escenario.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 30.** Proyección a cien años de la concentración de Cd en el tercer escenario.  
Fuente: elaboración propia.

Para lograr este escenario, Colombia debe proponerse gravar todos los vehículos de más de cinco años, con mayores tasas para las unidades más viejas y motores más grandes, y así desincentivar el uso de vehículos más viejos y promover el de unidades más nuevas. Se propone usar mecanismos fiscales (exención del IVA) para fomentar la sustitución voluntaria de vehículos en todas las modalidades de transporte terrestre y segmentos (no solo de servicio público), siempre y cuando los vehículos que van a ingresar superen los estándares vigentes cuando se haya desintegrado un vehículo de manera voluntaria. Asimismo, los comercializadores de esta tecnología deben enfocarse en penetrar en primera instancia en el sector público, que hace mayor uso de las vías, y posteriormente en los consumidores del sector privado. Finalmente, es importante que el Estado amplíe y promueva beneficios para reducir el costo de las adquisiciones y establecer un arancel de 0% para cada unidad importada.

### 3.5 Matriz DOFA del escenario 3

A continuación, en la tabla 2 se presenta la matriz DOFA del tercer escenario.

Tabla 2. Matriz DOFA del escenario equilibrado (escenario 3)

Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor eficiencia energética.</li> <li>• El vehículo no es contaminante.</li> <li>• Confort.</li> <li>• Mayor facilidad de aparcamiento.</li> <li>• Baja emisión de ruido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los recorridos diarios del vehículo eléctrico son compatibles con las autonomías actuales de las baterías.</li> <li>• Mejora de la imagen corporativa de la entidad o empresa de flotas (taxis).</li> <li>• Contribución a la mejora de la gestión de la red eléctrica.</li> <li>• Implantación de infraestructura de recarga en edificios.</li> <li>• Fomento del transporte público con el vehículo eléctrico.</li> <li>• Reducción de la dependencia de los combustibles fósiles.</li> <li>• Legislación más drástica para las emisiones de contaminantes asociados a la movilidad.</li> <li>• Existencia de incentivos económicos.</li> <li>• Existencia de alguna legislación específica para la implantación de estaciones privadas de recarga en edificios de uso residencial.</li> </ul>
Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de conocimientos de personal técnico acerca de los servicios relacionados con el vehículo eléctrico (reparación, recarga, etc.).</li> <li>• Necesidad de reducir los costos de las baterías.</li> <li>• Tiempo elevado de recarga.</li> <li>• Tiempo elevado de recarga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento del precio del litio si las reservas son limitadas y la demanda elevada.</li> <li>• Creciente eficiencia de los motores de combustión interna.</li> <li>• Dificultad en la homologación para una infraestructura de recarga pública y dificultades en el desarrollo de la infraestructura de recarga privada.</li> <li>• Dificultad en la homologación para una infraestructura de recarga pública y dificultades en el desarrollo de la infraestructura de recarga privada.</li> </ul>

Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incertidumbre en los precios de la electricidad.</li> <li>• Infraestructura de recarga pública de coste elevado.</li> <li>• Precio elevado del vehículo.</li> <li>• Escasa inclusión del vehículo eléctrico en flotas vehiculares.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de visión del vehículo eléctrico como elemento energéticamente viable.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

## 4. Conclusiones

Con el modelo de dinámica de sistemas desarrollado se realizaron los análisis del comportamiento temporal de niveles de contaminación por emisión de PM10 y los casos de IRA atribuidos a esta condición, lo cual permitió desarrollar hipótesis dinámicas mediante escenarios que explican las posibles causas del problema. A pesar de que el escenario ideal modelado fue el uso del 100% de vehículos eléctricos, es indecoroso debido a las altas inversiones que se tendrían que realizar por el costo de los automóviles eléctricos, al poco avance en la implementación de estaciones de recarga en puntos estratégicos para largos viajes y al porcentaje de colombianos que pueden acceder a esta alternativa. En consecuencia, es más conveniente que el nuevo modelo de transporte se base en las condiciones planteadas en el tercer escenario, y que se consideren fuentes combustibles, como producido por fermentación a partir de granos como el maíz o la caña de azúcar para reducir los gases de efecto invernadero.

Las emisiones de PM10, asociadas al crecimiento poblacional y al aumento del parque automotor, fomentan, alteran y provocan desequilibrio en el ambiente debido a que afectan directa e indirectamente la calidad del aire y la salud de los ciudadanos por IRA, así como indirectamente la calidad de las aguas superficiales como consecuencia del transporte de metales pesados en la escorrentía urbana. El modelo propuesto permite determinar que el metal pesado con mayor concentración en todos los escenarios es el zinc, seguido por el plomo y el cobre, y en menor concentración el cadmio.

Es importante que en Bogotá se aprueben políticas con beneficio, como que el arancel a vehículos eléctricos sea de 0% e híbridos 5% en el 2030, para garantizar una estabilidad jurídica de la política con el fin de incentivar el uso de tecnologías limpias. También se deben implementar programas para incrementar el número de vehículos eléctricos e híbridos en las flotas de servicio público en el perímetro urbano y rural. De igual forma, para que esta tecnología sea eficiente y sostenible, se deben desarrollar planes de implementación de estaciones de recarga, programas de disposición final de baterías de vehículos eléctricos, establecer tarifas diferenciales para carga de vehículos eléctricos, crear programas de capacitación a nivel nacional sobre cuidados de los vehículos eléctricos, promover foros y seminarios nacionales y regionales sobre movilidad sostenible, participar en el programa Proure y Eficiencia Energética, excluir del 1 x 1 (ingreso por reposición) vehículos eléctricos e híbridos y desarrollar CONPES para movilidad sostenible.

## Referencias

- Bilash, B. K., Fatimah, M. A., & Mohd, K. M. (2017). *System dynamics: Modelling and simulation*. Springer.
- Clean Air Institute. (2013). *La calidad del aire en América Latina: Una visión panorámica*. <https://bit.ly/2N3t6Ae>
- Cifuentes, L., Krupnick, A. J., O’Ryan, R., & Toman, M. A. (2005). *Urban air quality and human health in Latin America and the Caribbean*. Organización Panamericana de la Salud. <https://bit.ly/3nu6KYe>
- Fletcher, T. D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51, 261-279. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>
- Gaitán, M., Cancino, J., & Beherentz, E. (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. *Revista de Ingeniería*, 26, 81-92. <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n26/n26a11.pdf>
- Gromaire-Mertz, M. C., Garnaud, S., Gonzalez, A., & Chebbo, G. (1999). Characterisation of urban runoff pollution in Paris. *Water Science and Technology*, 39(2), 1-8. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00002-5)
- Harremoës, P. (1997). Integrated water and waste management. *Water Science and Technology*, 35(9), 11-20. <https://doi.org/10.2166/wst.1997.0327>
- Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, J., & Haaning Nielsen, A. (2010). *Urban and highway stormwater pollution: Concepts and engineering*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439826867>
- Kim, L.-H., Kayhanian, M., Zoh, K.-D., & Stenstrom, M. K. (2005). Modeling of highway stormwater runoff. *Science of The Total Environment*, 348(1-3), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.12.063>
- Leal, Y., & Castiblanco, E. (2020). La contaminación atmosférica en el municipio de San José de Cúcuta – Colombia. *Saber, Ciencia y Libertad*, 15(1), 176-191. <https://doi.org/10.18041/2382-3240/saber.2020v15n1.6309>
- Lee, S., Suits, M., Wituszynski, D., Winston, R., Martin, J., & Lee, J. (2020). Residential urban stormwater runoff: A comprehensive profile of microbiome and antibiotic resistance. *Science of The Total Environment*, 723, Article 138033. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138033>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2016, septiembre 27). La OMS publica estimaciones nacionales sobre la exposición a la contaminación del aire y sus repercusiones para la salud. <https://bit.ly/3bJEgXz>
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2017). Observatorio de movilidad. <https://bit.ly/3NFLRDU>
- Torres, C. S. (2010). *Línea de Calidad de Aire y Salud*. [https://oab.ambientebogota.gov.co/?post\\_type=dlm\\_download&p=4104](https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=4104)
- Transmilenio. (2019, julio 1). Empiezan a rodar los primeros 140 buses de Transmilenio a gas natural en Bogotá. <https://bit.ly/3la7nzz>

Walsh, C. J., & Kunapo, J. (2009). The importance of upland flow paths in determining urban effects on stream ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 28(4), 977-990. <https://doi.org/10.1899/08-161.1>

Zhang, Z., Cui, B., & Fan, X. (2012). Removal mechanisms of heavy metal pollution from urban runoff in wetlands. *Frontiers of Earth Science*, 6(4), 433-444.