

ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Simulation Model for the Evaluation of Environmental Policies Through the Characterization of Air Pollution in the City of Bogotá using System Dynamics

INGENIERÍA AMBIENTAL

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

Juan M. Sánchez-Céspedes^{1§}, Andrés E. Gaona-Barrera¹, David L. Dallos-Parra¹

¹*Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C., Colombia.*

§jmsanchezc@udistrital.edu.co, aegaonab@udistrital.edu.co, dldallosp@correo.udistrital.edu.co

Recibido: 1 de septiembre de 2021 – **Aceptado:** 10 de diciembre de 2021

Abstract

Poor air quality in large cities such as Bogotá, due to fixed and mobile emission sources of particulate matter, negatively affects the social, economic and ecological systems of the city. Population growth is one of the main causes that influence air pollution. Therefore, it is considered necessary to analyze the cause-effect relationships of pollution, its sources and the effects on the population. For this reason, developing a model using computer tools such as system dynamics, which can evaluate different environmental policy scenarios, will help to reduce pollution levels and improve the life quality of the population. The methodology used was quasi-experimental with a quantitative approach, divided into four stages, gathering information, proposing the causal diagram, developing the simulation model and evaluating scenarios. Vensim® was the software used as the simulation tool. As a result, it was found that highly polluting stationary and mobile sources cause an uncontrolled increase in PM10. It was also found that annual conversion rates to clean technologies must be 10% per year or higher to achieve a 50% reduction in

Como citar:

Sánchez-Céspedes JM, Gaona-Barrera AE, Dallos-Parra DL. 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*, 2022; e21911573. <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i2.11573>



PM10 levels, in the medium and long term. The main conclusions were to determine that the use of simulation technologies such as system dynamics are very useful to formulate more effective environmental policies. The simulation presented the need for environmental policies to be long-term structural policies that do not vary depending on the change of government.

Keywords: *Environmental Policies, Air Pollution, PM10, Systems Dynamics, Bogotá.*

Resumen

La mala calidad del aire en las grandes ciudades como Bogotá, debido a fuentes de emisión fijas y móviles de material particulado, afectan negativamente a los sistemas sociales, económicos y ecológicos de la ciudad. El crecimiento de la población es una de las principales causas que influye en la contaminación atmosférica. Por lo que se considera necesario analizar las relaciones causa-efecto de la contaminación, sus fuentes y los efectos en la población. Por tal motivo, desarrollar un modelo usando herramientas informáticas como dinámica de sistemas, las cuales pueden evaluar diferentes escenarios de políticas ambientales, ayudaran a reducir los niveles de contaminación y mejorar la calidad de vida de la población. La metodología utilizada fue de tipo cuasiexperimental con enfoque cuantitativo, dividido en cuatro etapas, recolección de información, planteamiento del diagrama causal, desarrollo del modelo de simulación y evaluación de escenarios, se uso como herramienta de simulación el software Vensim®. Como resultado se encontró que las fuentes fijas y móviles altamente contaminantes ocasionan un incremento descontrolado del PM10. También se encontró que las tasas de conversión anual a tecnologías limpias deben ser del 10% anual o superiores para lograr una reducción del 50% en los niveles de PM10, al mediano y largo plazo. Las principales conclusiones fue determinar que el uso de tecnologías de simulación como dinámica de sistemas, son muy útiles para formular políticas ambientales más eficaces. La simulación presentó la necesidad de que las políticas ambientales deben ser políticas estructurales de largo plazo que no varíen en función del cambio de gobierno.

Palabras clave: *Políticas Ambientales, Contaminación del Aire, PM10, Dinámica de Sistemas, Bogotá.*

1. Introducción

El desarrollo económico e industrial que se ha presentado en los dos últimos siglos, iniciando por la revolución industrial del siglo XIX, acompañada con el descubrimiento y uso de fuentes de energía no renovables como los combustibles fósiles tales como el carbón, el petróleo y el gas natural, han traído beneficios de carácter económico, pero también han conllevado impactos ambientales negativos, los cuales se han evidenciado desde la mitad del siglo XX. Estos impactos comenzaron a generar condiciones indeseadas en la calidad de vida de los seres humanos, ocasionando problemas de salud, especialmente provocando enfermedades de tipo respiratorio y cardiovascular, donde una de las causas principales es la contaminación del aire generada por la combustión de combustibles fósiles ⁽¹⁾.

Acorde a la OMS (Organización Mundial de la Salud), la contaminación del aire representa un importante riesgo ambiental y para la salud de la población mundial. La OMS determinó que el material particulado (PM10) que son partículas sólidas o líquidas de un diámetro de 10 micras pero mayor a 2,5 micras; pueden penetrar profundamente en los pulmones e inducir la reacción de la superficie y las células de defensa ⁽²⁾. También estiman que la contaminación ambiental del aire provoca 4,2 millones de muertes por año a nivel mundial ⁽³⁾. Un estudio desarrollado por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer de la OMS, en el año 2013 determinó que la contaminación del aire es carcinógena para el ser humano, especialmente con el pulmón y existe una estrecha relación con el cáncer de vías urinarias y vejiga ⁽³⁾. La mayoría de estos contaminantes

son causados por la quema de combustibles de origen fósil ⁽⁴⁾.

En América, la Organización Panamericana para la Salud (OPS), estableció que la contaminación del aire es el principal riesgo ambiental para la salud ⁽⁵⁾. Se estima que hay 93 mil muertes anuales en países de ingresos bajos y medios y 44 mil muertes anuales en países de ingresos altos por culpa de la contaminación del aire ⁽⁶⁾. Una investigación determinó que 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 la contaminación del aire ⁽⁴⁾; pero una de las situaciones más apremiantes, es que más de la mitad de las muertes de niños menores de 5 años por infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores (ALRI) son debidas material particulado producido del uso de combustibles fósiles ⁽⁷⁾.

En Colombia, se determinó que la principal fuente de contaminación del aire es el uso de combustibles fósiles de los cuales el 41% del total se encuentra concentrado en 8 ciudades ⁽⁸⁾. Las mayores emisiones de material particulado menor a 10 micras (PM10) son óxidos de nitrógeno (NOx) y monóxido de carbono (CO), las cuales son generadas por fuentes móviles como vehículos, motocicletas, aviones, etc ⁽⁹⁾, de los cuales el 80% de la contaminación originada por las fuentes móviles es ocasionada por vehículos que usan diésel ⁽¹⁰⁾. A parte del uso de combustibles fósiles, se han identificado otras fuentes que contribuyen a la contaminación del aire, como los incendios accidentales y no accidentales. También, otras causas que producen la generación de PM10 son la quema de cultivos, la cual es una práctica ilegal y la quema de bosques, la cual es una práctica

utilizada para el uso posterior de la tierra en cultivos ilícitos.

En Bogotá, se realizó un estudio con niños menores de 5 años en las localidades de Puente Aranda, Kennedy y Fontibón, donde se buscó determinar los efectos de la exposición con material particulado menor a 10 micras (PM10). El estudio mostró que el 79,6% de los niños presentó silbidos en el pecho en los jardines infantiles ubicados en las zonas de mayor exposición frente al 69% de las zonas de menor exposición. Se detectó que los niños menores de 5 años que van a jardines infantiles y están expuestos a mayor contaminación del aire y tienen 1,7 veces más riesgo de ausentismo escolar por enfermedad respiratoria ⁽¹¹⁾.

Todo lo expuesto anteriormente permite establecer los grandes problemas que genera en la salud humana la contaminación del aire, y en especial el generado por vehículos que usan fuentes de energía de origen fósil. Debido a que la combustión de estos combustibles genera emisiones con material particulado menor a 10 micras (PM10), lo cual es muy perjudicial para la salud como lo estableció la OMS.

Por tal motivo, a nivel mundial y en Colombia existe una gran preocupación por la contaminación del aire, lo cual se ha evidenciado desde el siglo pasado por los problemas de salud que han conllevado. Por lo cual, diversos países han establecido diferentes convenios internacionales, en aras de reducir el impacto ambiental negativo generado por el desarrollo industrial y la contaminación del aire. Entre los más reconocidos se encuentran el Convenio de Estocolmo, el cual tiene como objetivo proteger la salud humana y el medio ambiente frente a los Contaminantes Orgánicos Persistentes ⁽¹²⁾. Otro Convenio es el de Viena sobre Ozono, este tiene como objetivo establecer medidas para reducir el uso de sustancias que disminuyan la capa de

ozono, y de esta forma evitar los daños a la salud y al medio ambiente, este Convenio ha sido ajustado en 4 ocasiones con las enmiendas de Montreal, Londres, Copenhague, y Beijing ⁽¹³⁾. También está el convenio del Protocolo de Kioto, este protocolo compromete a los países industrializados a estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero ⁽¹⁴⁾. Por último, las Naciones Unidas desarrollaron los Objetivos del Desarrollo Sostenible a través del PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), estos objetivos globales son voluntarios, los cuales tienen el propósito erradicar la pobreza, proteger el medio ambiente, combatir el Cambio Climático y asegurar la prosperidad para todos, como parte de una nueva agenda de Desarrollo Sostenible ⁽¹⁵⁾.

En Colombia se han desarrollado diferentes políticas ambientales que han buscado reducir la contaminación del aire. La primera de ellas se enuncia en 1967 donde se instalaron las primeras redes para el monitoreo de la calidad del aire ⁽¹⁶⁾. En 1973 se expidió la Ley 23, la cual tenía como objetivo “Prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente y buscar el mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables, para defender la salud y el bienestar de todos los habitantes del territorio nacional” ⁽¹⁷⁾. Luego, con la Ley 9 de 1979, se definieron normas, programas y medidas para la protección del medio ambiente ⁽¹⁸⁾. Acorde a la Ley 9 de 1979 en 1982 se emitieron normas para regular la emisión y concentración de contaminantes a la atmósfera ⁽¹⁹⁾. En el 2001 y luego en el 2003 se expidieron normas específicas para Bogotá, en las cuales se establecieron estándares más estrictos y se incluyeron contaminantes que no habían sido contemplados en la regulación nacional ^(20,21). En el 2005, se aprueba el documento Conpes 3344 el cual presenta los lineamientos para la formulación de la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire ⁽⁹⁾. En el

2010, se generó la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire, la cual tenía como objetivo “Impulsar la gestión de la calidad del aire en el corto, mediano y largo plazo, con el fin de alcanzar los niveles de calidad del aire adecuados para proteger la salud y el bienestar humano, en el marco del desarrollo sostenible” ⁽⁸⁾. Por último, en 2018 se genera la política de mejoramiento del aire, la cual tiene como objetivo general “Reducir la concentración de contaminantes en el aire que afectan la salud y el ambiente” ⁽²²⁾, por lo cual se plantea entre los objetivos específicos reducir las fuentes contaminantes de las fuentes móviles y fijas, y también crear estrategias de prevención, reducción y control de la contaminación del aire ⁽²²⁾.

Actualmente, se están buscando generar políticas que ayuden a promover la movilidad con vehículos amigables al medio ambiente, por ejemplo, el uso de bicicletas o vehículos eléctricos ⁽¹⁰⁾. Por lo anteriormente expuesto se establece la necesidad de generar políticas públicas ambientales que contribuyan significativamente a mejorar la calidad del aire y este alineadas con las directrices internacionales y nacionales. Por tal motivo el uso de técnicas y herramientas que contribuyan con este propósito son de gran utilidad. Por ello, el presente artículo presenta el uso de dinámica de sistemas a través de la herramienta Vensim®, para analizar diferentes políticas ambientales potenciales que ayuden a reducir la contaminación del aire y específicamente a la generación de PM10 en la ciudad de Bogotá.

Es de aclarar que en el modelo de simulación desarrollado solo se tomaron los datos correspondientes al material particulado PM10, pero hay otros tipos de contaminantes del aire que son también perjudiciales para la salud como el material particulado PM2.5, el monóxido de carbono (CO), óxidos de Nitrógeno (NO, NO₂,

NOx) y dióxido de azufre (SO₂). Pero, el principal aporte del presente estudio es el modelo de simulación que puede ser homologado para analizar los otros tipos de contaminantes del aire. Por tal motivo, se recomienda para estudios futuros hacer las simulaciones con teniendo en cuenta los otros tipos. También, el modelo puede ser replicado para otras ciudades. Por lo cual, la metodología es uno de los elementos más importantes de la investigación, la cual se explica a continuación.

2. Metodología

Para el desarrollo de un modelo de contaminación de aire por PM₁₀ basado en dinámica de sistemas, con el fin de evaluar políticas públicas en el mejoramiento de la calidad del aire, se aplicó una metodología cuasiexperimental con enfoque cuantitativo^(23,24). El método consiste en cuatro (4) etapas, recolección de información y modelado de fuentes de contaminación; planteamiento del diagrama causal; desarrollo del modelo de simulación; y evaluación de escenarios. A continuación, se explica en detalle cada una de estas etapas.

2.1 Recolección de información y modelado de fuentes de contaminación

A partir de la información publicada por las diferentes entidades gubernamentales y/o privadas de la ciudad de Bogotá; Secretaria de Hacienda, Secretaria de Movilidad, Transmilenio, Cámara de Comercio de Bogotá, entre otras, se adquiere información asociada a las principales fuentes de contaminación del aire en Bogotá: fijas y móviles. A partir de cada una de las fuentes establecidas, se realiza un análisis particular basado en regresiones lineales y no lineales para predecir el comportamiento en el

tiempo de las diferentes variables como población de Bogotá, cantidad de diferentes tipos de vehículos de acuerdo con el combustible usado, número de hornos y calderas industriales. Lo anterior, permite caracterizar el modelo de simulación y plantear los escenarios de interés para evaluar las políticas públicas con relación al control ambiental del aire de la ciudad de Bogotá.

2.1.1 Población de Bogotá D.C.

En la Figura 1 se presenta el crecimiento poblacional y la regresión lineal estimada, en la cual se obtuvo un crecimiento anual de 101.664 habitantes con un R² de 0,99995.

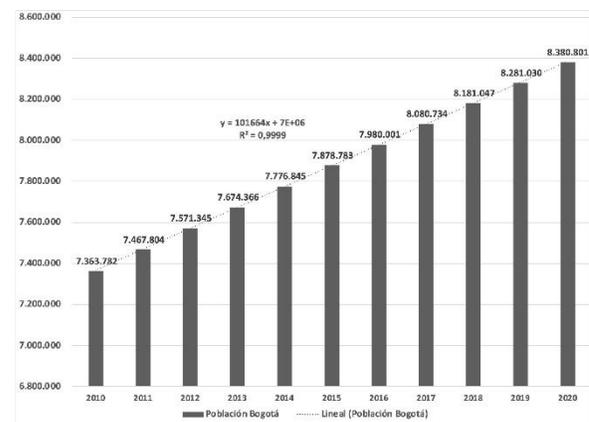


Figura 1. Población de Bogotá, Fuente: Autores⁽²⁵⁾.

2.1.2 Fuentes de contaminación móvil de PM₁₀

Las fuentes de contaminación se pueden clasificar en dos (2) tipos: móviles y fuentes fijas. Para modelar las fuentes se tomó de base el año 2018 y una muestra histórica desde el año 2010 al 2018. Para el caso de estudio, sólo se consideró el material particulado PM₁₀, el cual corresponde a las partículas sólidas o líquidas cuyo tamaño está comprendido entre 2,5µm y 10µm.

Las fuentes móviles son los vehículos que emiten material particulado durante su proceso de combustión de motor. Las fuentes se clasificaron por categoría de vehículos, las cuales fueron particulares colectivos (automóviles, camperos y camionetas), SITP (Sistema Integrado Transporte Público), transporte de carga, taxis y motocicletas. También, cada categoría se divide de acuerdo al tipo de combustible empleado en el vehículo (diésel, gasolina, gas natural vehicular-GNV), debido a que la cantidad de emisiones tiene

relación directa con el tipo de motor a combustión.

En la Tabla 1 se puede observar el número de vehículos por cada categoría y combustible que utiliza. También se presenta el factor de emisión de partículas PM10 en función de gramos (g/km) generados por kilómetro recorrido, según la clasificación. Es posible estimar las emisiones de PM10 totales a causa de cada tipo de fuente móvil contaminante, de acuerdo a la ecuación (1).

Tabla 1. Fuente móviles de emisión PM10 para Bogotá año 2018.

Tipo	Combustible	Número de Vehículos	PM10 (g/km)	Distancia Recorrida Promedio Anual (km)	PM10 x Vehículo (kg/Año)	PM10 Total (Ton/Año)
Particulares (Automóviles, Camperos y Camionetas)	Gasolina	1.624.005	0,021	9.815	0,206	334,72
Particulares (Automóviles, Camperos y Camionetas)	Diésel	105.173	0,273	9.815	2,679	281,80
Particulares (Automóviles, Camperos y Camionetas)	GNV	16.128	0,003	9.815	0,029	0,47
Transporte Carga	Diésel	36.864	0,867	18.249	15,821	583,23
Transporte Carga	Gasolina	26.456	0,258	18.249	4,708	124,56
Transporte Carga	GNV	3.827	0,003	18.249	0,055	0,21
SITP	Diésel	9.552	0,198	92.346	18,285	174,66
SITP	Gasolina	3.898	0,123	92.346	11,359	44,28
SITP	GNV	223	0,003	92.346	0,277	0,06
Taxi	Gasolina	9.923	0,025	49.026	1,226	12,16
Taxi	GNV	39.693	0,003	49.026	0,147	5,84
Motocicletas	Gasolina	480.404	0,016	19.385	0,310	149,00
TOTAL		2.356.146	TOTAL			1.711,0

Fuente: Autores⁽²⁶⁻²⁸⁾

$$\text{Emisión(Ton/año)} = \frac{NV \cdot DR \cdot FE}{10^6} \quad (1)$$

En la ecuación (1), la variable NV es el número de vehículos, FE el factor de emisión en (g/km) y DR los kilómetros recorridos por año.

Las fuentes móviles para el 2018 se modelaron a partir de 2.356.146 vehículos⁽²⁷⁾, en la ciudad de Bogotá. El vehículo que más contamina en la ciudad de Bogotá corresponde a los buses del SITP que usan diésel, en segundo lugar, el transporte de carga que emplea diésel y en tercer lugar los de SITP en gasolina. Sin embargo,

evaluando las flotas de vehículos, el grupo de fuentes móviles que más contaminan son los de transporte de carga de diésel, los vehículos particulares en diésel y los buses del SITP en diésel. Por lo tanto, los vehículos que más contaminan son los de combustión a diésel, los cuales se deben reemplazarse por otros que generen menores emisiones como son los vehículos que usan GNV.

Para el modelamiento de los diferentes tipos de vehículos se encontró la relación de número de vehículos x mil habitantes, a partir de la serie

histórica desde el año 2010 al 2018. De esta manera se establece la función de crecimiento de los vehículos en relación con el crecimiento poblacional. Para hallar esta función se usó diferentes técnicas de regresión.

En la Figura 2 se presenta la serie histórica de la relación de vehículos particulares colectivos (automóviles, camionetas y camperos) por cada 1.000 habitantes. También se presenta la función que describe su comportamiento en el tiempo. La función es logarítmica con R2 de 0,9743.

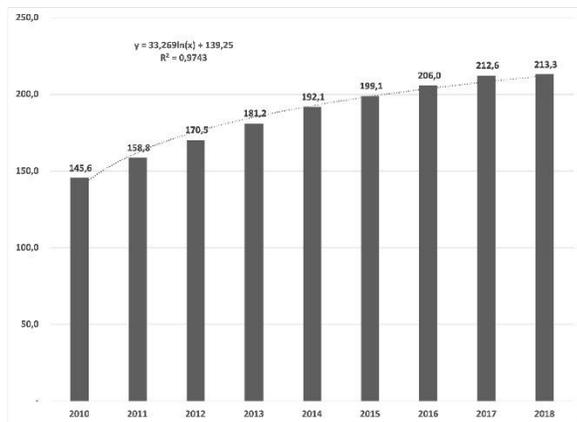


Figura 2. Vehículos Particulares Colectivos x 1.000 habitantes 2010-2018, Fuente: Autores ⁽²⁵⁾.

Para el transporte de carga solo fue posible obtener los datos del 2018 que se pueden ver en la Tabla 1. Con estos datos es posible calcular la relación vehículos x cada 1.000 habitantes, la cual es de 8,2.

Los vehículos de SITP se agrupan en tres (3) grupos; vehículos de Transmilenio, los zonales (buses azules y trabajan por concesión) y los SITP provisionales (buses del antiguo sistema). El comportamiento histórico de los vehículos SITP y las funciones de comportamiento se pueden observar en la Figura 3 para los vehículos de Transmilenio, en la Figura 4 para los zonales y en la Figura 5 para los SITP tradicionales.

Como se observa en la Figura 5, la flota de vehículos SITP provisional se ha disminuido por la salida paulatina de los vehículos por el cambio de sistema de transporte introducido en Bogotá en la última década. El comportamiento histórico del SITP Provisional es modelado como una función exponencial cuyo coeficiente de aproximación de 0,9578. De forma similar, se realizan las regresiones para los vehículos de Transmilenio en la Figura 3 y de SITP Zonal usando el comportamiento ilustrado en la Figura 4.

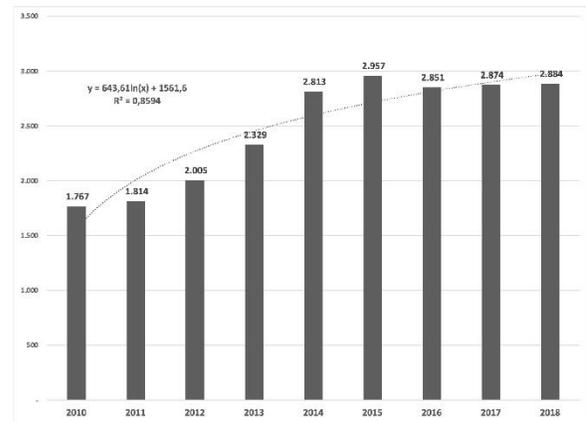


Figura 3. Vehículos Transmilenio 2010-2018, Fuente: Autores ⁽²⁹⁻³¹⁾.

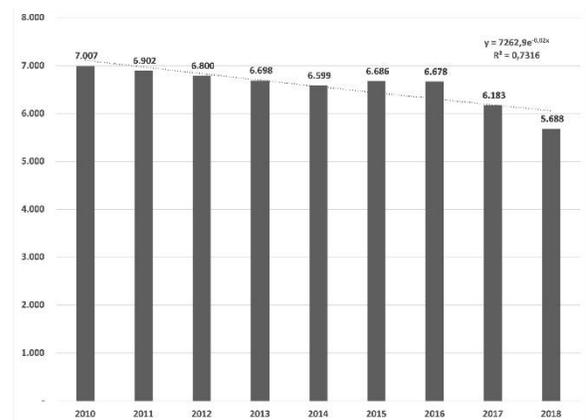


Figura 4. Vehículos SITP Zonal 2010-2018, Fuente: Autores ⁽²⁹⁻³¹⁾.

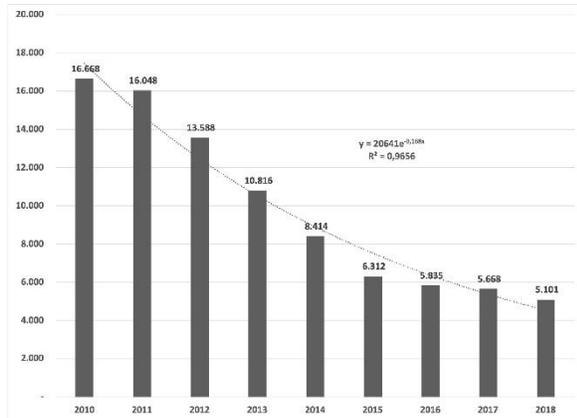


Figura 5. Vehículos SITP provisional 2010-2018, Fuente: Autores ⁽²⁹⁻³¹⁾.

Para los taxis se revisa los cupos de estos, los cuales se han mantenido constantes desde el año 2010, como se observa en la Tabla 2. Pequeñas variaciones alrededor de 50 mil, se han dado en la última década, lo cual permite determinar que la relación de taxis por 1.000 habitantes va disminuyendo en el orden de una décima a causa de que hay más habitantes en la ciudad con el mismo número de taxis.

Tabla 2. Relación de Vehículos Taxis 2010-2018.

Año	Población Bogotá	Número de Taxis	Taxis x 1.000 habitantes
2010	7.363.782	49.363	6,7
2011	7.467.804	49.318	6,6
2012	7.571.345	49.555	6,5
2013	7.674.366	49.877	6,5
2014	7.776.845	50.000	6,4
2015	7.878.783	50.109	6,4
2016	7.980.001	50.095	6,3
2017	8.080.734	49.779	6,2
2018	8.181.047	49.616	6,1

Fuente: Autores ⁽²⁵⁾.

En la Figura 6, se presenta la relación de motocicletas por cada 1.000 habitantes. También en la la Figura 6 se presenta la ecuación de regresión, la cual se hizo con una regresión logarítmica con un R2 de 0,9773.

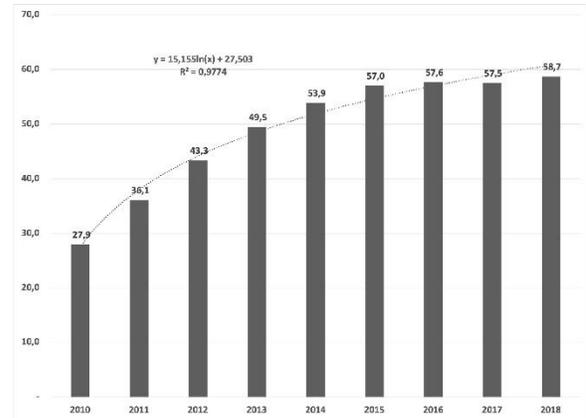


Figura 6. Vehículos Motocicletas x 1.000 habitantes 2010-2018, Fuente: Autores ⁽²⁵⁾.

2.1.3 Fuentes de contaminación fijas de PM10

Para las fuentes fijas, la información se extrajo de un estudio realizado por el Distrito Capital en el 2018, en el cual se identificaron 2.046 fuentes fijas industriales en operación, donde 2030 fuentes son de combustión externa; las cuales el 47% son calderas, el 35% hornos y el 18% restante de otro tipo ⁽²⁷⁾.

También se determinó que el 87% de las fuentes fijas industriales usan gas natural como combustible, el cual es amigable a medio ambiente, seguido por el 4% que corresponde al carbón, luego el diésel y el gas licuado de petróleo con un 3% cada uno, entre otros. Adicionalmente, se identificaron 42 tipos de fuentes fijas, pero solo 7 de los 42 tipos generan el 95% de emisiones de PM10, por lo cual solo se utilizarán estas en el modelo de simulación. Estas fuentes se presentan en la Tabla 3.

Como se observa en la Tabla 3 los hornos y calderas que usan como combustible carbón son los que más contaminan. Pero las calderas a gas natural anteriores a 1997 también contaminan significativamente el ambiente. Por lo cual, para reducir la contaminación de fuente fijas industriales es necesario realizar una

actualización tecnológica, donde los hornos y calderas que usan carbón se reemplacen por fuentes que usen gas natural. También se deben cambiar por unas nuevas la caldera que sean anteriores al 1997. Este hecho origina el planteamiento a futuro de la migración a fuentes fijas más limpias, como las consideradas en la Tabla 4.

Con esta actualización tecnológica se lograría una reducción del 89,4% que es significativa. Como no se tienen datos históricos sobre el crecimiento de fuentes fijas y la contaminación generada por estas, para el modelo se tomará como base el crecimiento poblacional del Distrito Capital.

Tabla 3. Fuentes fijas Industriales 2018.

Tecnología Actual						
Tecnología	Categoría	Combustible	Factor de Emisión	de Unidad F.E.	MP10 (Ton/año)	
Horno Ladrillero	HL	Carbón	12720	mg/kg	246,138	
Caldera >100 BHP	CC1	Carbón	6850	mg/kg	109,897	
Caldera >100 BHP (año de fabricación menor o igual a 1997)	CG1	Gas Natural	589,42	mg/m ³	44,992	
Horno	HC	Carbón	12720	mg/kg	30,872	
Caldera ≤100 BHP	CG3	Gas Natural	190,3	mg/m ³	12,834	
Horno y Caldera con aplicaciones industriales	GLP	Gas licuado de petróleo	24000	mg/m ³	5,793	
Caldera >100 BHP (año de fabricación mayor a 1997)	CG2	Gas Natural	237,18	mg/m ³	4,996	
TOTAL					455,521	

Fuente: Autores⁽²⁷⁾

Tabla 4. Fuentes fijas Industriales amigables al medio ambiente.

Tecnología Sugerida							
Tecnología	Categoría	Combustible	Factor de Emisión	de Unidad F.E.	MP10 (Ton/año)	Reducción	
Horno Ladrillero	HLG	Gas Natural	121,81	mg/m ³	2,357	99,04%	
Caldera >100 BHP (año de fabricación mayor a 1997)	CG2	Gas Natural	237,18	mg/m ³	3,805	96,54%	
Caldera >100 BHP (año de fabricación mayor a 1997)	CG2	Gas Natural	237,18	mg/m ³	18,104	59,76%	
Horno	HLG	Gas Natural	121,81	mg/m ³	0,296	99,04%	
Caldera ≤100 BHP	CG3	Gas Natural	190,3	mg/m ³	12,834	0,00%	
Horno y Caldera con aplicaciones industriales	GLP	Gas licuado de petróleo	24000	mg/m ³	5,793	0,00%	
Caldera >100 BHP (año de fabricación mayor a 1997)	CG2	Gas Natural	237,18	mg/m ³	4,996	0,00%	
TOTAL					48,185	89,42%	

Fuente: Autores⁽²⁷⁾

2.2 PLANTEAMIENTO DEL DIAGRAMA CAUSAL

Tomando en consideración el crecimiento poblacional y cada una de las fuentes fijas y móviles, y la afectación de estas en la calidad del

aire en la ciudad de Bogotá por PM10, se planteó el diagrama causal mostrado en la Figura 7. El diagrama causal se puede dividir en dos partes: contaminación por Fuentes Móviles en la parte izquierda y contaminación por Fuentes Fijas en la parte derecha.

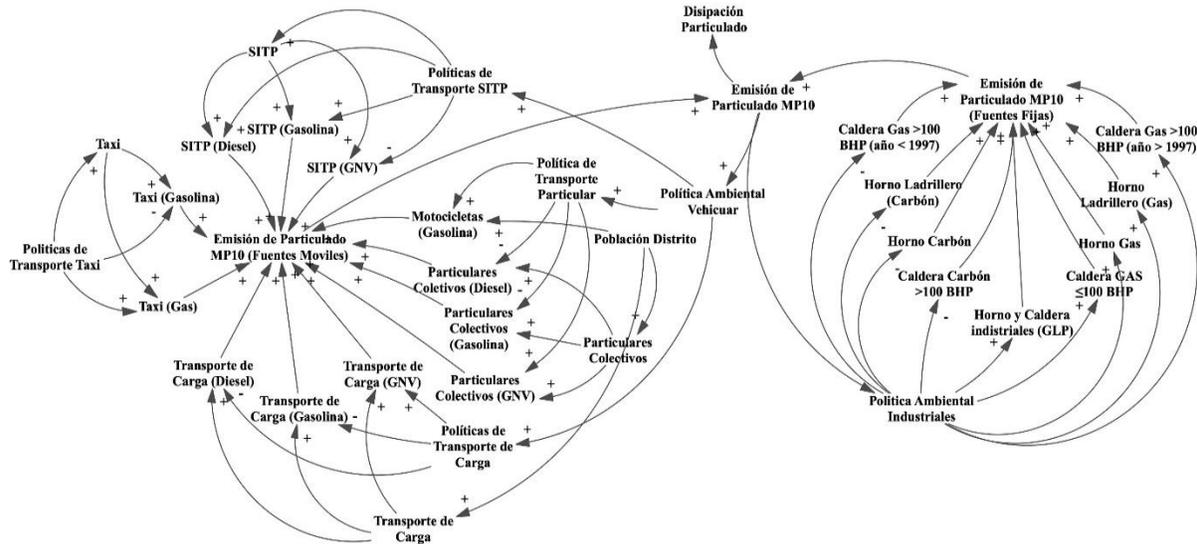


Figura 7. Diagrama Causal del modelo de contaminación del aire por PM10 para la ciudad de Bogotá, Fuente: Autores elaborado en Vensim®.

Como se observa en la Figura 7, las fuentes móviles forman un lazo que relaciona las variables de interés; por ejemplo, ante más políticas de calidad ambiental de transporte particular, se afecta de manera positiva el número de vehículos que usan gas natural, de la misma manera la cantidad de emisiones de PM10 por este tipo de fuente y el aumento de PM10 por esta fuente vehicular afecta positivamente la acumulación total de PM10. Con respecto a las fuentes fijas se observa que pueden subdividirse en fuentes “sucias” que usan como medio de combustión el carbón y fuentes “limpias” o eficientes energéticamente como las que hacen uso de gas natural en su operación. Como se observa en la Figura 7, cuando se aumentan las políticas ambientales de fuentes industriales, estas reducen la cantidad de Hornos

Ladrilleros, lo cual reduce la cantidad de PM10 por esta fuente, lo que influye en la reducción del PM10 total acumulado. Análisis similares pueden realizarse para las restantes fuentes fijas.

2.3 Desarrollo del modelo de simulación

A partir del modelo causal y de la recolección de datos de variables de interés para las fuentes de contaminación ambiental en la ciudad de Bogotá, se establece el modelo de simulación basado en el diagrama de Forrester; tal como se muestra en la Figura 8.

En el del diagrama de Forrester de la Figura 8, se puede observar en el costado izquierdo las fuentes móviles y en el costado derecho las

fuentes fijas. Las fuentes convergen a las tasas de entrada denominadas “Generación de PM10 de F móviles” y a “Generación de PM10 de F fijas” de acuerdo con cada caso, las cuales se suman y permiten determinar el acumulado de material particulado al nivel de PM10 en el aire. Finalmente, se plantea la tasa de dispersión como una tasa salida del Nivel de PM10, el cual se asocia a que las partículas terminan disolviéndose en el aire por las condiciones meteorológicas del lugar como el viento, lluvia o la temperatura. Para la simulación las condiciones meteorológicas se mantienen fijas, donde el tiempo de dispersión fue de 24 horas; pero se recomienda para futuros estudios, tener en cuenta la variación climática, debido que

dependiendo de ella, la dispersión puede ser mayor o menor; por ejemplo, en temporada seca, con pocos vientos la dispersión de las partículas es más lenta, esto quiere decir que duran más tiempo en el aire, a diferencia de las temporada de lluvias y que se presentan más vientos en la cual al dispersión es más rápida.

Las tasas y niveles de las fuentes móviles y fijas son calculados en función del tiempo y estimados tomando en consideración la población de la ciudad de Bogotá, de la manera como fue explicado en la sección de Recolección de Información.

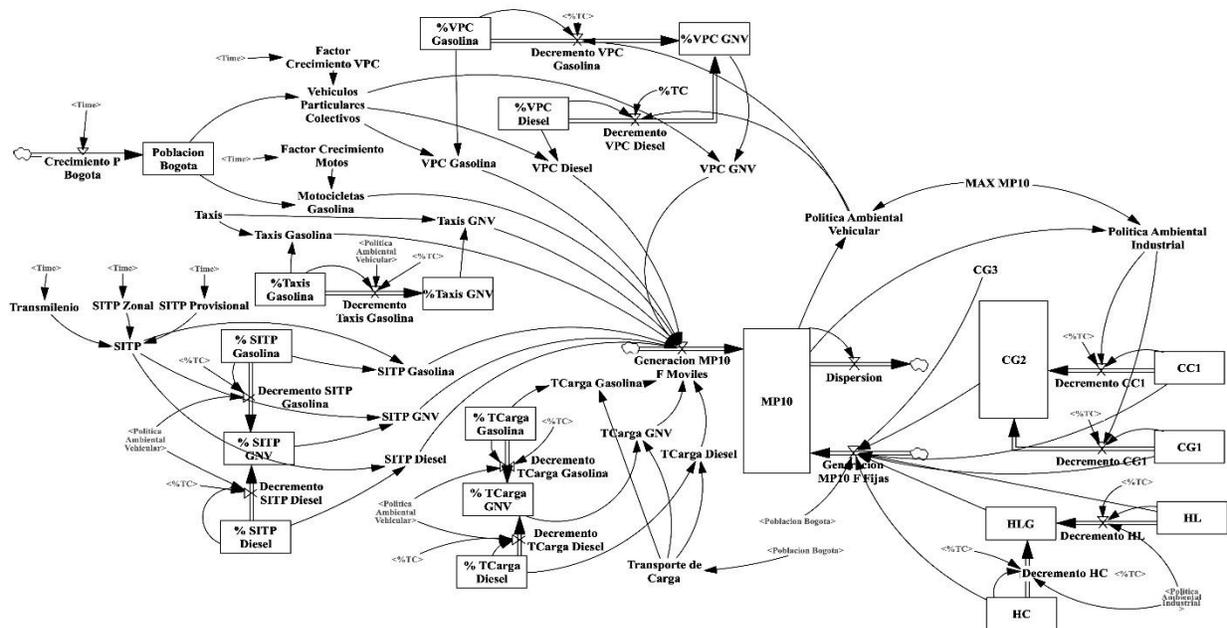


Figura 8. Diagrama de Forrester del modelo de contaminación del aire por PM10 para la ciudad de Bogotá, Fuente: Autores elaborado en Vensim®.

2.4 Evaluación de escenarios

Usando el modelo de simulación propuesto, se plantea el análisis de escenarios basado en la Gestión de políticas públicas ambientales a partir del establecimiento de metas en la reducción de la contaminación del aire por PM10 y que se

encuentran enfocadas a la conversión a fuentes limpias tanto fijas como móviles.

El objetivo del modelo de simulación de contaminación del aire por PM10 es determinar el efecto en el tiempo de la aplicación de políticas públicas ambientales. Para ello se establecen un conjunto de decisiones; políticas

para cada fuente, que dependen de un factor denominado Porcentaje de Tasa de Conversión (%TC). La tasa de conversión define el porcentaje de fuentes que migran a tecnologías limpias o eficientes energéticamente. Por ejemplo, en el caso de los vehículos particulares colectivos cuando el %TC es 10, entonces se establece que el 10% de los vehículos de gasolina o diesel migrarán al uso de gas natural en un periodo de un año. De forma similar se establece el %TC para las demás fuentes del modelo.

Como un parámetro adicional al %TC, se debe fijar un límite máximo de PM10 que sería la meta para alcanzar por parte de entidad gubernamental con la política pública. A continuación, se presentan diferentes escenarios de simulación del modelo de contaminación del aire por PM10, considerando variables de control el límite máximo de PM10 y el %TC. La ventana de simulación considerada son 20 años, en el rango de 2010 a 2030. En los diferentes escenarios se varían los límites máximos de PM10 que se deben generar en un año y se evalúan las diferentes tasas de conversión %TC.

3. Resultados.

Se realizaron 3 escenarios. El primer escenario es en el cual no se aplica ninguna política de ambiental adicional para la migración de las fuentes a tecnologías amigables con el ambiente, este escenario servirá de referencia inicial. El segundo escenario se evalúa diferentes %TC para lograr el objetivo de reducir la contaminación por PM10 en un 50%. En el tercer y último escenario se plantea el objetivo de reducir en un 25% la generación de PM10.

3.1 Escenario 1 (Línea Base): Sin aplicación de políticas ambientales.

Ante las condiciones estipuladas en el modelo original obtenidas a partir de la recolección de datos, se realiza el análisis de su comportamiento de contaminación por PM10, tal como se ve en la Figura 9.

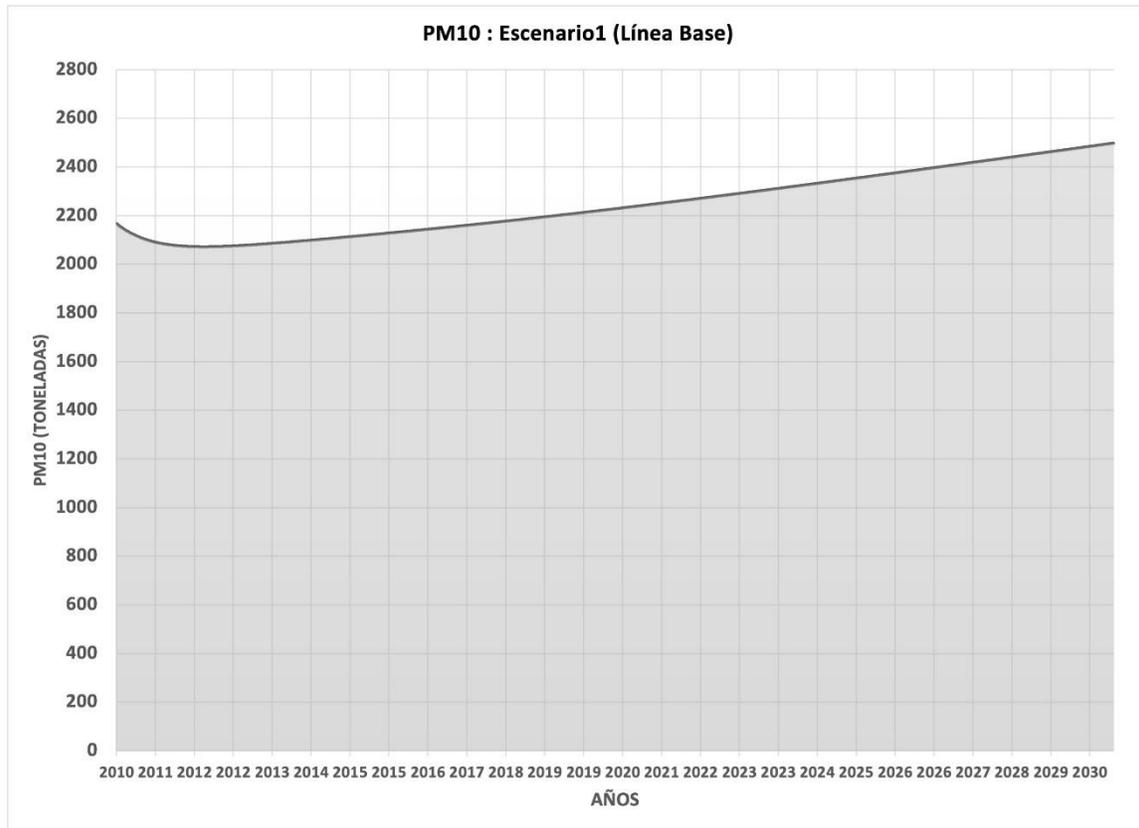


Figura 9. Escenario 1: Sin aplicación de políticas ambientales, Fuente: Autores elaborado en Vensim® (32).

En el escenario de ausencia de nuevas políticas de políticas ambientales, solo se observa una disminución en el primer año de simulación (2010), esto debido a la actual política, en la cual los buses del sistema anterior, los cuales son llamados SITP provisional, están siendo chatarrizados y están ingresando nuevos vehículos de transporte publico colectivo a través del sistema Transmilenio, los cuales son más amigables al medio ambiente. Pero luego del segundo año (2011) comienza a incrementarse paulatinamente la generación de partículas PM10 hasta llegar a superar el valor inicial de 2.166 Ton/año de la simulación (año 2010), y finalmente llegar a una producción de PM10 para el año 2030 de 2.500 Ton/año. El modelo de simulación evidencia que la actual política no es suficiente para mitigar la contaminación ambiental generada por partículas PM10, al mediano, ni al largo plazo; esto debido

al crecimiento poblacional de la ciudad, la cual produce también un crecimiento en los vehículos de carga y particulares, para los cuales no existe una política, ni legislación asociada, la cual asegure que los nuevos vehículos que entren al sistema transporte usen tecnologías limpias, amigables al ambiente. Por tal motivo, se evidencia la necesidad de implementar nuevas políticas que contribuyan a la migración de estos vehículos a tecnologías amigables al medio ambiente. También es necesario buscar nuevas políticas que ayuden a migrar a tecnologías limpias las fuentes fijas.

3.2 Escenario 2: Política con PM10 máx. de 1000 Ton/año (Reducción del 50%)

La Figura 10 muestran el comportamiento del modelo para un objetivo de reducción del PM10

del 50% (PM 10 máx = 1000 Ton/año).

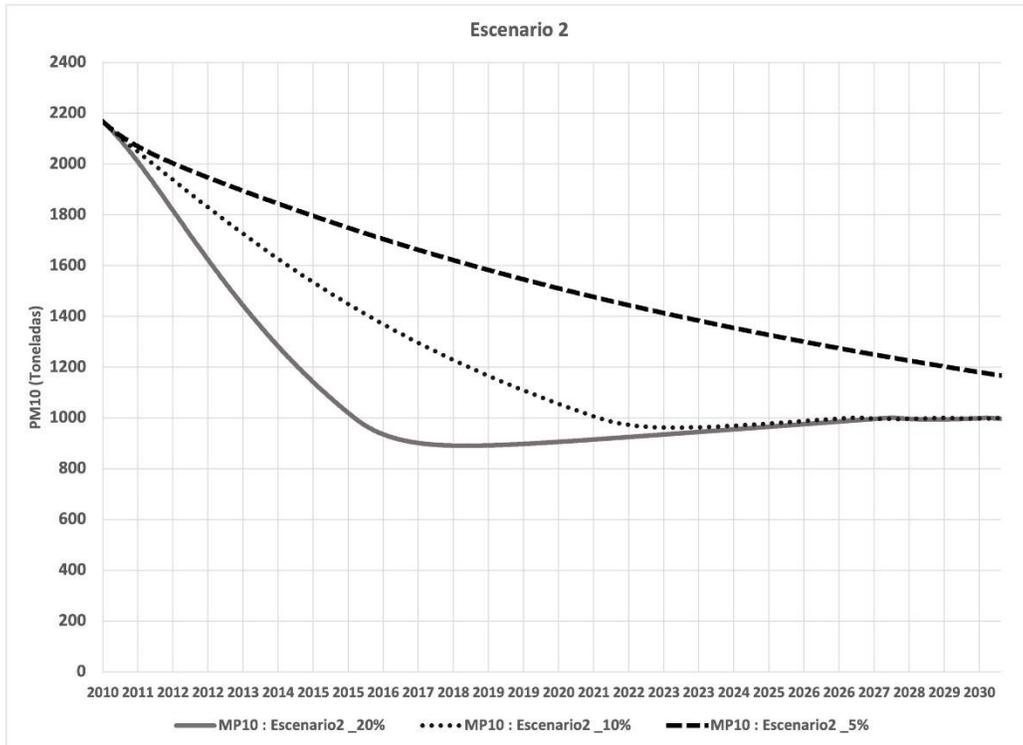


Figura 10. Escenario 2: Política con PM10 máx. de 1000 Ton/año (Reducción del 50%), Fuente: Autores elaborado en Vensim®.

Se evalúan 3 tasas de conversión %TC del 5%, 10% y el 20%. Como se observa en la figura 10, se logra el objetivo planteado con las tasas del 10% y del 20%, y no es posible alcanzar la meta con una tasa del 5% en el periodo de 20 años. Para la %TC del 20% se logra reducir la generación de PM10 en un 50% luego del quinto año (2015), por lo cual en el año 2016 se produce un sobre impulso que reduce a 900 Ton/año el material particulado, a partir de este momento, el sistema es capaz de controlar el material particulado para que logren las 1000 Ton/año, en el cual desde el año 17 (2027), el sistema es estable. Para el caso donde la %TC es de 10%, luego del año 11 (2021), se logra cumplir con el objetivo de reducir en un 50% la generación de PM10, esto debido a que el comportamiento con esta tasa es más suave y se presenta un sobre impulso más ligero,

comparado con el caso de %TC de 20%, el cual produce para el año 2022 una producción de 950 Ton/año de PM10, al igual que con la %TC de 20%, la %TC de 10% se mantiene estable a partir del año 17 (2027). En este escenario se evidencia la necesidad de plantear políticas más agresivas de conversión a fuentes limpias, para lograr el objetivo planteado del 50% de reducción, donde la alternativa inviable es la de la %TC del 5%.

Aunque es de aclarar que la política y legislación necesaria para lograr tasas de conversión más altas, son más difícil de implementar, esto debido al costo que implica la implementación de estas políticas a los diferentes stakeholders, entre los cuales se encuentran El Estado, que requiere tener presupuesto para ayudas a otros stakeholders para que migren a tecnologías

limpias; como los dueños de vehículos particulares; vehículos públicos; y en especial los dueños de transporte de carga y también a las fuentes industriales fijas que usan combustibles no amigables al ambiente como el carbón, esto debido a que el costo de inversión y los costos variables se les incrementarían notablemente. Por lo cual, la generación de leyes que promuevan este comportamiento es más difíciles de implementar y desarrollar. Por todo lo anteriormente expuesto la política de migración con una %TC del 10% es la más viable, porque logra con el objetivo planteado y su costo de implementación es menor.

3.3 Escenario 3: Política de PM10 máx. de 1500 Ton/año (Reducción del 25%)

La Figura 11 muestra el comportamiento de la meta de reducción del PM10 acumulado a 1500 Ton/año.

Para la %TC de 5%, los efectos son lentos para el sistema, que a pesar de alcanzar el límite de 1500 Ton/año en el año 2021, solo logra

estabilizar su comportamiento para el año 2018. Para los casos de %Tc de 20% y 10%, alcanzan la meta de PM10 acumulado en 3 años (2013) y 6 años (2016), respectivamente. Sin embargo, los cambios rápidos en la reducción del contaminante hacen que el sobre-impulso máximo esté por debajo de la meta de PM10 máx. El tiempo de establecimiento en la meta es de 11 (2021) años para ambos casos de %TC del 10% y el %TC de 20. Ambos escenarios son convenientes en la reducción a mediano y largo plazo de PM10, ya que en menos de 6 años se logra reducir la contaminación ambiental en el 25% aproximado y logra estabilizarse en el año 11 (2021), establecido por parte de la política establecida para este escenario. Aunque las 2 %TC de 10% y 20% son viables en su implementación, la %TC del 10% es la más adecuada, debido a que su implantación es más viable por los costos asociados a esta que son inferiores a la %TC del 20%, como ya se había explicado.

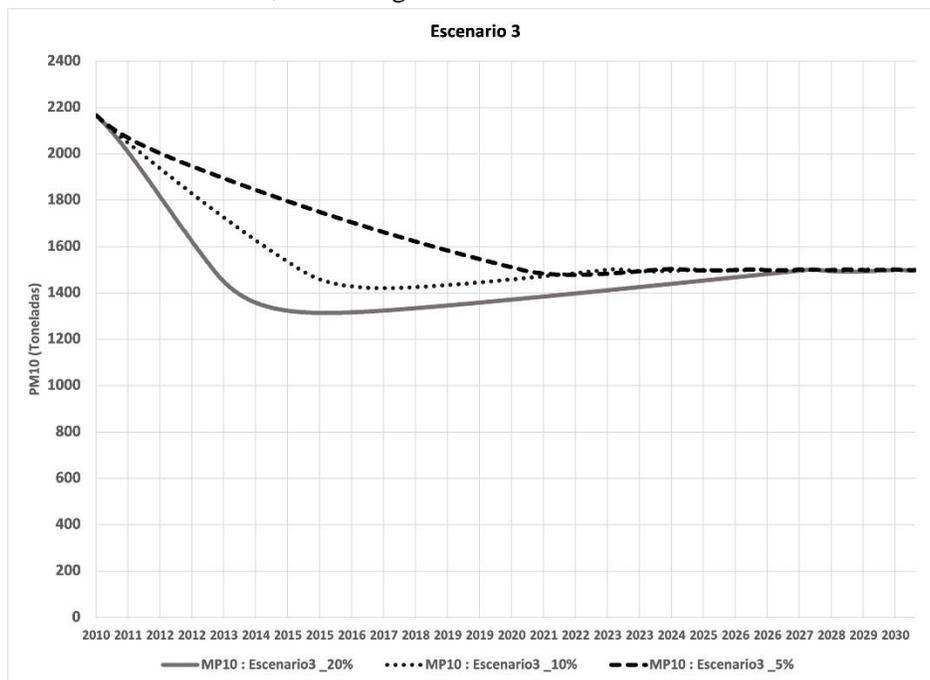


Figura 11. Escenario 3: Política con PM10 máx. de 1500 Ton/año (Reducción del 25%), Fuente: Autores elaborado en Vensim®.

En resumen, se evidencia la necesidad de generar nuevas políticas que sean efectivas en reducir los niveles de contaminación del aire, dadas por las partículas PM10. Al analizar, los posibles escenarios de las nuevas políticas públicas ambientales. Se encontró que la política que ofrece mayores beneficios, debido a que logra cumplir con los objetivos planteados, con el mayor beneficio al ambiente y al menor costo, es el escenario de generar una política que busque reducir en un 50% la emisión de partículas PM10 con una %TC a fuentes limpias del 10%. Esta política logra a partir del año 12 (2022) cumplir con el objetivo y desde el año 17 (2027), estabiliza su comportamiento, año el cual se encuentra dentro del horizonte de tiempo.

A parte de lo encontrado en la simulación, se puede asegurar también que las herramientas informáticas de simulación como dinámica de sistemas y en este caso en particular el software Vensim®. Son herramientas de gran utilidad en los procesos de formulación de políticas públicas, entendiendo que este proceso es un sistema complejo ⁽³³⁾ debido a que combina muchos elementos durante el proceso y al mismo tiempo, como se explica en el modelo de caneca de basura ⁽³⁴⁾. Lo cual hace que las políticas al formularse y ejecutarse no cumplan con los objetivos planteados. Por lo cual, como se presentó este caso, estas tecnologías ayudan a reducir el grado de incertidumbre y coadyuvan a generar lineamientos más efectivos en el proceso de generación de la política.

4. Conclusiones

A través del uso de conceptos de dinámica de sistemas fue propuesto un modelo de simulación de calidad del aire en la ciudad de Bogotá, considerando el contaminante PM10. El modelo

permite la caracterización de políticas públicas con datos reales tomados de los sistemas de información del Distrito Capital y evaluar los efectos en las reducciones de fuentes fijas o móviles o su conversión a fuentes limpias.

La ausencia de nuevas políticas ambientales, hacen que en periodo de mediano y largo plazo se presenten altos niveles de contaminación del aire, ocasionado por la generación de partículas PM10. El aumento de fuentes fijas y móviles altamente contaminantes ocasionan un aumento descontrolado del PM10, por tanto, se plantea la necesidad de buscar escenarios que mejoren la calidad de vida de los habitantes de la ciudad de Bogotá.

En los escenarios de mediano y largo plazo se logran reducir en un 25% o 50% los niveles de PM10 con tasas de conversión a tecnologías limpias de 10% anual o superiores. Sin embargo, es necesario establecer políticas ambientales y la legislación correspondiente para la conversión a energías limpias tanto de las fuentes móviles como de las fijas. El modelo usado no considera los efectos económicos de la conversión, ni las inversiones gubernamentales para la implementación del modelo.

En la mayoría de los escenarios efectivos en los cuales se tuvo como meta la reducción de PM10, muestran que los efectos no son inmediatos sino se encuentran en el rango entre los 5 a 20 años. Por lo anterior, las políticas ambientales son una necesidad de estado que deben perdurar a lo largo del tiempo, a pesar de los cambios políticos, tanto a nivel local como estatal. En otras palabras, las políticas ambientales deben ser políticas de Estado a largo plazo estructurales, y no simplemente políticas coyunturales que varíen dependiendo del partido político que este en el poder ejecutivo y legislativo.

Se recomienda para futuras investigaciones, ampliar el modelo de simulación, teniendo en cuenta otros tipos de contaminantes como PM2.5, NOx, CO, SO2. También, agregar al modelo factores climáticos para que los tiempos de dispersión varíen dependiendo de la época del año.

Por último, se concluye que las herramientas informáticas de dinámica de sistemas pueden ser muy útiles durante el proceso de formulación de políticas públicas ambientales, las cuales pueden generar lineamientos más adecuados y reducir el grado de incertidumbre que tiene el proceso.

5. Bibliografía

- (1). Afsar B, Elsurer Afsar R, Kanbay A, Covic A, Ortiz A, Kanbay M. Air pollution and kidney disease: Review of current evidence. *Clin Kidney J* [Internet]. 2019;12(1):19–32. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85066853379&doi=10.1093%2Fckj%2F12%2F1&partnerID=40&md5=f005debb6b467ac19e18ad4845ef0e54>
- (2). Organización Mundial de la Salud (OMS). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud [Internet]. Nota descriptiva. 2016 [cited 2020 Sep 16]. p. 1–8. Available from: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- (3). Organización Mundial de la Salud (OMS). La contaminación del aire ya es una de las principales causas de muerte en el mundo [Internet]. OPS. 2016 [cited 2020 Sep 16]. p. 1–2. Available from: https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=9089:2013-outdoor-air-pollution-leading-environmental-cause-cancer-deaths&Itemid=135&lang=es
- (4). World Health Organization. Mortality and burden of disease from ambient air pollution [Internet]. Who. World Health Organization; 2018 [cited 2020 Sep 16]. p. 1–3. Available from: https://www.who.int/gho/phe/outdoor_air_pollution/burden_text/en/
- (5). Prüss-Ustün A, Wolf J, Corvalán C, R Bos, Neira M. Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the environmental burden of disease. Vol. 259, World Health Organization 2016. 2016. 147 p.
- (6). Ciampi MM, Da Rocha Brito C. Awareness of social impact of engineering: The task for engineering schools? In: ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings [Internet]. Safety, Health and Environment Research Organization, United States: American Society for Engineering Education; 2011. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029124087&partnerID=40&md5=3cd3386566c5ab4bdb996735fb5cd420>
- (7). World Health Organization. Burning opportunity: clean household energy for health, sustainable development, and wellbeing of women and children. [Internet]. Clean Household Energy. Luxembourg; 2016. 130 p. Available from: https://www.afro.who.int/sites/default/files/2017-06/9789241565233_eng.pdf
- (8). Ministerio de Ambiente Vivienda y

- Desarrollo Territorial. Política de Prevención y control de la contaminación del aire. Vol. 1. Bogota D.C.; 2010. 48 p.
- (9). DNP. Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire. Doc Conpes [Internet]. 2005;29. Available from: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/conpes/2005/Conpes_3344_2005.pdf
- (10). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Mejorar la calidad del aire, compromiso del Gobierno Duque en el Día Mundial del Medio Ambiente [Internet]. 2020 [cited 2020 Sep 16]. Available from: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/4327-mejorar-la-calidad-del-aire-compromiso-del-gobierno-duque-en-el-dia-mundial-del-medio-ambiente>
- (11). Secretaria Distrital de Ambiente. Informe Sectorial Secretaría Distrital de Ambiente. 2013.
- (12). Secretariat of the Stockholm Convention. Stockholm Convention - Home page [Internet]. 2020 [cited 2020 Sep 16]. Available from: <http://chm.pops.int/>
- (13). United Nations. FAQ | Ozone Secretariat [Internet]. 2020 [cited 2020 Sep 16]. Available from: <https://ozone.unep.org/>
- (14). United Nations. ¿Qué es el Protocolo de Kyoto? [Internet]. 2020 [cited 2020 Sep 16]. Available from: https://unfccc.int/es/kyoto_protocol
- (15). PNUD. Objetivos de Desarrollo Sostenible | PNUD [Internet]. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. 2019 [cited 2019 Jun 24]. Available from: <https://www.undp.org/content/undp/es/ho>
- me/sustainable-development-goals.html
- (16). Sánchez E, Uribe E. Instrumentos económicos para el control de la contaminación industrial. Planeación Desarro. 1994;25(1):13–8.
- (17). El Congreso de Colombia. Ley 23 de 1973. D Of [Internet]. 1973;1973(No. 34.001 del 17 de enero de 1974):11–3. Available from: https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/ley_23_de_1973.pdf
- (18). El Congreso de Colombia. Ley 9 de 1979. D Of. 1979;1979(35308).
- (19). Presidencia de la República de Colombia. Decreto 02 de 1982. 1982;1982.
- (20). DAMA. Resolución 391 del 6 de marzo de 2001. 2001
- (21). Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. RESOLUCION No. 1208 de septiembre 5 de 2003. 2003;(1208). Available from: http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/res_1208_240610.pdf
- (22). DNP. CONPES 3943. Política para el mejoramiento de la calidad del aire. DNP 2018 p. 1–79.
- (23). Tamayo y Tamayo M. El proceso de la investigación científica. 5a Ed. Mexico: Limusa; 2011. 444 p.
- (24). Hernández Sampieri R, Fernández Collado C, Baptista Lucio M del P, Baptista Lucio P. Metodología de la Investigación. Sexta. MCGRAW-HILL. México D.F.: MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.; 2014. 736 p.

- (25). Ballesteros EA, Montealegre EL, Zambrano DL, Ortíz EY, Arango CD. Informe Anual de Calidad del aire de Bogota 2019 Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RMCAB. 2020. 2021 [cited 2021 Nov 29]. Available from: <https://oab.ambientebogota.gov.co/indicadores/?id=d2ccd170-0178-11ea-8cc7-8197075aabad>
- (26). Sanín FG, Reyes PG. Land Access and Peasant Property Rights: Walking the Labyrinths . Rev Colomb Antropol [Internet]. 2016;52(1):91–116. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84994486646&partnerID=40&md5=630e4499a1cde1e24cbbae3932c51bdf>
- (27). Subdirección de Calidad del Aire Auditiva y Visual. Inventario de Emisiones de Fuentes Móviles y Fuentes Fijas Industriales - año 2018 [Internet]. 2019. Available from: https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Noticias/10-03-2020/inventario_de_emisiones_2018_version_enero_2020.pdf
- (28). Universidad de los Andes, Camara de Comercio de Bogotá. Observatorio de Movilidad. 2009.
- (29). Movilidad SD de. Descarga el documento completo y las bases de datos en www.simur.gov.co. 2017;219.
- (30). Transmilenio S.A. Transmilenio en cifras. No. 34, Transmilenio. 2018.
- (31). TRANSMILENIO S.A. TRANSMILENIO S.A. Diciembre 2018 Informe No. 55. 2018;(55).
- (32). Secretaría Distrital de Ambiente. Información detallada del indicador » Observatorio Ambiental de Bogotá [Internet]. Material Particulado Inferior a 10 Micras { μ } Promedio Anual - PM10.
- (33). Sánchez JM, García CA, Narvaez E. Problematic Of The Decision-Making Process In The Formulation Of Public Agricultural Policies In Colombia : Review Article. Int J Mech Prod Eng Res Dev. 2020;10(6):139–46.
- (34). Cohen MD, March JG, Olsen JP. A Garbage Can Model of Organizational Choice. Adm Sci Q. 1972;17(1):1–25.