

Estimación de las emisiones de material particulado generado por el transporte público en Bogotá mediante la dinámica de sistemas

Estimation of particulate material emissions generated by public transportation in Bogotá by means of system dynamics

Óscar Mauricio Gelves Alarcón ¹, Paula Alejandra Sanabria Cruz ²,
Xilene Lidice Guerrero Solano ³, Andrea Daniela Garzón González ⁴

¹<https://orcid.org/0000-0003-0557-775X>, Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia, oscar.gelves@unimilitar.edu.co

²<https://orcid.org/0000-0002-0703-8517>, Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia, est.paulaa.sanabria@unimilitar.edu.co

³<https://orcid.org/0000-0002-1892-5904>, Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia, est.xilene.guerrero@unimilitar.edu.co

⁴<https://orcid.org/0000-0002-9101>, Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia, est.andrea.garzon@unimilitar.edu.co

Fecha de recepción: 08/02/2023 - Fecha de aceptación del artículo: 12/04/2023



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.19683>

Cómo citar: Gelves Alarcón, O. M., Sanabria Cruz, P. A., Guerrero Solano, X. L., & Garzón González, A. D. ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO GENERADO POR EL TRANSPORTE PUBLICO EN BOGOTÁ MEDIANTE LA DINÁMICA DE SISTEMAS. Avances investigación en ingeniería, 20(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.19683>.

Resumen

En el presente trabajo, se propone un modelo para la estimación de emisiones del contaminante criterio material particulado respirable (PM10) hacia el año 2060 generado por fuentes vehiculares, dentro de las cuales integra el transporte público de Bogotá. Lo anterior se lleva a cabo por medio de una revisión bibliográfica acerca de la contaminación del aire con relación al uso de vehículos, teniendo en cuenta la utilización de la dinámica de sistemas donde posteriormente se definen las variables implicadas en el estudio dinámico; para ello se define un Diagrama Causal y Diagrama de Forrester. Finalmente, al simular el modelo en el software Stella, se obtiene que para el año 2060, la ciudad de Bogotá emitirá 1.120.241,79 Kg, ante lo cual se propone una alternativa para la disminución de dicha cantidad.

Palabras clave: Dinámica de sistemas, Transporte público, Bogotá, Emisiones.

Abstract

This paper presents the proposed model for the estimation of emissions of the pollutant respirable particulate matter (PM10) by the year 2060 generated by vehicular sources, including public transportation in Bogota. This is carried out through a bibliographic review of air pollution related to the use of vehicles; to subsequently evaluate and designate the variables involved in the dynamic study, illustrating it in a Causal Diagram and Forrester Diagram. Finally, by simulating the model in the Stella software, it is obtained that by the year 2060, the city of Bogotá will emit 1,120,241.79 Kg before which an alternative will be presented for the reduction of this amount is presented

Keywords: Dynamic of systems, Public Transport, Bogota, emissions.

I. Introducción

Bogotá D.C. es considerada una de las urbanizaciones más grandes en Latinoamérica. De acuerdo con el último censo poblacional realizado por el DANE, Bogotá cuenta con 7.181.469 de habitantes, y dentro de las proyecciones establecidas para el año 2050, se espera un aumento en el crecimiento poblacional, alcanzando un número de habitantes de hasta 10.000.000. [1].

Sin embargo, de la mano de dicha densidad poblacional se tienen una inmensidad de problemas ambientales, entre ellos la contaminación del aire. De acuerdo con la OMS, los contaminantes microscópicos afectan directamente los sistemas respiratorio y circulatorio que atacan pulmones, corazón y cerebro. [2] Es decir, la calidad

de vida de una urbanización estará ligada a la calidad de su aire. A partir de esto, la Secretaría Distrital de Ambiente SDA, en conjunto con la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RM CAB, ha llevado a cabo un inventario de emisión de contaminantes atmosféricos, el cual permite cuantificar las emisiones generadas por la ciudad, además de realizar procesos diagnósticos, definición de objetivos y políticas ambientales, estimaciones y proyecciones por medio de modelados, entre otras utilidades. [3] De esta manera, fueron identificadas fuentes de emisión externa, correspondientes a aquellas fuentes que no pertenecen a la jurisdicción de Bogotá, y de emisión interna, correspondientes a las fuentes que generan emisiones dentro la jurisdicción ya mencionada. Las fuentes internas son presentadas en la Figura 1.



Figura 1. Fuentes internas de emisiones en Bogotá [3]

Ahora bien, dentro de todas las emisiones evaluadas en el inventario ejecutado, el contaminante atmosférico con mayor impacto en Bogotá D.C. es el material particulado respirable (PM10). Por otro lado,

diversos estudios desarrollados por la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) y la Universidad de la Salle, demuestran que las fuentes móviles contribuyen de manera

significativa en las emisiones de este contaminante [4] El PM10 es catalogado como uno de los contaminantes más críticos de Bogotá gracias a que los niveles actuales del contaminante, consignados en la Figura

2, [3] superan los niveles máximos permisibles en el aire, establecidos en la Resolución 2254 de 2017, consignados en la Figura 3 [5]. Lo anterior, teniendo en cuenta que una tonelada equivale a $1e+12 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Categoría vehicular	Emisiones (t/año)					
	2008	2012	2014	2016	2018	2020
Automóviles	25	45	50	33	307	275
Camperos y Camionetas	17	118	146	148	310	372
Camiones	453	423	525	499	708	759
SITP -Provisional	536	431	182	164	123	70
SITP (Zonal)	No aplica	No aplica	88	90	68	59
SITP (Troncal)	35	45	31	28	27	9
Taxi	13	3	3	5	18	69
Motocicletas	284	86	97	109	149	118
Trans. Especial	No estimado	23	188	122	129	61
Otro	No estimado	No estimado	9	8	8	7
Total	1.364	1.174	1.318	1.206	1.846	1.798

Figura 2. Inventarios de emisiones de combustión para PM10 generadas por las fuentes móviles en carretera desde el año 2008 a 2020. [3]

Contaminante	Nivel máximo Permissible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición
PM ₁₀	50	Anual
	100	24 horas
PM _{2.5}	25	Anual
	50	24 horas
SO ₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO ₂	60	Anual
	200	1 hora
O ₃	100	8 horas
CO	5.000	8 horas
	35.000	1 hora

Figura 3. Niveles máximos de contaminantes criterio en el aire a partir del 1 de julio de 2018. [5]

Gracias a lo anterior, en el presente trabajo se plantea una propuesta de simulación, empleando el software Stella, para conocer la cantidad de emisiones de PM10 para el año 2060 por fuentes vehiculares; tomando diferentes factores y criterios, expuestos en la sección III.

2. Marco teórico

2.1. Dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas busca definir las relaciones que establecen un sistema para encontrar resultados, de modo que los patrones y variables resulten más veraces y

con ello contribuir al marco de los sistemas. Por medio de la dinámica de sistemas, desarrollada por J. Forrester, es posible estudiar el comportamiento de los sistemas con la aplicación de características de realimentación, alcanzando una mezcla en los flujos de información del sistema. [6]

Se reconoce como sistema dinámico aquel en el cual su salida en el presente depende de una entrada en el pasado; es un sistema estático si su salida en curso depende solamente de la entrada en curso. La salida de un sistema estático permanece constante

si la entrada no cambia y solo cambia cuando la entrada también cambia. Por otro lado, cuando el sistema dinámico no está en equilibrio, la salida va a cambiar con el tiempo. [7]

Para desarrollar un modelo dinámico, es necesario considerar el sistema que se va a modelar y definir el problema. En conclusión, si se tiene un sistema más complejo, se puede recurrir a una técnica más detallada para definir un sistema dinámico. En la figura 4 se encuentran las principales características de un modelo dinámico [8]:



Figura 4. Mapa mental de la Dinámica de Sistemas [9].

2.2. Transporte en Bogotá D. C.

Las comunidades del ámbito mundial presentan la necesidad de movilizarse, por lo que la mayoría sufre esta necesidad utilizando un medio de transporte público o privado, el cual acorta las distancias y permite eficiencia en las actividades diarias de los usuarios. Estos transportes se observan principalmente en las ciudades capitales, ya que son fundamentales para su dinamismo social, cultural y económico [10]. En el transcurso del tiempo se han desarrollado diversos tipos de transportes que suplan las necesidades de las personas y así alcanzar un sistema eficiente. Actualmente,

las ciudades buscan innovar sus sistemas de transporte para aumentar la conectividad entre sus comunidades, de tal manera que sean reconocidos internacionalmente. Los sistemas de transporte más utilizados en la actualidad son los buses, los metros, los tranvías y los carros. Los cuales a su vez requieren una adecuada malla vial y semaforización, vitales para el buen funcionamiento de los diferentes medios de transporte. Colombia, según el DANE, tiene 48.258.494 habitantes [11] de los cuales 7.181.469 están ubicados en Bogotá [12]. Según estudios del año 2016 [13], se obtuvo que de los habitantes de la capital el 35% usan Transmilenio; el 16% el SITP; el

13% automóvil; el 9% bicicleta; el 8% moto y el 3% taxi. La situación de transporte de la capital ha mejorado, pero lastimosamente no lo suficiente ya que el sistema actual de Transmilenio y el SITP no han suplido la demanda en términos de servicio, de calidad e infraestructura. En Bogotá, durante más de 20 años, el sistema de transporte público Transmilenio ha garantizado el transporte de la mayoría de los habitantes; sin embargo, con el paso de los años el crecimiento de la población ha aumentado y el sistema de transporte ha sido deficiente debido a que cada vez se requiere mayor capacidad para alcanzar la demanda de los habitantes; el sistema se congestiona en todas las franjas horarias [14].

Entonces, el crecimiento y expansión de la ciudad durante el último siglo no puede ser visto sin contar con el importante papel

que han asumido las infraestructuras del transporte, pero en Bogotá las deficiencias serias del modelo Transmilenio para los pasajeros son las siguientes: el sistema es relativamente lento, muy costoso, produce exclusión social y no contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible del milenio [18]. Aunque el Transmilenio no es un sistema ejemplar, permite que los habitantes se movilicen del norte al sur de la ciudad en un lapso de tiempo de 30 a 40 minutos, mientras que, con los buses tradicionales, los usuarios se demoran entre 1 hora y 20 minutos a 1 hora y 30 minutos.

Es decir, el Transmilenio genera un ahorro en los tiempos de viaje cotidianos. Además, cuenta con una única tarjeta de pago que sirve para los diferentes sistemas (Transmilenio, SITP y buses complementarios) [10].

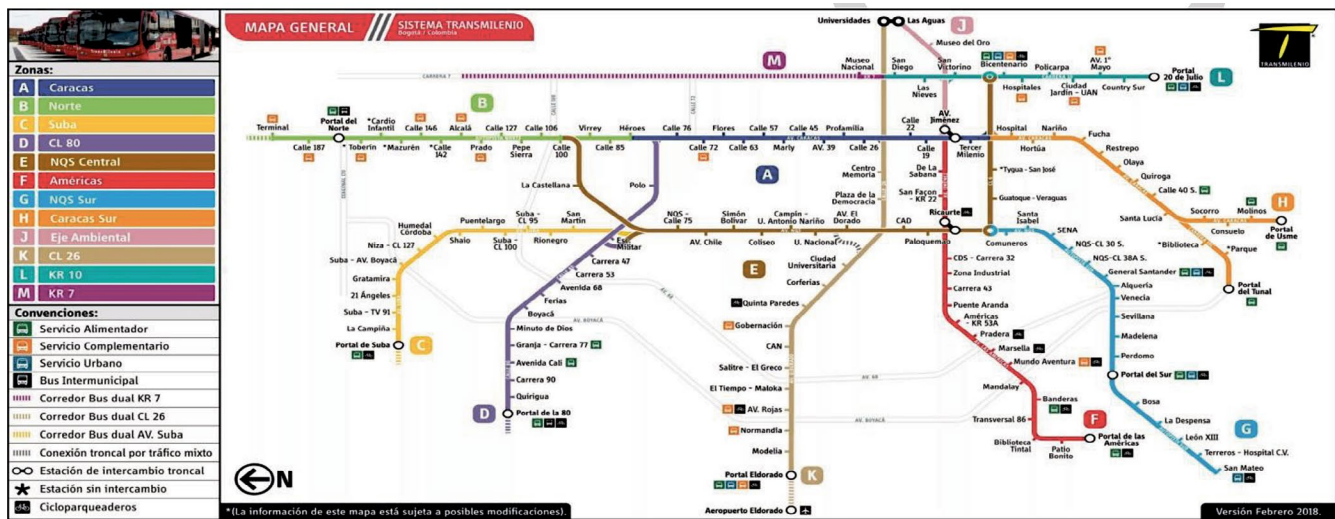


Fig. 5. Rutas del sistema de Transmilenio en Bogotá.[15].

A pesar de que el transporte en Bogotá tenga un sistema de transporte integrado y sea eficiente en tiempos, no es suficiente para suplir las necesidades de la población, por lo que en los últimos años se han iniciado dos proyectos nuevos para mejorar la movilidad de todos los bogotanos y los habitantes de los municipios aledaños. El primer proyecto es el metro, el cual será una combinación entre tramos elevados y subterráneos

(Figura 6); y el segundo proyecto es el tren de cercanías el cual tiene como objetivo ser un medio de transporte que permita la conexión de los municipios que integran la Sabana de Bogotá con la ciudad de Bogotá D.C. El ramal oeste iniciará en la calle 26 con avenida Caracas hasta el Facatativá, mientras que el ramal norte comenzaría en la calle 26 con carrera 66 en Bogotá hasta Zipaquirá [16].



Fig.6. Primera línea de metro en Bogotá. [16].

2.3 Revisión Literaria

Para el desarrollo de la revisión literaria se utilizan las bases de datos de Scopus y Scielo para proponer la siguiente ecuación de búsqueda:

Dinamica and sistemas and transporte and ciudades (1)

Se determinó un plazo de diez años desde 2012 - 2022 para la búsqueda de literatura; se realizó un tamizaje y se definieron cinco artículos que representan una mayor profundidad del tema de estudio. Fontoura, en el artículo titulado Política brasileña de movilidad urbana:

El impacto en el sistema de transporte de São Paulo utilizando dinámica de sistemas, [17] define en el modelo propuesto variables como la polución generada por los diferentes tipos de transportes que interactúan en el transporte brasileiro, el impacto económico y la congestión en los viajes realizados por los diferentes tipos de transporte utilizados. En este artículo el autor propone tres tipos de escenarios: en el primero se muestra el impacto de los combustibles alternativos en las emisiones de CO2 donde determinan que la mejor combinación es utilizar etanol

para el transporte privado y en el público diésel AMD 30 como medio para disminuir las emisiones de CO2. En el segundo escenario definen dos tipos de curvas de aprendizaje más lento para la implementación de políticas para el transporte.

En el tercer escenario se presenta la relación entre la congestión y el número de personas que usan transporte privado; se observa que existe una disminución significativa cuando se utilizan políticas para compartir el vehículo privado.

Callejas [18] establece un modelo de dinámica de sistemas donde define como variables principales los viajes potenciales, los viajes cumplidos, la calidad de los viajes, los retornos, en términos de oferta, las variables reflejadas son la capacidad de los despachos, los niveles de servicio y las ofertas no realizadas por falta de capacidad.

En este artículo se llega a la conclusión de que en horas pico la frecuencia de oferta de buses no debe ser la misma que en horas valle. Por otro lado, no se tienen en cuenta variables de tipo ambiental en este modelo.

Aarón [19] en su estudio Análisis de la movilidad vehicular en el departamento de la Guajira usando simulación. Caso Riohacha y Maicao se enfoca en el flujo vehicular entre las ciudades de Riohacha y Maicao donde se definen como variables para el desarrollo del diagrama causal como la tasa de accidentalidad, contaminación de tipo auditiva y emisiones de CO₂.

Dentro de los resultados obtenidos en esta investigación se encuentra que el aumento de la congestión vehicular genera un incremento en las emisiones de CO₂ y la falta de una educación vehicular genera más embotellamientos y afecta directamente en la cantidad de siniestros y, por tanto, de muertes. Se evidencia que en este artículo de investigación se utiliza el software vensim para la realización de la simulación.

Medina [20] propone un modelo de dinámica de sistemas para la cantidad de emisiones de material particulado en Bogotá D.C. En este documento el autor establece como variables principales la demanda de usuarios, cantidad de vehículos, velocidad promedio en la vía y recorrido de los trayectos; en las conclusiones se resalta la necesidad de realizar interconexiones en la zona occidental de la ciudad.

Zhou [21] propone un modelo de dinámica de sistemas para la generación de emisiones en la ciudad Wuan, China; el documento se enfoca en el impacto del bosque urbano en la disminución de emisiones de material particulado en la ciudad, y concluye que la no existencia de bosque urbano podría aumentar de manera significativa el aumento de emisiones de 10 a 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

3. Materiales y métodos

3.1. Variables

Para realizar los respectivos diagramas (causal y de nivel) es necesario definir los elementos del sistema y las relaciones entre ellos.

Contaminación (cantidad de PM₁₀)

Esta variable estará afectada por las emisiones generadas por los vehículos automotores y por las emisiones ahorradas por el uso de vehículos no motorizados (bicicleta, scooters, el individuo caminando, etc.). PM₁₀ se refiere a las partículas cuyo diámetro está entre 2,5 y 10 micrómetros y su exposición a ella conlleva a problemas de salud relacionados con el corazón y con los pulmones [22].

Emisiones totales PM₁₀

Las emisiones totales de PM₁₀ anuales cambiarán con respecto a las emisiones generadas por cada uno de los vehículos en el modelo.

Vehículos tipo X necesarios

La cantidad de vehículos necesaria para cada uno de los tipos estará dada por el porcentaje de utilización, es decir, cuántos bogotanos usan ese medio para transportarse, por la capacidad del vehículo, dictando cuántos viajes se podrían suplir con él y por el número total de viajes por realizar

Porcentaje de utilización

Cada uno de los medios de transporte tiene un porcentaje de uso por parte de los bogotanos, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Porcentaje de utilización de medios de transporte en Bogotá en 2019 [23].

Vehículo	Utilización (%)
Vehículo particular	11
Moto	5
SITP	24
Transmilenio	15
Taxi	5
Bicicleta y a pie	35
Otros	5

Capacidad del vehículo

Como su nombre lo indica, se refiere al número de pasajeros que pueden ocupar el medio de transporte.

Tabla 2. Capacidad de los medios de transporte

Vehículo	Capacidad del vehículo
Vehículo particular	5
Moto	2
Camioneta	5
SITP	90
Transmilenio	150
Taxi	4
Vehículo no automotor	1

Emisiones por vehículo tipo X

Cada uno de los vehículos motorizados generará emisiones de partículas PM10, número determinado generalmente por su tamaño. Teniendo en cuenta el número de vehículos en circulación de cada tipo y las emisiones que generan cada uno de los grupos, es posible determinar la contribución de cada vehículo.

Tabla 3. Cantidad de vehículos en Bogotá y su aporte en emisiones de PM10, año 2018 [22] [24].

Vehículo	Cantidad en Bogotá	Tn por grupo de vehículo de PM10/año	Kg/vehículo/día
Vehículo particular	1.200.000	307	0,0007
Moto	480.000	149	0,0009
SITP	336.000	123	0,0010
TransMilenio	96.000	94	0,0027
Taxi	24.000	18	0,0021
Otros	48.000	8	0,0005

Emisiones vehículo tipo X

La emisión total de cada tipo de vehículo estará dada por la emisión de cada uno multiplicado por la cantidad necesaria de dicho vehículo.

Viajes por realizar

En Bogotá se realizan aproximadamente 15´000.000 de viajes diarios [22], el cual será el valor inicial de la variable. Estos viajes cambiarán de acuerdo con una variación que estará definida como 0,001% diario.

a. Diagrama causal

Teniendo claras las variables del sistema, observamos las relaciones entre ellas:

- Un aumento en las emisiones por tipo de vehículo motorizado, aumentará las emisiones totales de PM10.
 - Un aumento en la tasa de utilización del medio de transporte tipo X, aumentará el número necesario de vehículos.
 - Un aumento en las emisiones totales de PM10, aumentará la contaminación.
 - Un aumento en el número de vehículos no motorizados necesarios, aumentará las emisiones ahorradas de PM10.
 - Un aumento en las emisiones ahorradas, disminuirá la contaminación.
 - Un aumento en la capacidad del vehículo tipo X, disminuirá el número de vehículos necesario.
 - Un aumento en la emisión por vehículo, aumentará las emisiones totales del tipo de vehículo X.
 - Un aumento en el número de vehículos tipo X necesarios para transporte, aumentará las emisiones totales del mismo tipo.
- Estas relaciones presentadas en el siguiente diagrama causal: Una vez definido el diagrama causal, es posible adaptarlo en un diagrama de Forrester o de nivel, donde:
- Los viajes por realizar y la contaminación son un nivel.
 - Las emisiones por cada tipo de vehículo son flujos.
 - La cantidad de vehículos necesarios, la capacidad, utilización y emisión de PM10 del mismo son variables auxiliares.

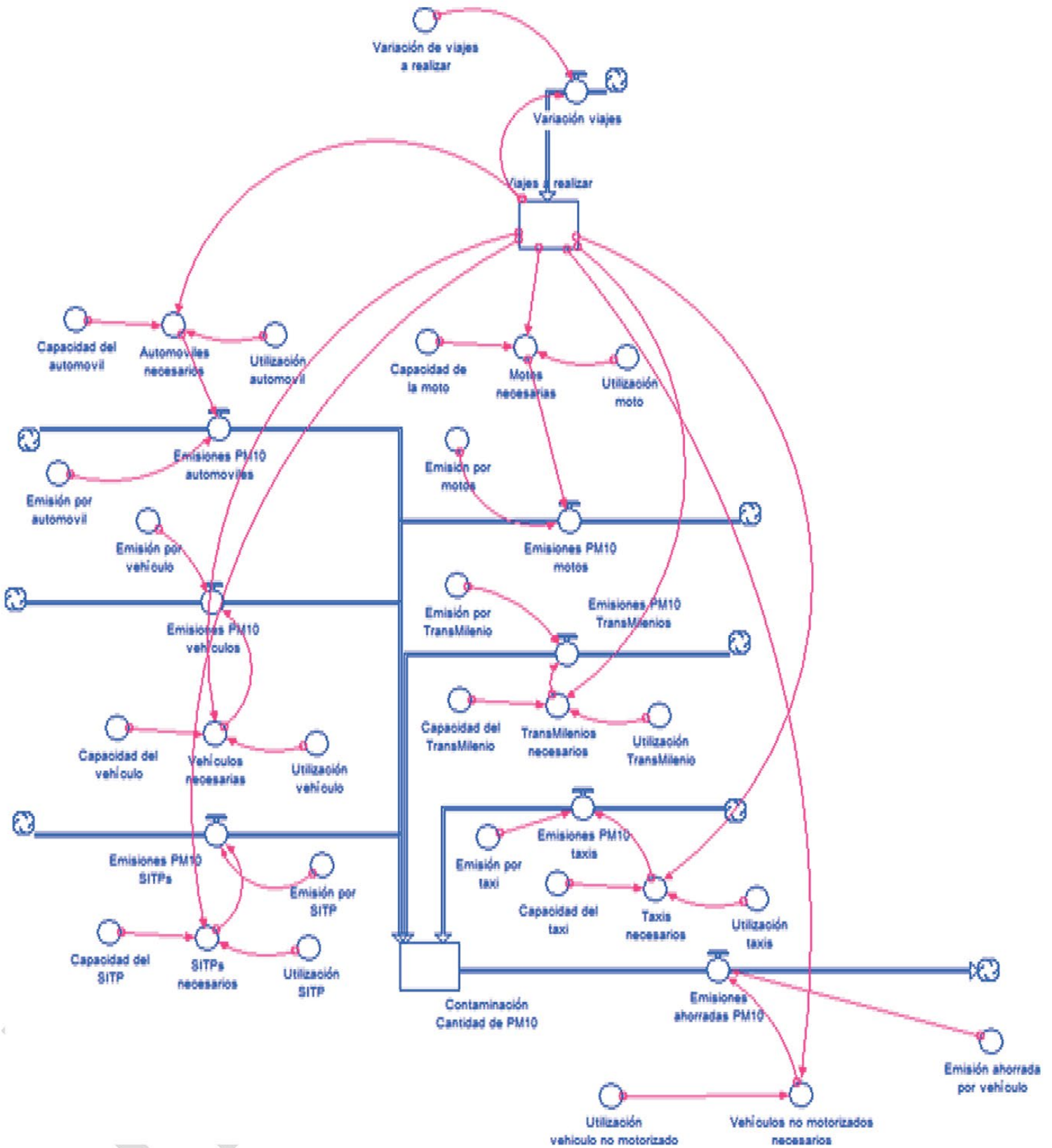


Figura 6. Diagrama de Forrester de la contaminación debido a partículas PM10 en Bogotá a causa del transporte.

Debido a la gran cantidad de variables, el diagrama de nivel fue realizado en el software de Stella, ya que trabaja con la misma notación.

b. Simulación en Stella

En el programa de Stella se definen cada una de las ecuaciones y valores de los elementos.

Para los niveles se especifican sus valores iniciales, que son 15'000.000 para los viajes por realizar y 0 para la contaminación.

Para los flujos, que son las emisiones creadas/ahorradas por cada medio de transporte, se fijan las ecuaciones, de tal manera que es posible observar en las gráficas que la contaminación debido a partículas PM10 aumentará hasta llegar a más de mil toneladas para el año 2060, producto del aumento de los vehículos necesarios para suplir los viajes de los bogotanos.

La cantidad de partículas PM10 en Kg en cada uno de los años (aproximadamente cada 365 días), se observa a continuación:

$$\text{Emisiones PM10 vehi X} = \text{Emision por vehiculos} * \text{Vehiculos X neces} \quad (2)$$

$$\text{Motos necesarias} = \frac{\text{Viajes a realizar} * \text{utilización moto}}{\text{Capacidad}} \quad (3)$$

$$\text{Sitp necesarios} = \frac{\text{Viajes a realizar} * \text{utilización sitp}}{\text{Capacidad}} \quad (4)$$

$$\text{Taxis necesarios} = \frac{\text{Viajes a realizar} * \text{utilización Taxis}}{\text{Capacidad}} \quad (5)$$

$$\text{Transmilenio necesarios} = \frac{\text{Viajes a realizar} * \text{utilización Taxis}}{\text{Capacidad}} \quad (6)$$

$$\text{Vehic no motorizados} = \frac{\text{Viajes a realizar} * \text{utilización de vehiculo}}{\text{Capacidad}} \quad (7)$$

Para cada una de las variables auxiliares, sus valores están dados en la sección A. En

el caso de la emisión ahorrada por no usar vehículos motorizados, esta equivaldrá a 0,0002 Kg/veh/día.

4. Resultados

La corrida de la simulación se dio desde el año 2018 hasta el año 2060, en días, lo cual equivale, aproximadamente, a 15.330 días.

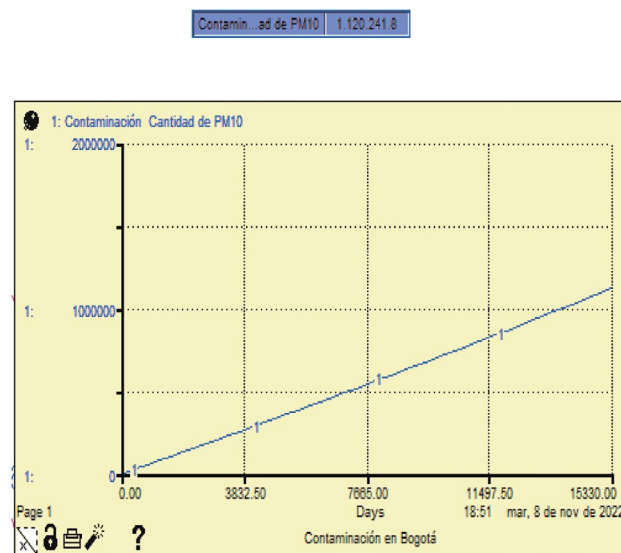


Figura 7 Simulación de la contaminación diaria en cantidad de PM10

Como es posible observar en las gráficas, la contaminación debido a partículas PM10 aumentará hasta llegar a más de mil toneladas para el año 2060, producto del aumento de los vehículos necesarios para suplir los viajes de los bogotanos.

La cantidad de partículas PM10 en Kg en cada uno de los años (aproximadamente cada 365 días), se observa a continuación:

Days	Contaminación
0	0.00
365	24.728.75
730	49.547.76
1095	74.457.36
1460	99.457.88
1825	124.549.65
2190	149.733.01
2555	175.008.28
2920	200.375.81

3285	225.835.93
3650	251.388.98
4015	277.035.30
4380	302.775.23
4745	328.609.11
5110	354.537.29
5475	380.560.10
5840	406.677.89
6205	432.891.02
6570	459.199.82
6935	485.604.65
7300	512.105.85
7665	538.703.79
8030	565.398.81
8395	592.191.27
8760	619.081.51
9125	646.069.91
9490	673.156.82
9855	700.342.59
10220	727.627.59
10585	755.012.18
10950	782.496.72
11315	810.081.59
11680	837.767.13
12045	865.553.73
12410	893.441.76
12775	921.431.57
13140	949.523.54
13505	977.718.05
13870	1.006.015.48
14235	1.034.416.18
14600	1.062.920.55
14965	1.091.528.96
Final	1.120.241.79

Figura 8. Datos arrojados por la simulación sobre la cantidad de partículas PM10 en Kg en el aire de Bogotá

Tabla 4. Porcentaje de utilización de medios de transporte en Bogotá fomentando los vehículos no automotores.

Vehículo	Utilización (%)
Vehículo particular	10
Moto	5
SITP	24
Transmilenio	15
Taxi	5
A pie y bicicleta	36
Otros	5

La gráfica y tabla de valores correspondientes, serán:

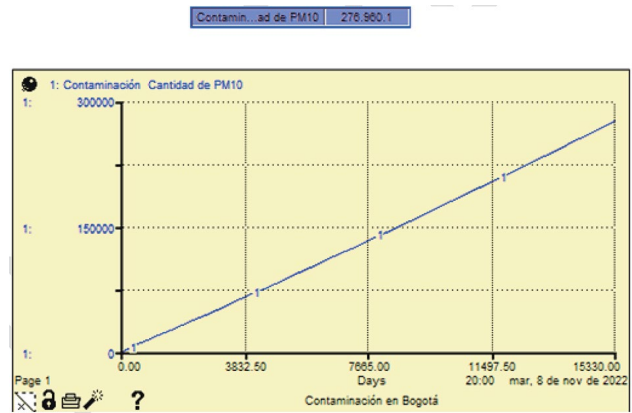


Figura 9. Gráfico de la contaminación (cantidad de partículas PM10) en Bogotá junto a su valor en Kg para el año 2060 si aumenta en un 1% el uso de vehículos no automotores.

Days	Contaminación
0	0.00
365	6.113.75
730	12.249.82
1095	18.408.28
1460	24.589.22
1825	30.792.72
2190	37.018.88
2555	43.267.73
2920	49.539.41
3285	55.833.98
3650	62.151.52
4015	68.492.12
4380	74.855.87
4745	81.242.84
5110	87.653.13
5475	94.086.81
5840	100.543.98
6205	107.024.72
6570	113.529.11
6935	120.057.24
7300	126.609.20
7665	133.185.07
8030	139.784.95

8395	146.408.91
8760	153.057.05
9125	159.729.46
9490	166.426.22
9855	173.147.43
10220	179.893.17
10585	186.663.53
10950	193.458.60
11315	200.278.47
11680	207.123.24
12045	213.992.99
12410	220.887.81
12775	227.807.80
13140	234.753.05
13505	241.723.65
13870	248.719.69
14235	255.741.27
14600	262.788.48
14965	269.861.40
Final	276.960.15

Figura. 10. Datos arrojados por la simulación sobre la cantidad de partículas PM10 en Kg en el aire de Bogotá si aumenta el uso de vehículos no automotores.

Como es posible observar, un cambio mínimo (un punto porcentual) en la utilización de los vehículos automotores genera un cambio significativo en la emisión de partículas PM10, en el cual la emisión del 2060 es un 24,73% de la emisión del mismo año en el modelo inicial. El impacto del uso de vehículos no automotores es significativo, si se tiene en cuenta también que solo se está observando una de las tantas emisiones que producen los vehículos diésel.

Dentro de las investigaciones futuras se pretende profundizar el modelo teniendo en cuenta el ingreso de variables como la entrada de vehículos de tipo eléctrico y gas con bajo nivel de material particulado en el mercado automotor los movimientos de migratorios de la ciudad.

5. Conclusiones

Las emisiones generadas por vehículos automotores no son un tema ligero; lo demuestran la infinidad de medidas gubernamentales y por parte de las empresas de producción de vehículos, cada día buscando reducir más y más las emisiones de gases nocivos (tanto para la atmósfera como para el organismo humano). La solución a esta problemática puede ser tan simple como fomentar el uso de la bicicleta o crear espacios más accesibles para el peatón, como se ve en el segundo caso puesto en marcha, donde un cambio tan mínimo significa una reducción significativa en la contaminación del aire.

Una alternativa un poco más cercana o viable es el uso del transporte público, más aún si esta emplea energías limpias, ya que, aunque la contaminación generada por el vehículo es considerablemente mayor a la de un vehículo particular, su capacidad también lo es para suplir la necesidad de viajes de los ciudadanos.

Es posible realizar un análisis de la calidad del aire de un área utilizando un diagrama causal, aunque las variables son susceptibles a errores debido a la variación o escasa información acerca de dichas variables (número de autos o vehículos de servicio público en circulación, por ejemplo).

Un incremento mínimo en la utilización de vehículos de combustión en Bogotá D.C. puede generar un aumento significativo a largo plazo en la cantidad de material particulado, lo cual puede acarrear diferentes problemáticas de salud y ambientales.

Teniendo en cuenta que en los inventarios de emisiones de combustión para PM10 (Figura 2) se evidencia que en el año 2022 los vehículos que emiten mayor cantidad de PM10 por año son los camiones, sería recomendable añadir este tipo de vehículos al estudio, ya que al no incluirlo se está omitiendo en el resultado final de la

simulación una cantidad enorme de PM10 emitido anualmente. Incluso, también sería factible realizar el modelo propuesto netamente a estos vehículos de carga, para así establecer políticas de control frente a la emisión generada por ellos.

Otra de las aplicaciones que se le puede brindar al modelo propuesto es en el proyecto de metro en Bogotá. Dentro de su evaluación, es de gran relevancia tener en cuenta la cantidad de emisiones de contaminantes críticos que este generará frente a su capacidad, debido a que gracias a que este contaría con una amplia capacidad, es

posible que se disminuya el uso de automóviles particulares y motos, y con ello la cantidad total de contaminantes emitidos cada año.

El modelo propuesto puede ser un punto de partida para otros modelos de emisiones en otras ciudades basada en la metodología de la dinámica de sistemas, además de ser flexible en la posibilidad de ingresar nuevas variables y escenarios, como el aumento y la disminución del bosque urbano en Bogotá D.C. y la capacidad a futuro de hospitales y clínicas para la atención de enfermedades respiratorias debido a la mala calidad del aire.

Referencias bibliográficas

- [1] DANE, “Proyecciones y retroproyecciones de población con base CNPV 2018”, marzo de 2021. Accedido el 13 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible: https://www.dane.gov.co/files/censo2018/proyecciones-de-poblacion/presentacion-Proyecciones-Demograficas_baseCNPV-2018_mar21.pdf.
- [2] “Cómo la contaminación del aire está destruyendo nuestra salud”. World Health Organization (WHO). [https://www.who.int/es/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health#:~:text=Pueden%20aumentar%20el%20riesgo%20de,inflamación%20pulmonar,%20e%20insuficiencia%20pulmonar.\(accedido%20el%2014%20de%20noviembre%20de%202022\).](https://www.who.int/es/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health#:~:text=Pueden%20aumentar%20el%20riesgo%20de,inflamación%20pulmonar,%20e%20insuficiencia%20pulmonar.(accedido%20el%2014%20de%20noviembre%20de%202022).)
- [3] E. Y. Ortiz Durán, J. A. Vásquez Ramírez, K. J. Blanco Fajardo y D. L. Gómez Gómez, “Inventario de emisiones de Bogotá, contaminantes atmosféricos”, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá - RMCAB, Bogotá, diciembre de 2021.
- [4] E. Behrentz, “Impacto del sistema de transporte en los niveles de contaminación percibidos por los usuarios del espacio público”, Dearq, Vol 4, pp. 122–129, 2009.
- [5] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017, 1 de noviembre). Resolución n.º 2254. Accedido el 13 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resolución+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f>
- [6] J. M. García, Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas. Juan Martin García, España 2003, pp. 25- 33
- [7] J. Aracil, Introducción a la dinámica de sistemas. Alianza editorial, España, 1997 pp. 15 - 18.
- [8] D. Agudelo and Y. López, “Dinámica de sistemas en la gestión de inventarios,” USB Med, Vol. 9 (1), pp. 75-85, 2018.
- [9] E. De Leo, D. Aranda, and G. A. Addati, “Introducción a la Dinámica de Sistemas”, repositorio Universidad Cema, 2020.
- [10] O. Rodríguez, A. Ramiro, S. Vargas, C. Venegas, and K. Allynson, “Consorcio Regional de Transporte de Madrid y Empres Transmilenio de Bogotá,” vol. 10, no. 15, pp. 1–19, 2019.
- [11] DANE, “¿Cuántos somos?,” dane.gov.co, 2018. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018/cuantos-somos>.
- [12] DANE, “Bogotá Población Total,” DANE, 2018. <https://sitios.dane.gov.co/cnpv/#/>
- [13] L. Amézquita, “Matriz origen-destino y eficiencia en modos de transporte urbano: Un análisis de la movilidad de Bogotá,” 2016.
- [14] D. Molina, “Configuración del territorio Soacha - Bogotá D.C. a partir de los usos de los sistemas masivos de transporte público y la movilidad,” 2017.
- [15] TransMilenio, Mapa de TransMilenio. 2022. [Online]. Available: <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/150404/conoce-nuestro-nuevo-mapa-interactivo/>
- [16] Departamento Nacional de Planeación, “CONPES da garantía a la Nación para financiar primera línea del metro de Bogotá,” Departamento Nacional de Planeación, 2018. <https://www.dnp.gov.co/Paginas/CONPES-da-garant%C3%ADa-de-la-Naci%C3%B3n-para-financiar-Primera-L%C3%ADnea-del-Metro-de-Bogota.aspx>
- [17] W. Fontoura, G. De Lorena y G. Mattos “La política brasileña de movilidad urbana : El Impacto en el sistema de transporte de Sao Paulo utilizando dinámica de sistemas”, Transport Policy, Vol 73 , pp. 51-61 , 2019.
- [18] M. Aaron, C. Gómez , J. Fontalvo y A. Gómez “Análisis de la movilidad vehicular en el departamento de la Guajira usando simulación. Caso Riohacha y Maicao”, información Tecnológica Vol. 30 (1), pp. 321-332 ,2012.
- [19] M. Callejas , H . Valero y A. Alarcón “Simulation based on system dynamic for evaluating the quality of transport service in a complex social system” Dyna, Vol. 80, pp. 33-40, 2013.
- [20] J. Medina “Modelación del Comportamiento del Tráfico de Transporte Público en la Avenida Boyacá entre la Avenida de las Américas y la calle 127 de la ciudad de Bogotá”, tesis, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D. C., Colombia, 2020.
- [21] Y. Zhou , H . Liu , J. Zhou y X. Meng “Simulation of the Impact of Urban Forest Scale on

- PM2.5 and PM10 based on System Dynamics”, sustainability, Vol. 11(21), 5998, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11215998>
- [22] Greenpeace, Greepeace.org. [Online]. Available: https://www.greenpeace.org/static/planet4-colombia-stateless/2021/10/e9f8ee02-pdf_greenpeace.pdf. [Accessed: 09-Nov-2022].
- [23] E. L. R. S.A.S., “En Bogotá se realizan 15 millones de viajes, de los cuales más de 30% se hacen a pie,” Diario La República, 21-Jul-2017. [Online]. Available: <https://www.larepublica.co/infraestructura/en-bogota-se-hacen-15-millones-de-viajes-de-los-cuales-mas-de-30-se-hacen-a-pie-25284>
- [24] O. Oróstegui, “Preocupa Crecimiento de Parque Automotor en Bogotá,” Bogotá Cómo Vamos, 19-Feb-2020.
- [25] C. Franco, G. Méndez y J. Espitia “Evaluacion de escenarios de descongestión vehicular en Bogotá D. C. mediate dinámica de sistemas”, ingeniería Vol. 20 (2) pp 209-231, 2015.
- [26] L. Álvarez y G. Méndez “Modelo dinámico para analizar políticas relacionadas con el tráfico peatonal en Bogotá”, Dyna Vol. 81 (186), pp 276-283, 2014.