

## ANÁLISIS DE COSTO/BENEFICIO EN SALUD POR REDUCCIÓN DE LA EXPOSICIÓN A MATERIAL PARTICULADO FINO EN EL SISTEMA TRONCAL DE TRANSMILENIO DE BOGOTÁ CAUSADA POR LA RENOVACIÓN DE LA FLOTA



Juan Pablo Contreras Soriano  
Paula Andrea Bulla Chavarro  
Boris Galvis

## Introducción

	BRT fleet technology share			
	baseline		1st follow-up	2nd follow-up
	2015 (%)	2017 (%)	2019 (%)	2020 (%)
Euro II/III	56.2	56.2	34.0	3.90
Euro IV/V	32.0	32.0	26.5	20.8
hybrid	11.5	11.5	10.7	10.4
Euro V-DPF	-	-	19.5	31.5
Euro VI-CNG	-	-	9.2	33.4

Morales Betancourt, R., Galvis, B., Mendez-Molano, D., Rincón-Riveros, J. M., Contreras, Y., Montejo, T. A., Rojas-Neisa, D. R., & Casas, O. (2022). Toward Cleaner Transport Alternatives: Reduction in Exposure to Air Pollutants in a Mass Public Transport. *Environmental Science and Technology*, 56(11). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07004>

La renovación de la flota del sistema troncal se realizó de manera gradual desde el año 2018 ya que los buses existentes en ese momento tenían tiempos de servicio superiores a 15 años.



## Toward Cleaner Transport Alternatives: Reduction in Exposure to Air Pollutants in a Mass Public Transport

Ricardo Morales Betancourt,\* Boris Galvis, Daniela Mendez-Molano, Juan Manuel Rincón-Riveros, Yadert Contreras, Thalia Alejandra Montejo, Diego Roberto Rojas-Neisa, and Oscar Casas

Cite This: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07004>

Read Online



Tabla 1. Concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en diferentes microambientes durante los años 2017 al 2020

Microambiente	Concentraciones de PM <sub>2,5</sub> [μg/m <sup>3</sup> ]		
	2017	2019	2020
Oficinas /Aulas <sup>a</sup>	18,73	17,72	16,63
Vivienda <sup>a</sup>	18,73	17,72	16,63
Buses de Transmilenio <sup>b</sup>	174,4	95,4	42,3
Estaciones de Transmilenio <sup>b</sup>	151,1	65,6	24,9

Nota <sup>a</sup>(Secretaría Distrital de Ambiente, s. f.) <sup>b</sup>(R. Morales Betancourt et al., 2022)

El trabajo de Morales Betancourt et al., (2022) proporcionó los datos de concentración media e sistema troncal de Transmilenio durante las campañas de muestreo





- Inversión para renovar la flota: 2,84 billones de pesos
- Usuarios promedio del sistema troncal



- Tasa de Inflación (IPC)
- Tasa de cambio (TRM)





Tabla 3. Defunciones relacionadas con PM<sub>2.5</sub> en la ciudad de Bogotá

Grupo de Enfermedades (CIE-10)	Defunciones		
	2019	2020	2022
Enfermedades Isquémicas del Corazón (I20-I25)	5218	6070	4806
Enfermedades Cardiopulmonares (I26-I28)	211	234	202

Nota. Datos Obtenidos de la bodega de datos de SISPRO



Del DANE se obtuvo la proyección de población en varios periodos



Tabla 5. Riesgos relativos y factores de concentración respuesta para causas básicas de muerte por el cambio en la concentración de PM<sub>2.5</sub>

Causa Básica de Muerte (CIE-10)	Riesgo Relativo* (RR)	Factor Concentración Respuesta (β)
Enfermedades Isquémicas del corazón (I20-I25)	1,15 <sup>a</sup>	0,01689 <sup>b</sup>
Enfermedades Cardiopulmonares (I26-I28)	1,09 <sup>a</sup>	0,00898 <sup>b</sup>

Nota. \*El riesgo relativo está basado en un cambio de 10 µg/m<sup>3</sup> con un intervalo de confianza del 95%. <sup>a</sup>(Krewski et al., 2009). <sup>b</sup>(U. S. Environmental Protection Agency, 2010)

Se empleó la ecuación del cambio en la mortalidad descrita por Anenberg utilizando en la fracción atribuible los factores de concentración-respuesta que utiliza la EPA.

$$\Delta\text{Mort} = y_0(1 - \exp^{-\beta\Delta X})\text{Pop.}$$



Se realiza una proyección de la relación costo-beneficio para el año 2028, donde  $\Delta Mort$  es el cambio en la mortalidad al año 2028 y el VSL es el valor estadístico de la vida.

$$Beneficios = \Delta Mort * VSL$$

Se emplea la ecuación donde  $I_0, I_1, I_2, I_n$  es el IPC desde el primer año (precio constante) hasta el último año, esta ecuación es empleada para obtener los costos proyectados para el año 2028.

$$\prod_{\infty} = \prod_i (1 + I_0) (1 + I_1) (1 + I_2) \dots (1 + I_n)$$



Tabla 4. Tiempo medio de exposición en los microambientes

Categoría	Tiempo (horas)	Incertidumbre
Oficinas/Aulas	7,1	0,7
Vivienda	12,8	0,6
Bus Transmilenio	1,8	0,4
Estación de Transmilenio*	0,166	-

Adaptado de Espinoza, (2007)

Nota. \* Espinoza emplea un valor de 4 minutos para las estaciones de Transmilenio, sin embargo, se empleó un tiempo de 10 minutos (0,166 horas) debido a la demanda de los últimos años

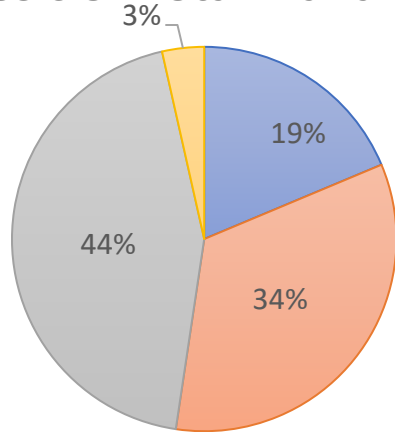
El tiempo medio de exposición se obtuvo mediante las encuestas realizadas por Espinoza, (2007)





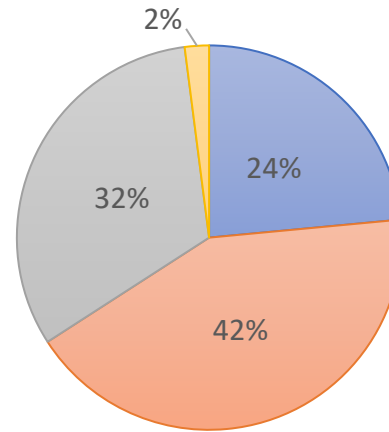
## Resultados

Exposición Total Diaria 2017



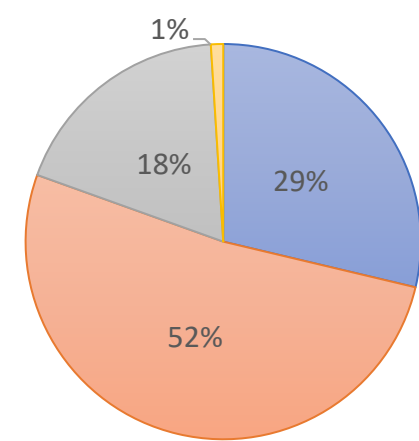
■ Oficinas/Aulas      ■ Viviendas  
■ Bus Transmilenio      ■ Estación de Transmilenio

Exposición Total Diaria 2019



■ Oficinas/Aulas      ■ Viviendas  
■ Bus Transmilenio      ■ Estación de Transmilenio

Exposición Total Diaria 2020



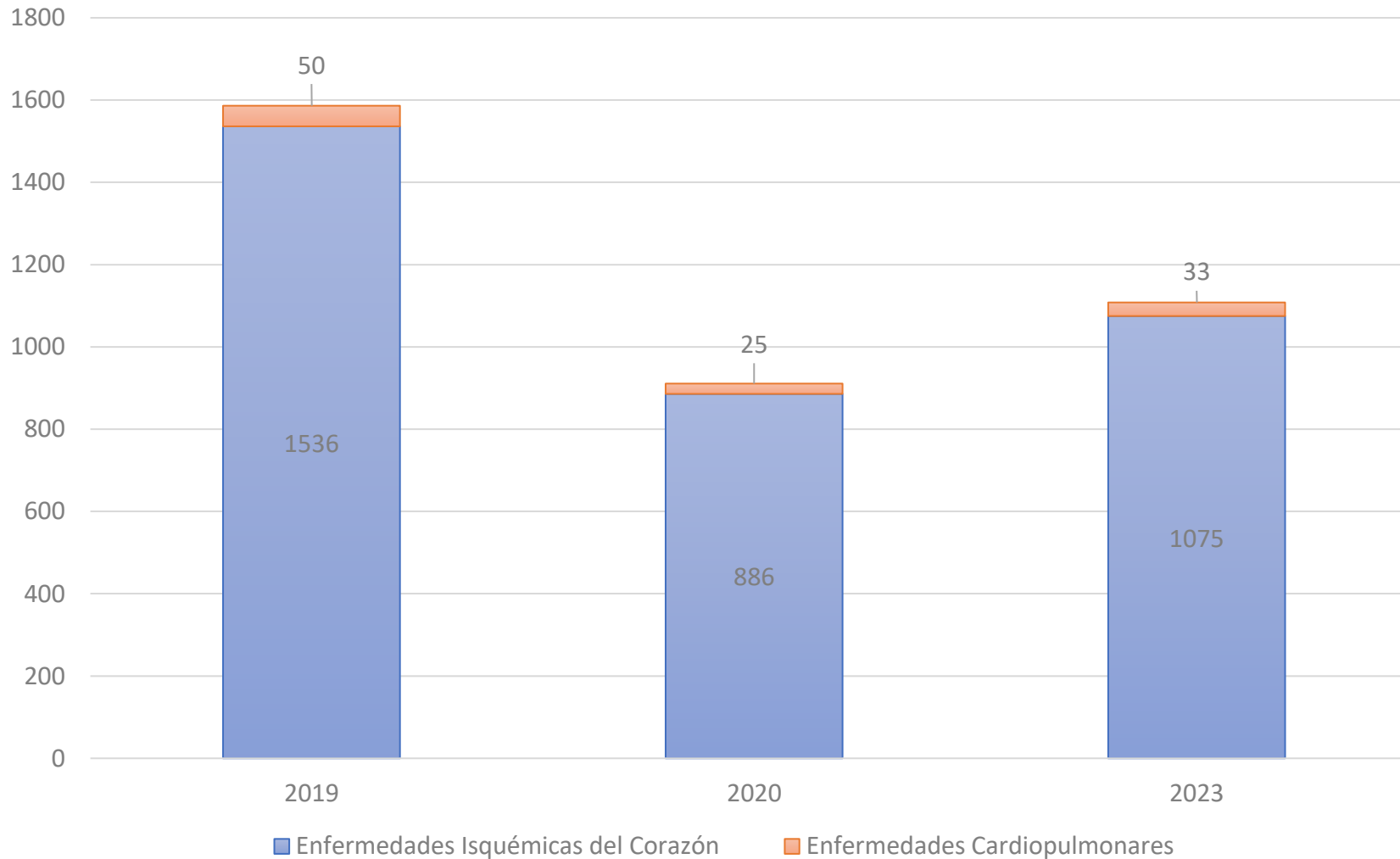
■ Oficinas/Aulas      ■ Vivienda  
■ Bus Transmilenio      ■ Estación de Transmilenio

Evolución del comportamiento en la exposición total diaria  
de un usuario de Transmilenio



## Resultados

### Variación en el cambio en la Mortalidad



El cambio en la mortalidad tuvo cambios relativamente altos debido a las medidas por la contingencia de COVID 19 y la disminución en las concentraciones



$$\text{Beneficios} = \Delta \text{Mort} * \text{VSL}$$

$$\text{Beneficios} = 10.439 * \text{USD } 352,844.00 = \text{USD } 3,683,338,516.00$$

$$\text{RCB} = \text{Beneficios} / \text{Costos}$$

**Tabla 13. Relación Beneficio-Costo de la Inversión**

	USD
<b>Beneficios</b>	3,683,338,516.00
<b>Costos</b>	716,349,213.54
<b>RBC<sup>a</sup></b>	5.14

Fuente: Autores

<sup>a</sup>La relación Beneficio-Costo es adimensional

La RCB es mayor a uno lo que significa que la inversión fue positiva y se recuperará la inversión



## Conclusiones

---

- ❑ La inversión en la renovación de la flota de Transmilenio tiene una relación beneficio-costos de 5.14. Es decir, que por cada peso invertido en Transmilenio se ahorran 5,14 en salud.
- ❑ La exposición total diaria para un usuario típico de Transmilenio entre los años 2017 y 2020 se redujo de  $711.63 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$  a  $411.21 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ .
- ❑ Al año 2028 las defunciones por enfermedades isquémicas del corazón y enfermedades cardiopulmonares relacionadas con  $\text{PM}_{2.5}$  disminuirían en alrededor de 10.000 casos si la exposición en el sistema troncal no cambia significativamente.



## Referencias

---

- Anenberg, S. C., Horowitz, L. W., Tong, D. Q., & West, J. J. (2010). An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling. *Environmental Health Perspectives*, 118(9), 1189–1195. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901220>
- Box, G., Jenkins, G., Reinsel, G., & Ljung, G. (2015). *Times Series Analysis: Forecasting and Control* (D. J. Balding, N. A. C. Cressie, G. M. Fitzmaurice, G. H. Givens, H. Goldstein, G. Molenberghs, D. W. Scott, A. F. M. Smith, R. S. Tsay, & S. Weisberg, Eds.; Quinta Edición).
- Castillo, J. J. (2010). Estimación de los beneficios en salud asociados a la reducción de la contaminación atmosférica en Bogotá, Colombia. *Observatorio Ambiental de Bogotá*, 26. <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/estimacion-de-los-beneficios-en-salud-asociados-a-la-reduccion-de-la-contaminacion-atmosferica-en-bogota-colombia>
- Contreras, J. P., & Giraldo, A. J. (2018). Revisión a la gestión pública de Transmilenio S.A. en su obligación de ofrecer una flota, para la prestación del servicio troncal, en condiciones óptimas de operación y seguridad. In *Personería delegada para la movilidad y la planeación urbana*. [https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/150277/publicacionesrevision a la gestion publica de transmilenio sa en su obligacion de ofrecer una flota en condiciones optimas de operacion y seguridad mayo 2018/](https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/150277/publicacionesrevision%20a%20la%20gestion%20publica%20de%20transmilenio%20sa%20en%20su%20obligacion%20de%20ofrecer%20una%20flota%20en%20condiciones%20optimas%20de%20operacion%20y%20seguridad%20mayo%202018/)
- DNP. (2017, May 7). *Los costos en la salud asociados a la degradación ambiental en Colombia ascienden a \$20,7 billones*. [https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradaci%C3%B3n-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-\\$20,7-billones-.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradaci%C3%B3n-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-$20,7-billones-.aspx)
- Duan, N. (1982). Models for human exposure to air pollution. *Environment International*, 8(1–6), 305–309. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(82\)90041-1](https://doi.org/10.1016/0160-4120(82)90041-1)
- Espinoza, M. (2007). Caracterización de los rangos de exposición a contaminantes atmosféricos en Bogotá: estudio piloto. *Universidad de Los Andes*.



## Referencias

---

- Morales Betancourt, R., Galvis, B., Balachandran, S., Ramos-Bonilla, J. P., Sarmiento, O. L., Gallo-Murcia, S. M., & Contreras, Y. (2017). Exposure to fine particulate, black carbon, and particle number concentration in transportation microenvironments. *Atmospheric Environment*, 157(1), 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.006>
- Morales Betancourt, R., Galvis, B., Mendez-Molano, D., Rincón-Riveros, J. M., Contreras, Y., Montejo, T. A., Rojas-Neisa, D. R., & Casas, O. (2022). Toward Cleaner Transport Alternatives: Reduction in Exposure to Air Pollutants in a Mass Public Transport. *Environmental Science and Technology*, 56(11). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07004>
- OMS. (1986). Carta de Ottawa para Promoción de la Salud. *Carta de Ottawa Para La Promoción de La Salud*, 6. <https://www.paho.org/hq/dmdocuments/2013/Carta-de-ottawa-para-la-apromocion-de-la-salud-1986-SP.pdf>
- OMS. (2016, September 27). *La OMS publica estimaciones nacionales sobre la exposición a la contaminación del aire y sus repercusiones para la salud*. <https://www.who.int/es/news/item/27-09-2016-who-releases-country-estimates-on-air-pollution-exposure-and-health-impact>
- Pachón, J., Pérez, M., Parra, A., Ramírez, J., & Ortiz, B. (2018). *Observación e investigación para avanzar de lo simple a lo complejo* (A. Ardila & G. Correa, Eds.; p. 225).
- Morales Betancourt, R., Galvis, B., Balachandran, S., Ramos-Bonilla, J. P., Sarmiento, O. L., Gallo-Murcia, S. M., & Contreras, Y. (2017). Exposure to fine particulate, black carbon, and particle number concentration in transportation microenvironments. *Atmospheric Environment*, 157(1), 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.006>





# ¡MUCHAS GRACIAS!

Más información



<https://casap.science/>



[casap@casap.science](mailto:casap@casap.science)