



Aplicación de una valoración económica ambiental al proyecto Metro Ligero de la 80

Juan Camilo Rengifo López

Economista, Mg en Estudios Urbano Regionales

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

Asesor

John Fernando Escobar Martínez, Doctor (PhD) en Ingenierías

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	(Rengifo López, 2023)
Referencia	Rengifo López (2023). <i>Aplicación de una valoración económica ambiental al proyecto Metro Ligerero de la 80</i> . [Trabajo de grado especialización].
Estilo APA 7 (2020)	Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Lista de Mapas	5
Resumen	5
Abstract	6
1 INTRODUCCIÓN	7
2 MARCO CONCEPTUAL.....	8
Fase 1: Identificación y selección de los impactos relevantes.....	9
Fase 2: Clasificación de impactos internalizables y no internalizables	10
Fase 3: Cuantificación biofísica de los bienes y servicios ecosistémicos.....	11
Fase 4: Análisis económico de los impactos internalizables	11
Fase 5: Valoración económica de los impactos no internalizables.....	12
3 CARÁCTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	14
3 METODOLOGÍA	18
Costos de Tratamiento y Función Dosis Respuesta	18
Fuentes de información	20
Parámetros usados	20
Pendientes dosis respuesta	20
Tasa de Incidencia.....	22
Costos de tratamiento.....	23
Cambios en la concentración de contaminante	24
4 RESULTADOS	25
Resultados del valor económico	25
5 LIMITACIONES	26
6 CONCLUSIONES	28

BIBLIOGRAFÍA.....30

Lista de tablas

Tabla 1. Cuantificación biofísica del cambio en los bienes y servicios ecosistémicos..... 11

Tabla 2. Análisis de internalización de impactos en la evaluación ex ante..... 12

Tabla 3. Caracterización del Metro Ligero de la 80..... 15

Tabla 4. Pendientes dosis respuesta por población en riesgo (%)..... 21

Tabla 5. Casos reportados por enfermedad. 22

Tabla 6. Tasas de Incidencia por enfermedad. 23

Tabla 7. Costos de tratamiento a precios de 2022..... 24

Tabla 8. Contaminantes evitados. Cambios en la concentración de contaminantes anual..... 24

Tabla 9. Número de casos evitados..... 25

Tabla 10. Costos evitados..... 25

Lista de figuras

Figura 1. Estructura general del proceso de evaluación económica ambiental en los EIA 10

Figura 2. Mapa conceptual sobre los grupos metodológicos para realizar valoraciones económicas 13

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
BSE	Bienes y servicios ecosistémicos.
CIE	Clasificación Internacional de Enfermedades
EEA	Evaluación Económica Ambiental

EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
FDR	Función Dosis Respuesta
PMA	Plan de Manejo Ambiental
RIPS	Registro Integral de Prestadores de Salud
SISPRO	Sistema Integrado de Información de la Protección Social
VEA	Valoración Económica Ambiental

Lista de Mapas

Mapa 1. Sistema Metro del Valle de Aburrá.....	16
Mapa 2. Barrios impactados por el Metro Ligerero de la 80.....	17

Resumen

La presente monografía realiza una valoración económica ambiental del proyecto Metro Ligerero de la 80 en Medellín, Colombia. Se enfoca en identificar y cuantificar los impactos ambientales y de salud pública, utilizando un enfoque de costos de tratamiento y función dosis-respuesta. Los hallazgos principales indican beneficios significativos en la reducción de contaminantes y la prevención de enfermedades relacionadas con la mala calidad del aire. Se destaca la importancia de aplicar enfoques económicos precisos en la valoración de proyectos de infraestructura con impactos ambientales. La implementación del Metro Ligerero contribuye a la disminución de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, generando un ahorro considerable en costos de atención médica y pérdidas de productividad. Las conclusiones apoyan políticas públicas que promueven el transporte público eléctrico como estrategia efectiva para mejorar la calidad del aire y la salud pública incentivando monitoreo, seguimiento y evaluación a través de Sistemas de Información Geográfica. Además, se identifican limitaciones en la disponibilidad y precisión de los datos, sugiriendo futuras investigaciones para una comprensión más amplia de los impactos de proyectos similares.

Palabras clave: Valoración Económica Ambiental, Metro Ligerero de la 80, Costo Evitado

Abstract

The present monograph conducts an environmental economic assessment of the Metro Ligerero de la 80 project in Medellín, Colombia. It focuses on identifying and quantifying environmental and public health impacts, using a treatment cost and dose-response function approach. The main findings indicate significant benefits in reducing pollutants and preventing diseases related to poor air quality. The importance of applying precise economic approaches in evaluating infrastructure projects with environmental impacts is highlighted. The implementation of the Metro Ligerero contributes to the decrease in respiratory and cardiovascular diseases, resulting in considerable savings in medical care costs and productivity losses. The conclusions support public policies that promote electric public transportation as an effective strategy to improve air quality and public health, encouraging monitoring, follow-up, and evaluation through Geographic Information Systems. Additionally, limitations are identified in the availability and accuracy of the data, suggesting future research for a broader understanding of the impacts of similar projects.

Keywords: Environmental Economic Assessment, 80 Light Rail, Avoided Cost

1 INTRODUCCIÓN

Mejorar la calidad de vida de los habitantes de una ciudad, siempre será un objetivo común de las administraciones locales en cuanto a la búsqueda del provisionamiento de servicios esenciales como salud, educación, esparcimiento, movilidad, entre otros. En particular, la ciudad de Medellín se ha caracterizado en cuanto a la dimensión movilidad, en tener uno de los mejores sistemas integrados multimodales de transporte no solo de Colombia sino a nivel mundial (metro, metrocables, buses, tranvía, escaleras eléctricas). Actualmente, en Medellín a través de su Empresa de Transporte Masivo se planea construir una nueva línea del sistema a modo de tren ligero el cual abarcará el borde occidental de la ciudad y que tiene como meta estar en etapa de construcción entre los años 2024 a 2026 para poder entrar en operación en 2027.

Por mencionar cifras que respaldan el por qué llevar a cabo un ejercicio aplicado como el expuesto en esta monografía, en un estudio realizado por investigadores de la Universidad de Antioquia denominado, Determinación de la carga atribuible de la enfermedad por contaminación del aire urbano y sus costos económicos para la ciudad de Medellín, “Si en Medellín se continúa con los programas de prevención y control de contaminación del aire por PM2.5, se evitaría el 13.8 % de la pérdida de años de vida saludable por enfermedades agudas como las isquémicas del corazón, las cerebrovasculares y las infecciones de las vías respiratorias inferiores como la influenza y la neumonía, y también por patologías crónicas como los tumores malignos de los órganos respiratorios y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica EPOC”

En ese orden de ideas, para que el proyecto fuera factible desde el punto de vista económico, social y ambiental, este debió pasar por un proceso de evaluación para cuantificar los posibles impactos que se generarían en su etapa de construcción y operación. Uno de los impactos más directos en estas fases radica en la salud de la población dado los incrementos de la congestión por cierres viales y la emisión de contaminantes que degradan la salud humana en particular en enfermedades asociadas al sistema vascular y respiratorio. A pesar de que se espera que la entrada de operación de un sistema completamente eléctrico reducirá significativamente las emisiones de CO₂, las externalidades positivas y negativas, deben ser valoradas mediante técnicas de valoración económica ambiental definidas por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA como

la valoración contingente o los costos evitados dada la presencia de una intervención que modificará las acciones de una población tratada o potencialmente a ser tratada.

El objetivo general de la investigación es implementar un método de valoración económica ambiental aplicado a un proyecto de infraestructura de movilidad férrea. Para responder a este objetivo general, se plantean dos objetivos específicos: en primera medida, caracterizar la hoja de ruta que se usa en proyectos que optan por licenciamiento ambiental a partir de la selección de impactos relevantes para llevar a cabo una valoración económica ambiental. En segunda medida, cuantificar un valor económico con base en la metodología del costo evitado y funciones dosis respuestas ante efectos en la salud con base en la selección de uno de los impactos más sensibles en cuanto a la forma de determinar su relevancia en proyectos de infraestructura vial, en este caso en particular, se habla del incremento o disminución del material particulado, incremento o disminución en la concentración de vapores e incremento o disminución de la demanda de combustibles fósiles como se explicará en detalle en el desarrollo de la monografía.

La monografía da a conocer en una primera sección, el marco conceptual que aborda la forma como se hace la selección de impactos a ser susceptibles de valoración económica ambiental en proyectos de infraestructura; luego se hace una caracterización de la zona de estudio por medio de técnicas de selección por localización. Posteriormente se desarrolla toda la metodología a través de una función dosis respuesta antes cambios en parámetros de la salud de la población, luego se presentan los resultados de la valoración económica y, finalmente, se presentan las conclusiones.

2 MARCO CONCEPTUAL

La valoración económica ambiental de los impactos ambientales de proyectos de infraestructura se basa en la Metodología General para la Presentación de Estudios Ambientales, los Términos de Referencia para la elaboración de estudios de impacto ambiental en proyectos ferroviarios y las directrices técnicas de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) para el uso de herramientas económicas en proyectos sujetos a licenciamiento ambiental. Su objetivo es analizar la relación entre los beneficios y las pérdidas de bienestar resultantes de los impactos ambientales internalizables y no internalizables del proyecto.

La evaluación económica de los impactos ambientales es fundamental para la gestión de los recursos naturales y es utilizada por diversas partes interesadas, incluyendo empresas, instituciones de investigación, autoridades ambientales y la sociedad en general, para monitorear el estado del capital natural, especialmente cuando se implementan proyectos de desarrollo.

Los proyectos de desarrollo, como la construcción del Metro Ligerero de la 80, buscan mejorar la calidad de vida de los habitantes y visitantes de una región, en este caso, integrando la zona occidental de Medellín al sistema de transporte masivo. Sin embargo, es esencial evaluar si los beneficios del proyecto superan los costos sociales y ambientales que genera su construcción, operación y mantenimiento. La evaluación económica de impactos ambientales proporciona información clave sobre cómo el proyecto contribuye al bienestar social de la población en su área de influencia. El proceso metodológico de la evaluación económica ambiental (EEA) consta de seis fases.

Fase 1: Identificación y selección de los impactos relevantes

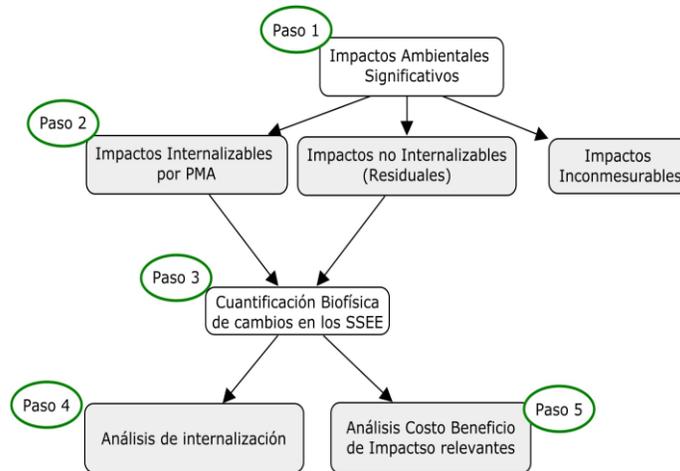
A partir de los resultados del proceso de evaluación ambiental, se detectan los impactos ambientales y sociales significativos, que son aquellos calificados como de importancia alta en las categorías de críticos y severos, además de considerar los impactos moderados que puedan tener un impacto significativo en el bienestar social. Esta identificación se basa en la gravedad de los impactos negativos y los beneficios de los impactos positivos. La identificación de los impactos relevantes se basa en la calificación de importancia obtenida en la evaluación ambiental y se complementa con criterios adicionales:

- La necesidad de implementar medidas de control más rigurosas para el impacto.
- La posibilidad de evaluar el impacto de manera cuantitativa.
- La disponibilidad de herramientas económicas para cuantificar el impacto.

Estos impactos significativos, identificados mediante los criterios mencionados, se utilizan en el análisis económico, el cual distingue entre impactos internalizables y no internalizables. La

metodología de evaluación económica ambiental propuesta sigue el enfoque de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA & MinAmbiente, 2017), como se describe en el documento "Criterios técnicos para el uso de herramientas económicas en los proyectos, obras o actividades sujetas a licenciamiento ambiental", como se ilustra en la **Figura 1**.

Figura 1. Estructura general del proceso de evaluación económica ambiental en los EIA



Fuente: (ANLA & MinAmbiente, 2017)

Siguiendo el esquema presentado en la Figura 6.3.1, se plantean las siguientes etapas adicionales de la evaluación económica ambiental (EEA).

Fase 2: Clasificación de impactos internalizables y no internalizables

Las directrices de la ANLA sugieren enfocar el análisis económico de impactos en aquellos que podrían transformarse en impactos no internalizables. Esto significa que se centran en las externalidades ambientales, económicas y sociales, ya sean negativas o positivas, que puedan tener un impacto significativo en la población afectada relevante. A continuación, se ofrecen las definiciones de impacto ambiental internalizable y no internalizable:

- Impacto ambiental internalizable: Se refiere a los efectos ambientales que pueden ser internalizados o gestionados dentro del proceso económico o empresarial, sin generar costos o beneficios significativos para la población afectada.

- Impacto ambiental no internalizable: Hace referencia a los efectos ambientales que no pueden ser fácilmente internalizados o controlados en el proceso económico o empresarial, y que pueden generar costos o beneficios significativos para la población afectada.

Fase 3: Cuantificación biofísica de los bienes y servicios ecosistémicos

En esta sección, se determinan los servicios ecosistémicos que serían impactados por los efectos negativos y positivos significativos, ya sean internalizables o no. Para llevar a cabo esta presentación, se crea un indicador de referencia relacionado con el estado inicial del recurso, ya sea biótico, abiótico o socioeconómico, y se calcula el cambio correspondiente en el indicador en la situación que resultaría con la implementación del proyecto. Esto se realiza mediante el llenado de la **Tabla 1**.

Tabla 1. Cuantificación biofísica del cambio en los bienes y servicios ecosistémicos.

IMPACTO NEGATIVO	SERVICIO ECOSISTÉMICO O AMBIENTAL	INDICADOR LÍNEA BASE (EIA)			CUANTIFICACIÓN (CAMBIO DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO O AMBIENTAL)
		NOMBRE	UNIDAD BIOFÍSICA	VALOR	
Valores Totales					

Fuente: (ANLA & MinAmbiente, 2017)

Fase 4: Análisis económico de los impactos internalizables

Para llevar a cabo este análisis, se parte de la información contenida en la **Tabla 1**. En esta tabla, se incorporan tres campos adicionales relacionados con las medidas de gestión incluidas en el Plan de Manejo Ambiental (PMA), las cuales tienen como objetivo corregir o prevenir el impacto correspondiente. Estos campos son los siguientes:

- El nombre de la medida específica del PMA.
- El estado final del indicador de referencia una vez que se han aplicado las medidas de gestión.
- El costo asociado a la implementación de la medida. Este costo se expresa en la **Ecuación 1**.

Ecuación 1. Estimación del costo económico.

$$EC_i = CT_i + CO_i + CP_i$$

Donde,

EC_i : Estimación del costo ambiental del impacto i .

CT_i : Costos de transacción (como los costos de impuestos, tasas y precios por el uso del servicio ambiental).

CO_i : Costos de operación (que son los que se generan por la actividad como tal, por ejemplo, las siembras, los cerramientos, compras de predios, etc.)

CP_i : Costos de personal requerido para cada medida.

En resumen, en esta sección se construye la

Tabla 2.

Tabla 2. Análisis de internalización de impactos en la evaluación ex ante.

IMPACTO NEGATIVO	SERVICIO ECOSISTÉMICO O AMBIENTAL	INDICADOR LÍNEA BASE (EIA)		CUANTIFICACIÓN (CAMBIO DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO O AMBIENTAL)	MEDIDA DE PMA			VALOR INDICADOR	COSTOS AMBIENTALES ANUALES		
		NOMBRE	VALOR		PROGRAMA	SUBPROGRAMA	NOMBRE		C	C	C
Valores Totales											

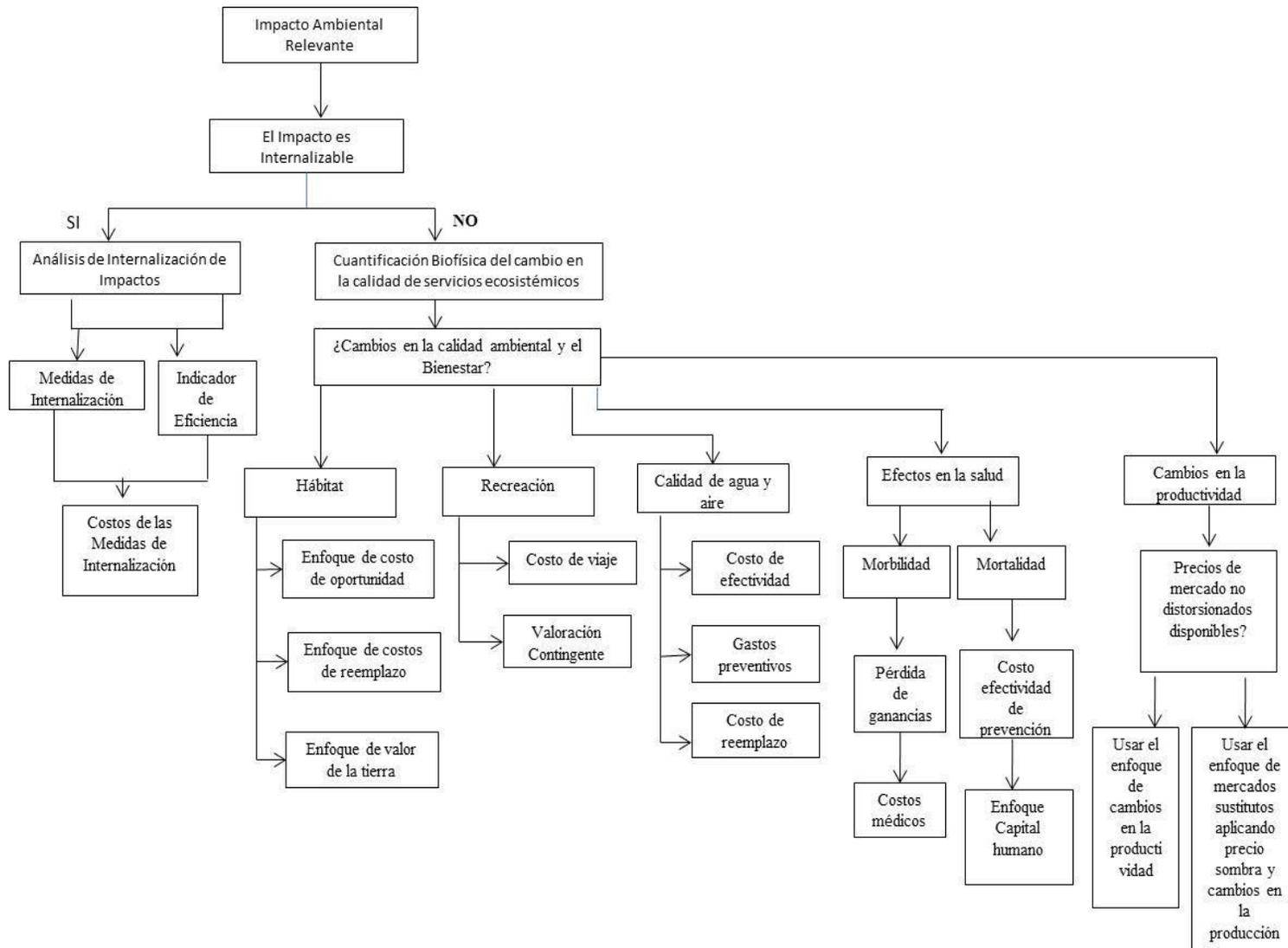
Fuente: (ANLA & MinAmbiente, 2017)

Fase 5: Valoración económica de los impactos no internalizables

El ejercicio de valoración económica parte de la identificación del Valor Económico Total de los bienes y servicios ambientales afectados por cada impacto no internalizable. En cada impacto se indaga si la sociedad tiene un consumo directo de los bienes y servicios ecosistémicos (BSE) afectados (valor de uso) o si pueden declarar algún tipo de satisfacción por la mera existencia de esos BSE (valor de no uso), o se está en presencia de ambas situaciones. Esta clasificación de los valores de uso y no uso permite seleccionar la metodología de valoración adecuada para estimar el valor económico del impacto. Luego, la elección de la metodología se enmarca en las opciones presentadas por la ANLA & MinAmbiente (2017) a partir del esquema de Pagiola & Bank (1998) mostrado en la

Figura 2.

Figura 2. Mapa conceptual sobre los grupos metodológicos para realizar valoraciones económicas



Fuente: (ANLA & MinAmbiente, 2017), (MinAmbiente, 2017).

3 CARÁCTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El Metro de la 80 se erige como uno de los proyectos más trascendentales en la historia de la movilidad y la renovación urbana de Medellín. En conjunto con otra inversión en movilidad, Tren del Río, promete potenciar el desarrollo ferroviario regional y ejercer un impacto positivo en la dinámica metropolitana. La magnitud de este proyecto, su considerable inversión y el tiempo necesario para su ejecución ponen de manifiesto su relevancia tanto para la ciudad como para sus habitantes. Por ello, resulta crucial que la población se familiarice con cada pormenor de esta mega obra que formará parte integral de la vasta red del Metro de Medellín.

De acuerdo con la minuta contractual de la Empresa de transporte masivo del Valle de Aburrá Ltda. – Metro de Medellín Ltda. (2022), las características distintivas del Metro de la 80 de Medellín son notables. Este sistema abarcará una extensión de 13,25 kilómetros en el occidente de la ciudad, con la proyección de construir 17 estaciones. La inversión prevista superará los 3.5 billones de pesos, consolidando su magnitud. Además, se destacan elementos innovadores, como su cualidad de Metro Ligero y su integración en cuatro estaciones con las líneas de metro existentes, conectando así estaciones como Caribe y Aguacatala de la Línea A del metro actual, además de permitir la integración con Metroplús en la estación ubicada en La Palma. La conexión de estaciones como Caribe, Aguacatala y Floresta, enlazando ambas líneas del metro, contribuirá a la eficiencia del sistema. Asimismo, se prevé la construcción de una estación parcialmente soterrada en el barrio Robledo, y los talleres encontrarán su sede en la antigua ubicación de Everfit en el barrio Caribe.

En cuanto a su operatividad, el Metro de la 80 tendrá una velocidad promedio de 25 km/h y una velocidad máxima en el corredor de 60 km/h. Gran parte del tramo estará cubierto con grama natural, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental al evitar la emisión de 5 millones de toneladas de CO₂. Además, se incluirá ciclo infraestructura a lo largo de todo el recorrido. En términos de capacidad, se estima que el sistema podrá transportar a 14.000 pasajeros en cada sentido en una hora, y los trenes tendrán la capacidad de albergar de 300 a 600 pasajeros. La construcción se llevará a cabo en tres tramos, comenzando con el tramo Caribe-Floresta, y la línea será bautizada como la "Línea E de Eco ciudad".

El Metro de la 80 se extenderá por 32 barrios del occidente de Medellín, trayendo consigo un horizonte de movilidad renovada y desarrollo urbano. Su impacto será innegable, consolidándose como un hito en la historia de la metrópolis y la región de Antioquia.

A través de técnicas de selección por localización, se determinaron algunas de las variables de caracterización del trazado del Metro Ligero de la 80 de la Ciudad de Medellín. La **Tabla 3** reporta esa información. Además, el **Mapa 1** y el **Mapa 2** visualizan el Sistema Metro del Valle de Aburrá actual a 2023 y su proyección a 2027 y los barrios impactados respectivamente.

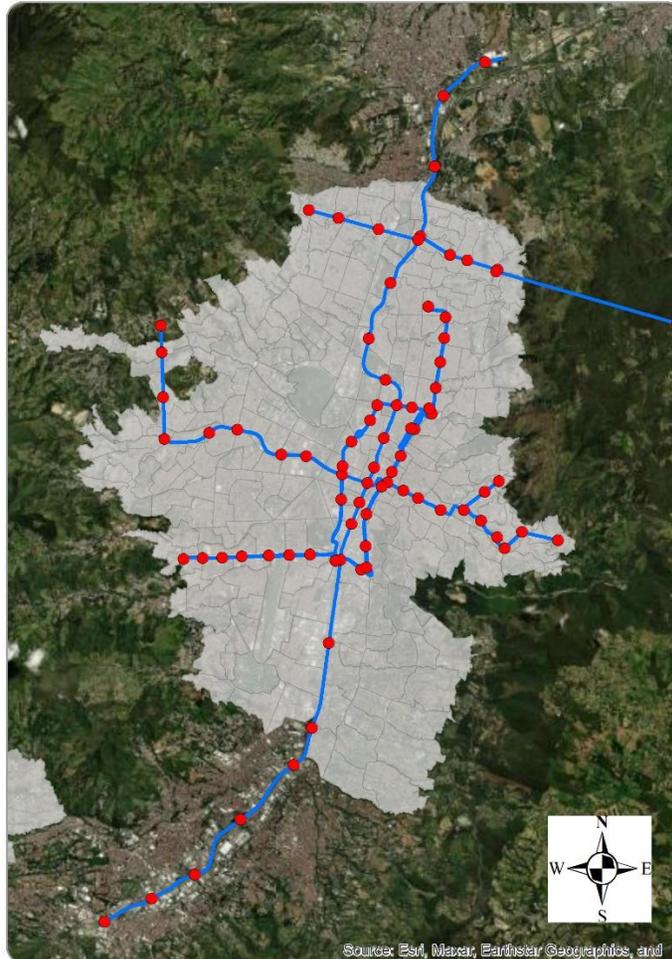
Tabla 3. Caracterización del Metro Ligero de la 80.

Variable de caracterización	Descripción espacial
Longitud	13.25 km
Estaciones	17
Comunas	7
Barrios	34
Manzanas	171
Población Directamente Impactada	33.861
Viviendas	14.428
Hogares	12.945
Arboles	3.328
Área de intervención	1'245.016 metros cuadrados

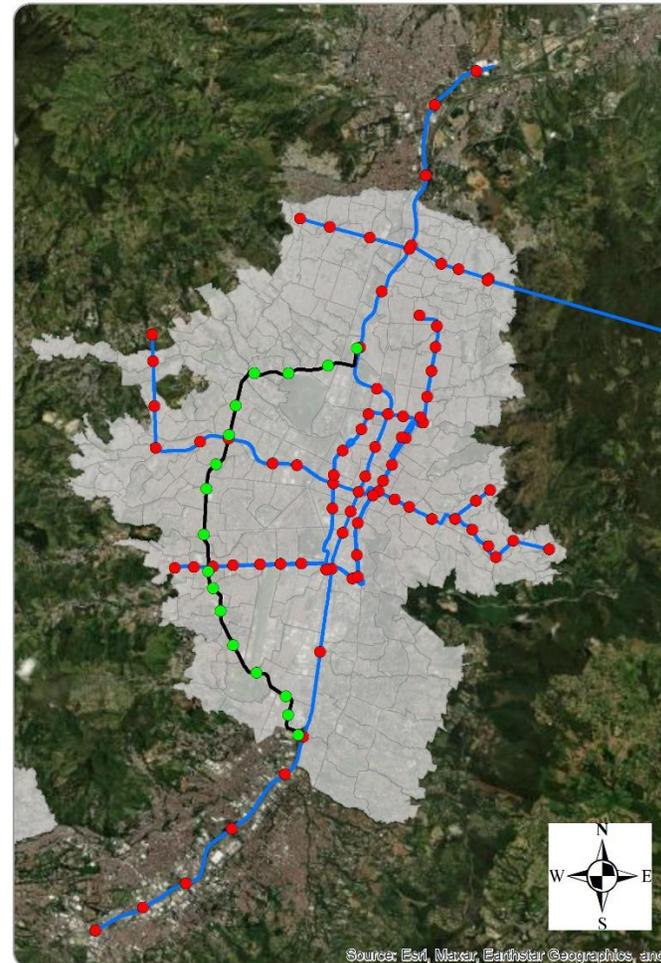
Fuente: elaboración propia

Mapa 1. Sistema Metro del Valle de Aburrá

Sistema Metro (2023)



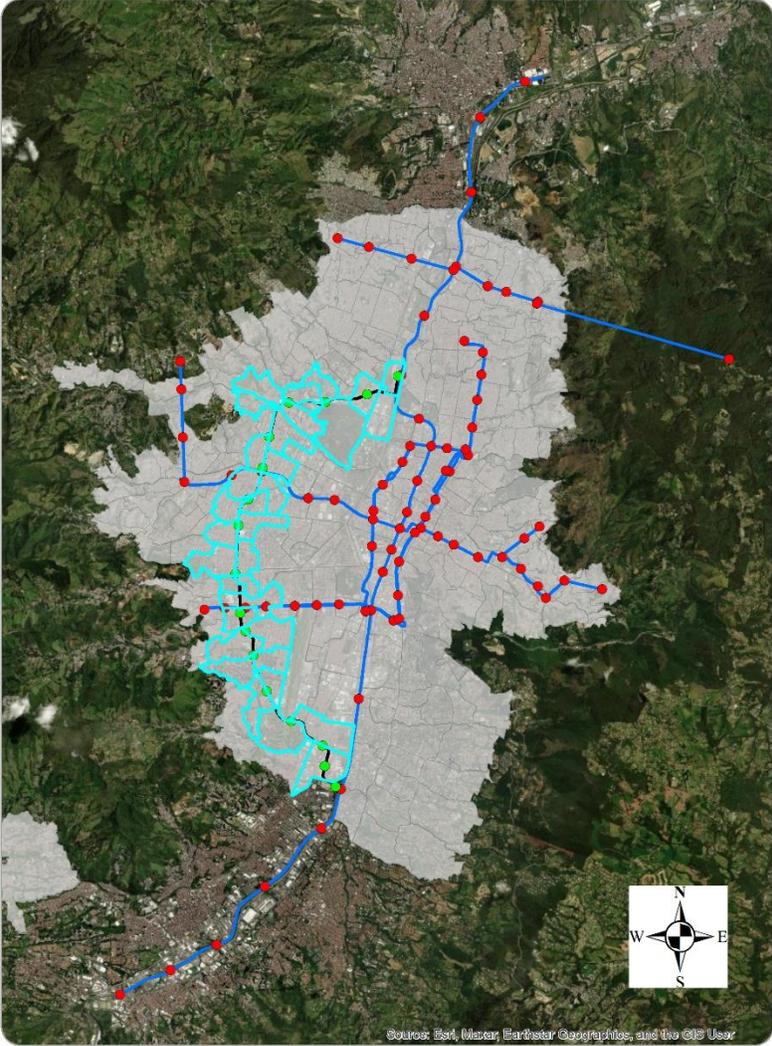
Sistema Metro (2027)



Fuente: elaboración propia

Mapa 2. Barrios impactados por el Metro Ligero de la 80

Barrios Impactados por el Sistema



Fuente: elaboración propia

3 METODOLOGÍA

La metodología usada para la valoración económica de este impacto fue la de costos de tratamiento y funciones dosis respuesta (FDR). En particular, este impacto analiza cómo cambia la salud de los usuarios debido a la mejora en la calidad del aire causada por la puesta en marcha del Metro Ligero de la 80. Dado que el sistema de transporte es eléctrico y no emite contaminantes, se sugiere que tiene un impacto positivo en la salud de los usuarios. El propósito es calcular la cantidad de casos de enfermedades relacionadas con la mala calidad del aire que se evitan gracias al sistema, así como los costos que el sistema de salud ahorra en el tratamiento de estas afecciones. De esta manera, se calcula la FDR, se establecen los costos de tratamiento y se realiza una evaluación económica integral.

Es de resaltar que este impacto, hace parte del medio abiótico y a su vez del componente atmosférico de la matriz de impactos el cual tiene relación con las etapas de estudios y diseños, construcción, operación y mantenimiento del Metro Ligero de la 80. En un primer momento, todas las actividades relacionadas con la fase constructiva se orientan a establecer las medidas necesarias para prevenir y mitigar la emisión de material particulado por efecto de las actividades de construcción del Metro Ligero de la 80. De igual modo, se capacita a todo el personal de obra sobre las medidas de prevención y control de emisiones atmosféricas, igualmente sobre los efectos que puede causar el material particulado con el fin de crear una concientización y que actúe como medida de prevención de la alteración de la calidad del aire. Ya en la fase de operación, habrá una reducción considerable de contaminantes y una mejora de la calidad del aire.

Costos de Tratamiento y Función Dosis Respuesta

Los efectos en la salud relacionados con la reducción de contaminantes gracias al Metro Ligero de la 80 fueron estimados mediante el uso de Funciones Dosis-Respuesta (FDR). Estas funciones describen la relación entre la cantidad de un contaminante específico y la respuesta en la salud de un grupo de personas como se explicará más adelante. En teoría, sería más apropiado considerar la cantidad que el receptor recibe en lugar de la concentración del contaminante como punto de referencia. Sin embargo, en la práctica, esta información detallada rara vez está disponible, por lo

que es común encontrar estudios económicos que utilizan la concentración en lugar de la cantidad (Octaviano, 2011). La **Ecuación 2** expresa una función dosis respuesta estándar.

Ecuación 2. Formalización de una función dosis respuesta estándar.

$$H_i = \beta_i \cdot T_i \cdot \Delta C_i \cdot P_i$$

Donde

- H_i : corresponde al número de casos atribuibles a la enfermedad i a un cambio en la concentración de un contaminante. Si el caso de estudio es una reducción del contaminante, entonces H_i serán casos evitados. En caso contrario, serán casos aportados.
- β_i : es la pendiente dosis respuesta. Expresa el cambio porcentual en los casos atribuibles a una concentración de $1 \mu g \cdot m^{-3}$. Es decir, β_i se expresa como $(\Delta\% / \mu g \cdot m^{-3})$
- T_i : tasa de incidencia. Tasa de casos reportados de la enfermedad por población. Es decir, $(Casos\ enfermedad\ i / población)$. También se conoce como línea base del efecto.
- ΔC_i : cambio en la concentración del contaminante estudiado. Se expresa como (Δ / m^3) .
- P_i : población expuesta al contaminante. También se conoce como población en riesgo.

Las unidades de cada factor pueden variar entre documentos de referencia, por ejemplo, la pendiente dosis respuesta se puede expresar como se indica en la **Ecuación 3**.

Ecuación 3. Pendiente dosis respuesta.

$$\left(\frac{\Delta}{10 \mu g \cdot m^{-3}} \right)$$

y la tasa de incidencia como tasa basal se expresa como en la **Ecuación 4**.

Ecuación 4. Tasa de incidencia.

$$\left(\frac{Casos\ enfermedad\ i}{100\ 000\ personas} \right)$$

En ese orden de ideas, los costos vinculados a cada situación se pueden determinar al relacionar cada efecto H_i con los costos relacionados con la productividad y los costos de atención médica. Como aclaración, los costos de productividad hacen referencia a las ganancias que el individuo deja de obtener debido a su enfermedad, mientras que los costos de atención médica engloban todos los gastos que la persona (directa o indirectamente) debe asumir para superar o aliviar su enfermedad. De esta manera, utilizando la **Ecuación 2**, es factible determinar los casos

relacionados con modificaciones en la concentración de una sustancia específica. Cuando se busca analizar el impacto que se ha evitado, es necesario proporcionar un cambio (ΔC_i) equivalente a la cantidad del contaminante que ya no se emite. En contraste, si el objetivo es evaluar el impacto generado, (ΔC_i) representa la cantidad del contaminante generado por el sistema.

Fuentes de información

Para llevar a cabo la valoración económica de este impacto, se recopiló información sobre el número de casos y los costos de tratamiento de las enfermedades vinculadas a la deterioración de la calidad del aire. Esta información se obtuvo del Sistema Integrado de Información de la Protección Social (SISPRO) y el Registro Integral de Prestadores de Salud (RIPS) del (Ministerio de Salud, 2022b; 2022a) utilizando la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-10). Además, se utilizaron investigaciones locales específicas para Colombia y Medellín, así como estudios internacionales que examinaron la relación entre la variabilidad de partículas en el aire y la incidencia de enfermedades respiratorias.

Parámetros usados

Pendientes dosis respuesta

La pendiente dosis respuesta (β_i)), es un parámetro que en rigor debe calcularse a través de un diseño econométrico con datos reales de una región de estudio. Al respecto, Octaviano (2011) afirma:

“Esta dosis es función de la calidad del aire y de factores como el tiempo de exposición, la relación de concentración dentro y fuera de recintos cerrados, el nivel de actividad física, la composición del aire contaminado, la dimensión y la distribución de especies y la proximidad a la fuente de contaminación”. (p.14)

Específicamente, para evaluar este impacto, se consideraron dos investigaciones a nivel local que calcularon las respuestas de impulso para PM10, NOX y SO2. Estos estudios fueron realizados por la Contraloría General de Medellín y la Universidad Nacional (2018) , así como por Golub et al., (2014) en colaboración con el Banco Mundial. Además, se incluyó un estudio internacional realizado por Salud & Ambiente (2002) en la zona metropolitana del Valle de México . La

importancia de contar con estos estudios locales radica en la necesidad de evitar problemas en la valoración al combinar datos de diferentes fuentes. Algunos autores, como Castillo (2011), se han visto limitados por la falta de respuestas de impulso locales y han tenido que utilizar respuestas foráneas para analizar el impacto en la morbilidad y mortalidad. La **Tabla 4** presenta un resumen de las respuestas de impulso utilizadas específicamente para el proyecto del Metro Ligerero de la 80. Es importante destacar que, para el cálculo final, se determinaron las emisiones de partículas PM2.5 en lugar de PM10 en los escenarios con el 100% y 50% de los buses respectivamente. Del mismo modo, se utilizó la respuesta de impulso de PM10 para la ponderación.

Tabla 4. Pendientes dosis respuesta por población en riesgo (%)

ENFERMEDAD	POBLACIÓN EN RIESGO	PM 10 Y SULFATOS	NITRATOS	SO2
Bronquitis crónica	>=30 Años	0,52	0,18	0
Ingresos hospitalarios (respiratorios)	Población total	0,04	0,02	0,04
Visitas a salas de urgencia (respiratorias)	Población total	0,311	0,1555	0
Crisis aguda de asma	Asmáticos	0,963	0,387	0

Fuente: elaboración propia

Los valores presentados en la **Tabla 4** representan la probabilidad promedio de desarrollar una enfermedad específica en función de la concentración del contaminante. Por ejemplo, los parámetros correspondientes a la bronquitis crónica indican que un aumento de un microgramo por metro cúbico en la concentración de PM₁₀, en promedio, incrementa la probabilidad de padecer esta enfermedad en un 0,52%. Además, si la concentración de nitratos aumenta en una unidad, se suma un 0,18% adicional al aumento de la probabilidad, mientras que un aumento en la concentración de SO₂ no tiene un efecto adicional en la probabilidad.

Tasa de Incidencia

La tasa de incidencia es una medida de casos reportados de una enfermedad por población afectada (*Casos reportados/ población afectada*). Los datos de casos reportados por enfermedad se toman de la base de datos de SISPRO y RIPS al último periodo de corte de abril de 2023. Se filtra por código CIE 10 de la enfermedad y se toman los valores de casos reportados en el año 2022. Los casos reportados en 2022 por enfermedad se resumen en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Casos reportados por enfermedad.

ENFERMEDAD	CASOS REPORTADOS
Bronquitis crónica (>=30 Años)	7.967
Ingresos Hospital [Respiratorias] (Población total)	12.432
Visitas a Urgencias [Respiratorias]	18.352
Crisis asma (Población total)	1.101
Número de Asmáticos (Población total)	25.895

Fuente: SISPRO-RIPS (2022)

Siguiendo la décima revisión de la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-10), que se utiliza para registrar enfermedades en la base de datos SISPRO-RIPS, se emplean los siguientes códigos para identificar cada caso de enfermedad y se aplican filtros a los casos registrados en 2020 en la ciudad de Medellín. Para identificar casos de bronquitis crónica en personas de 30 años o más que sobrevivieron, se utilizan los códigos J40X, J410, J411, J418 y J42X.

En cuanto a los ingresos hospitalarios relacionados con enfermedades respiratorias, se considera todo el grupo C10, pero se excluyen los códigos relacionados con bronquitis y asma para evitar duplicaciones. Además, se eliminan los grupos J60-J70 debido a enfermedades causadas por agentes externos como polvo o alimentos, así como los grupos J85-J86 relacionados con contaminantes en el agua o alimentos. No se aplica un filtro de edad, y se incluye a todas las personas que sobrevivieron al hospital.

El sistema cardiovascular comprende el sistema respiratorio y circulatorio, ya que se incluye a personas mayores de 65 años en el análisis de ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias. Para las visitas a urgencias por enfermedades respiratorias, se utilizan los mismos

códigos que en los ingresos hospitalarios, pero se filtran para incluir solo casos de visitas a urgencias, sin considerar la edad de las personas que sobrevivieron.

Para calcular la tasa de incidencia de asmáticos, se requieren dos medidas: los casos de crisis de asma reportados y la cantidad de asmáticos en la población. En el caso de las crisis de asma, se utiliza el código J46X y se aplica un filtro para atenciones en urgencias, incluyendo a todas las personas que sobrevivieron al hospital, sin importar su edad. Es importante destacar que el código J46X se refiere al "estado asmático", y se asume que las crisis se atienden en urgencias en lugar de consultas generales. Para identificar a los asmáticos, se buscan todos aquellos que han sido atendidos en hospitales por algún tipo de asma, utilizando los códigos J450, J451, J458 y J459.

La información sobre la población se refiere al número de habitantes elegidos para la caracterización en el área de influencia del proyecto, que es de 408.719 personas. Esta población se distribuye de la siguiente manera: el 41.24% tiene 15 años o más, el 32.14% tiene 20 años o más, el 20.13% tiene 30 años o más y el 6.49% tiene 65 años o más. Estos porcentajes se estiman a partir de la base de manzana censal del DANE en 2018.

Tabla 6. Tasas de Incidencia por enfermedad.

ENFERMEDAD	TASAS DE INCIDENCIA
Bronquitis crónica (>=30 Años)	9,68%
Ingresos Hospital [Respiratorias] (Población total)	3,04%
Visitas a Urgencias [Respiratorias]	4,49%
Crisis asma (Población total)	4,25%

Fuente: SISPRO-RIPS (2022) y DANE (2020)

Costos de tratamiento

Los costos de tratamiento se refieren al gasto económico que un individuo, ya sea directamente o de manera indirecta, debe afrontar para recuperarse de una enfermedad. Bajo esta definición, estos costos deberían comprender el valor de todos los suministros y servicios proporcionados en el hospital, además de los gastos relacionados con la compra de medicamentos externos, los costos de transporte y las ganancias perdidas debido a la incapacidad.

La verdadera dificultad radica en la capacidad para recopilar esa información. De hecho, para obtener los gastos relacionados con el transporte y la cantidad de medicamentos adquiridos fuera del hospital, se requiere llevar a cabo encuestas específicas y procesar los datos. Sin embargo, es importante destacar que obtener esta información conlleva un alto costo de recopilación en comparación con el impacto limitado que tiene en los costos del tratamiento. Por esta razón, autores como Castillo (2011) suelen calcular los costos de tratamiento teniendo en cuenta únicamente los valores de los suministros y servicios proporcionados en el hospital, así como las pérdidas de productividad debido a la incapacidad. La

Tabla 7 muestra los costos de tratamiento de las enfermedades relacionadas con la calidad del aire que fueron analizadas.

Tabla 7. Costos de tratamiento a precios de 2022.

ENFERMEDAD	COSTO
Bronquitis crónica (>=30 Años)	\$708.925
Ingresos Hospital [Respiratorias] (Población total)	\$1'600.000
Visitas a Urgencias [Respiratorias]	\$352.000
Crisis asma (Población total)	\$1'000.000

Fuente: SISPRO-RIPS (2022)

Cambios en la concentración de contaminante

Finalmente, para incorporar todos los parámetros de la **Ecuación 2** que calcula la cantidad de casos prevenidos para cada una de las enfermedades analizadas, la **Tabla 8** proporciona información sobre los cambios en la concentración de contaminantes que se evitarían en dos etapas de análisis anual. En primer lugar, se considera el escenario de construcción, donde se toma en cuenta la fase de construcción con control de emisiones, que es la más probable. Esta fase se desglosa en función de los tres segmentos de construcción del proyecto, y se basa en un estudio de emisiones y modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos. Por otro lado, en la etapa de operación, se evalúa el escenario en el que el 100% de la flota de autobuses está en funcionamiento.

Tabla 8. Contaminantes evitados. Cambios en la concentración de contaminantes anual.

ETAPA	TRAM O	PM 10	PM 2.5	NO X	SO2	C O	UNIDAD ES
-------	-----------	----------	-----------	---------	-----	--------	--------------

Construcción con control de emisiones	1	19,14	5,27	36,6	2,74	8,9	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
				2			
	2	4,71	1,05	3,35	0,24	0,8	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
	3	1,93	0,61	1,83	0,13	0,4	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Operación 100%			1,05	6,02	0,005	10,	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
					78	1	

Fuente: Metro de Medellín (2021)

4 RESULTADOS

Resultados del valor económico

El Metro Ligero de la 80 contribuye a la reducción de contaminantes, lo que a su vez conduce a la prevención de enfermedades. Naturalmente, estos beneficios en términos de salud pueden traducirse en un impacto económico positivo. Los resultados de la aplicación del modelo de dosis-respuesta de la **Ecuación 2** se resumen en la **Tabla 9**, mientras que la cuantificación económica de dicho impacto se encuentra detallada en la **Tabla 10**.

Tabla 9. Número de casos evitados.

ENFERMEDADES	CONSTRUCCIÓN CON CONTROL DE EMISIONES	OPERACIÓN 100% DE LA FLOTA DE BUSES
Bronquitis crónica	247.975	64.496
Ingresos Hospitalario, Respiratorio	7.413	2.022
Visitas a Urgencias, respiratorias	79.764	23.172
Crisis aguda de asma	213.314	58.058
TOTAL	548.466	147.748

Fuente: elaboración propia

Tabla 10. Costos evitados.

ENFERMEDADES	CONSTRUCCIÓN CON CONTROL DE EMISIONES	OPERACIÓN 100% DE LA FLOTA DE BUSES
Bronquitis crónica	\$ 175.796.002.444	\$ 45.722.750.731
Ingresos Hospitalario, Respiratorio	\$ 11.860.203.398	\$ 3.234.929.725
Visitas a Urgencias, respiratorias	\$ 28.076.833.450	\$ 8.156.662.385
Crisis aguda de asma	\$ 213.314.009.616	\$ 58.057.510.219
TOTAL	\$ 429.047.048.908	\$ 115.171.853.060

Fuente: elaboración propia

En resumen, las **Tabla 9** y **Tabla 10** muestran que la operación del Metro Ligero de la 80 conlleva a una reducción promedio de 247,975 y 64,496 casos de bronquitis crónica. Estos casos representan un ahorro en costos de atención médica entre 45 y 175 mil millones de pesos durante las fases de construcción con control de emisiones y operación al retirar el 100% de la flota de autobuses, respectivamente.

Además, se evitan en promedio 7,413 y 2,022 ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias, lo que se traduce en un ahorro entre 3 y cerca de 12 mil millones de pesos en las mismas etapas.

Asimismo, se previenen en promedio 79,764 y 23,172 visitas a urgencias debido a enfermedades respiratorias, generando un ahorro entre 8 y 28 mil millones de pesos en costos durante las fases mencionadas. Finalmente, se evitan en promedio 213,314 y 147,748 crisis de asma, con un valor económico entre los 58 y 213 mil millones de pesos, respectivamente.

5 LIMITACIONES

La valoración económica ambiental es una herramienta poderosa que se utiliza para asignar un valor monetario a los recursos naturales y los servicios ecosistémicos, lo que puede ayudar a tomar decisiones informadas en la gestión de los recursos naturales y la conservación del medio ambiente. Sin embargo, como cualquier enfoque analítico, presenta sus propias limitaciones y desafíos que deben ser considerados. Si bien por normativa se exige que los proyectos deben tener un análisis costo beneficio en cuanto a la evaluación de externalidades, quienes realizan estas mediciones deben ser conscientes de los alcances de estas metodologías ya que, en un primer momento, ese valor monetario calculado, no es un valor financiero, es un valor económico que en últimas reporta el beneficio o afectación social de acuerdo con la naturaleza del impacto estudiando. A continuación, se enumeran algunas de las limitaciones más importantes de las metodologías de valoración económica ambiental.

La VAE puede ser subjetiva porque a menudo se basa en encuestas y preferencias individuales, lo que puede llevar a resultados subjetivos. Las personas pueden tener diferentes percepciones del valor de los recursos naturales, lo que puede llevar a discrepancias en las valoraciones. También, puede ocurrir que existan externalidades no incluidas. Muchos aspectos de la naturaleza, como la biodiversidad y la belleza escénica, pueden ser difíciles de valorar adecuadamente en términos monetarios. Esto puede resultar en la subestimación del valor de estos recursos en las evaluaciones económicas. Otro aspecto para detallar es el valor a largo plazo. Las VAE a menudo se centran en el valor presente de los recursos naturales, lo que puede no reflejar adecuadamente su valor a largo plazo. La pérdida de recursos naturales puede tener consecuencias graves en el futuro, pero estas consecuencias pueden no estar bien reflejadas en las valoraciones actuales.

Una limitación que no es ajena al ejercicio mismo de la valoración es la falta de datos precisos: En muchos casos, la disponibilidad de datos precisos sobre los recursos naturales y los servicios ecosistémicos es limitada. Esto dificulta la realización de valoraciones económicas precisas y confiables. Además, que hay un factor muy elástico o lo que también se llama, sensible y son los cambios en las preferencias de las personas y que cambian con el tiempo, lo que hace que las VAE sean sensibles a las fluctuaciones en las actitudes y opiniones públicas. En particular, cuando se trata de dificultades en la valoración de bienes públicos como el aire limpio y el agua potable, estos son difíciles de valorar económicamente porque están disponibles para todos y no se pueden excluir a las personas de su uso. Esto sugeriría una subestimación de su valor en las valoraciones económicas.

Un aspecto que se debe tener en cuenta es la inclusión de valores morales y éticos. En el campo de la economía ambiental, por ejemplo, se argumenta que la valoración económica de los recursos naturales puede pasar por alto consideraciones morales y éticas importantes, ya que no todo en la naturaleza debe ser valorado en términos monetarios. Finalmente, los escenarios de incertidumbre a los que se enfrentan quienes toman decisiones para cambiar conductas de los agentes en un mercado y más específicamente en una decisión de tomar o no un medio de transporte sustituible debe ser considerado dado que ya que no siempre es posible prever con certeza los impactos futuros de las decisiones sobre el medio ambiente. Esto afecta la precisión de las valoraciones y por más

que se establezca un modelo econométrico confiable, este es un modelo que va a contener variabilidad.

Ahora bien, la utilización de funciones dosis-respuesta es una técnica ampliamente usada en la VAE, especialmente cuando se trata de evaluar los efectos de la contaminación en la salud humana y el medio ambiente. No obstante, es importante reconocer y considerar sus limitaciones al interpretar los resultados. La incertidumbre y la variabilidad inherentes a estas funciones requieren una evaluación cuidadosa y la consideración de múltiples fuentes de información al tomar decisiones sobre la gestión de los contaminantes y la protección del medio ambiente. Además, las coberturas geográficas y los propios sistemas de información del sistema de salud no tienden a ser precisos en las coberturas geográficas en las que se desearía su aplicación para dar un resultado local.

6 CONCLUSIONES

La presente monografía analizó la aplicación de una valoración económica ambiental al proyecto Metro Ligero de la 80 en Medellín, Colombia. El estudio se enfoca en identificar y cuantificar los impactos ambientales y en la salud pública, utilizando un enfoque de costos de tratamiento y función dosis-respuesta. Los principales hallazgos incluyen la reducción de contaminantes y la prevención de enfermedades relacionadas con la mala calidad del aire, resultando en beneficios económicos significativos durante su etapa constructiva y operativa. A partir de selecciones por localización se determinó la zona de influencia próxima para tener la aproximación de los casos evitados atribuibles a la construcción y operación del sistema en cuanto a la afectación y posterior beneficio económico en términos sociales dada la aplicación de una infraestructura de movilidad sostenible para el borde occidental de Medellín.

En cuanto a la evaluación de impactos ambientales y de salud, el proyecto Metro Ligero de la 80 en Medellín representa un avance significativo en la mejora de la calidad del aire y la salud pública. La implementación de este sistema de transporte eléctrico contribuye a la reducción de contaminantes atmosféricos, lo que a su vez disminuye la incidencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares en la población. Los beneficios económicos derivados del análisis económico revelan que los beneficios de salud pública derivados de la operación del Metro Ligero de la 80

son cuantificables y significativos. La reducción en la incidencia de enfermedades conlleva a un ahorro considerable en costos de atención médica y en pérdidas de productividad, demostrando que los beneficios del proyecto exceden sus costos operativos y de construcción. Sin embargo, esto debe considerarse al reunir la mayor cantidad de impactos y sus naturalezas (positivas y negativas).

Respecto a la metodología de VAE utilizada, basada en el costo evitado y las funciones dosis-respuesta, reportó una evaluación detallada y cuantificable de los impactos ambientales y de salud. Esto subraya la importancia de aplicar enfoques económicos rigurosos para la valoración de proyectos de infraestructura con impactos ambientales significativos. Ahora bien, las recomendaciones para Políticas Públicas de esta investigación apoyan la implementación de intervenciones orientadas a promover el transporte público eléctrico como una estrategia efectiva para mejorar la calidad del aire urbano y la salud pública. Es esencial que los tomadores de decisiones consideren estos beneficios económicos y de salud al planificar y ejecutar proyectos de infraestructura urbana y, en particular, como línea de articulación entre la empresa de transporte masivo, la academia y la administración pública, gestar a través de sistemas de información, el monitoreo, seguimiento y evaluación de estos impactos a través de sistemas de información geográfica.

Finalmente, las limitaciones y futuras líneas de Investigación dado que la metodología aplicada proporciona una base sólida para la valoración económica, se identificaron limitaciones relacionadas con la disponibilidad y precisión de los datos. Estudios futuros podrían expandirse a otras infraestructuras de transporte y considerar variables adicionales para una comprensión más amplia de los impactos ambientales y económicos de proyectos similares.

BIBLIOGRAFÍA

- ANLA, & MinAmbiente. (2017). *Criterios técnicos para el uso de herramientas económicas en los proyectos, obras o actividades objeto de licenciamiento ambiental*. (p. 136).
- Castillo, J. . (2011). Estimación de los beneficios en salud asociados a la reducción de la contaminación atmosférica en Bogotá, Colombia. *Universidad de Los Andes*, 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>
- Contraloría General de Medellín, & UNAL. (2018). Cuantificación física y económica del impacto de la contaminación atmosférica en salud de la población de la ciudad de medellín. In *Sello Editorial Contraloría General de Medellin*.
- Empresa de transporte masivo del Valle de Aburrá Ltda. – Metro de Medellín Ltda. (2022). *Metro Ligero de la Avenida 80 Minuta Contractual*.
- Golub, E., Klytchnikova, I., Sanchez, G., & Belausteguigoitia, J. C. (2014). Environmental health costs in Colombia: the changes from 2002 to 2010. Latin America and Caribbean region. *World Bank Group*, 2–18.
- MinAmbiente. (2017). *Guia De Aplicacion De La Valoracion Economica Ambiental*. 0–53. www.minambiente.gov.co
- Ministerio de Salud. (2022a). *Registro Integral de Prestadores de Salud RIPS*.
- Ministerio de Salud. (2022b). *Sistema Integrado de Información de la Protección Social SISPRO*.
- Octaviano, C. (2011). Análisis general de las externalidades ambientales derivadas de la utilización de combustibles fósiles en la industria eléctrica centroamericana. In *CEPAL*.
- Pagiola, S., & Bank, W. (1998). *Economic Analysis and Environmental Assessment*. January.
- Salud, M. ., & Ambiente, R. . (2002). Salud, M.S., & Ambiente, R.N. (2002). Ecosistema urbano y salud de los habitantes de la zona metropolitana del valle de México. *Editorial Acuario*.