



**Impacto del tren ligero de la 80 en el costo de oportunidad del tiempo de viaje por barrio. Aproximación a través de Network Spatial Analysis. Caso de estudio: Medellín (Colombia)**

Carlos Andrés Hoyos Lugo

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:  
**Economista**

Tutor

Héctor Mauricio Posada Duque

PhD Economía

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ciencias Económicas  
Economía  
Medellín, Antioquia, Colombia  
2022

## Agradecimientos

Al profesor Hector Mauricio Posada y a Victor David Bernal por su acompañamiento incondicional y compartir sus conocimientos.

## Contenido

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Introducción .....	2
Justificación .....	4
1 Medellín y el tren ligero de la 80.....	5
1.1 Objetivo general .....	7
1.2 Objetivos específicos.....	7
2 Revisión de literatura .....	8
2.1 Aplicación del Network spatial analysis .....	8
2.2 Evaluación de impacto de nuevos proyectos de infraestructura y el valor del tiempo	10
3 Metodología.....	11
3.1 Datos.....	12
3.2 Construcción de red de calles, paradas y estaciones .....	13
3.3 Parametrización de los medios de transporte .....	15
3.4 Network Base .....	17
4 Resultados.....	19
4.1 Tiempos de desplazamiento Medellín actual.....	19
4.2 Tiempos de desplazamiento en Medellín con tren ligero de la 80 .....	22
4.3 Diferencias en tiempos de desplazamiento.....	22
4.4 Costo de oportunidad del tiempo de viaje .....	24
4.5 Ahorro potencial.....	26
Conclusiones.....	28
Referencias bibliográficas.....	29

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b>	Velocidades promedio de medios de transporte en Medellín.....	16
<b>Tabla 2</b>	ArcGIS tiempo calculado vs tiempos de Google.....	20
<b>Tabla 3</b>	Velocidad promedio estimada de tren ligero.....	22
<b>Tabla 4</b>	Estadísticas descriptivas de diferencias en tiempos de viaje.....	23
<b>Tabla 5</b>	Estadísticas descriptivas para ahorro potencial.....	27

## Índice de gráficos

<b>Figura 1</b>	Corredor de la Av 80.....	6
<b>Figura 2</b>	Network del sistema de transporte público de Medellín 2021.....	14
	Nota: Network del sistema de transporte público de Medellín [Mapa]. Elaboración propia. ....	15
<b>Figura 3</b>	Centroides de cada barrio.....	18
<b>Figura 4</b>	Tiempo promedio de viaje desde cada origen hacia cualquier destino posible en Medellín en 2021.....	19
<b>Figura 5</b>	Correlación parcial entre tiempos de Google y tiempos calculados con Network.....	21
<b>Figura 6</b>	Diferencia en tiempos promedio de desplazamiento actual vs tren ligero.....	23
<b>Figura 7</b>	Salario promedio por barrios.....	25
<b>Figura 8</b>	Ahorro potencial.....	26

## Resumen

El transporte público ha sido uno de los pilares para respaldar el crecimiento de la ciudad de Medellín, tener una mejor conexión intraurbana y un sistema de transporte consolidado que mejore la calidad de vida de los ciudadanos es pieza fundamental en los esfuerzos que se realizan en cuanto a política pública. Este trabajo pretende medir el impacto del tren ligero de la 80 en el costo de oportunidad del tiempo de viaje para los barrios de Medellín, es decir, las ganancias o pérdidas económicas medidas a través del salario; esto utilizando una metodología de evaluación ex ante a través de Network Spatial Analysis introduciendo un contrafactual -nuevo proyecto de infraestructura de transporte- condicional a información geográfica, de infraestructura y tiempos de espera en el sistema, además de datos sobre el salario promedio por barrio de la encuesta de calidad de vida para el 2018. Se espera verificar si con la construcción del nuevo proyecto disminuye el tiempo de viaje, y por consiguiente los barrios que obtendrán beneficio económico a partir de esta mejora en el sistema.

**Palabras clave:** *costo de oportunidad, spatial network analysis, salario, tiempo de viaje*

**Clasificación JEL:** *R4, R410, R53*

## Abstract

Public transportation has been one of the pillars to support the growth of the city of Medellín. Having a better intra-urban connection and a consolidated transportation system that improves the quality of life of citizens is a fundamental part of public policy efforts. This work aims to measure the impact of the 80th avenue light rail on the opportunity cost of travel time for the neighborhoods of Medellín, in other words, the economic gains or losses measured through wages, using an ex ante evaluation methodology through Network Spatial Analysis by introducing a counterfactual -new transportation infrastructure project- conditional on geographic information, infrastructure, tolerance levels and waiting times in the system, in addition to data on the average wage per neighborhood from the Medellín quality of life survey. It is expected to verify if with the construction of the new project travel time decreases, and consequently the neighborhoods that will obtain economic benefit from this improvement in the system.

**Keywords:** *opportunity cost, spatial network analysis, salary, travel time.*

**JEL classification:** *R4, R410, R53*

## Introducción

El transporte público es uno de los servicios de mayor impacto en las áreas urbanas, debido a que permite el acceso de los ciudadanos al mercado laboral, servicios de educación, salud, recreación, cultura, entre otros. Lo anterior puede verse como un aumento en el bienestar de los individuos por el hecho de estar conectados espacialmente y es por ello que los hacedores de política dedican sus esfuerzos para enfrentar esta necesidad de cubrir la demanda por viajes, ya

que no se responden de manera inmediata o en su defecto el tiempo de viaje resulta ir en aumento año a año producto del crecimiento de las ciudades. Adicionalmente, se tienen otras externalidades negativas tales como las asociadas a la contaminación ambiental, la congestión vehicular y la siniestralidad vial, que afectan la sostenibilidad económica, ambiental y social. que pueden ser mitigadas con proyectos de infraestructura más novedosos.

Este proyecto se enfoca en calcular el impacto que puede provocar introducir otro servicio al sistema de transporte público en Medellín, como lo es el tren ligero, en el bienestar económico de los barrios aledaños al proyecto. El desarrollo del mismo se da mediante un análisis ex ante que nos permite evaluar con anterioridad los efectos que tendría en el promedio de tiempo de viaje y el ahorro en términos de costo de oportunidad del tiempo producto de estos efectos, todo lo anterior bajo un escenario para el año 2021 y otro con el tren operativo en el año 2025. Se espera que, al contar con este nuevo servicio, baje el tiempo empleado para desplazarse y que aun contando con la cobertura de otras rutas de buses en toda la avenida 80, se obtengan ganancias de costo de oportunidad del tiempo con cada viaje efectuado.

Recrear el sistema de transporte público es la base para realizar los cálculos del tiempo promedio de viaje para el 2021 y acto seguido, manteniendo todos los parámetros constantes el cálculo de los tiempos para el 2025 con el nuevo servicio. Simultáneamente, con los salarios promedio por barrios tomando como base el año 2018 para ambos escenarios, se calcula el ahorro o la posible reducción del costo de oportunidad de la diferencia entre el año 2021 y 2025. Todo lo anterior sujeto a que el salario promedio es diferente para cada barrio.

Este trabajo se desarrolla de la siguiente manera: en la sección 1 se expone con claridad el planteamiento del problema con el reto que presenta la ciudad de Medellín en términos de

movilidad con el nuevo proyecto de infraestructura de transporte público con el tren ligero de la 80 y los objetivos que se pretenden alcanzar con el desarrollo del trabajo, en la 2 se describe el marco conceptual que sustenta el trabajo y la respectiva revisión de literatura, la 3 presenta la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo de la investigación, en la sección 4 se muestran los resultados obtenidos y finalmente las conclusiones y recomendaciones.

### **Justificación**

El sistema integrado de transporte público de Medellín representa una gran alternativa para la mayoría de los ciudadanos y sus intereses particulares: las rutas más eficientes y rápidas, el mejor servicio, las tarifas que resulten más económicas, menos congestión, entre otros. "El transporte público posibilita la reproducción de la fuerza laboral a través del desplazamiento masivo de la mano de obra porque incrementa las grandes economías de escala y la productividad general de la ciudad"(Etienne, 1985). No obstante, aún la movilidad no se distribuye de forma equitativa: hay barrios donde puede ser más fácil movilizarse respecto a otros, donde también puede ser más rápido desplazarse y en más direcciones. Esta disparidad es una buena oportunidad para determinar cambios en las dinámicas económicas de los barrios de la ciudad con la nueva cobertura en la avenida 80 mediante el tren ligero.

Además, resulta interesante realizar un análisis a este proyecto por otras razones. Según los datos del censo 2018, del Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE-, a ese año Medellín contaba con una población de 2.427.129 habitantes, lo que la hace la segunda ciudad más poblada de Colombia; contando con 16 comunas y 249 barrios urbanos oficiales. Por otro

lado, tiene de los sistemas de transporte público más robustos y modernos de Colombia; siendo la única ciudad que cuenta con metro y tranvía, y además los integra con metrocables, metroplus y rutas de buses. No obstante, a pesar de los esfuerzos realizados en materia de movilidad, el promedio de viaje ha ido aumentando a través de los años, por ejemplo, para Medellín en 2012, un viaje promedio solía tomar 33 minutos. En 2017 ese tiempo aumentó a 36 minutos. Desde 2005 hasta 2017, el tiempo de viaje ha ido aumentando año tras año para todo tipo de viajes (Medellín cómo vamos, 2018).

Es así como este trabajo pretende examinar el esfuerzo en términos de política pública por consolidar el sistema de transporte público en la ciudad con el nuevo proyecto de infraestructura, desde un punto de vista técnico utilizando herramientas tecnológicas que nos permitan conocer con antelación los posibles beneficios económicos que en este caso se presentan como la variación de los salarios por minuto dado el cambio en el tiempo de desplazamiento a nivel barrio.

## **1 Medellín y el tren ligero de la 80**

El desarrollo de la movilidad de Medellín se ha venido consolidando a través del tiempo con esfuerzos y avances, sin embargo, se evidencian todavía una serie de retos, principalmente de oferta y cobertura en la zona occidental de la ciudad.

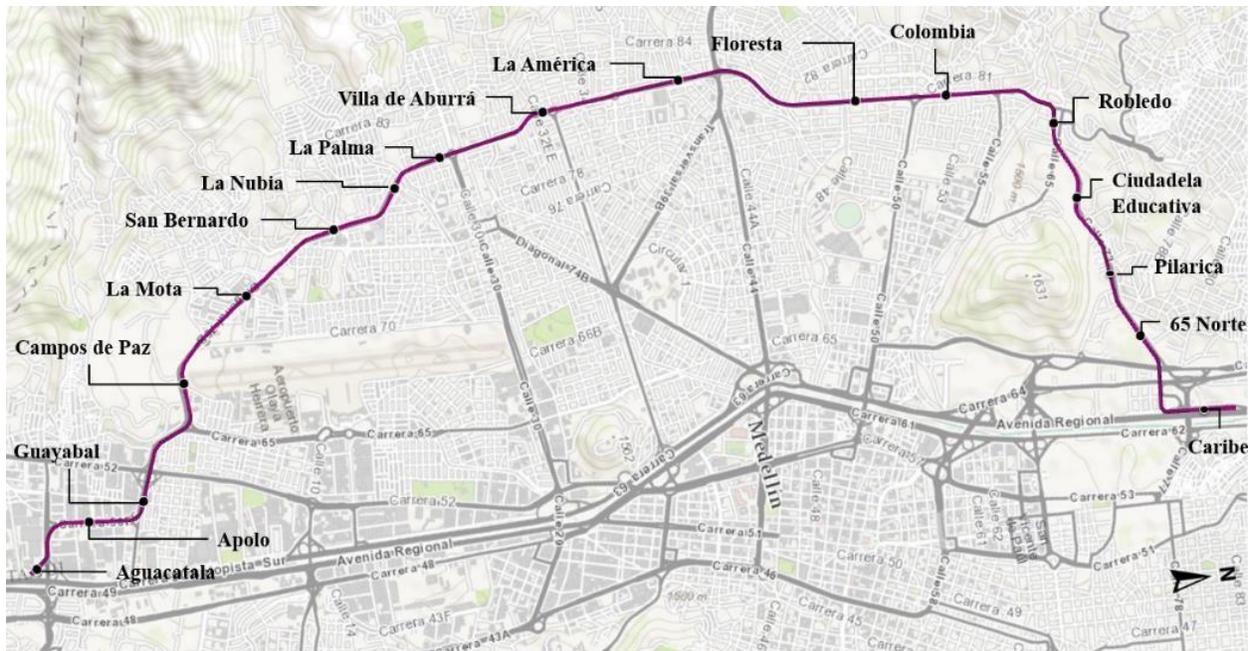
En Medellín se identifican algunas de las siguientes problemáticas: (i) falta de cobertura del sistema de transporte público en algunas zonas, especialmente en ladera; (ii) altos tiempos de viaje por efecto de la congestión vial; (iii) ausencia de

herramientas para la planificación de viajes en tiempo real; (iv) altos costos de desplazamiento para los usuarios, especialmente para la población vulnerable, y (v) conectividad deficiente en algunas zonas del territorio. (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2020)

Esta zona Occidental que tiene como vértebra el corredor de la Avenida 80, abarca 32 barrios y tiene una localización estratégica y céntrica en Medellín lo que le permite una conexión ágil y directa con el resto de la ciudad. Además, concentra alta densidad de habitantes - aproximadamente el 20,7% de la población de la ciudad según datos del perfil demográfico de Medellín - y tiene también altas dinámicas comerciales.

Por lo anterior, las actuales condiciones funcionales muestran un corredor con importantes demandas intermodales, en el cual se requiere una intervención integral que ayude a mejorar las condiciones de movilidad de la zona. Con el propósito de mitigar las problemáticas previamente expuestas, Medellín estructuró el proyecto Metro Ligeró de la Avenida 80 como una solución que aporte a mejorar la problemática actual en términos de movilidad y que pueda contribuir a consolidar el sistema de transporte público de Medellín, el cual se espera pueda tener impactos positivos al contribuir con el cuidado del medio ambiente, reducir la siniestralidad vial y disminuir también los tiempos de viaje de toda esta zona. La figura 1 resalta en color morado el corredor por donde transitaría la nueva línea del metro de Medellín -línea E- el cual va desde la estación Caribe hasta la estación Aguacatala y viceversa, pasando por un total de 14 paradas, y 3 estaciones las cuales son: Aguacatala, Floresta y Caribe que permitirán la integración con el sistema metro.

**Figura 1** *Corredor de la Av 80*



Nota: Adaptado de Metro de la 80 [Mapa], por Alcaldía de Medellín, 2020 ([Alcaldía de Medellín \(medellin.gov.co\)](http://medellin.gov.co)).

## 1.1 Objetivo general

Medir el impacto del nuevo tren ligero en el costo de oportunidad del tiempo de viaje para los barrios de Medellín.

## 1.2 Objetivos específicos

- Simular la red de transporte para Medellín.
- Calcular los tiempos de viaje por barrio para el año 2021 sin tren ligero y 2025 con tren ligero.
- Hallar el costo de oportunidad del tiempo de viaje para todos los barrios de Medellín tanto para el 2021 como para el 2025.

- Calcular las pérdidas o ganancias económicas producto de la construcción del tren ligero de la 80.

## 2 Revisión de literatura

Al realizar la revisión de literatura y el rastreo bibliográfico, encontramos que la metodología *Network Spatial Analysis* ha sido poco aplicada para estudios de economía urbana, por lo que los encontrados sirvieron como referentes para realizar la aplicación de la misma. Además, se destacan varios estudios relacionados a la forma en que se estima el valor del tiempo de viaje para calcular el costo de oportunidad del mismo como una proporción del salario. A continuación, se presenta un recorrido de los principales trabajos abordados que nos ayudan a contextualizar esta investigación.

### 2.1 Aplicación del Network spatial analysis

Podemos definir el *network spatial analysis* (análisis de redes espaciales) como un paquete de herramientas para analizar las configuraciones espaciales de las ciudades y sus procesos sociales, económicos y ambientales relacionados. Estas relaciones (líneas) entre actores (nodos) las conocemos como redes.

Los eventos que se pueden analizar suceden dentro de la red (por ejemplo, un nuevo proyecto de infraestructura, cambios en la malla vial, etc), así mismo aquellos que

sucedan junto a la red (por ejemplo, la apertura de una empresa cerca de una calle, una tienda cerca de una nueva estación de metro, etc). (Okabe & Sugihara, 2012)

Durante los últimos años, esta herramienta ha tomado fuerza, ya que resulta ser útil a la hora de predecir y analizar fenómenos urbanos de gran interés tales como la 'accesibilidad', 'proximidad', 'integración', 'conectividad', 'costo' o 'esfuerzo'. Según D. O'Sullivan (2014) "las redes espaciales organizan y estructuran los sistemas sociales, económicos y culturales humanos".

Algunos de los estudios más importantes y que han sentado el precedente para el análisis urbano se remontan a la década pasada. Jiang & Liu (2011) calculan las direcciones o rutas en las que una persona tenga que hacer menos giros y menos recorrido. El experimento se realizó para calles de Estados Unidos y Europa, en las cuales se logra ilustrar las ventajas de tomar rutas más cortas y simples que las proporcionadas por GoogleMaps, siendo un 15% más cortas que estas últimas. Ozbil et al. (2011), investigan como el diseño de las calles afectan el flujo de peatones, además modelan la conectividad de las calles con el uso del suelo, reforzando la importancia en la planificación de la red de calles al interior de las ciudades y su impacto en la transitabilidad.

Actualmente el análisis de redes espaciales se hace por medio de la tecnología GIS (Sistemas de Información Geográfica) ya que permite la organización, manipulación, análisis y visualización de datos espaciales, a menudo descubriendo relaciones, patrones y tendencias. Mediante la utilización de extensiones para ArcGIS Liu & Zhu (2004) mencionan la posibilidad de aplicarlas en temas de planificación del transporte urbano, también para estudios sobre la relación entre el transporte y el uso de la tierra, la evaluación de la eficiencia de la red de transporte, la planificación de la infraestructura de transporte y las evaluaciones de impacto relacionadas con las políticas de transporte. Uno de los trabajos que tenemos como principal referencia y que nos

brinda información respecto a la preparación del sistema de información geográfica para la creación de la Network fue el desarrollado por García-Castrillón & Flórez-Londoño (2016) donde buscan construir una ruta alternativa en un barrio de Medellín que mejore la ruta ya existente mediante la creación del dataset de la red utilizando *sahpefiles*<sup>1</sup> con información del sistema de transporte y de la malla vial configurada de acuerdo a unos atributos tales como sentido de las vías, velocidad máxima permitida, cruces semaforizados, entre otros.

## **2.2 Evaluación de impacto de nuevos proyectos de infraestructura y el valor del tiempo**

El desarrollo urbano aumenta también las necesidades en cuanto a movilidad. Resulta un reto para los hacedores de política determinar la eficiencia de los diferentes medios de transporte y disminuir los costos asociados al crecimiento de las ciudades tales como la congestión. De acuerdo con de Grange (2010) en ciudades que presentan buenos sistemas de transporte público, la mayor parte de la demanda es atendida por líneas de Metro o tecnologías similares (trenes suburbanos, trenes ligeros o tranvías), siendo el bus una alternativa minoritaria. Hay múltiples estudios que han tratado de estudiar el impacto de nuevos proyectos de transporte en los tiempos de viaje. Por ejemplo, Fu & Gu (2018) realizan un análisis para determinar los cambios en el flujo de pasajeros del metro y el tiempo de viaje al tener una nueva línea de metro. En primer lugar, se analiza el impacto de la nueva línea de metro en la distribución del flujo de pasajeros y luego en el tiempo de viaje dentro de la red de metro, también Zhao et al. (2021) se enfocan en cómo minimizar el costo total del tiempo de viaje de los pasajeros, utilizando matrices de origen destino,

---

<sup>1</sup> es un formato vectorial de almacenamiento digital donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos

las cuales pueden ser utilizadas para calcular con precisión el costo total del tiempo de viaje a través de modelos con algoritmos que pueden ser utilizados en el mundo real.

Respecto a la forma de medir el costo de oportunidad del tiempo, podemos partir de la idea de valorar el tiempo como aquello que rige el costo de oportunidad de actividades individuales que derivan cierta utilidad. Se puede seguir el trabajo de Wardman, en el que el costo del tiempo destinado al transporte es la disposición de las personas a pagar por una reducción en sus tiempos de desplazamiento, pudiéndose ver también como la compensación óptima que esperarían recibir dichos individuos por la pérdida de tiempo gastado viajando (Wardman, 1998) y que pudieran estar laborando. Para nuestro estudio tomamos el parámetro de desutilidad marginal del tiempo de viaje propuesto por A. O'Sullivan (2011) en el cual se sugiere que en promedio este valor corresponde al 50% del salario de un viajero. Otros estudios han propuesto también la medida "The opportunity Value of Travel Time (VTT)", la mayoría se basan en el marco teórico propuesto por Becker (1965) mediante el uso de una combinación de datos de preferencias declaradas y reveladas para estimar un valor de tiempo que es uniforme en todas las actividades y en todas las circunstancias. No obstante, esta restricción es relajada por DeSerpa (1973) modelo que permite que el valor del ahorro de tiempo sea específico de la actividad.

### **3 Metodología**

En esta sección se presenta el enfoque mediante el cual se combina la teoría económica con información geográfica para cuantificar las ganancias o pérdidas económicas de los cambios en los tiempos de desplazamiento producto de la construcción del tren ligero de la 80 en Medellín,

medidos a través del costo de oportunidad de desplazarse, el cual a su vez se mide como una proporción del salario. La metodología consiste en recrear lo mejor posible la red actual de transporte público masivo -sin transporte privado- conectando los nodos o direcciones geográficas de las calles de Medellín, estaciones y paradas del transporte público. Esta simulación permite calcular los tiempos de desplazamiento, los cuales se obtienen inicialmente para el año 2021, cuando no estaba construido el tren ligero, y luego para el 2025 donde ya estaría en funcionamiento el mismo (contrafactual). Con estos resultados se calcula así el costo de oportunidad del tiempo de viaje en Medellín a nivel barrio el cual es una proporción del salario. Finalmente calculamos el ahorro potencial que surge de las diferencias en el costo de oportunidad del tiempo de viaje para Medellín Actual y para Medellín futuro, bajo la expectativa de que un nuevo proyecto de transporte público genera una mejora en el bienestar de los habitantes.

### **3.1 Datos**

Los datos para este trabajo se toman de Geo Medellín y Open Street Maps, específicamente los shapefiles para la construcción de la red de transporte. Los tiempos de viaje se hallan mediante una matriz de origen destino que es calculada a partir de la Network o simulación construida en este ejercicio, siendo una de las ventajas de esta metodología ya que la encuesta de origen-destino no tiene información de todos los barrios imposibilitando tener la totalidad de posibles combinaciones de viajes, además puede tener errores de medición al ser tiempos auto informados donde se tienden a subestimar o redondear. También se utiliza la encuesta de calidad de vida de Medellín 2018 que nos provee información referente a los ingresos salariales por barrio.

### 3.2 Construcción de red de calles, paradas y estaciones

Para llevar a cabo la simulación es necesario utilizar métodos o técnicas computacionales denominadas Network Spatial Analysis o Spatial Analysis. Estas técnicas asumen que el mundo real está representado por redes que interconectan elementos como bordes (líneas) y cruces de conexión (puntos). Las personas, bienes y servicios tienden a circular a través de redes: los medios de transporte suelen hacerlo por carreteras, vías de tren, rutas de vuelo, entre otros. En este apartado se describe la configuración de toda la red de transporte construida a partir de los softwares R, Python y ArcGIS utilizando dos conjuntos de datos principales; shapes que contienen la información de las calles y barrios de Medellín <sup>2</sup> y shapes con los puntos donde se ubican las estaciones y paradas del sistema de transporte <sup>3</sup>.

Teniendo en cuenta que se desea medir con la mayor precisión posible las distancias en la red de transporte y conocer la distribución de las estaciones y paradas, es indispensable que los shapes se proyecten en el mismo sistema de coordenadas; los utilizados para este estudio son el sistema de coordenadas para Colombia: Bogotá 1975 / UTM zone 18N. Al definir lo anterior se constituye el sistema de calles y sus conexiones, utilizando la herramienta “integrar”<sup>4</sup> de ArcGIS donde las calles se conectan condicionadas a cierta cantidad de metros, este parámetro es conocido como cluster tolerance y para este ejercicio se define un valor de 12 metros. Finalmente, lo que se

---

2 <https://www.openstreetmap.org/relation/1343264>

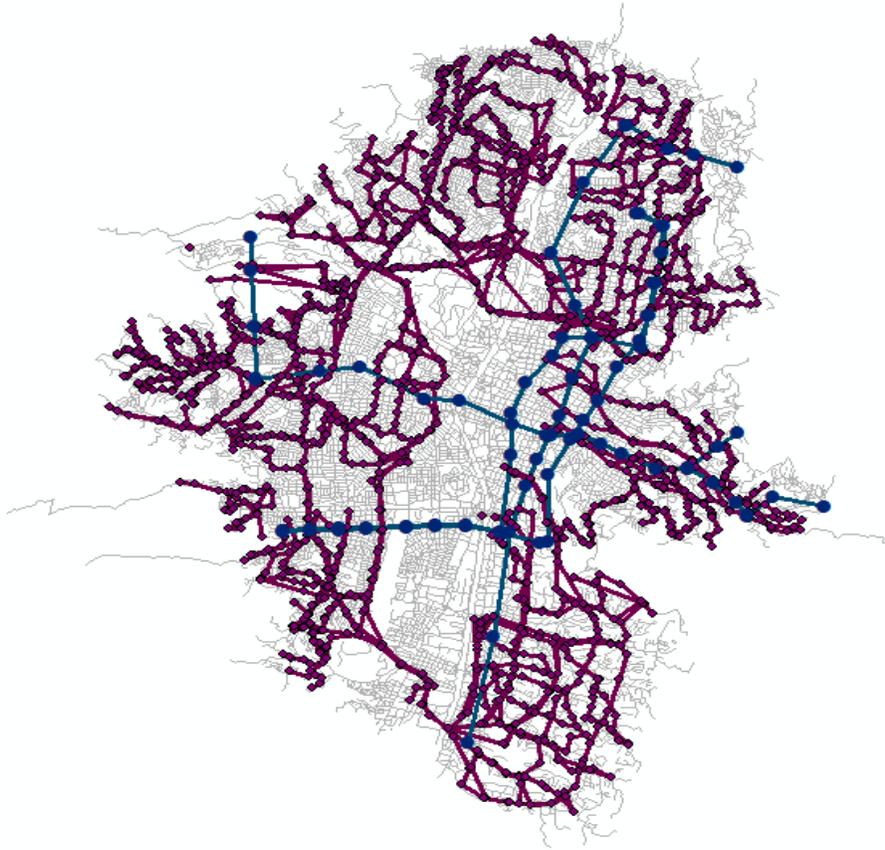
3 <https://geomedellin-m-medellin.opendata.arcgis.com/>

4 <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/data-management-toolbox/integrate.htm>

busca es eliminar brechas en calles muy cercanas separadas ya sea por errores en los shapés o por características geográficas mínimas; por ejemplo, andenes, arboles, etc.

Para modelar el transporte público se utilizan los shapés con las coordenadas de las estaciones del Metro, y, además, las paradas de las rutas integradas y los alimentadores. Con el fin de darle un orden a cada línea del sistema y poder manipular la información no se utiliza un shape con el sistema de transporte, sino que se unen los puntos de cada estación o parada tratando de recrear así las rutas reales. La figura 2 muestra el resultado de este proceso, donde se pueden visualizar el sistema metro y las diferentes rutas de buses. Asimismo, se introducen dos parámetros estructurales que nos permiten consolidar el modo en que se conectan las estaciones y paradas con las calles más cercanas; el primero llamado Buffer factor otorga el acceso al sistema a través de la calle más cercana en un rango inferior a 3 metros, y el segundo parámetro que denominamos Separation factor nos ayuda a calibrar la distancia entre dos líneas del metro ubicadas en una misma estación o las llamadas líneas de transferencia como es el caso de San Antonio A y San Antonio B, a este último se le asigna el valor de 30 metros o 70 pasos aproximadamente para pasar de una estación a otra.

**Figura 2** *Network del sistema de transporte público de Medellín 2021*



*Nota: Network del sistema de transporte público de Medellín [Mapa]. Elaboración propia.*

Esta Network incluye todo el sistema metro, el cual tiene 104 rutas de buses a lo largo del sistema integrado de transporte público, sin considerar el transporte privado. En azul se puede evidenciar el sistema metro y en purpura el sistema de buses, creados a partir de las conexiones entre calles, estaciones y paradas.

### **3.3 Parametrización de los medios de transporte**

Una vez configurada la red de transporte, se introducen parámetros de velocidad y tiempo a los medios de transporte (metro, metrocables, tranvía, metroplus y rutas de buses), puntos de espera, y tiempos de entrada y salida al sistema. La tabla 1 muestra los parámetros y valores asignados, estos fueron extraídos de Wikipedia 5, donde el sistema metro expone la ficha técnica

---

5 [https://en.wikipedia.org/wiki/Medell%C3%ADn\\_Metro](https://en.wikipedia.org/wiki/Medell%C3%ADn_Metro)

de las velocidades estimadas para los trenes, buses, tranvía y metro cables. Además, se calculan mediante un proceso de iteración el tiempo de espera en cada estación donde se determina que 30 segundos es el tiempo que mejor se ajusta a la realidad, y de 2 minutos para entrar y salir del sistema. Todo lo anterior junto con la longitud de cada una de las líneas y rutas, determinan el funcionamiento del sistema de transporte en nuestra simulación, tanto para Medellín actual, cómo para el escenario donde entra en funcionamiento la nueva infraestructura que sería nuestro contrafactual.

**Tabla 1** *Velocidades promedio de medios de transporte en Medellín*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Medio de transporte</b>
<b>Ts</b>	40 Km/h	Trenes
<b>Bs</b>	16 Km/h	Buses
<b>Trs</b>	16 Km/h	Tranvía
<b>Cs</b>	18 Km/h	Metrocable
<b>St</b>	30 segundos	Tiempo de espera cada estación

Nota: *Adaptado de Velocidades promedio de medios de transporte en Medellín [Tabla], por METRO Calidad de vida, 2016, Wikipedia (<http://web.archive.org/web/20160216184042/https://www.metrodemedellin.gov>).*

### 3.4 Network Base

Una vez definido nuestro modelo de ciudad dónde se consolidan las principales redes: vías, estaciones, paradas y medios de transporte, podemos afirmar que tenemos la network base (actual) de Medellín. A partir de toda esta información condicional a los parámetros definidos en la sección 1.1. y 1.2 obtenemos la matriz de origen destino mediante la extensión Network Analyst<sup>6</sup> para capturar los cambios en la variable endógena, que en este caso sería el tiempo de viaje. Esta matriz contiene el volumen de viajes medidos en minutos entre todos los barrios simulando los tiempos bidireccionales.

$$OD_{269 \times 269} = \begin{pmatrix} OD_{11} & DO_{21} & DO_{31} & \cdots & DO_{269x1} \\ OD_{21} & OD_{22} & DO_{32} & \cdots & DO_{269x2} \\ OD_{31} & OD_{32} & OD_{33} & \cdots & DO_{269x3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ OD_{269x1} & OD_{269x2} & OD_{269x3} & \cdots & OD_{269x269} \end{pmatrix} \quad (1)$$

De (1) tenemos que:

$$AOD = \begin{pmatrix} AOD_1 \\ AOD_2 \\ AOD_3 \\ \vdots \\ AOD_{269} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$AOD_i = \sum_{j=1}^n \frac{OD_{ij}}{n}$$

$$n = 269$$

$$i = 1, 2, \dots, 269$$

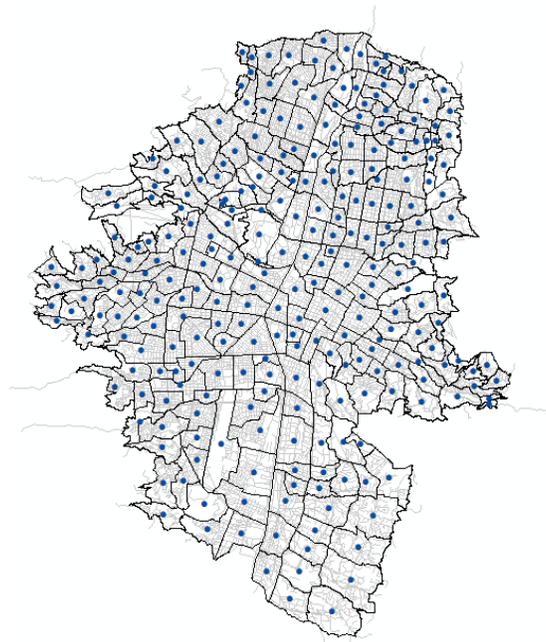
---

<sup>6</sup> <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/what-is-network-analyst-.htm>

- $AOD$  es un vector de promedios, y  $AOD_i$  es el promedio de tiempo de viaje desde el origen  $i$  hacia todos los posibles destinos  $j$ .

Para este proceso se propone que: dado un sistema de transporte público obtendremos la cantidad de minutos que se necesitan para ir desde el centroide de cada barrio  $i$  hacia el centroide de todos los demás barrios  $j$ , entrando y saliendo del sistema por la estación más cercana. Este tiempo se calcula bajo el supuesto de que el individuo toma la ruta que optimiza su tiempo de viaje usando cualquier combinación posible de medio de transporte. En la figura 3 tenemos una muestra de cómo se asocia un centroide a todos y cada uno de los barrios.

**Figura 3** *Centroides de cada barrio*



Nota: Centroides de cada barrio [Mapa]. *Elaboración propia.*

Esta figura ilustra los centroides creados en cada barrio con el fin de determinar el tiempo promedio empleado de viaje desde el centroide de cada barrio  $i$  al centroide de todos los demás barrios  $j$ .

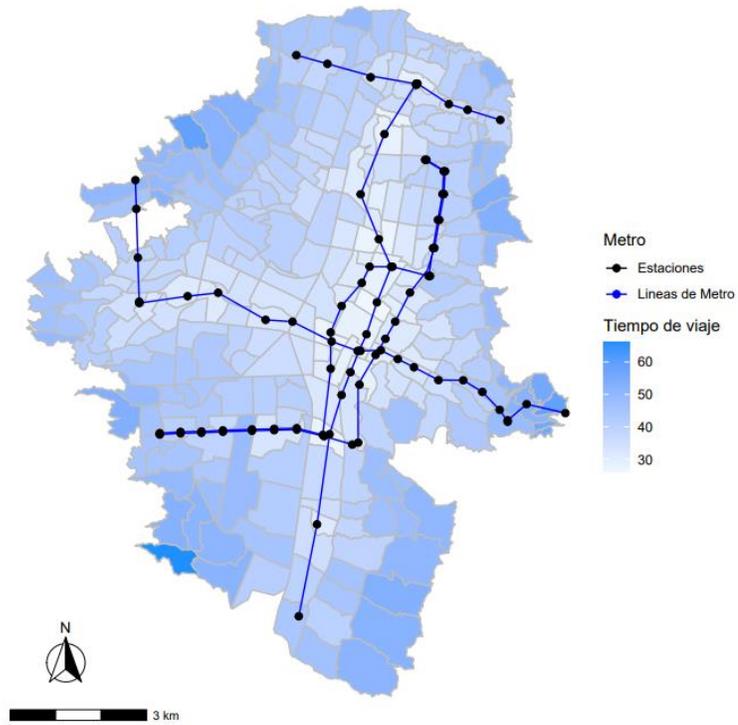
## 4 Resultados

### 4.1 Tiempos de desplazamiento Medellín actual

Al colapsar la matriz de origen destino obtenemos el tiempo promedio de desplazamiento de cada origen hacia todos los destinos, La figura 4 nos presenta evidencia de que para la periferia el tiempo promedio empleado para viajar a cualquier destino tiende a superar los 60 minutos, mientras que las zonas con más acceso al transporte público tales como el centro de la ciudad tienden a ser inferior a 40 minutos. Como ejercicio de validación para el funcionamiento de la network base y prueba de robustez a los datos obtenidos de la metodología aplicada se realiza una regresión confrontando la matriz generada versus el reporte de tiempos de viaje con la API de Google - Google Maps Platform –; la cual es una interfaz que ofrece Google Maps en la cual se interactúa con mapas, rutas y lugares en tiempo real, que a su vez permite obtener direcciones, descargar matrices de rutas con tiempos de viaje, rutas de transporte, localización de sitios de interés, entre otros.

Los datos utilizados fueron seleccionados en un rango de horas entre 7 am y las 12 pm con una muestra de 10263 viajes. El resultado de la regresión que encontramos en la tabla 2 nos indica que existe una relación cercana a uno entre los minutos empleados por un individuo para desplazarse de un barrio a otro, siendo en este caso los datos de la API de Google los más cercanos a la realidad ya que también son estimados. La figura 5 nos muestra también la correlación parcial existente entre ambos datos.

**Figura 4** *Tiempo promedio de viaje desde cada origen hacia cualquier destino posible en Medellín en 2021*



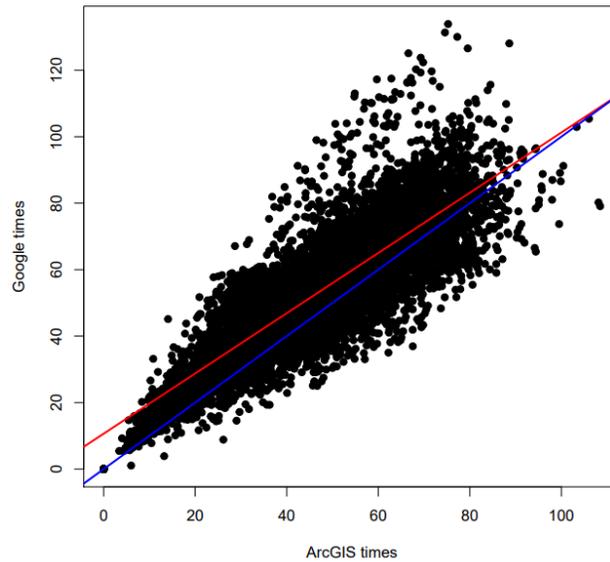
Nota: Tiempo promedio de viaje desde cada origen hacia cualquier destino posible en Medellín en 2021 [Mapa]. Elaboración propia.

**Tabla 2** ArcGIS tiempo calculado vs tiempos de Google

		<i>Dependent variable:</i>
		Time
Total_public_Minutes	0.906*** (0.006)	
Constant	10.653*** (0.282)	
Observations	10,263	
R <sup>2</sup>	0.715	
Adjusted R <sup>2</sup>	0.715	
Residual Std. Error	9.854 (df = 10261)	
F Statistic	25,686.790*** (df = 1; 10261)	
<i>Nota:</i>	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01	

Nota: ArcGIS tiempo calculado vs tiempos de Google [Tabla]. Elaboración propia.

**Figura 5** Correlación parcial entre tiempos de Google y tiempos calculados con Network



Nota: Correlación parcial entre tiempos de Google y tiempos calculados con Network [Gráfico].  
Elaboración propia.

## 4.2 Tiempos de desplazamiento en Medellín con tren ligero de la 80

Para el ejercicio contrafactual se integra el tren ligero que entraría a operar en el 2025 y la velocidad promedio estimada a los cuales circularían los trenes, cuya velocidad se estima que será de aproximadamente 25 Km/h como se registra en la tabla 2 según datos del conpes 4003 de 2020. Con esta nueva configuración del sistema de transporte público calculamos así los promedios de tiempo viaje desde cualquier origen *i* hacia todos los posibles destinos *j*. Los resultados de la figura 6 ilustran la disminución en el tiempo de viaje para la mayoría de los barrios dentro de la zona de impacto aun teniendo en cuenta que hay buena cobertura de rutas de buses integradas.

**Tabla 3** *Velocidad promedio estimada de tren ligero*

Parámetro	Valor	Medio de transporte
TI	25 Km/h	Tren ligero de la 80

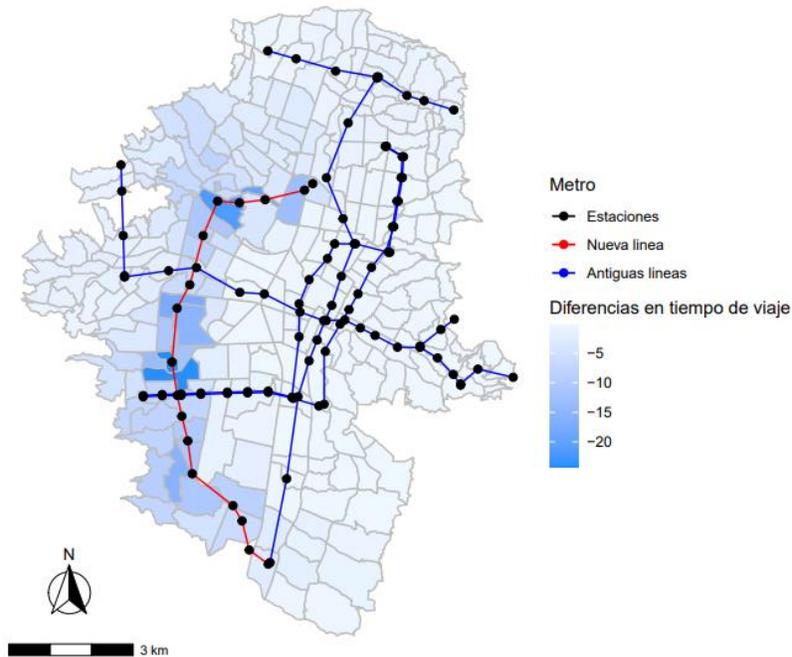
Nota: Adaptado de *Velocidad promedio estimada de tren ligero* [Tabla], por Departamento Nacional de Planeación, 2020, DNP (<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4003.pdf>).

## 4.3 Diferencias en tiempos de desplazamiento

Uno de los hallazgos que se destaca en este trabajo se da en las diferencias presentadas en los tiempos promedios de viaje una vez el tren ligero entra en operación, que surge de restar los

tiempos calculados en la matriz de OD para el 2021 y los del 2025 respectivamente. Por ejemplo, la figura 6 nos da una visual de las zonas afectadas siendo 20 minutos el valor máximo en ahorro de tiempo en barrios pertenecientes a la comuna de Belén y también se perciben cambios importantes en el sector de Robledo. La tabla 4 nos indica que la diferencia en los tiempos promedio de desplazamiento será de aproximadamente -2,70 minutos como media de los viajes ejecutados en todos los barrios. Esta diferencia se evidencia más en barrios cercanos al proyecto aun teniendo en cuenta que hay buena cobertura de rutas de buses integradas.

**Figura 6** *Diferencia en tiempos promedio de desplazamiento actual vs tren ligero*



Nota: Diferencia en tiempos promedio de desplazamiento actual vs tren ligero [Gráfico].  
Elaboración propia.

**Tabla 4** *Estadísticas descriptivas de diferencias en tiempos de viaje*

Diferencias en tiempos de viaje	
Media	-2.69665993
Desviación estándar	3.93666858
n	243

Nota: Estadísticas descriptivas de diferencias en tiempos de viaje [Tabla].  
Elaboración propia.

*Los valores están expresados en minutos.*

#### 4.4 Costo de oportunidad del tiempo de viaje

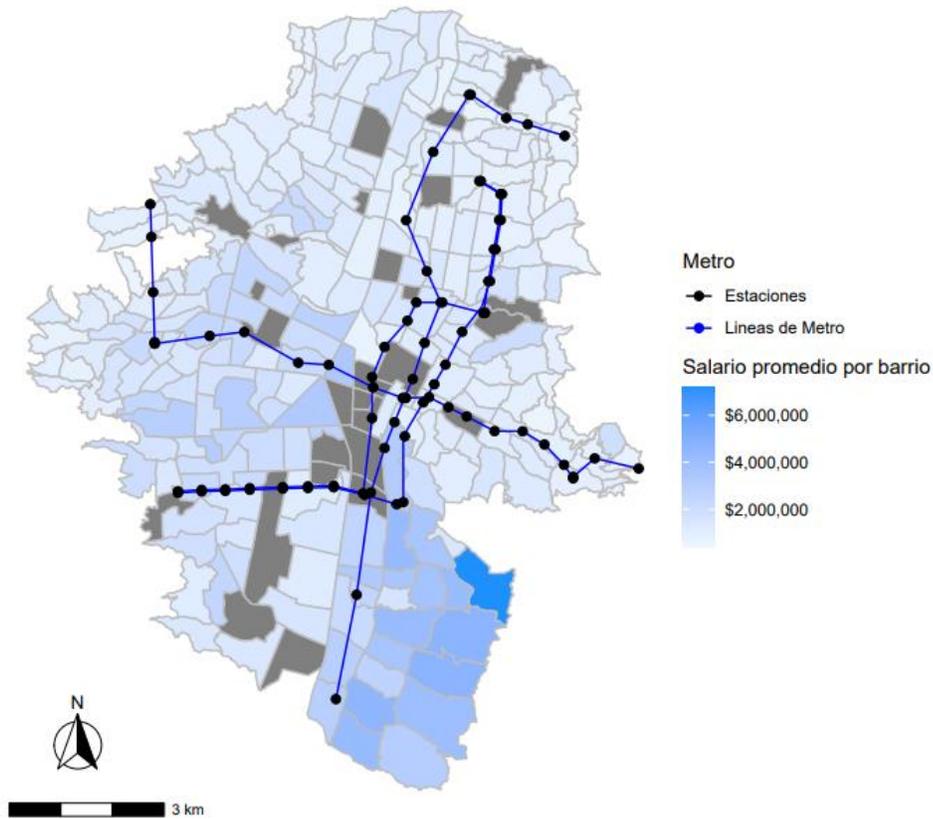
Partiendo de la premisa que el costo de oportunidad del tiempo es heterogéneo para todos los barrios y una buena forma de aproximar esa heterogeneidad es a través de los salarios dejados de percibir. Se propone la medida de COTV (Costo de oportunidad del tiempo de viaje) la cual incluye el tiempo de viaje promedio calculado, y un parámetro con valor fijo que expresa la desutilidad del tiempo empleado para viajar el cual determinamos en 0.5 unidades de salario por minuto.

El salario promedio por minuto por barrio está representado en el siguiente vector:

$$S = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \vdots \\ S_{269} \end{pmatrix} \quad (3)$$

La figura 7 es un mapa con la asignación del salario promedio por barrios con la información extraída de la encuesta de calidad de vida del 2018. Es importante mencionar que hay datos faltantes (missing) para algunos barrios, los cuales podemos notar en color gris; estando más afectado el centro de la ciudad.

**Figura 7** *Salario promedio por barrios*



Nota: Salario promedio por barrios [Gráfico]. *Elaboración propia.*

Multiplicando (2) y (3) y la fracción monetaria del tiempo (0.5) tenemos la medida del Costo de oportunidad del tiempo de viaje, la cual nos indica el valor monetario de la mejor alternativa posible de emplear el tiempo usado para viajar. El cálculo se realiza tanto para el escenario actual como para el futuro con el tren ligero. A su vez la diferencia entre el costo de oportunidad del tiempo de viaje calculado antes y después del funcionamiento del tren ligero nos permite hallar las ganancias o pérdidas económicas, las cuales van a estar en términos de pesos tomando como base el año 2018.

$$COTVa = AODi \times 0.5 \times S \quad (4)$$

$$a = 2021, 2025$$

- $COTVa$  es el costo de oportunidad del tiempo de viaje, siendo  $a$  el año que se toma para el análisis.

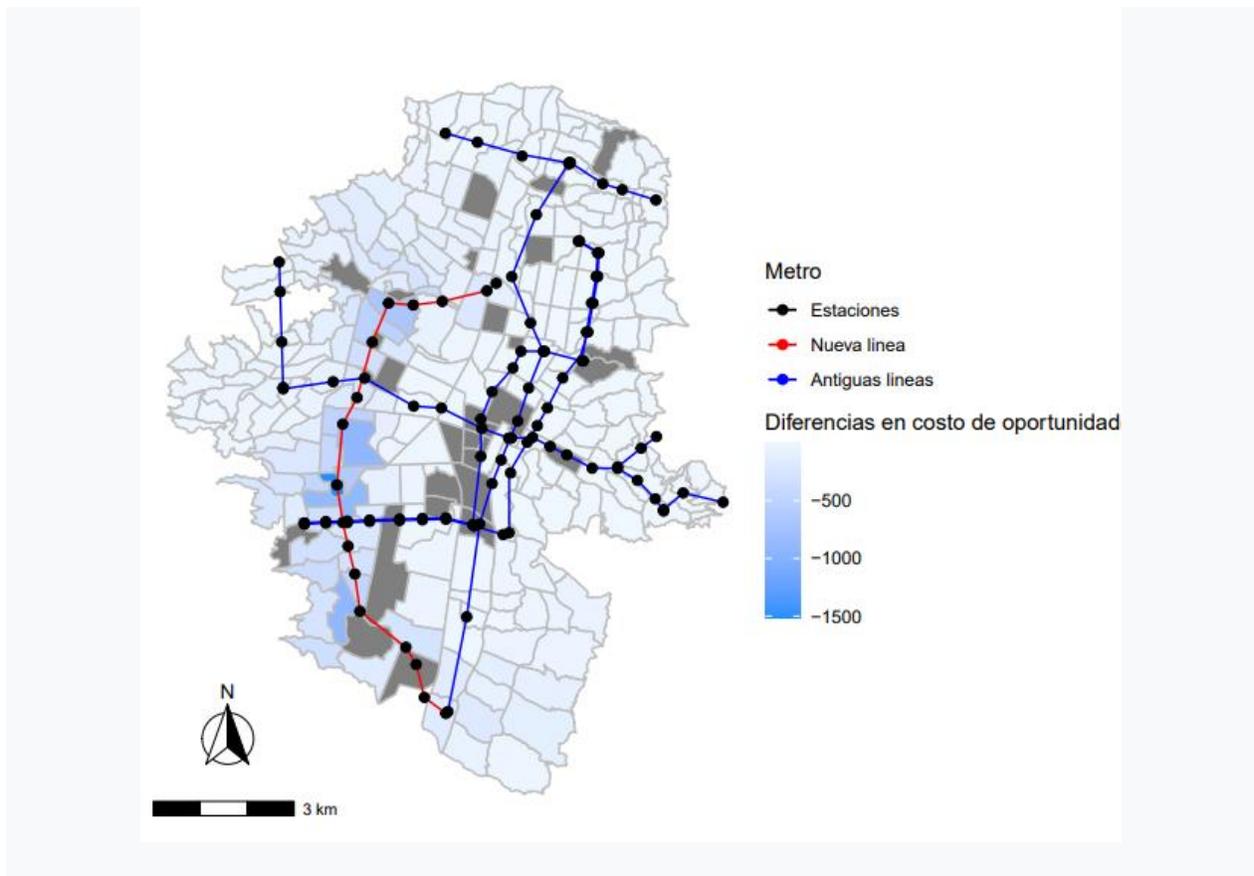
#### 4.5 Ahorro potencial

Este puede ser interpretado como una medida de magnitud que tiene la construcción del tren ligero sobre el bienestar de los habitantes de cada barrio de la ciudad.

$$AP = COTV_{2025} - COTV_{2021}$$

$COTV_{2025}$  es el costo de oportunidad de tiempo de viaje para Medellín contrafactual y  $COTV_{2021}$  para Medellín actual. La figura 8 contiene el ahorro en términos de costo de oportunidad del tiempo que surge en el área de influencia del proyecto. A su vez que la tabla 5 presenta algunas estadísticas descriptivas sobre el ahorro potencial asociado a la disminución del tiempo de viaje promedio hacia todos los destinos posibles. Por ejemplo, en promedio el ahorro potencial para la muestra de 243 barrios disponibles es de 95.47 pesos.

**Figura 8** *Ahorro potencial*



Nota: Ahorro potencial [Gráfico]. Elaboración propia.

**Tabla 5** Estadísticas descriptivas para ahorro potencial

Ahorro potencial	
Media	95.475821
Desviación estándar	171.371103
n	243

Nota: Estadísticas descriptivas del ahorro potencial [Tabla]. Elaboración propia.

Los valores se encuentran expresados en pesos tomando como base el año 2018.

## Conclusiones

La primera conclusión importante se da a partir del ejercicio de robustez comparando los tiempos promedio de viaje calculados con la simulación programada con los datos actuales y los extraídos de Google, nos da un resultado positivo dado que la correlación parcial corrobora la relación entre ambos datos, por consiguiente, la información calculada respecto a las matrices de origen destino son cercanas a la realidad.

Por otro lado, podemos destacar que el tren ligero tendrá un impacto positivo principalmente en los barrios cercanos al proyecto. Por ejemplo, barrios como Miravalle, Belén, San German, El Volador, Lorena, La Mota son los que tienen variaciones más altas tanto en los tiempos promedio de desplazamiento como en ahorro, aun teniendo en cuenta que la avenida 80 tiene buena cobertura de ruta de buses integrados.

Adicionalmente se puede detectar qué al contar con un salario promedio más alto, una variación en el tiempo promedio de viaje va a ser más significativa ya que el ahorro en términos de costo de oportunidad esta dado por una proporción del salario. Por ejemplo, en el barrio Los Colores y el barrio Las Acacias se presentaron diferencias en el tiempo de desplazamiento de aproximadamente 10 minutos, sin embargo, para el primero el ahorro en términos de costo de oportunidad de acuerdo al salario promedio es de 531.806087, mientras que para el segundo es de 442.4658408 pesos.

Finalmente, para toda la ciudad tendríamos una media en el cambio de los tiempos de desplazamiento de aproximadamente -2.69 minutos y la media respecto al ahorro potencial en

términos de costo de oportunidad del tiempo promedio de viaje en pesos del 2018, se estima en 95.47582.

### **Recomendaciones**

Queda la posibilidad abierta a realizar futuras investigaciones por ejemplo para calcular la accesibilidad al sistema, al mercado laboral, a servicios de la ciudad como la salud, educación, entre otros, y así poder calcular los efectos que tendría el proyecto con respecto a estos servicios. Adicionalmente puede ser aplicado a otras ciudades que cuentan con proyectos aprobados de nueva infraestructura de transporte para así tener también más datos comparables.

Por último, se recomienda que en las encuestas se procure completar datos faltantes de variables como el salario que resultan ser fundamentales para la toma de decisiones y la formulación de políticas públicas.

### **Referencias bibliográficas**

- Alcaldía de Medellín. (2020). *Metro de la 80 recibió el aval técnico del Ministerio de Transporte*.  
<https://www.medellin.gov.co/irj/portal/medellin?NavigationTarget=contenido/5673-Metro-de-la-80-recibio-el-aval-tecnico-del-Ministerio-de-Transporte>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2020). *Plan Maestro de Movilidad para el Valle de Aburrá*.
- Becker, G. (1965). A Theory of the Allocation of Time. *The Economic Journal*.

CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL REPÚBLICA DE COLOMBIA DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. (2020). *DECLARACIÓN DE IMPORTANCIA ESTRATÉGICA DEL PROYECTO METRO LIGERO DE LA AVENIDA 80 EN MEDELLÍN* (Departamento Nacional de Planeación, Ed.).

de Grange, L. (2010). *El gran impacto del Metro*.

DeSerpa, A. C. (1973). Microeconomic theory and the valuation of travel time: Some clarification. *Regional and Urban Economics*.

Etienne, H. (1985). Les approches analytiques des transports urbains en Amérique Latine. In H. Etienne & O. Figueroa (Eds.), *Transports urbains et services en Amérique Latine* (pp. 37–43).

Fu, X., & Gu, Y. (2018). Impact of a New Metro Line: Analysis of Metro Passenger Flow and Travel Time Based on Smart Card Data. *Journal of Advanced Transportation*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9247102>

García-Castrillón, J. A., & Flórez-Londoño, O. (2016). *Analysis of Passenger Transportation Routes through Network Analyst Tool of Arcgis. Case Applied in Medellin City* (Vol. 7, Issue 2).

Jiang, B., & Liu, X. (2011). Computing the fewest-turn map directions based on the connectivity of natural roads. *International Journal of Geographical Information Science*, 25(7), 1069–1082. <https://doi.org/10.1080/13658816.2010.510799>

Liu, S., & Zhu, X. (2004). Accessibility Analyst: An integrated GIS tool for accessibility analysis in urban transportation planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 105–124. <https://doi.org/10.1068/b305>

Medellín cómo vamos. (2018). *¿Qué nos deja la nueva encuesta Origen - Destino?* Medellín Cómo Vamos. <https://www.medellincomovamos.org/que-nos-deja-la-nueva-encuesta-origen-destino>

Okabe, A., & Sugihara, K. (2012). *Spatial Analysis Along Networks: Statistical and Computational Methods*.

O'Sullivan, A. (2011). *Urban Economics* (8th ed.).

O'Sullivan, D. (2014). Spatial Network Analysis. In M. Fischer & P. Nijkamp (Eds.), *Handbook of Regional Science*.

Ozbil, A., Peponis, J., & Stone, B. (2011). Understanding the link between street connectivity, land use and pedestrian flows. *Urban Design International*, 16(2), 125–141. <https://doi.org/10.1057/udi.2011.2>

Wardman, M. (1998). A Review of British Evidence on the Valuations of Time and Service Quality. *Institute of Transport Studies, University of Leeds*.

Zhao, J., Ye, M., Yang, Z., Xing, Z., & Zhang, Z. H. (2021). Operation optimizing for minimizing passenger travel time cost and operating cost with time-dependent demand and skip-stop patterns: Nonlinear integer programming model with linear constraints. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100309>