



Trabajo de grado en modalidad de aplicación

[181007] Análisis de la configuración de redes de infraestructura de transporte público multimodal

Wilson David Garcés Espinel^{a,c}, Andrés Felipe Moreno Bejarano^{a,c}, Daniel Enrique
Ospina Martínez Aparicio^{a,c}, Andrea Catalina Tello León^{a,c}

Nicolás Rincón García^{b, c}

^a Estudiante de Ingeniería Industrial

^b Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^c Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen de diseño en Ingeniería

Public transport systems are one of the priorities for the cities around the world, therefore, the investments on this subject must be made for the long-term and they should impact the majority of the population, improving their quality of life.

Bogota is one of the cities with more than 8 million people that has not a metro system within its actual transport network design. BRT systems are a good option for those cities where the travel demand is not too high. Nevertheless, Bogota is a city generating over 12 million travels, excluding those made by the pedestrians. Thus, the main objective of this study is to determine how the actual and most important public transport system of Bogota (Transmilenio) can be positively affected by the presence of a certain metro network in the city.

The latest and most important information regarding transport is the “Encuesta de Movilidad 2015”. It is a survey that collects all the information from origin to destination of the population living in Bogota and its 17 municipalities, therefore, the current study is based on this information.

For the purpose of the main study, a methodology to analyze new infrastructure of metro system in Bogota was proposed. First, the database was filtered because there was some empty information. Then, the Transmilenio network was uploaded to QGIS, a Geographic Information System application where all the spatial information can be modelled. On this software, the TM and the proposed metro networks were added as a vector layer and then, exported to TransCAD, a software for transportation planning. Once all the layers are exported to TransCAD as an ESRI Shapefile (SHP), the information regarding origin - destination is also uploaded to this software and, consequently, analyzed. These last data were obtained through QGIS, where the distance of the centroids between every ZAT and its closest station was calculated. With this, data regarding the origin and destination station within the network was collected. Then, with the metro and Transmilenio networks on TransCAD and the knowledge of the travels between every pair of stations, the total flow for all arcs was calculated, showing the amount of people moving along all the current lines of Transmilenio and the proposed lines of metro. It is important to mention that the travel information was filtered for the peak hours of the city, which means 6 a. m to 7 a. m, 7 a. m to 8 a. m, 5 p. m to 6 p. m and 6 p. m to 7 p. m.

In the same way, a weighted matrix was proposed in order to choose which of the metro lines designed for the current study better fulfill the needs of the city based on a multi-criteria decision-making.



Facultad de Ingeniería
INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo de Grado – Primer Semestre 2019

transporte público masivo se caracteriza por movilizar grandes volúmenes, contando con vías segregadas, tarjetas prepago y un diseño de estaciones que permiten el acceso a un gran volumen de pasajeros a los vehículos en corto tiempo (Hidalgo, Pereira, Estupiñán, y Jiménez, 2013).

Las ciudades deben considerar la forma como se expanden territorialmente, de manera que permitan ubicar a los ciudadanos de forma más ordenada, desarrollar sitios de trabajo y comercio, y proveer líneas de transporte que satisfagan las necesidades de las personas y, a su vez, mejoren su calidad de vida (Alcántara Vasconcellos, 2010). Por tal motivo, para asimilar qué desplazamientos se realizan y qué tipos de transporte son necesarios para llevarlos a cabo, es importante comprender de qué manera se encuentra estructurada la ciudad, cómo se distribuyen las ciudades en su espacio y qué tanto este ha sido afectado por aspectos como el aumento de la densidad poblacional y, por tanto, el aumento en el número de trayectos.

Bogotá es una ciudad de aproximadamente 8 millones de habitantes, en la cual se generan diariamente cerca de 12 millones de viajes, sin incluir aquellos realizados a pie. De estos, cerca del 20 por ciento son realizados en Transmilenio y alrededor del 35 por ciento del total se realizan en otros medios de transporte público. Entre el año 2011 y 2015 el número de viajes realizados en Transmilenio aumentó en un 53.26 por ciento (Alcaldía mayor de Bogotá y Secretaría Distrital de Movilidad, 2015). Las ciudades aumentan cada día van su cantidad de viajes necesarios, por lo que el sistema de transporte debe crecer a la misma tasa. En el 2017, el 65 por ciento de los ciudadanos percibieron que sus trayectos habituales duraron más tiempo que el año anterior y un 60 por ciento de los usuarios consideraron que el servicio de Transmilenio ha empeorado. Por la troncal de la Caracas transita el 17 por ciento de los usuarios que utilizan Transmilenio (Bogotá Cómo vamos, 2017), por lo que es el corredor que más usuarios moviliza y donde más insatisfacción existe.

Las personas que deben desplazarse desde los extremos (norte - sur) en Transmilenio deben hacer varios transbordos para llegar a su destino. Además, las personas que se encuentran muy al occidente o al oriente deben buscar otros medios de transporte complementarios para lograr llegar a la vía del Transmilenio. Es necesario ofrecer un sistema que pueda movilizar una mayor cantidad de usuarios por hora por sentido, la red existente debe aumentar su capacidad y la calidad con la que se brinda el servicio a través de la mejora de las carreteras y líneas de transporte, o mediante la construcción de enlaces y líneas adicionales para ampliar la red (Vitins y Axhausen, 2009).

En sus inicios, Transmilenio fue la solución más notoria para el caos de movilidad y enorme polución que generaba el transporte en la época y llegó a transportar 116 millones de pasajeros en el 2001. Sin embargo, los siguientes años tuvieron tasas de crecimiento de pasajeros muy elevadas, a tal punto, que en el 2002 el número de pasajeros transportados aumentó en un 78,1 por ciento (TRANSMILENIO S.A., 2016). Por esta razón, 6 años más tarde después de su implementación, el sistema ya estaba saturado y había alcanzado su máxima capacidad, y era necesaria una línea mayor. Bogotá no puede planearse para que la inversión en líneas de sistemas de transporte que se hagan no ofrezcan un servicio de calidad después de 6 años de haberse implementado. Bogotá es una de las pocas ciudades con más de 8 millones de habitantes que no tiene metro. Es por esto que se debe decidir en qué líneas de la ciudad se necesita un sistema metro.

El objetivo del presente Trabajo de Grado fue diseñar una metodología para analizar diferentes opciones de infraestructura de sistema de transporte público masivo en Bogotá, con el fin de determinar la línea propuesta que genere un mayor impacto para la ciudad, teniendo en cuenta diferentes indicadores como el índice de personas por kilómetro, porcentajes de descongestión total, entre otros.

De acuerdo con el planteamiento anterior, se propone la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo planear infraestructura para que sea una operación eficiente que permita calidad para los usuarios?



2. Antecedentes

Bogotá es actualmente una de las nueve ciudades con más de ocho millones de habitantes en el mundo que no cuenta con un sistema de transporte público tipo metro. Bogotá ha sido centro de investigación en materia de movilidad desde diferentes aspectos como arquitectónicos, económicos, sociales y ambientales (Palau, 2013). La construcción del metro de Bogotá ha sido de los temas principales en las alcaldías de la capital y ha evolucionado en diferentes propuestas de movilidad a lo largo del tiempo.

En el año 1942, cuando el principal medio de transporte era el tranvía, el cual transportaba alrededor de 200.000 pasajeros al día, el alcalde Carlos Sáenz quien también construyó el alcantarillado y el acueducto, mencionó por primera vez la construcción del metro y lo propuso por un corredor vial paralelo a los cerros del centro al norte de la ciudad. No obstante, las obras no se concretaron, ni los estudios tuvieron repercusión alguna en la ciudad debido al poco impacto que tuvo en el consejo, nublado además por los problemas geopolíticos de aquel entonces (Sepúlveda, 2014). No fue sino hasta 1949, cuando el alcalde Fernando Mazuera eliminó el sistema de tranvía como consecuencias de los daños sufridos después del Bogotazo y propuso un metro por concesión a 25 años que iba de norte a sur de la ciudad por la avenida Caracas y Autopista, aunque finalmente, la presión del capital privado y el monopolio de los buses no hicieron posible la construcción de este corredor (Gómez Colmenares, 2014).

Posteriormente en el año 1954, el alcalde Roberto Salazar Gómez solicita un préstamo para el estudio de metro por la avenida Caracas, no obstante, el consejo no aprobó el desembolso y continuó con la importación de buses. Después fue el alcalde Andrés Rodríguez quien le propuso al Concejo desarrollar la idea y también fracasó en su intento. En 1961, el alcalde designado Jorge Gaitán Cortés, propuso desplegar un trazado de tramos subterráneos y elevados, con una extensión de 93 kilómetros a lo largo de la avenida Caracas, desde la calle 66 hasta la calle 22 sur. El plan de Gaitán Cortés contemplaba 15 estaciones, pero hubo cambio de gobierno y a pesar de que llegó a la alcaldía de la ciudad uno de sus más connotados gestores, Virgilio Barco Vargas, la idea del metro volvió a archivarse una vez más (Duque Aguirre, 2015).

En 1981, comenzaron los primeros estudios serios que permitieron perfilar las actuales propuestas de metro para la capital. El primero de ellos se hizo durante la presidencia de Julio César Turbay y la alcaldía de Hernando Durán Dussán, lo ejecutó la firma Sofretu Ineco CS y se centró en tres principales corredores viales: La carrera 7, la calle 13 y la Caracas, con un total de 76 kilómetros. En el año 2000, el proyecto supuso una población futura de 7,5 millones de personas que se alcanzarían dentro del perímetro de la ciudad capital, en el año 2011, con un costo aproximado de 797 millones de dólares. Sin embargo, este no se llevó a cabo dada la prioridad del metro de Medellín. Posteriormente, Virgilio Barco en el año 1987, con la ayuda de la firma italiana Intermetro, sugirió una propuesta de metro con tres líneas de 46 kilómetros y un costo aproximado de 858 millones, no obstante, el presidente César Gaviria lo declaró inviable (Alzate, 2007).

Unos años después, en 1992, el exalcalde Jaime Castro licitó Metrobús, una empresa que tendría integración de bus y un futuro metro. No obstante, el gremio de los buses no lo vio viable y el proyecto fracasó. Después, en el año 1996, la agencia de cooperación japonesa Jica hizo el Plan Maestro de Movilidad, durante el periodo de Antanas Mockus. Este incluía los estudios de un metro, pero el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), decretado por el mismo Mockus, ignoró la propuesta. Un año más tarde, había un nuevo proyecto: en 1997, con Ernesto Samper en la Presidencia, se pagó la consultoría Systra-Bechtel-Ingetec, que propuso tres líneas de metro. El costo se elevó a 2.450 millones de dólares, sin embargo, como consecuencia de la crisis financiera del año 1999, se optó por construir Transmilenio (Acevedo, 2009).

Finalmente, ocho años después, Samuel Moreno contrata a la firma Sener para llevar a cabo un nuevo estudio donde se propuso una línea de metro, cuyo costo aumentó a 4 billones de pesos, posteriormente el congreso asignó 340.000 millones de pesos para la construcción de la primera línea y las mejoras de Transmilenio. Además, el Concejo de Bogotá aprobó un cupo de deuda por 800.000 millones de pesos. No obstante, el carrusel de contratación hizo que no se pudieran llevar a cabo las obras. Con la llegada de la administración de Petro, se incrementaron los costos de implementación y ascendieron a 15 billones de pesos, los cuales no fueron aprobados

por la rama legislativa. Finalmente, el actual alcalde, Enrique Peñalosa, propuso una línea de metro intermodal que va entre Kennedy, Tunjuelito y Ciudad Bolívar y conecta con la actual línea de Transmilenio.

La literatura que aborda la toma de decisión para la construcción de nueva infraestructura es bastante reducida y se centra principalmente en la comparación económica y presupuestal de diferentes líneas de transporte público, como lo menciona Alonso-Neira (2013). En su estudio, evalúa la viabilidad económica y financiera entre dos líneas de metro en las periferias de Madrid propuestas por la administración de Ana Botella. Por otro lado, existen aproximaciones conceptuales, como lo hace Hidalgo (2005), donde por medio de una evaluación indicativa de alternativas de transporte masivo demuestra que solo es conveniente introducir tecnología ferroviaria (Metro) cuando la demanda de viajes es mayor a 40,000 pasajeros por hora por sentido para la ciudad de Bogotá. Otra aproximación interesante la hace Porras (2018), donde analiza el sistema de transporte existente en Bogotá e identifica posibles adecuaciones que permitan adecuar nuevas propuestas técnicas descriptivas de intermodalidad al sistema integrado de transporte (SITP).

No obstante, es en la viabilidad arquitectónica donde se centran la mayoría de los estudios de comparación de diferente infraestructura para el transporte público. En el estudio planteado por Bengoechea González (2017), se compara la viabilidad estructural de diferentes corredores viales para ferrocarril de doble vía para la región de Cataluña. De igual forma, Guzmán Ruiz (2018) utiliza la investigación y el análisis de las características de las propuestas de metro elevado, entorno urbano y tipologías de ocupación del suelo para identificar los posibles impactos a los que se ve enfrentada la ciudad de Bogotá, así como la opción de hacerlo elevado o subterráneo. Desde otro punto de vista, Téllez (2018) analiza cómo diferentes propuestas de transporte público impactan de forma socioeconómica a la población bogotana.

Con base en la revisión de la literatura, se puede concluir que no hay estudios donde se generen flujos de demanda de diferentes líneas de metro propuestas y se compare gráfica y cuantitativamente el grado de descongestión de los corredores viales actuales de Transmilenio. Esto con el objetivo de determinar cuál de las líneas es la que genera un impacto mayor para la ciudad por medio de características propias de los medios de transporte como el tiempo de espera, tiempo de recorrido y costo.

3. Objetivos

Diseñar una metodología que permita soportar la toma de decisiones para la ubicación de nueva infraestructura del Sistema de Transporte Público.

- Identificar los factores de selección de modo de operación del Sistema de Transporte Público en Colombia.
- Proponer una metodología que permita evaluar diferentes ubicaciones de infraestructura del Sistema de Transporte Público implementando algoritmos de ruta más corta en redes multimodales
- Analizar diferentes opciones de nueva infraestructura de líneas de metro o troncales de Transmilenio.
- Realizar un análisis de sensibilidad del impacto del algoritmo diseñado, comparándolo con el sistema de transporte público actual.

4. Metodología propuesta

4.1 FASE 1: Determinar factores de selección de modo - Distribución modal

Esta fase busca determinar cómo se están desplazando los usuarios en los diversos sistemas de transporte en Bogotá y qué incentiva estos comportamientos, con el fin de obtener las probabilidades de escogencia de los modos de transporte según un modelo Logit Multinomial. Los pasos planteados para la presente fase fueron los siguientes:

4.1.1 Selección del conjunto de datos

Los datos utilizados para el presente Trabajo de Grado fueron tomados de la Encuesta de Movilidad 2015, proporcionada por la Secretaría Distrital de Movilidad¹. En esta encuesta, se encuentran datos de origen y destino de los viajes, tiempos de desplazamiento, tiempos de espera, estrato, modo predominante de transporte, entre otros. La Encuesta recolecta datos de 147,251 personas que representan el 1.87% de la población de Bogotá para el 2015 (DANE, s.f.). Asimismo, la encuesta permite estimar la población real por medio de un factor de ponderación.

Esta Encuesta se escogió dado que actualmente es la más reciente. Adicionalmente, recolecta una gran cantidad de información que sirve de insumo para realizar los análisis pertinentes.

4.1.2 Transformación del conjunto de datos de entrada

La Encuesta de Movilidad está fragmentada en distintas bases de datos, de las cuales se utilizaron 4, en donde se encuentra la caracterización de los viajes que realizan las personas. Para el presente análisis, se unificaron estas bases de datos por medio del ID de la encuesta, con el fin de tener todos los datos relevantes y poder analizarlos en conjunto.

Para la presente transformación, se eliminaron los datos vacíos² y datos atípicos³ debido a que no proporcionan la información requerida para el análisis. De la misma manera, se eliminaron todos los viajes realizados en los 17 municipios vecinos del área de influencia de Bogotá, para centralizar el estudio únicamente en esta zona de influencia. Adicionalmente, aquellos viajes realizados en medio predominante “ilegal”, “intermunicipal” y “otros” fueron eliminados debido a que son modos con características diversas y difícilmente medibles.

En la Figura 2 se puede evidenciar la distribución de los viajes a lo largo del día según la Encuesta de Movilidad 2015.

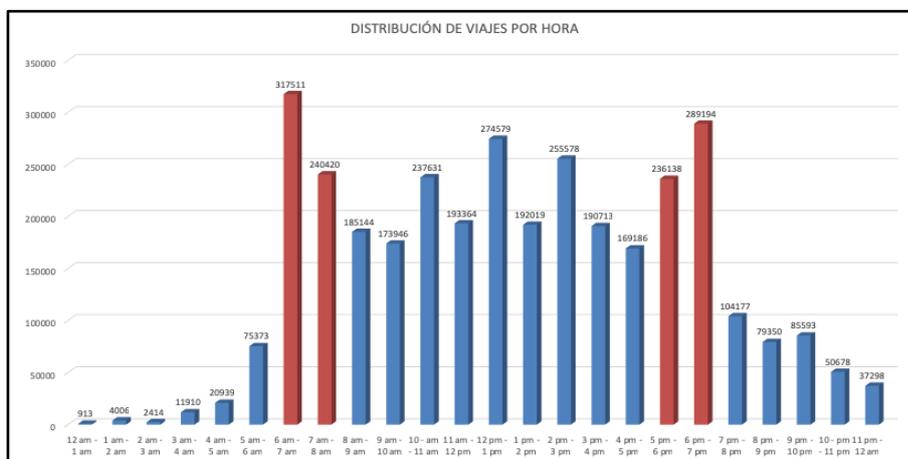


Figura 2. Distribución de viajes por franja horaria

En esta figura, se puede evidenciar que las franjas de 6 a.m. a 7 a.m., 7 a.m. a 8 a.m., 5 p.m. a 6 p.m. y 6 p.m. a 7 p.m. presentan una alta cantidad de viajes en las horas de la mañana y la tarde. Por esta razón, para el presente

¹ La encuesta de Movilidad 2015 puede consultarse en: https://www.movilidadbogota.gov.co/web/datos_abiertos

² Datos cuyo valor no existe o es cero para los casos de las latitudes y longitudes

³ Entiéndase como valores por fuera de los rangos normales, como costos de transporte o tiempos de desplazamiento demasiado elevados



Trabajo de Grado y el desarrollo de su metodología, se realizó el análisis para estas 4 franjas horarias. Finalmente, se obtuvo una base de datos de 29.256 encuestas.

4.1.3 Selección de variables representativas

Las variables representativas para el cálculo de los coeficientes de selección de modo fueron escogidas a través de la literatura. Particularmente, Alcántara Vasconcellos (2010) menciona que las variables de escogencia de un modo sobre otro son: tiempo de desplazamiento, tiempo de espera, costo del viaje y los ingresos de la persona.

4.1.4 Cálculo de coeficientes

Una vez se cuenta con la base de datos final, se encuentra la distancia que recorre cada una de las personas encuestadas. Dado que la Encuesta de Movilidad 2015 ofrece información georreferenciada, se puede determinar la distancia en kilómetros que recorre cada usuario a través de la Ecuación de Haversine, que calcula la distancia euclidiana entre dos puntos geográficos:

$$\text{Distancia en km} = 6371 * ACOS(COS(RADIANES(90 - LAT1)) * COS(RADIANES(90 - LAT2)) + SENO(RADIANES(90 - LAT1)) * SENO(RADIANES(90 - LAT2)) * COS(RADIANES(LON1 - LON2)))$$

Ecuación 1. Ecuación de Haversine

Siendo,

- LAT1: latitud origen
- LAT2: latitud destino
- LON1: longitud origen
- LON2: longitud destino

Posteriormente, para el cálculo de los coeficientes se utiliza BIOGEME, el cual es un software de estimación de modelos de elección discreta, utilizado para modelos Logit Multinomiales.

Para el presente modelo se plantean los siguientes conjuntos:

- I: Modos de transporte {Alimentador, Auto, Bicicleta, Especial, Moto, Peatón, Taxi, TPC-SITP, Transmilenio}
- J: Coeficientes de selección de modo {BetaI, BetaC, BetaD, BetaE}

La función de utilidad para el presente modelo se presenta como sigue:

$$Y = Asc_i + BetaI * INGRESO_i + BetaC * COSTO_i + BetaD * TVIAJE_i + BetaE * TESPERA_i$$

Siendo:

Asc_i : valor de la constante del modo i

β_{eta_j} : valor del coeficiente j de selección de modo

$INGRESO_i$: valor de la variable Ingreso de las personas para el modo i

$COSTO_i$: valor de la variable Costo del viaje para el modo i

$TVIAJE_i$: valor de la variable Tiempo de Viaje para el modo i

$TESPERA_i$: valor de la variable Tiempo de Espera para el modo i

La declaración de las variables relevantes para el modelo en BIOGEME se muestra en la Figura 3.

//Name	Value	LowerBound	UpperBound	status (0=variable, 1=fixed)
Asc1	0	-10000	10000	0
Asc2	0	-10000	10000	0
Asc3	0	-10000	10000	0
Asc4	0	-10000	10000	0
Asc5	0	-10000	10000	0
Asc6	0	-10000	10000	0
Asc7	0	-10000	10000	0
Asc8	0	-10000	10000	0
Asc9	0	-10000	10000	0
BetaI	0	-10000	10000	0
BetaC	0	-10000	10000	0
BetaD	0	-10000	10000	0
BetaE	0	-10000	10000	0

Figura 3. Declaración de variables BIOGEME

Las funciones de utilidad propuestas para cada uno de los modos de transporte para los cuales se estiman los coeficientes a través de BIOGEME se pueden ver a continuación (Figura 4).

[Utilities]			
// Id	Name	Avail	linear-in-parameter expression (beta1*x1 + beta2*x2 + ...)
1	ALIMENTADOR	av1	Asc1 * One + BetaI * INGRESO_1 + BetaC * COSTO_1 + BetaD * T_VIAJE_1 + BetaE * T_ESPERA_1
2	AUTO	av2	Asc2 * One + BetaI * INGRESO_2 + BetaC * COSTO_2 + BetaD * T_VIAJE_2 + BetaE * T_ESPERA_2
3	BICICLETA	av3	Asc3 * One + BetaI * INGRESO_3 + BetaC * COSTO_3 + BetaD * T_VIAJE_3 + BetaE * T_ESPERA_3
4	ESPECIAL	av4	Asc4 * One + BetaI * INGRESO_4 + BetaC * COSTO_4 + BetaD * T_VIAJE_4 + BetaE * T_ESPERA_4
5	MOTO	av5	Asc5 * One + BetaI * INGRESO_5 + BetaC * COSTO_5 + BetaD * T_VIAJE_5 + BetaE * T_ESPERA_5
6	PEATON	av6	Asc6 * One + BetaI * INGRESO_6 + BetaC * COSTO_6 + BetaD * T_VIAJE_6 + BetaE * T_ESPERA_6
7	TAXI	av7	Asc7 * One + BetaI * INGRESO_7 + BetaC * COSTO_7 + BetaD * T_VIAJE_7 + BetaE * T_ESPERA_7
8	TPC-SITP	av8	Asc8 * One + BetaI * INGRESO_8 + BetaC * COSTO_8 + BetaD * T_VIAJE_8 + BetaE * T_ESPERA_8
9	TRANSMILENIO	av9	Asc9 * One + BetaI * INGRESO_9 + BetaC * COSTO_9 + BetaD * T_VIAJE_9 + BetaE * T_ESPERA_9

Figura 4. Funciones de utilidad modelo Logit

A partir de las funciones de utilidad propuestas, se corre el modelo en BIOGEME y se hallan los valores de los parámetros. Con esto, se calculan las utilidades que tendría cada usuario al utilizar un modo de transporte u otro, y con los datos de tiempo y costo de cada modo se estima la probabilidad de uso de cada medio de transporte. La ecuación del Logit Multinomial es la siguiente:

$$P_m = \frac{e^{U_m}}{\sum_{m=1}^n e^{U_m}}$$

Ecuación 2. Ecuación Logit Multinomial

Siendo,

P_m = Probabilidad de uso del modo m

U_m = Función de utilidad del modo m

Finalmente, se pueden calcular las probabilidades de uso de los modos de transporte con el modelamiento en BIOGEME de la base de datos y la implementación de la ecuación del Logit Multinomial.

4.2 FASE 2: Proponer nuevas opciones de infraestructura

En esta fase, se busca definir qué líneas de metro van a ser analizadas por la metodología propuesta, con el fin de validar cual tendrá el mayor impacto en los principales corredores viales que se encuentran en sobresaturación en la ciudad de Bogotá.

4.2.1 Planteamiento de líneas de infraestructura

Teniendo en cuenta los estudios de viabilidad para la construcción de las diferentes líneas de metro planteadas a lo largo de la historia de Bogotá, se evaluaron seis propuestas de metro sobre las cuales se han hecho los estudios más completos por parte de las diferentes administraciones.

Por otro lado, se tuvo en cuenta cuáles son las zonas de la ciudad que no cuentan con una línea de Transmilenio cercana, como lo es la zona occidental de Bogotá, que abarca localidades como Engativá, Fontibón, Bosa, Kennedy y Ciudad Bolívar. Esta zona solo cuenta con líneas de Transmilenio en sentido Oriente - Occidente, y no de Norte - Sur, en el cual, con base en nuestros análisis, se evidencia un flujo significativo. Adicionalmente, se tuvo en cuenta la orientación geográfica de la línea, de forma que sean perpendiculares a las troncales actuales, como por ejemplo la propuesta de la línea de la Avenida Boyacá y el corredor vial de la Autonorte.

Según el planteamiento anterior, se evaluaron las propuestas que se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propuestas de redes de infraestructura del sistema de transporte público tipo metro

Línea Propuesta	Trayecto	Justificación
Boyacá	Por la avenida Boyacá desde la calle 170 hasta el portal Tunal. Longitud 23,07 km	Es paralela a la autopista norte y la Avenida Caracas, y tiene sentido norte - sur por el costado occidental de la ciudad, donde actualmente no existe ningún corredor vial de transporte integrado. Adicionalmente, según el Consejo Nacional de Política Económica Social (CONPES, 2017) es uno de los dos corredores viales más llamativos para la estructuración de la primera línea de metro de Bogotá.
Séptima	Por la Carrera Séptima desde la calle 170 hasta la calle 26. Longitud 17,44 km	Es paralela a la autopista norte, con sentido norte - sur en el costado oriental de la ciudad, donde se genera un porcentaje significativo del total de los viajes al día de 23% (Chaparro, I. 2002). Adicionalmente, según el Consejo Nacional de Política Económica Social (CONPES, 2017) es uno de los dos corredores viales más llamativos para la estructuración de la primera línea de metro de Bogotá.
Propuesta de Mockus (1998)	Consta de tres tramos, el primero va desde la calle 26 sur por la transversal 92, después por la carrera 13 hasta la zona centro, la segunda por la calle 26 iniciando desde el aeropuerto hasta la candelaria, la tercera inicia desde la zona nororiental desde la 127 a través de la carrera 9, posteriormente por la diagonal 92 hasta la NQS. Longitud 39,09 km	Esta propuesta abarca en su mayoría zonas donde no hay Transmilenio, adicionalmente combina el sentido tanto norte - sur por la calle 26 como oriental - occidental por la transversal 92 desde la calle 26 sur. En su totalidad cubre aproximadamente un 75% de las localidades.
Propuesta de Moreno (2007)	Se evaluó la primera fase que va desde la calle 26 sur por la 68, pasando por la autopista por la calle 100 hasta la carrera 7 con 116. Longitud 20,84 km	Teniendo en cuenta que la 68 en el tramo sur hace parte de la zona occidental de Bogotá, y luego en el tramo norte desemboca en la calle 100 que llega a la carrera séptima, se quiso evaluar el comportamiento de una infraestructura vial mixta que tenga cobertura tanto de la zona oriental como occidental.

Propuesta de Petro (2011)	Cubre desde la localidad de Bosa desde el portal de la Américas, por la avenida Villavicencio, avanzando por la avenida primera (Hortúa), llegando al centro por la carrera 13 y posteriormente hasta el parque de Lourdes, después se alinea con la carrera 11 hacia el norte pasando por el Cantón hasta llegar a la calle 127. Longitud 25,28 km	Se quiso evaluar esta propuesta, debido que a la cobertura que tiene se concentra en la zona sur y tiene un tramo por la calle 7 que es perpendicular a la troncal de la Caracas y de la Autopista Norte.
Propuesta de Peñalosa (2016)	Al igual que la propuesta de Petro, inicia desde la localidad de Bosa en la troncal de las Américas, hasta la localidad Antonio Nariño, por la carrera 50 siguiendo por los Mártires, para llegar a la troncal de la Caracas hasta la 72. Longitud 25 km	Como con la administración de Petro, se quiso evaluar el impacto que genera una línea de metro que tenga una cobertura en la zona sur de Bogotá, donde se concentra el mayor número de viajes tanto en la mañana como en la tarde.

4.2.2. Trazado de las nuevas líneas de infraestructura

Para el desarrollo de esta etapa se utilizó un sistema de información geográfica de código libre (QGIS), el cual permite importar archivos vectoriales Shapefile (SHP) o capas georreferenciadas. Lo que se buscó con el uso de este software, fue trazar las nuevas opciones de infraestructura de transporte público de manera precisa sobre una capa de que permitiera la visualización de la malla vial de Bogotá junto con el actual sistema de transporte público masivo de la ciudad.

Las capas utilizadas para la presente etapa del trabajo de grado fueron tomadas de la Plataforma Distrital de Datos Abiertos de Bogotá⁴ para las estaciones de Transmilenio y de la encuesta de movilidad de 2015⁵ para las ZAT de la ciudad de Bogotá y los municipios vecinos. En estas capas se encuentran 948 objetos espaciales para las ZAT y 149 objetos espaciales para las estaciones de Transmilenio.

Una vez importadas tanto la capa de las ZAT de Bogotá como las estaciones del sistema actual de Transmilenio, se fusionaron en un nuevo proyecto. Sobre este nuevo proyecto se realiza el trazado de cada una de las líneas propuestas, de manera separada haciendo uso de la herramienta “Conmutar edición” seguido de “Añadir objeto Espacial”.

4.2.3 Generación de la matriz de distancias - viajes

Una vez finalizado todo el trazado de la línea, se utiliza la herramienta “Centroides de polígonos” a través de QGIS para calcular el centroide de cada una de las ZAT. Después de esto, se calcula la matriz de distancias entre los centroides de las ZAT y los objetos espaciales de todas las estaciones de Transmilenio y metro para luego asignar la estación más cercana a cada una de las ZAT, de manera que una única estación satisfaga la demanda para esa ZAT. Finalmente, se guarda una nueva capa con los objetos espaciales de Transmilenio y la nueva línea de metro unidos en un solo archivo Shape.

Contando con la información de qué estación atiende a cada ZAT, se realiza una asignación de los viajes por estación origen y estación destino. Teniendo los factores de selección de modo, se aplica el porcentaje

⁴ Esta información puede consultarse en: <http://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/estaciones-troncales-Transmilenio>

⁵ Esta información puede consultarse en <https://drive.google.com/drive/folders/0BzYr0SveNi4AeDJ6MzJtYnJ6MIU>



(probabilidad de escogencia) de viajes que se realizan en cada modo (metro y Transmilenio) y se reasignan a estos modos, logrando un modelo conjunto entre cercanía y factores de selección de modo.

4.3 FASE 3: Representación de los flujos de demanda - Análisis de opciones de infraestructura

Posteriormente, se procede a representar los flujos de demanda de las diferentes líneas en los diferentes horarios para analizar su comportamiento. Se utilizó TransCAD, un software para la planeación de transporte que trabaja con Sistemas de Información Geográfica (SIG) y que permite modelar la demanda, con base en la información previa generada por QGIS.

4.3.1 Trazado de las líneas de transporte con conexiones multimodales

Inicialmente, se toma el archivo Shape (SHP) que se generó en QGIS, y se exporta a la consola de TransCAD, permitiendo visualizar las estaciones tanto de las líneas propuestas como de las troncales de Transmilenio. Inicialmente, los objetos espaciales importados de QGIS se deben unir por modo, es decir, se unen todas las troncales de Transmilenio y, por otro lado, la línea propuesta de metro. Una vez se unen los objetos espaciales se crean puntos de conexión intermodal donde se conectan estaciones en ambos modos de manera que un usuario.

4.3.2 Generación de los flujos de demanda

Se importa la matriz de distancia para cada franja horaria a la consola de TransCAD. Una vez se carga este archivo, se genera la matriz de viajes, la cual contiene la información del número de viajes que existen de una estación a otra de la red plasmada en el software. Posteriormente, se crean las variables “Modo” y “Tiempo” y se asignan las estaciones de Transmilenio y las que son de Metro en la variable “Modo”. Teniendo en cuenta la velocidad promedio de Transmilenio y de metro de 26 km/h y 43 km/h, respectivamente (Grava, 2010).

Finalmente, se crean las rutas de red y se hace la asignación de tráfico, los cuales servirán como recurso para el cálculo de los flujos de viajes diferenciados por sentido. Estos flujos se utilizarán para el análisis de sensibilidad e impacto de las diferentes líneas en la infraestructura de Transmilenio actual. Por último, se aplica el modelo de ruta más corta que contiene TransCAD, teniendo como base el tiempo de desplazamiento entre los diferentes puntos. Así, se logró evidenciar las rutas que tomarían las personas y los flujos de los diferentes arcos que se tendrían por hora por sentido en las franjas pico de la ciudad.

4.3.3 Restricciones previas al análisis de flujos

Una de las limitaciones más grandes para el presente trabajo fue la información suministrada, pues toda la información relevante para el modelo fue tomada directamente de la Encuesta de Movilidad 2015. Dado que esta es una encuesta de preferencias reveladas⁶, la distribución de los viajes entre metro y Transmilenio se hizo siguiendo el tiempo de desplazamiento aproximado que arroja el modelo y la probabilidad de escogencia arrojada por los factores de selección de modo. Asimismo, para el análisis de sensibilidad, se realizó una aproximación de los viajes al 2050 asumiendo incrementos en los viajes con la misma tasa de crecimiento población que suministra el DANE (1,5% anual).

Al proponer las estaciones de metro por la Avenida Boyacá y la Carrera Séptima, no se consideraron aspectos de infraestructura, económicos, ambientales, restricciones implantadas por departamentos de planeación o el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de la ciudad. Se espera que las propuestas de metro de las administraciones de Antanas Mockus, Samuel Moreno, Gustavo Petro y la propuesta actual de la Alcaldía de Bogotá sí cumplan con los factores anteriormente enunciados.

Adicional a esto, se hacen algunos supuestos relevantes:

⁶ Observación del comportamiento real de las personas

- No existe un tiempo de caminata o espera, es decir, no existe un tiempo de desplazamiento a la estación más cercana y las personas una vez en la estación no deben esperar para abordar un bus o un tren.
- Los costos y los tiempos de transbordo son nulos. Se asume que una persona puede realizar los transbordos que sean necesarios sin ningún costo con el objetivo de minimizar su tiempo de desplazamiento.
- Se asumen velocidades constantes de 26 km/h y 43 km/h para Transmilenio y metro respectivamente. Por lo cual, para un usuario que vaya de una estación a otra, no se consideran tiempos de paradas en estaciones, semaforización, tráfico y demás factores que puedan tener un impacto en la velocidad del sistema.

4.4 FASE 4: Análisis de impacto

4.4.1 Indicadores de desempeño

El análisis de impacto se realizó por medio de los indicadores de desempeño que proporcionan información relevante para evidenciar y evaluar cuál de las líneas propuestas para el presente Trabajo de Grado permite planear infraestructura, de tal forma que sea una operación eficiente que se refleje en calidad para los usuarios.

Los indicadores con su objetivo dentro de la metodología y la fórmula utilizada para calcularlos se enuncian en la Tabla 2.

Tabla 2. Indicadores de desempeño, cálculo y justificación

Indicador	Objetivo del indicador	Fórmula utilizada
IPK - Índice de Pasajeros por Kilómetro	Medir la efectividad del servicio prestado. Para la presente metodología se utilizará sobre cada una de las líneas de metro propuestas, con el fin de determinar cuál es la línea que responde en mejor medida a este índice.	$IPK = \frac{\text{Flujo total de la línea}}{\text{Kilometros de la línea}}$
Flujo promedio	Determinar por medio del flujo total de viajes, cuál de las líneas de metro propuestas sobrepasa la capacidad máxima de 65.000 viajes/hora y 35.000 viajes/hora para metro y Transmilenio respectivamente.	$\text{Flujo promedio para el modo } j = \frac{\sum_j \text{Flujo del arco}}{\# \text{ de arcos}}$
Porcentaje de saturación promedio	Calcular el porcentaje de saturación para cada franja horaria de cada propuesta, y generar un promedio lineal para determinar cuál línea tiene un porcentaje de saturación total.	$\% \text{ de saturación promedio} = \frac{\text{Flujo promedio del modo } j}{\text{Capacidad del modo } j} - 1$
Cantidad de arcos saturadas	Comparar cuál de las diferentes propuestas de metro, genera el menor porcentaje de arcos saturados para toda la infraestructura de transporte. teniendo en cuenta la capacidad máxima de cada modo se calcula cuál estación se encuentra en saturación y posteriormente se hace el conteo de todos los arcos que superen la capacidad máxima.	$\text{Cantidad de arcos saturados} = \sum \text{Arcos que exceden la capacidad}$
Porcentaje de Descongestión promedio	Teniendo en cuenta los flujos generados por TransCAD, se calcula el cambio porcentual de los flujos de viajes de las estaciones sin la implementación de la línea de metro, respecto a los flujos de viaje de las estaciones con la línea implementa y se calcula un promedio lineal.	$\% \text{ Promedio de descongestión} = \frac{\sum \% \text{ de descongestión para cada arco}}{\# \text{ total de arcos}}$
Costo total de la	Comparar el impacto presupuestal de cada una de las líneas	

línea	propuestas, teniendo en cuenta el costo por kilómetro y la longitud total de la propuesta.	Costo total = $\text{Longitud de la línea en km} * \text{Costo del km}^7$
Porcentaje de utilización de la línea	Medir el porcentaje de utilización para todo el sistema respecto a la capacidad máxima de la misma.	% de utilización de la línea = $\frac{\sum_i \text{Utilización del arco } i}{\sum_i \text{Capacidad máxima de la línea}}$

4.4.2 Análisis de toma de decisiones multicriterio

Para la escogencia de cuál línea de metro propuesta es más favorable se va a definir un análisis de toma de decisiones multicriterio, asignándole una ponderación a cada uno de los indicadores de desempeño previamente mencionados (Romero, 1996). Para lo cual, se plantea el siguiente orden de importancias propuesta para la presente metodología:

Tabla 3. Orden de importancia indicadores de desempeño

	IPK - Índice de Pasajeros por Kilómetro	Flujo promedio	Porcentaje de saturación promedio	Cantidad de arcos saturados	Porcentaje de descongestión promedio	Costo total de la línea	Porcentaje de utilización de la línea
Prioridad	4	7	1	2	3	5	6

Siendo el número 1 la primera prioridad y el número 7 la última prioridad. El orden de importancias escogido puede variar dado un ejercicio en particular. Para la presente metodología, se buscó darle una mayor prioridad a la descongestión que se presenta en el sistema Transmilenio si existieran nuevas opciones de redes de infraestructura de transporte público.

Posteriormente, se debe hallar el máximo, el mínimo y el recorrido de cada uno de los indicadores en función de las distintas líneas propuestas, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Matriz de valores por indicador y línea

	IPK - Índice de Pasajeros por Kilómetro	Flujo promedio	Porcentaje de saturación promedio	Cantidad de arcos saturados	Porcentaje de descongestión promedio	Costo total de la línea (USD)	Porcentaje de utilización de la línea
Boyacá	26.591	43.816	-32,6	3	-6,93	\$3.667.907.627	71,64
Séptima	107.749	58.111	-9,7	13	-1,56	\$2.772.642.568	86,29

⁷ El costo por kilómetro fue tomado del costo actual por km para la construcción del Metro de Bogotá, que puede consultarse en: <http://www.metrodebogota.gov.co/?q=transparencia/informacion-interes/faqs/%C2%BFcu%C3%A1l-ser%C3%A1-el-costo-kil%C3%B3metro-del-proyecto-y-c%C3%B3mo-se-compara>

Mockus	46.875	37.008	-24,5	11	-3,40	\$6.214. 910.749	57,97
Moreno	41.268	50.871	-21,7	5	-1,30	\$3.313. 881.275	80,25
Petro	76.223	72.417	11,4	16	3,18	\$4.019. 288.991	100,90
Peñalosa	50.917	55.345	-14,9	10	-6,47	\$3.975. 000.000	76,00
Máximo	107.749	72.417	11,4	16	3,18	\$6.214. 910.749	100,90
Mínimo	26.591	37.008	-32,6	3	-6,93	\$2.772. 642.568	57,97
Recorrido	81.158	35.409	44	13	10,11	\$3.442. 268.181	42,93

Una vez se cuenta con la matriz anterior, se procede a calcular los pesos para cada criterio o indicador con la siguiente fórmula:

$$W_j = \frac{\frac{1}{r_j}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}}$$

Ecuación 3. Peso para cada indicador de desempeño i

Siendo,

- $r_{i,j}$ el nivel de prioridad del indicador i, j .

Adicionalmente, se van a tener dos fórmulas para el cálculo de las puntuaciones de cada criterio. Para los indicadores de Saturación promedio, Arcos saturados, Porcentaje de descongestión y Costo de la línea, se utilizará la siguiente ecuación:

$$Puntuación = \frac{(Valor\ indicador - Mínimo)}{Recorrido}$$

Ecuación 4. Puntuación para los indicadores de desempeño

Se utiliza la Ecuación 4 dado que nos interesan los valores más pequeños de cada propuesta. Por ende, la puntuación para los valores más favorables será 0 y para los menos favorables será 1. Por el contrario, los indicadores de Índice de Pasajeros por Kilómetro - IPK y Porcentaje de utilización se medirán con la siguiente ecuación:

$$Puntuación = \frac{(Máximo - Valor\ indicador)}{Recorrido}$$

Ecuación 5. Puntuación para los indicadores de desempeño

La Ecuación 5 se utiliza dado que nos interesan los valores más grandes de cada propuesta. De igual forma que con la ecuación anterior, los valores más favorables tendrán una puntuación de 0 y los menores favorables tendrán



Facultad de Ingeniería
INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo de Grado – Primer Semestre 2019

una puntuación de 1. Una vez realizada toda la matriz de ponderación, se puede estimar cuál es la mejor línea propuesta de acuerdo con los presentes criterios de selección⁸.

La propuesta de la Avenida Boyacá presenta un valor más cercano a 0 que las demás propuestas. Ya que para la presente matriz de ponderación los valores más favorables son los que más se acercan a cero, se puede concluir que según la presente toma de decisiones multicriterio, la línea propuesta por la Avenida Boyacá desde la calle 170 hasta el Portal Tunal es la que satisface en mayor medida los indicadores de desempeño propuestos para la presente metodología. Por lo anterior, el análisis de sensibilidad se realizará para esta línea propuesta.

5. Resultados:

5.1 FASE 1: Determinar factores de selección de modo

Una vez realizado todo el procedimiento presentado en los numerales anteriores, se evidencian los resultados del ejercicio en cuestión. Inicialmente, los valores de los parámetros correspondientes a cada variable del modelo a estimar se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Valor coeficientes BIOGEME

Coeficiente	Valor
BetaC	-0,0000806
BetaD	-0,049
BetaE	-0,006
BetaI	-3,73E-09

⁸ Para ver en detalle los resultados de la matriz de ponderación, referirse al Anexo 12

En esta tabla:

- **BetaC** corresponde al parámetro que acompaña la variable de costo del pasaje
- **BetaD** corresponde al parámetro que acompaña la variable de tiempo de desplazamiento
- **BetaE** Corresponde al parámetro que acompaña la variable de tiempo de espera
- **BetaI** Corresponde al parámetro que acompaña la variable de ingreso de la persona

Es importante resaltar que el valor *per se* de estos coeficientes no es relevante y lo que debe considerarse es el signo de los mismos. Por ejemplo, para el parámetro de tiempo de desplazamiento (BetaD), al tener un signo negativo refleja que dado un mayor tiempo de desplazamiento la utilidad que va a tener ese usuario va a ser menor. De la misma manera se pueden interpretar los demás parámetros (Fajardo y Gómez, 2015). Así, el resultado de las funciones de utilidad que se obtienen para cada modo de transporte se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Utilidad U_m de cada modo de transporte

Alimentador	-2,575866
Auto	-2,610666
Bicicleta	-2,700866
Especial	-2,455866
Moto	-2,002966
Peatón	-0,740866
Taxi	-3,148166
TPC-SITP	-0,909766
Transmilenio	-1,349946
Metro	-1,171066

Dado que el metro es un modo que actualmente no existe en la ciudad de Bogotá, se utiliza la misma función de utilidad que se utilizó para los demás modos de transporte. De esta forma, utilizando la ecuación del Logit Multinomial, se estiman las probabilidades de uso de los modos de transporte modelados para el presente ejercicio.

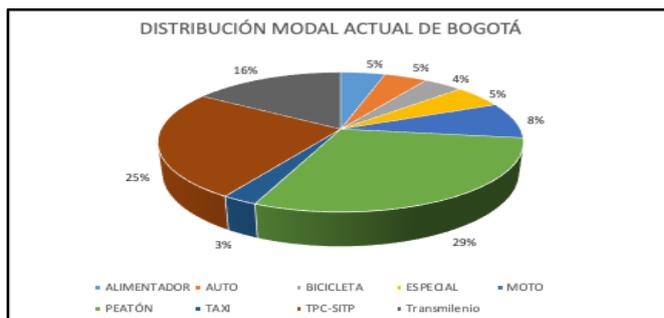


Figura 5. Distribución modal actual de Bogotá - Logit Multinomial

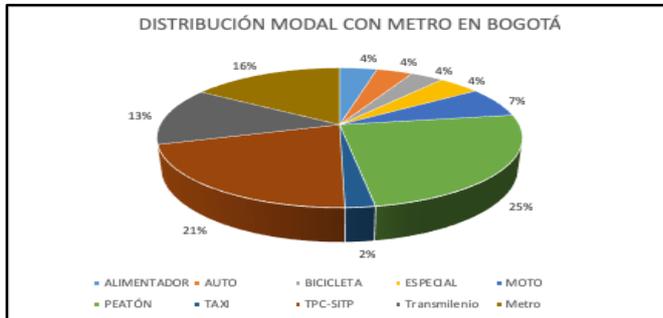


Figura 6. Distribución modal de Bogotá dado un sistema tipo metro - Logit Multinomial

En las gráficas anteriores, se puede evidenciar la probabilidad de uso que tiene cada modo de transporte modelado. Cabe resaltar que lo anterior son valores aproximados, pues se hicieron algunos supuestos considerables que es difícil modelar en temas de transporte y movilidad. Las probabilidades de escogencia de Transmilenio y metro se utilizaron para el análisis de infraestructura que se presenta más adelante. Sin embargo, únicamente se usaron para aquellas estaciones sobrepuestas.

5.2 FASE 2: Proponer nuevas opciones de infraestructura

Se obtiene una visualización de la red actual del sistema Transmilenio en QGIS y se habilita una interfaz en este último para que refleje la información de la malla vial de Bogotá (Figura 7).

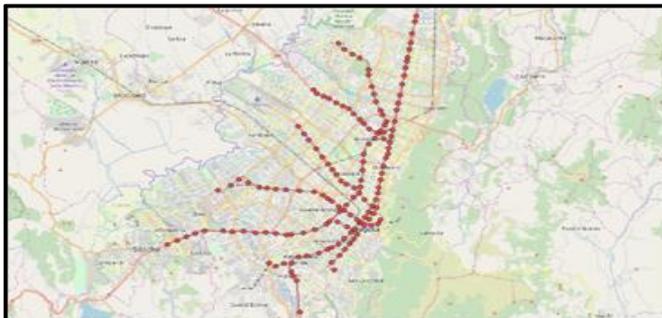


Figura 7. Red actual de Transmilenio, visualización QGIS

También se obtiene una visualización de las redes de metro propuestas con la línea de Transmilenio actual (Figura 8).

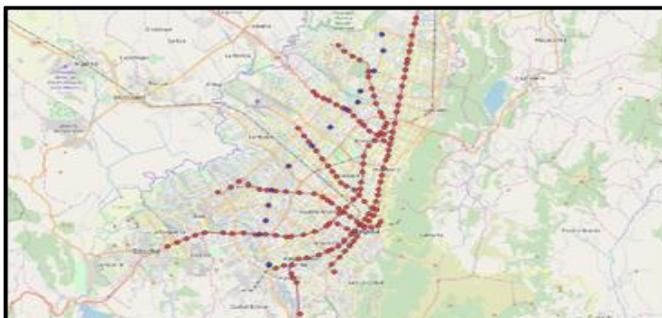


Figura 8. Red actual TM - Red propuestas metro Boyacá, visualización QGIS

Cabe resaltar que los puntos rojos corresponden a las troncales actuales de Transmilenio y los puntos azules corresponden a las estaciones propuestas de metro. Este último, se muestra desde la Avenida Boyacá con calle 170 hasta el Portal Tunal, conectándose con algunas estaciones de Transmilenio para permitirle al usuario alternar los dos modos de transporte, dependiendo del trayecto a realizar.

La visualización de las demás capas vectoriales con los puntos geográficos correspondientes a cada línea de metro propuesta se encuentra en los Anexos del documento.

5.3 FASE 3: Representación de los flujos de demanda - Análisis de opciones de infraestructura

La Figura 9 presenta una visualización inicial de las líneas de metro y Transmilenio en TransCAD y la Figura 10 muestra una ilustración del flujo total de viajes que se generan en las horas pico de la ciudad:

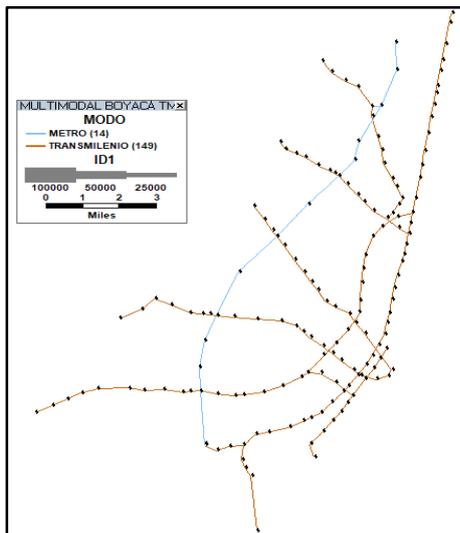


Figura 9. Red actual TM - Red propuesta metro Boyacá, visualización TransCAD

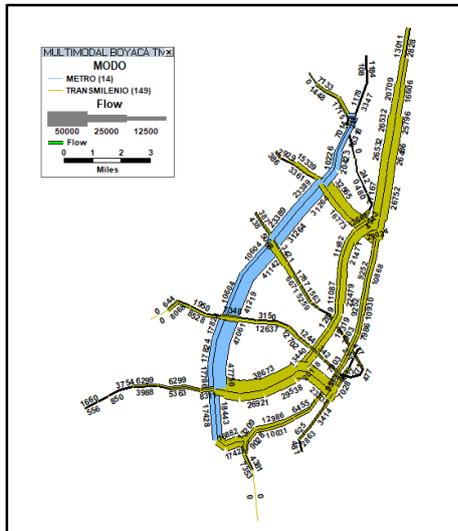


Figura 10. Flujo Total - Boyacá 5 p. m a 6 p. m, visualización en TransCAD⁹

La Figura 11 ilustra el cálculo del tiempo de desplazamiento entre cada par de puntos de la red. Con esto se muestra cuánto se demoraría una persona saliendo de una estación determinada hasta otra. El modelo expresa los cambios de modo que puede hacer un usuario, permitiendo alternar entre las troncales existentes de Transmilenio y las líneas de metro.

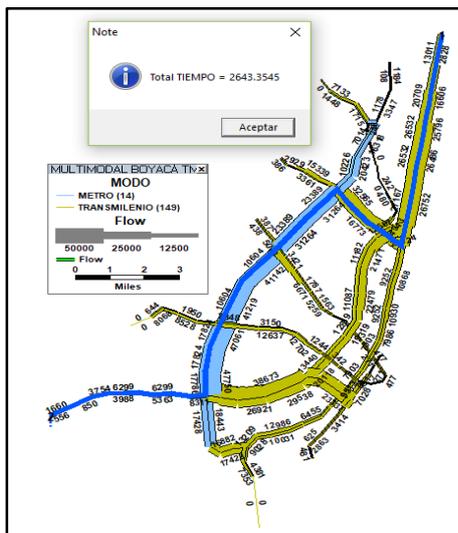


Figura 11. Tiempo Desplazamiento entre dos puntos - Boyacá 5 p. m a 6 p. m, visualización en TransCAD

En esta figura, se evidencia el tiempo de desplazamiento estimado que tendría una persona que vaya desde la estación “Terminal” de la troncal de la Autopista Norte hasta el “Portal Sur”. El tiempo se encuentra en segundos, pero se puede pasar a minutos para una mejor percepción del modelo. Para el presente ejercicio, el tiempo de desplazamiento total que tendría ese usuario sería de aproximadamente 45 minutos. Asimismo, se puede ver el

⁹ La visualización en TransCAD para las demás líneas se presenta en los anexos del presente documento

intercambio modal que existe a lo largo de los corredores para permitirle un desplazamiento más rápido al usuario. A simple vista, se puede observar que el desplazamiento en km puede aumentar tomando esta ruta, sin embargo, el tiempo de desplazamiento es menor al hacer el intercambio modal.

5.4 FASE 4: Análisis de impacto

A continuación, en la Figura 12 se evidencian los resultados de los indicadores de desempeño explicados en el numeral anterior.

5.4.1 Índice de Pasajeros por Kilómetro – IPK:

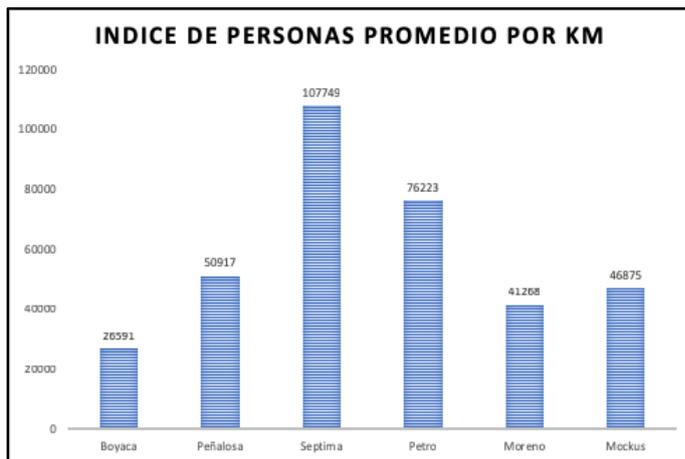


Figura 12. Índice de Pasajeros por Kilómetro – IPK – promedio para las 4 franjas horarias

En la gráfica anterior, se puede evidenciar que la línea con mayor IPK es la línea planteada por la Carrera Séptima. Esto debido a que es una de las líneas más cortas planteadas con aproximadamente 17 km, es por esto que se muestran más personas por km. Por otro lado, se evidencia que la línea planteada de la Avenida Boyacá, es la de menor IPK con 23 km de línea. Con esto, se puede deducir que el comportamiento del IPK es inversamente proporcional a los km abarcados por la línea.

5.4.2 Flujo promedio:

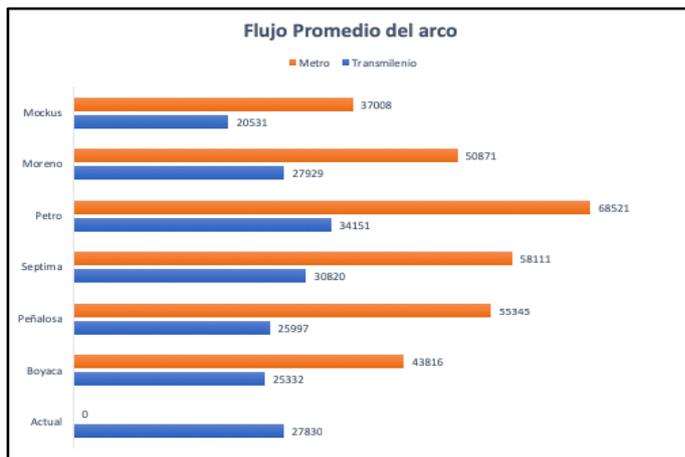


Figura 13. Flujo promedio por arco para cada línea – promedio para las 4 franjas horarias

En la gráfica anterior (Figura 13), se puede evidenciar el comportamiento de las diferentes líneas de metro y Transmilenio. Se puede observar que la línea propuesta por Petro es la que tiene mayor flujo promedio de metro y Transmilenio. Esto puede deberse a la ubicación de la infraestructura de cada línea, sin embargo, la capacidad máxima del modo es de 65.000¹⁰ y el flujo sobrepasa esta capacidad. Por otro lado, se observa que la línea con menor flujo promedio es la propuesta por Mockus, debido a que esta es la línea más larga, contiene mayor cantidad de arcos y por ende se reparte el flujo.

5.4.3 Porcentaje de saturación promedio:

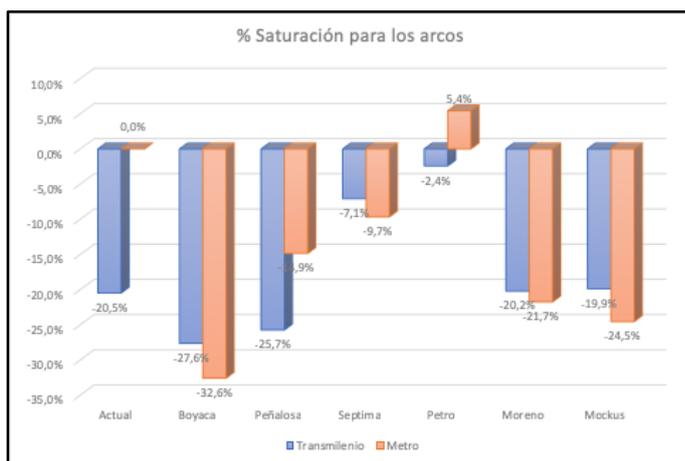


Figura 14. Saturación promedio de cada línea propuesta – promedio para las 4 franjas horarias

En la gráfica anterior (Figura 14), se evidencia el porcentaje de saturación promedio de los arcos de las diferentes líneas planteadas. Se observa que la única línea que sobrepasa la capacidad máxima de los arcos es la línea propuesta por Petro. Como se mencionó en el indicador anterior, esta es la línea con el mayor flujo, lo cual es consistente con el mayor % de saturación. De la misma manera, se observa que la línea de la Boyacá es la de menor porcentaje de saturación proporcional al flujo de la línea.

5.4.4 Cantidad de arcos saturados:

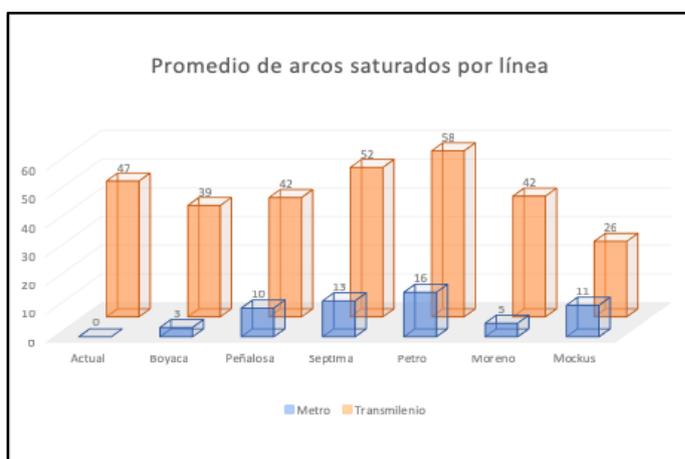


Figura 15. Número de arcos saturados - promedio para las 4 franjas horarias

¹⁰ De acuerdo a los criterios establecidos para el presente Trabajo de Grado y según la literatura existente

En la gráfica anterior (Figura 15), se evidencia la cantidad de arcos saturados, incluso con 1 persona más que la capacidad máxima del arco. Con esto, se observa que al igual que en los dos indicadores anteriores, la línea propuesta por Petro es la que tiene mayor cantidad de arcos saturados tanto para Transmilenio como para metro. Por lo tanto, se puede afirmar que tanto el flujo promedio del arco, como el porcentaje de saturación y la cantidad de arcos saturados son directamente proporcionales.

5.4.5 Porcentaje de descongestión promedio:

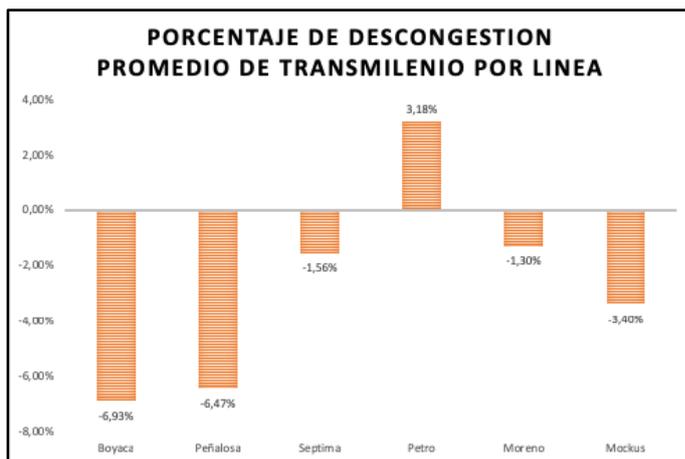


Figura 16. Porcentaje de descongestión promedio para cada línea – promedio para las 4 franjas horarias

En la gráfica anterior (Figura 16), se evidencia el porcentaje de descongestión de la línea del Transmilenio implementando las diferentes líneas de metro. Se puede observar que la línea propuesta por Petro no genera ningún tipo de descongestión. Por otro lado, se observa que la mayor línea que genera una descongestión es la línea de la Avenida Boyacá, esto puede ser gracias a que su ubicación es paralela a la línea más congestionada de Transmilenio en la actualidad que es la Autopista Norte y la Caracas. Con esta línea, se reparten los viajes entre metro y Transmilenio, logrando una descongestión significativa.

5.4.6 Costo total de la línea

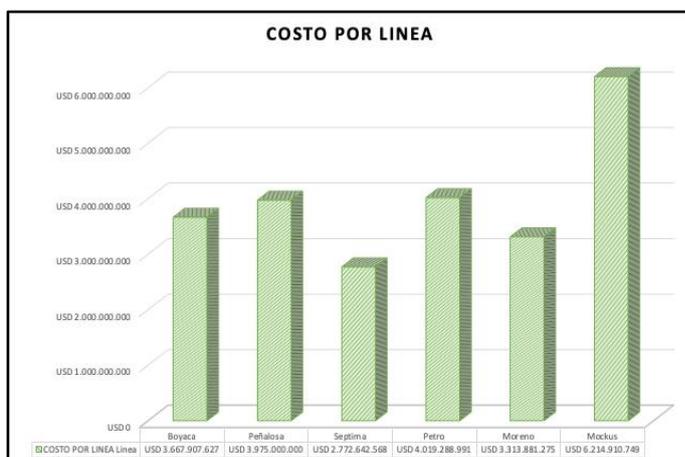


Figura 17. Costo total de cada línea propuesta

En la gráfica anterior (Figura 17), se evidencian los costos de implementación de cada línea. Como se puede observar, la línea de Mockus es la más costosa de implementar debido a los km abarcados. Por la misma razón, la

línea de la Carrera Séptima es la más económica. Como cualquier tipo de costos de implementación, estos son directamente proporcionales a la cantidad implementada.

5.4.7 Utilización de la línea

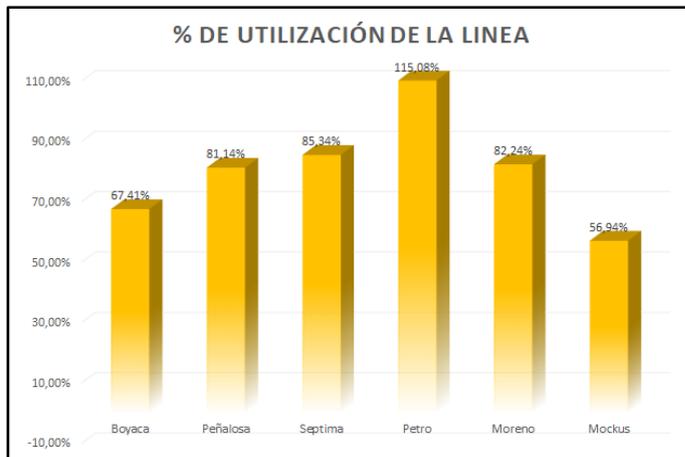


Figura 18. Porcentaje de utilización de cada línea propuesta - promedio para las 4 franjas horarias

En la gráfica anterior, se evidencia el porcentaje de utilización de cada una de las líneas planteadas (Figura 18). Esto se calcula según la utilización de cada uno de los arcos de la línea y su capacidad. Se evidencia que la línea de Petro es la que mayor utilización tiene, esto se debe de la misma manera a la cantidad de flujo que pasaría por la misma, así mismo se evidencia que la línea de Mockus es la que menos utilización tendría.

5.5 Matriz de ponderación – toma de decisiones multicriterio

El resultado de la matriz de ponderación puede verse con detalle en el Anexo 12. Con el resultado de esta matriz se puede concluir que según los criterios estipulados la línea propuesta por la Avenida Boyacá es la que los satisface en mayor medida, obteniendo una puntuación de 0,20. Por el contrario, la línea menos apropiada es la línea planteada por la Alcaldía de Petro, la cual tiene una puntuación de 0,77. Se debe tener presente que los mejores valores son aquellos que se acercan a cero.

Según lo anterior, el análisis de sensibilidad se realiza para la línea propuesta por la Avenida Boyacá.

6.4. Análisis de sensibilidad

Teniendo en cuenta que la propuesta de metro por la avenida Boyacá fue la que generó un menor número de arcos saturados, el impacto sobre las troncales de Transmilenio que se encuentran en funcionamiento actualmente fue mayor para la franja horaria de la mañana, cuyo porcentaje de descongestión fue de 38%. No obstante, para la franja horaria de la tarde también se observó un cambio porcentual significativo de 34% en el flujo de viajes de las troncales de Transmilenio. El porcentaje de descongestión se calculó de la siguiente forma:

$$\text{Porcentaje de descongestión} = \frac{\text{Total de viajes por TM con metro}}{\text{Total de viajes por TM sin metro}} - 1$$

Ecuación 6. Cálculo del porcentaje de descongestión para las troncales de TM

Por otro lado, de acuerdo con las cifras históricas de incremento de la población del DANE proyectadas al 2050 (aproximadamente 1.5% anual), se observa un aumento del número de viajes explicado no solo por el crecimiento poblacional sino también por la expansión urbana a las periferias, las cuales generarán mayor demanda de viajes en la ciudad. En la Figura 19, se muestra el incremento de flujos de viajes en toda la infraestructura vial de Bogotá, lo que afecta en gran medida tanto los corredores viales de Transmilenio como la propuesta de metro en la avenida Boyacá. Dado que la oferta de transporte público permanece constante, se observa que algunas de los arcos de metro estarían saturados al superar las 65 mil personas por hora. De igual forma, el efecto en las troncales de Transmilenio sería proporcional y aproximadamente de un 43% de arcos saturados para el 2050.

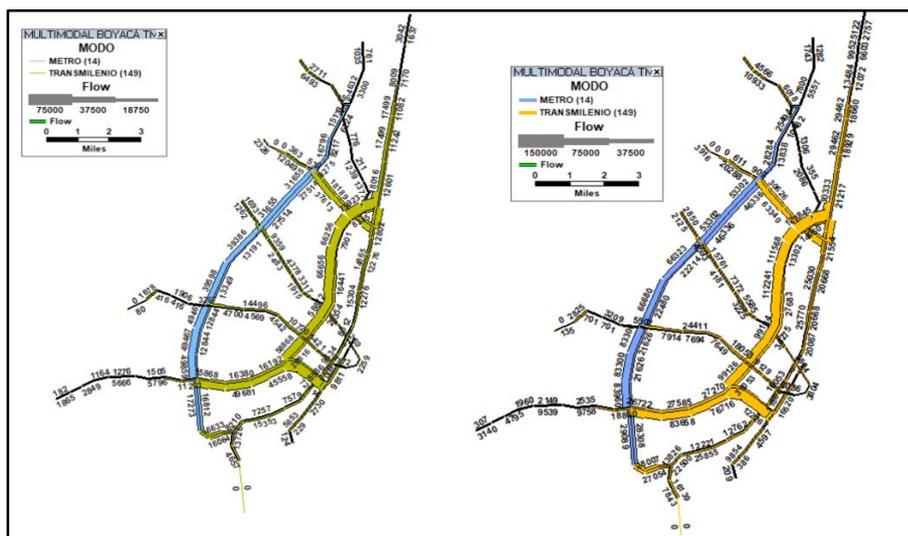


Figura 19. Flujo Total - Boyacá 7 a. m a 8 a. m (actual) vs. Flujo Total - Boyacá 7 a. m a 8 a. m (2050)

Se puede observar que, comparando el año del estudio con el año 2050, habrá una mayor cantidad de arcos saturados. Esto se debe al crecimiento poblacional y el aumento de la demanda de transporte. Como se mencionó anteriormente, los modos de transporte seguirán teniendo la misma capacidad, pero aumentará la población, por lo cual, se sobrepasará la capacidad de las líneas. Por esta razón, es fundamental que se siga invirtiendo en la construcción de diferentes líneas que permitan la descarga del sistema de transporte público actual.

La distribución modal, que se define como la probabilidad de que un individuo utilice algún medio de transporte, evalúa el impacto de aprobación que generaría la línea de metro propuesta tanto a mediano plazo como a largo plazo. De esta forma, se analizaron nuevamente las variables de la regresión (tiempo de espera, tiempo de desplazamiento, costo del pasaje e ingresos de la persona) proyectados para el año 2025 y 2050, teniendo en cuenta el cambio histórico de los precios de la canasta básica de Colombia (índice de precios al consumidor, IPC). Se calcularon las distribuciones modales para los dos periodos de tiempo y en la Figura 20 se observa que el metro y el Transmilenio son los medios con más aceptabilidad en Bogotá.

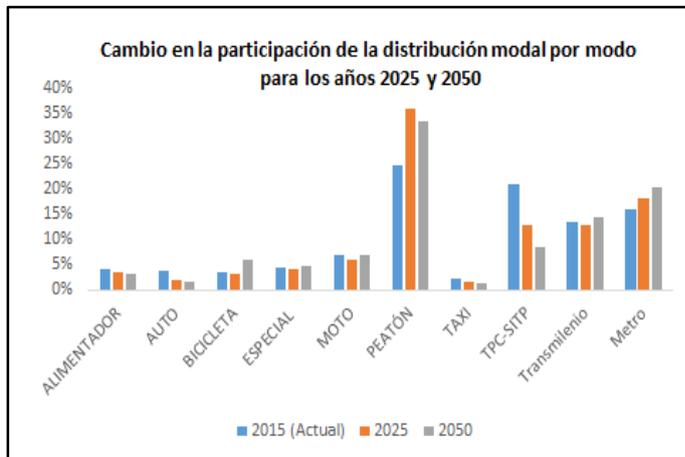


Figura 20. Cambio en la distribución modal para los años 2025 y 2050

El análisis de impacto en términos de descongestión, calculado por medio de la ecuación 4 para cada línea de Transmilenio que actualmente se encuentra en funcionamiento, se representa en las Tablas 8 y 9. Se observa que el número de flujo para las principales troncales se ve reducido de manera significativa para ambos periodos de tiempo (6 a.m. a 7 a.m. y 5 p.m. a 6 p.m.). No obstante, un determinante para la proporción de descongestión es la relación con la distancia entre la línea de Transmilenio actual y la línea de metro por la Avenida Boyacá a implementar.

Tabla 7. Análisis de Impacto por línea de Transmilenio (% descongestión) 6 - 7 am

Análisis de Impacto por línea de Transmilenio (% descongestión) 6 - 7 am			
Troncal	Total Flujo sin Metro	Total Flujo con Metro	% descongestión
NQS Sur	332997	271318	-19%
Américas	857594	462889	-46%
Calle 26	992805	235466	-76%
Av. Suba	274239	223200	-19%
Calle 80	518898	233221	-55%
Carrera 10	1044703	528106	-49%
Av. Caracas	382920	322680	-16%

Tabla 8. Análisis de Impacto por línea de Transmilenio (% descongestión) 5 - 6 pm

Análisis de Impacto por línea de Transmilenio (% descongestión) 5 - 6 pm			
Troncal	Total Flujo sin Metro	Total Flujo con Metro	% descongestión
NQS Sur	226272	191410	-15%
Américas	565381	157302	-72%
Calle 26	908763	202404	-78%
Av. Suba	246841	212781	-14%
Calle 80	444150	268427	-40%
Carrera 10	786039	351278	-55%
Av. Caracas	351159	310499	-12%

6. Conclusiones y recomendaciones

El presente Trabajo de Grado refleja una forma de distribución de viajes que se generan en las horas pico de la ciudad de Bogotá, dada cierta infraestructura de transporte público masivo propuesta. Para efectos del ejercicio



Facultad de Ingeniería
INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo de Grado – Primer Semestre 2019

en cuestión, se escogió un sistema tipo metro, capaz de movilizar una mayor cantidad de personas a una velocidad más alta que un sistema tipo BRT como lo es Transmilenio. Dado lo anterior, se puede concluir lo siguiente:

- De acuerdo con la literatura, los factores de selección de modo que más influyen en la elección modal de las personas son el tiempo para acceder al vehículo, tiempo de espera, tiempo de desplazamiento, el costo y la ocupación promedio de los vehículos.
- El sistema de transporte público actual de Bogotá está colapsado. No es capaz de atender toda la demanda de viajes que se están generando en las horas pico de la ciudad, por lo cual, es relevante estudiar otro tipo de sistemas que puedan ayudar a descongestionar las troncales actuales y que ofrezcan un sistema de calidad.
- Un sistema tipo metro puede lograr descongestionar las troncales actuales de Transmilenio, permitiendo una mayor calidad de vida a los usuarios, medida en una menor cantidad de personas desplazándose por hora por sentido.
- Las matrices de ponderación permiten realizar una toma de decisiones cuando interceden múltiples factores. Por tal razón, se implementó dentro de la metodología con el objetivo de determinar la línea de metro propuesta que mejor cumple los criterios enunciados.
- Dada la matriz de ponderación, el sistema propuesto por la Avenida Boyacá es el que tiene un mayor impacto para la ciudad.
- De acuerdo con lo ilustrado en el análisis de sensibilidad, las ciudades deben continuar expandiendo su red de sistema de transporte público masivo, pues al 2050 la mayoría de los arcos de la red estarán saturados si el sistema permanece constante. Por lo cual, es recomendable realizar una planeación exhaustiva sobre el incremento de los viajes y los corredores que más se verán afectados, con el fin de planear infraestructura para que sea una operación eficiente que permita calidad para los usuarios.
- En temas relacionados con la movilidad y el transporte, los usuarios maximizan sus utilidades reduciendo sus tiempos de desplazamiento y no la distancia total recorrida de un nodo a otro de la red. Por esta razón, la distribución de viajes se realizó teniendo en cuenta el tiempo de desplazamiento de un punto a otro.
- La presente metodología refleja en buena medida el comportamiento real de las personas en Bogotá, así como el flujo actual que está teniendo el sistema de transporte masivo de la ciudad y el impacto que este tendría si existiera un sistema tipo metro.
- Para futuros estudios, podría ser interesante determinar el comportamiento de las personas teniendo en cuenta variables como el tiempo de espera y el tráfico. Asimismo, podría realizarse esta metodología para determinar el comportamiento en Bogotá con la Encuesta de Movilidad 2019 que actualmente está realizando la Secretaría Distrital de Movilidad.

7. Glosario

ZAT: Zona de Análisis de Transporte. Es una zona de referencia que agrupa cierto número de barrios con el objetivo de hacer el estudio menos complejo de modelar.

TM: Transmilenio

TPC: Transporte Público Colectivo

SITP: Sistema Integrado de Transporte Público

TRANSCAD: Software de modelación de demanda de viajes

QGIS: Software de Información Georreferenciada

BRT: Bus Rapid Transit (Buses de Tránsito Rápido)

8. Tabla de Anexos o Apéndices

Tabla 9. Anexos

Número del Anexo	Nombre	Tipo del archivo (programa)	Enlace de ubicación
1	Líneas propuestas en QGIS	PDF (QGIS)	https://drive.google.com/file/d/16uDwyNJB8s8PGbkSnnrGQFNrOTxYefmv/view?usp=sharing
2	Líneas propuestas en TransCAD	PDF (TRANSCAD)	https://drive.google.com/file/d/1-MRWQm6ho-tSm6ELiNS7OJmfwwH7oA6m/view?usp=sharing
3	Flujos por hora por línea	PDF (TRANSCAD)	https://drive.google.com/file/d/1xlTyCBOM3O_F9e5zDiBVVv9bloSDWlws/view?usp=sharing
4	Flujos de personas por hora por línea	PDF (TRANSCAD)	https://drive.google.com/file/d/137ZiUqjWkl-GaFLXdcHU73F48Z-Du9Ma/view?usp=sharing
5	Línea año 2050	PDF (TRANSCAD)	https://drive.google.com/file/d/1qG0rIhB7feOiQZ6SzkUHUP_oe8QIKZ4M/view?usp=sharing
6	Base de datos final	Excel (xlsx)	https://drive.google.com/file/d/131j7ScaqiUEQuwXvyurdibpb-a9he5Zp/view?usp=sharing
7	Modelo Logit	Excel (xlsx)	https://drive.google.com/file/d/1-PdDSXchyEj2XlGnLHNv43GD1_uU7wst/view?usp=sharing
8	Matriz Origen-Destino ZAT por franja horaria	Excel (xlsx)	https://drive.google.com/file/d/1hZqCEqY2I4XmBJ_4qNf-_q24yAatVnfA/view?usp=sharing
9	Flujos de personas por hora por línea (para las 6 líneas)	Excel (xlsx)	https://drive.google.com/file/d/1jY939m4p-ujE3lq7lZ9TJIKYf6l9zBC2/view?usp=sharing
10	Flujos por hora por línea (para las 6 líneas)	PDF (TransCAD)	https://drive.google.com/file/d/1HoYO4FB2UROhePNpdxPGqyikqHz5uNJs/view?usp=sharing
11	Indicadores de desempeño	Excel (xlsx)	https://drive.google.com/file/d/1S6LkhvSwOif4jdcUx_7w6HFkEOPwZEGd/view?usp=sharing

12	Matriz ponderada – toma de decisiones multicriterio (resultado)	Excel (xlsx)	https://drive.google.com/file/d/1M6b8J8EqYksLul9rKE3f-TqoVV1wzlxu/view?usp=sharing
13	Diagrama de flujo – explicación de la metodología	PDF (Bizagi Modeler)	https://drive.google.com/file/d/1zfOatNPfKyfA0tsLT9nAAGq34xOwQkj_/view?usp=sharing

9. Referencias

- Acevedo, A. B., & Cruz, A. R. J. (2009). *Más que un metro para Bogotá: complementar la movilidad*. Bogotá: Universidad del Rosario.
- Alcaldía mayor de Bogotá, & Secretaría Distrital de Movilidad. (2015). Encuesta de Movilidad 2015. *Bogotá D.C.*, 62. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Alcántara Vasconcellos, E. (2010). *Análisis de la movilidad urbana. Espacio, medio ambiente y equidad*. Bogotá, Colombia. <https://doi.org/1f7432010202974>
- Alonso-Neira, M. Á., Gallego-Losada, R., & Pires-Jiménez, L. (2013). La ampliación del Metro en la periferia de Madrid (1999-2011). *EURE (Santiago)*, 39(118), 123-148
- Alzate, J. M., Rave, C. C., Cadena, Á., & Smith, R. A. (2007). Models to Analyze Urban Transportation Development of the Aburrá Valley from Economic, Energetic and Environmental Perspectives. *Revista de Ingeniería*, (25), 114-121.
- World Bank (2002). *Cities on the Move: A World Bank Urban Transport Strategy Review*. Washington D.C.: World Bank. Retrieved from <http://siteresources.worldbank.org/INTURBANTRANSPORT/Resources/chapter7.pdf>
- Beria, P., Maltese, I., & Mariotti, I. (2012). Multicriteria versus Cost Benefit Analysis: A comparative perspective in the assessment of sustainable mobility. *European Transport Research Review*, 4(3), 137–152. <https://doi.org/10.1007/s12544-012-0074-9>
- Bengoechea González, A. (2017). *Viabilidad estructural de tableros de puentes de ferrocarril de doble vía, de hormigón estructural, en forma de "C" tumbada* (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Bocarejo, J. P., Portilla, I., & Pérez, M. A. (2013). Impact of Transmilenio on density, land use, and land value in Bogotá. *Research in Transportation Economics*, 40(1), 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.06.030>
- Bogotá Cómo vamos. (2017). Informe de calidad de vida 2016, 371. Retrieved from <http://www.bogotacomovamos.org/documentos/informe-de-calidad-de-vida-de-bogota-en-2016/>
- Bray, D. (2005). Improving economic evaluation of urban transport projects in Australia. Conferencia presentada en el Australian Transport Research Forum 2005, 1–15. Retrieved from: https://www.atrf.info/papers/2005/2005_Bray_a.pdf
- Carrigan, A., Velasquez, J. M., Raifman, M., & Duduta, N. (2013). *Social, Environmental and Economic Impacts. Bus Rapid Transit Case Studies from Around the World*. Washington D.C.: World Resources Institute.



Facultad de Ingeniería
INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo de Grado – Primer Semestre 2019

- Chaparro, Irma. 2002. “Evaluación del impacto socioeconómico del transporte urbano en la ciudad de Bogotá: el caso del sistema de transporte masivo, Transmilenio.” Recursos Naturales e Infraestructura 48 (October), United Nations Economic Commission for Latin America and the Caribbean, Santiago, Chile. Delling, D., Sanders, P., Schultes, D. & Wagner, D. 2009. Engineering route planning algorithms. Algorithmics of large and complex networks. Springer. In: Lerner J., Wagner D., Zweig K.A. (eds) *Algorithmics of Large and Complex Networks. Lecture Notes in Computer Science*, vol 5515. Berlin, Heidelberg: Springer
- De Dios Ortuzar, J. & Willumsen, L. G. 2011. *Modelling transport*. Hoboken N.J.: John Wiley & Sons.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), *Proyecciones nacionales y departamentales de población 2005-2020*
- Duque Aguirre, C. A. (2015). *Instrumentación para el control de estabilidad y asentamientos como consecuencia del diseño de la estación Marly de la primera línea del metro de Bogotá-PLMB con respecto a las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia*. (Trabajo de grado de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia).
- Hidalgo, D. (2005). Comparación de Alternativas de Transporte Público Masivo–Una Aproximación Conceptual. *Revista de ingeniería*, (21), 92-103.
- Fajardo Hoyos, C. L., & Gómez Sánchez, A. M. (2015). Análisis de la elección modal de transporte público y privado en la ciudad de Popayán. *Territorios* [online], n.33, pp. 157–190.
- Gärling, T., & Schuitema, G. (2007). Travel Demand Management Targeting Reduced Private Car Use: Effectiveness, *Public Acceptability and Political Feasibility*, 63(1).
- Gómez Colmenares, A., Tunjo, L., & Dallam, L. (2014). *Estudios de subsidencia para excavaciones subterráneas en la primera línea del Metro de Bogotá (PLMB) priorizado en el tramo III*. (Trabajo de grado de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia).
- González Álvarez, A. (2008). La difícil inserción de redes de autobuses rápidos en medios urbanos densos: el caso de París. *The Difficult Insertion of Rapid Bussing Networks in a Dense Urban Environment: The Case of Paris*, (156), 313–320.
- Guzmán Ruiz, P. (2018). Identificación de los potenciales impactos urbanos del metro elevado de Bogotá, tramo Avenida Caracas, a partir de experiencias en ciudades con esta infraestructura. (Trabajo de grado de Ingeniería Civil, Universidad de la Salle).
- Hensher, D. A., Golob, T. F. (2008) “Bus rapid transit systems: a comparative assessment”, *Transportation*, 35(4), pp.501-518.
- Hidalgo, D., Pereira, L., Estupiñán, N., & Jiménez, P. L. (2013). Transmilenio BRT system in Bogota, high performance and positive impact - Main results of an ex-post evaluation. *Research in Transportation Economics*, 39(1), 133–138. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.06.005>
- Hidalgo, D., Lleras, G. & Hernández, E. 2013. Methodology for calculating passenger capacity in bus rapid transit systems: Application to the Transmilenio system in Bogotá, Colombia. *Research in Transportation Economics*, 39, 139-142
- Mishra, S., Welch, T. F. & Jha, M. K. 2012. Performance indicators for public transit connectivity in multi-modal transportation networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46, 1066-1085.



Facultad de Ingeniería
INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo de Grado – Primer Semestre 2019

- Molinero, J. y Sánchez, L. (1997). *Transporte público: planeación, diseño, operación y administración*. México D.F.: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Palau, J. J. (2013). Análisis del transporte masivo y la movilidad en Bogotá. *Universidad & Empresa*, 15(24), 15-23.
- Pfütze, T., Rodríguez-Castelán, C., & Valderrama-González, D. (2018). Urban Transport Infrastructure and Household Welfare Evidence from Colombia, (February). Washington: World Bank.
- Redman, L., Friman, M., Gärling, T., Hartig, T. (2013) Quality attributes of public transport that attract car users: A research review. *Transport Policy*, 25, pp.119-127.
- Randall, E. R., Condry, B. J., Trompet, M., Campus, S. K. (2007) International bus system benchmarking: Performance measurement development, challenges, and lessons learned. Conferencia presentada en la *Transport Research Board 86th Annual Meeting*.
- Sepúlveda, L. F. C. (2014). El metro imaginado y la plaza del maestro. *Anekumene*, (8), 47-53.
- Téllez, J. C. (2018). Urban development in Bogotá. Analysis from the relocation program due transport infrastructure. Yasar Bahri Ergen, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.79829.
- Transmilenio S.A. (2016). TRANSMILENIO EN CIFRAS. *Estadísticas de oferta y demanda del Sistema Integrado de Transporte Público - SITP*, (30). Retrieved from <http://www.Transmilenio.gov.co/loader.php?lServicio=Publicaciones&lTipo=WfaccionA&lFuncion=visualizar&id=14098&bd=m>
- Vitins, B., & Axhausen, K. (2009). Optimization of large transport networks using the ant colony heuristic. *Computer - Aided Civil and ...*, 24, 1–14. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00569.x>