

2016

Matriz de accesibilidad en tiempos del sistema BRT Transmilenio para ruta fácil en hora punta

Jonathan Felipe Burgos Herrera
Universidad de La Salle, Bogotá

Dairo Alberto Daza Godoy
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil



Part of the [Civil Engineering Commons](#)

Citación recomendada

Burgos Herrera, J. F., & Daza Godoy, D. A. (2016). Matriz de accesibilidad en tiempos del sistema BRT Transmilenio para ruta fácil en hora punta. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/97

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Civil by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**MATRIZ DE ACCESIBILIDAD EN TIEMPOS DEL SISTEMA BRT
TRANSMILENIO PARA RUTA FÁCIL EN HORA PUNTA.**

JONATHAN FELIPE BURGOS HERRERA

DAIRO ALBERTO DAZA GODOY



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D. C.

2016

**MATRIZ DE ACCESIBILIDAD EN TIEMPOS DEL SISTEMA BRT
TRANSMILENIO PARA RUTA FÁCIL EN HORA PUNTA.**

JONATHAN FELIPE BURGOS HERRERA

DAIRO ALBERTO DAZA GODOY

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Civil**

Director Temático

PhD CARLOS FELIPE URAZAN BONELLS



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D. C.

2016

Dedicatoria, Jonathan Felipe Burgos Herrera

Dedico este logro a mis padres Gerson Burgos y Yanira Herrera por su apoyo incondicional y esfuerzo continuo, por motivarme y formarme como la persona que soy bajo los principios de nuestro hogar; a mi hermano Santiago Burgos quien ha sido compañía y parte fundamental a lo largo de este camino; de igual manera al resto de mi familia y demás personas cercanas a mi vida quienes con sus palabras, actos y consejos me han fortalecido para salir adelante frente a los momentos difíciles. Finalmente, a Dairo Daza quien ha sido un compañero incondicional en esta etapa de mi vida.

Dedicatoria, Dairo Alberto Daza Godoy

Dedico este logro a mis padres, mi hermana y mi gran familia por apoyarme en difíciles momentos, brindarme su cariño y motivarme siempre a luchar por mis ideales, orientándome siempre a vivir plenamente y bajo el calor de los principios y valores humanos. A todos los que en este camino de aprendizaje han sido un apoyo y compañía, quiero agradecer por creer siempre en mí y tener siempre tan buenos deseos para nuestras objetivos profesionales y personales, de manera especial a Jonathan Burgos y Luis Basto por los grandes momentos vividos durante este periodo académico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos:

Al Dr. Carlos Felipe Urazan Bonells, por su paciencia, acompañamiento, asesoría y consejos en todo momento, lo cual nos permitió desarrollar este trabajo de investigación y porque su calidad humana, profesional y experiencia nos guiaron siempre por el camino del conocimiento y la investigación.

Agradecemos a la Universidad De La Salle por habernos aceptado para ser parte de ella y abrirnos las puertas de su seno científico para poder estudiar esta hermosa carrera, así como también a los diferentes docentes que brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante y tener una formación más integral.

Por último, a todas aquellas personas que durante nuestro proceso académico aportaron de una u otra manera en nuestra formación profesional y personal, a nuestros compañeros de pregrado por todos los momentos vividos a lo largo de este camino.

Jonathan Felipe Burgos Herrera

Dairo Alberto Daza Godoy

Contenido

Introducción	10
Descripción Del Problema	11
Objetivos.....	12
Objetivo General	12
Objetivos Específicos.....	12
Marco Referencial.....	13
Antecedentes (Estado del Arte)	13
Marco teórico.....	17
Experiencias con el BRT	18
Bogotá inicio y desarrollo en el BRT	18
Modelos.....	19
Técnicas aplicadas.....	20
Teoría de los grafos.	20
Medidas de distribución espacial.	22
Método del vehículo flotante.....	22
Accesibilidad en el presente proyecto.....	23
Marco conceptual.	23
Metodología	24

Resultados Y Análisis De Resultados.....	28
Conclusiones	51
Recomendaciones Para Futuras Investigaciones.....	55
Bibliografía.....	56
Cibergrafía	57

Lista de figuras

Figura 1. Viajes en el sistema por hora en Transmilenio. (Secretaria Distrital de Movilidad, 2011).....	13
Figura 2. Participacion modal en viajes motorizados. (Secretaria distrital de Movilidad, 2011).....	13
Figura 3. Participacion modal en viajes de transporte publico. (Secretaria Distrital de Movilidad, 2011).....	14
Figura 4. Tiempo de viaje en minutos por estrato. (Secretaria Distrital de movilidad, 2011).....	15
Figura 5. Cantidad de viajes por hora en dia sabado y dia tipico. (Secretaria Distrital de Movilidad, 2011	24
Figura 6. Formato de toma de datos. (Autores)	24
Figura 7. Zoom del formato de la matriz trabajada durante la tercera fase del proyecto. (Autores)	26
Figura 8. Formato de trabajo lleno con datos tomados en campo. (Autores)	27

Figura 9. Mapa de Transmilenio con los ramales determinados para hacer el barrido de toda la red. (Autores).....	28
Figura 10. Zoom de la matriz resultante. (Autores).....	29
Figura 11. Estaciones con baja accesibilidad y sus respectivos tiempos. (Autores).....	30
Figura 12 .Estaciones con accesibilidad media y sus respectivos tiempos. (Autores).....	31
Figura 13. Estaciones con buena accesibilidad y sus respectivos tiempos. (Autores).....	32
Figura 14. Grafico de accesibilidad en barras. (Autores).....	34
Figura 15. Distancia promedio Vs. Accesibilidad en tiempo. (Autores).....	35
Figura 16. Velocidad maxima Vs. Accesibilidad en tiempo. (Autores).....	36
Figura 17. Velocidad media Vs. Accesibilidad en tiempo. (Autores).....	37
Figura 18. Densidad semaforica Vs. Accesibilidad en tiempo. (Autores).....	39
Figura 19. Densidad de baches Vs. Accesibilidad en tiempo.....	40
Figura 20. Semaforos en rojo Vs. Accesibilidad en tiempo. (Autores).....	42
Figura 21. Promedio de semaforos Vs. Accesibilidad en tiempo. (Autores) .	45
Figura 22. Promedio de baches Vs. Accesibilidad en tiempo. (Autores).	46
Figura 23. Distribucion de la estaciones en los diferentes grupos de accesibilidad sobre la red de Transmilenio. (Autores)	48

Figura 24. Distribucion de la estaciones en los diferentes grupos de accesibilidad sobre la red de Transmilenio y a su vez sobre un mapa real de Bogota. (Autores).....	49
Figura 25. Baches a lo largo de la red de Transmilenio. (Google Earth, Autores).....	50
Figura 26. Semáforos en rojo con fila de articulados y biarticulados a lo largo de la red de Transmilenio. (Google Earth, Autores).....	51
Figura 27. Estación Av. Jiménez, la más accesible de la red de Transmilenio. (Google Earth, Autores).....	52
Figura 28. Estación San Mateo, la menos accesible de la red de Transmilenio. Google Earth, Autores).....	52

Lista de Tablas

Tabla 1. Tramos o ramales de la red definidos para hacer el barrido del sistema completo. (Autores).....	28
Tabla 2. Resumen de tramos analizados. (Autores).....	44

Lista de Anexos

- A.** Formatos llenos con los datos tomados en campo viaje 1 (Digital).
- B.** Formatos llenos con los datos tomados en campo viaje 2 (Digital).
- C.** Formatos llenos con los datos tomados en campo viaje 3 (Digital).
- D.** Matriz individual de cada uno de los viajes 1, 2 y 3 (Digital).
- E.** Matriz final y estaciones organizadas de mayor a menor accesibilidad (Digital).
- F.** Matrices de distancias, semáforos y tiempos (Digital).
- G.** Mapas de distribución de las estaciones con sus indicadores de accesibilidad (Digital).
- H.** Matriz final impresa.
- I.** Mapas de distribución de las estaciones con sus indicadores de accesibilidad impresos.

Introducción

La movilidad en las ciudades es un tema de vital importancia para el desarrollo social, económico y cultural de las mismas. La accesibilidad que tengan habitantes y turistas en algún punto define la calidad de vida de los mismos y a su vez es un factor influyente en el desarrollo sostenible de la comunidad. Este tema de movilidad y accesibilidad en Bogotá ha tomado bastante peso en los últimos tiempos ya que los habitantes de la ciudad no se sienten a gusto con los sistemas de transporte; el Transmilenio, un sistema público de transporte en Bogotá que probablemente sea uno de los más utilizados por los ciudadanos ha sido víctima de las malas referencias de los usuarios por diferentes motivos, estos datos sobre la inconformidad de los usuarios y los altos tiempos en los viajes dentro de la ciudad que pueden llegar a ser en promedio hasta de 70 minutos para los estratos más bajos y de 40 minutos para los más altos se ven evidenciados en la encuesta de movilidad del 2011, en esta encuesta también se evidencia que los tiempos y cantidad de viajes son mayores entre semana; este trabajo permitirá realizar un análisis de estos factores que afectan el sistema por medio de una matriz de accesibilidad en términos de tiempos que se realizara en todas las rutas fáciles que brinda el mismo entre todas las estaciones de cada troncal por medio de tiempos medidos en campo por el método de vehículo flotante para obtener la mayor precisión posible. Por otro lado la matriz de accesibilidad del sistema es un trabajo inédito puesto que no se han realizado trabajos de este estilo ni análisis por medio de este método sobre el Transmilenio, por este motivo la realización de este trabajo y la generación de esta matriz permitirán brindar conocimiento a diferentes usuarios y entidades sobre el funcionamiento del mismo.

Descripción Del Problema

La idea de hacer más fácil la comunicación entre diferentes puntos de una ciudad surge de la necesidad, de hacer más eficiente y menos complicado la movilización de las personas desde varios puntos cotidianos o comunes en su vida como lo son su hogar, su lugar de trabajo, el colegio de sus hijos, su universidad, etc. Que obligan a la persona estar en constante movimiento dentro de su ciudad, haciendo que esta sea el espacio idóneo para el movimiento en masa de personas a grandes escalas. Es por esto que la calidad de ejecución de un proyecto de movilidad es tan crucial para el desarrollo. La accesibilidad hoy en día es un tema que se ha venido desarrollando con mayor fuerza gracias a factores como el crecimiento económico, social, cultural y político de una ciudad, ya que una ciudad o comunidad es de vital importancia tener un completo acceso desde cualquier parte de la misma para garantizar un mejor desarrollo de sus habitantes principalmente y posteriormente sus fuentes económicas, culturales, turísticas entre otras. El problema surge cuando la accesibilidad se ve condicionada, es decir cuando esta no es buena y por el contrario es deficiente, en este trabajo el problema básicamente se basa en la accesibilidad en términos de tiempo que según la encuesta de movilidad del 2011 los tiempos de viaje alcanzan en promedio los 70 minutos para los estratos más bajos, el fin último de este trabajo es identificar los puntos menos accesibles para los habitantes de la ciudad en términos de tiempo dentro del sistema BRT Transmilenio, es decir los puntos a los cuales los tiempos de viaje son más elevados. En conclusión el gran problema en el que se enfoca el trabajo es en la accesibilidad en términos de tiempo buscando evaluar los puntos y/o zonas de la ciudad que se ven más afectadas y como estos puntos de difícil acceso por culpa de los elevados tiempos de viaje se ven afectados, tomando como centro del problema el tiempo que debe invertir una persona en la ciudad de Bogotá usando el sistema de Transmilenio para ir de un punto a otro

Objetivos

Objetivo General

Establecer la matriz de accesibilidad por tiempos para las estaciones del sistema BRT (Bus Rapid Transit) Transmilenio empleando ruta fácil en hora punta.

Objetivos Específicos

- Establecer los promedios de desplazamiento entre todas las estaciones de Transmilenio en hora punta y usando ruta fácil.
- Conformar la matriz de accesibilidad empleando los datos anteriores.
- Evaluar la matriz resultante para determinar cuáles son las estaciones más afectadas en términos de accesibilidad por tiempo.
- Realizar un análisis de velocidad promedio y tiempos totales para cada uno de los recorridos empleando trackeo por GPS (Mi ruta).

Marco Referencial

Antecedentes (Estado del Arte)

Los antecedentes sobre este tipo de trabajos son escasos y más en nuestro País puesto que no se han realizado trabajos de este estilo hasta el momento en la ciudad de Bogotá y menos enfatizados el sistema BRT (Bus Rapid Transit) Transmilenio, pero si existen trabajos de temáticas similares que fueron útiles a la hora de desarrollar este proyecto y al analizar los resultados obtenidos. Uno de los más importantes es la encuesta de movilidad en Bogotá, este trabajo sirve de base para entender la problemática en torno a la movilidad que se ha venido presentando en la ciudad y a conocer datos importantes sobre la misma. La encuesta en primer lugar ofrece datos sobre los tiempos promedio de viajes dentro de la ciudad discriminada por estratos sociales siendo los más bajos los más afectados, otro dato importante es el de la hora de inicio de viajes donde se evidencian tres (3) picos siendo el de la mañana y el de la tarde los más elevados, esta distribución horaria de viajes no está determinada únicamente para el Transmilenio si no que esta también para automóvil particular, taxi, buses, bicicleta y a pie lo que permite tener una comparación del sistema con los demás medios de transporte; para el caso puntual de Transmilenio la cantidad de viajes por hora presenta dos picos significativos lo que ayuda a determinar las hora pico del sistema (Figura 1).

Otro dato importante que arroja la encuesta es el de la distribución horaria de los viajes en día sábado y en día típico, como resultado se evidencian unos picos menos pronunciados en los días sábados. Además muestra el porcentaje del modo de viaje dentro de la ciudad, Transmilenio ocupa el 9% de los viajes dentro de todos los medios de transporte, y en los medios de transporte motorizados ocupa el 18% de los viajes (Figura 2), y de los medios de transporte público ocupa casi un 30% de los viajes (Figura 3).

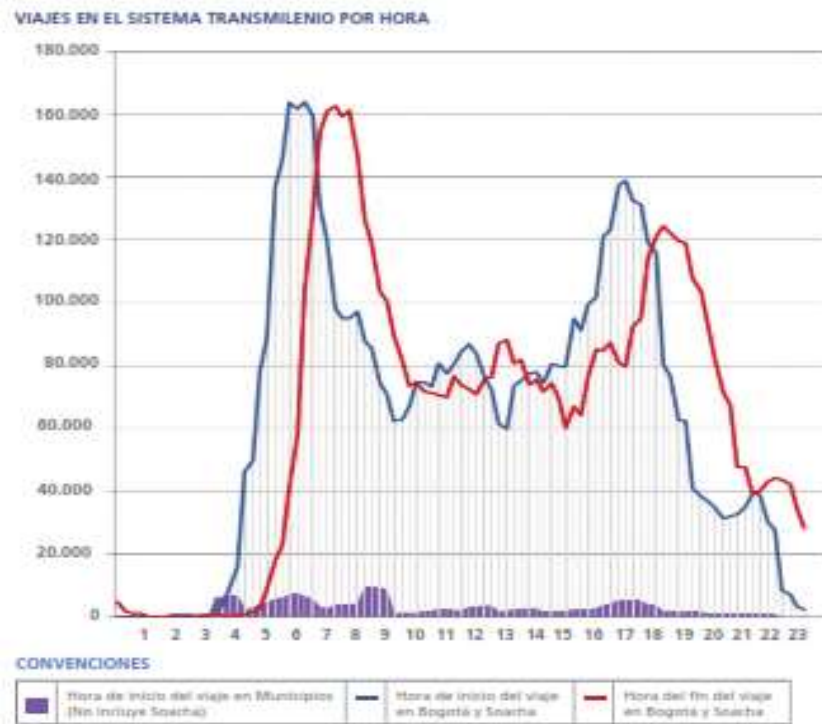


Figura 1. Viajes en el sistema por hora en TM **Fuente.** (Secretaria Distrital de Movilidad, 2011)

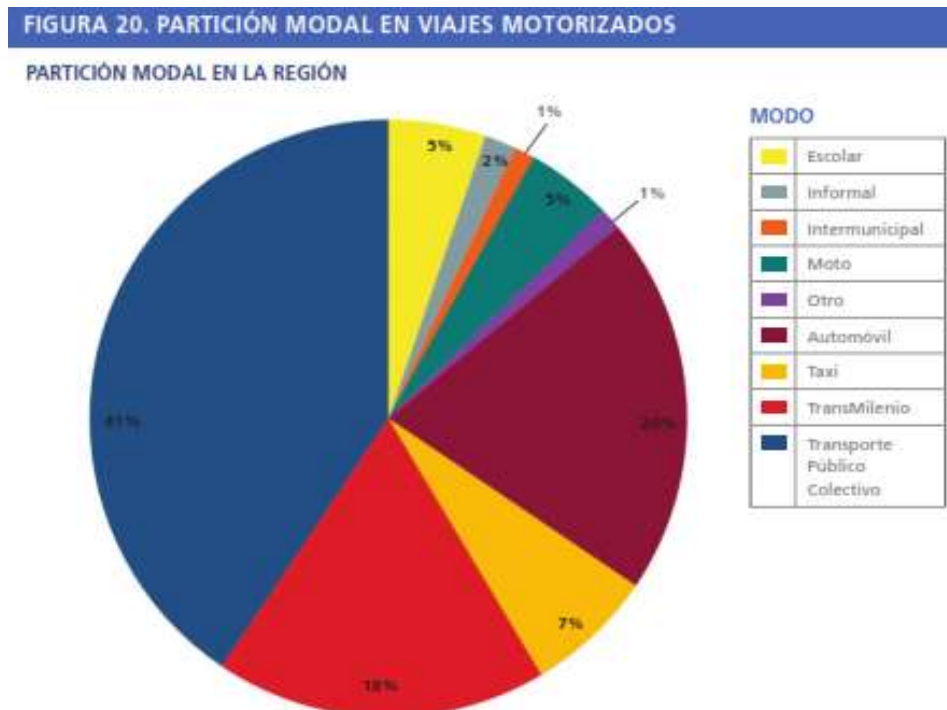


Figura 2. Participación modal en viajes motorizados **Fuente.** (Secretaria Distrital de Movilidad, 2011)

FIGURA 23. PARTICIÓN MODAL EN VIAJES DE TRANSPORTE PÚBLICO

PARTICIÓN MODAL EN LA ZONA DE ESTUDIO

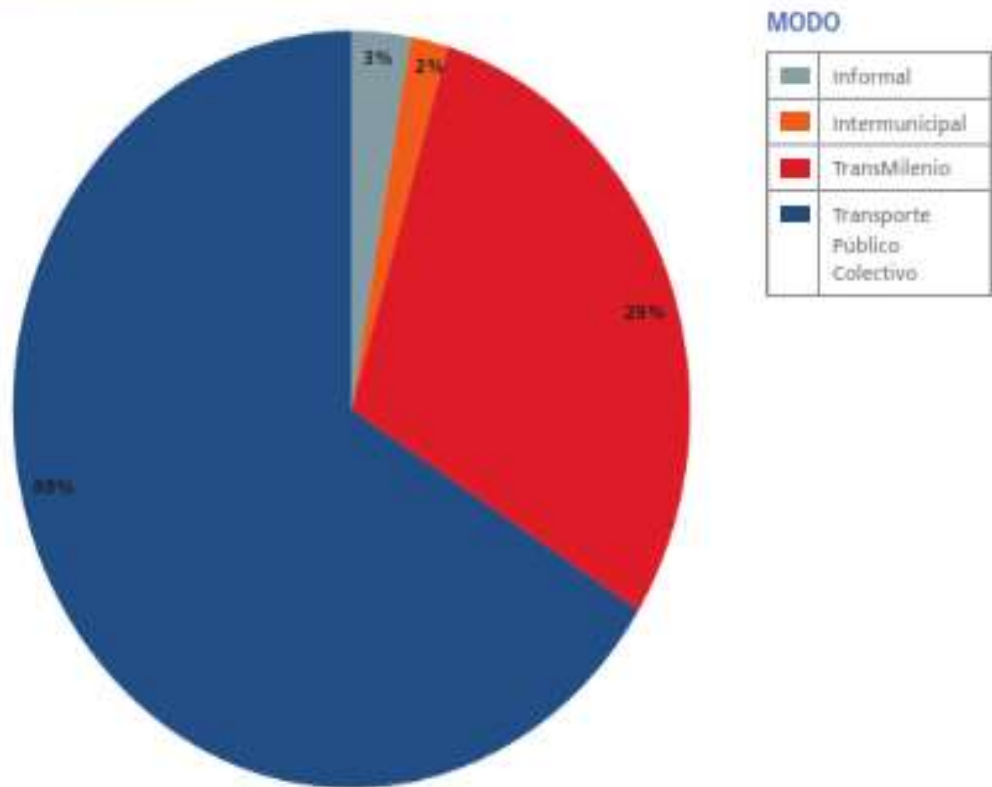


Figura 3. Participación modal en viajes de transporte publico **Fuente.**
(Secretaria Distrital de Movilidad, 2011)

Al tener en cuenta que la temática principal de este proyecto es la accesibilidad basada en tiempos de viaje uno de los datos más importantes es precisamente ese y es un dato que la encuesta brinda diferenciando los tiempos según el estrato del usuario, esta encuesta muestra que los tiempo de viaje son sumamente elevados en la ciudad llegando incluso hasta casi los 80 minutos de viaje. (Figura 4).

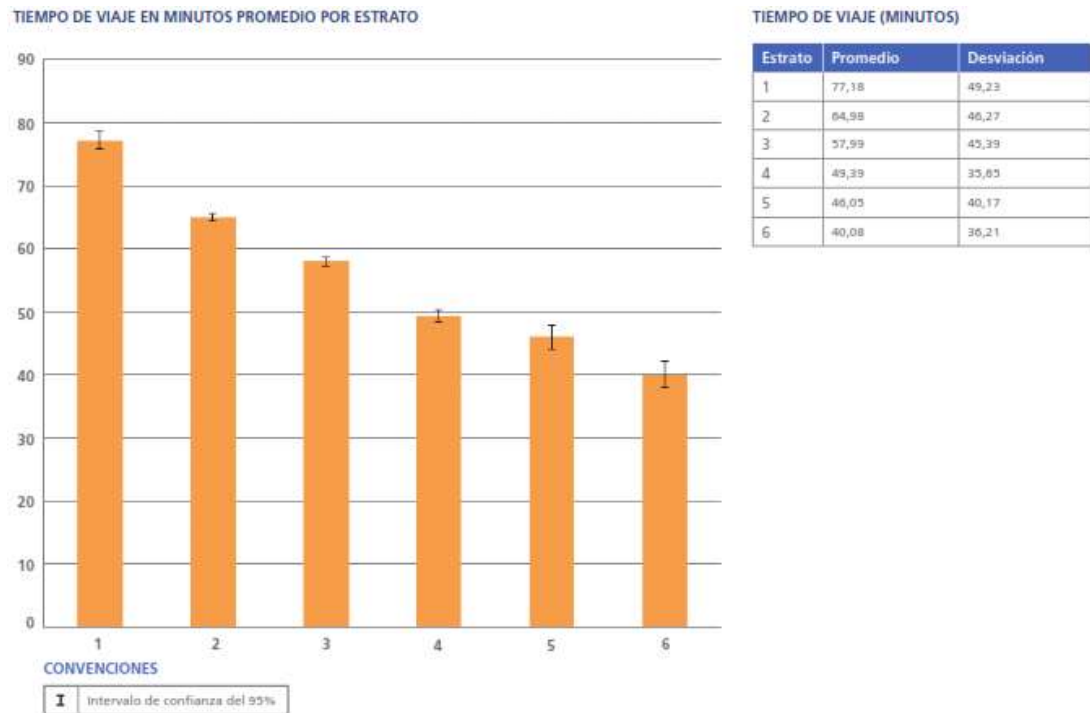


Figura 4. Tiempo de viaje en minutos por estrato **Fuente.** (Secretaría Distrital de Movilidad, 2011)

En cuanto a la parte de accesibilidad existe un trabajo que ha servido de base para el planteamiento de este proyecto, el trabajo fue desarrollado en la región centro sur del departamento de caldas y tenía como finalidad analizar la accesibilidad en esta zona. Es de gran ayuda puesto que la metodología usada en ese trabajo fue la del vehículo flotante (usada también en el presente proyecto), por medio de este método se obtuvieron las velocidades de operación en las vías para las diferentes horas del día. Estos datos permitieron evaluar los caminos que presentaran menores tiempos entre nodos y definir los puntos más accesibles de la zona de estudio. Por otro lado la base de datos de este estudio fue alimentada con información sobre las vías básicamente en términos de calidad de estas. Esto permitió determinar las zonas que presentaran deficiencias en las vías de conexión y determinar posibles razones para las zonas que presentan mejores o peores tiempos de viaje; es decir las zonas más o menos accesibles.

La información de la que se disponía en este trabajo permitió a los investigadores determinar la diferencia de velocidades según el tipo y la calidad de la vía. Al final se determina la velocidad media global de la zona a partir del tiempo promedio de viaje desde un nodo inicial hasta los demás nodos de la red.

Por último el trabajo determino que los tiempos de viaje podían variar por razones como el estado de las vías, la topografía del terreno, la superficie de rodadura entre otros y como caso particular los investigadores generaron unas isócronas sobre la zona de estudio, estas isócronas son básicamente curvas de nivel que determinan el tiempo de viaje promedio dentro de estas curvas, es decir las isócronas representan las zonas que pueden ser alcanzadas en un determinado tiempo de viaje.

Si bien el trabajo realizado en la red de Transmilenio y dicho trabajo realizado en el departamento de Caldas tienen varias diferencias en algunos aspectos, pueden ser comparados en gran parte del mismo puesto que la finalidad de ambos trabajos es la misma, determinar la accesibilidad de una red bajo la misma variable, que en este caso es el tiempo de viaje.

Marco teórico

Para darle inicio al tema de BRT (buses de transporte rápido) es necesario encontrar su origen en el tiempo. La denominación BRT, cobró notoriedad recién a inicios la década pasada, pero el concepto data de muchos años antes. Habitualmente se considera que el primer antecedente de proyecto de BRT, aún sin esa denominación, data de 1937 en Chicago, Estados Unidos, con un plan que apuntaba a sustituir líneas ferroviarias por servicios de buses expresos. Dos años más tarde, en esa misma ciudad, se implementaron por primera vez los carriles exclusivos de buses, y a partir de entonces varias ciudades los implementaron de distintos tipos. Sin embargo, hubo que esperar hasta la década de 1970 para que existan casos que se consideren como embriones de BRT operativos. (Division de Recursos Naturales e Infraestructura , 2012).

Experiencias con el BRT

Fue en Curitiba, Brasil, a principios de los 1970s, que el Sistema de bus rápido se desarrolló por primera vez. La ciudad ha implementado muchas otras medidas, como las zonas sin automóviles y grandes espacios verdes, para convertirse en una de las más exitosas historias urbanas del mundo. Curitiba es uno de los mejores ejemplos de transporte integrado y planificación urbana. Tiene una población de 1.5 millones de habitantes y cerca de 655.000 vehículos a motor. El transporte público es manejado por una compañía pública, URBS y es operado por 10 compañías privadas bajo contratos de concesión.

Sao paulo opera probablemente el sistema más grande de BRT del mundo, en termino de kilómetros cubiertos. Sao Paulo, el centro industrial y financiero más importante de Brasil, tiene 9.9 millones de habitantes y 4.8 millones de vehículos. El transporte público en autobús es manejado por una compañía pública, SPTRANS, y es operado por 53 compañías privadas. El sistema de transporte publico opera con cerca de 12.000 buses, los cuales transportan un promedio de 4.8 millones de pasajeros al día. El sistema une áreas periféricas metropolitanas con el exitoso sistema subterráneo de Sao Paulo. De esta manera, en forma similar a Hong Kong y Singapur donde los servicios de autobús están bien combinados con los sistemas de metro.

Bogotá inicio y desarrollo en el BRT

En 1967 había en Bogotá 2.679 autobuses urbanos que transportaron, en promedio, 1.629.254 pasajeros por día. En esta época, cuando la ciudad era de un poco más de un millón de habitantes y tenía 8.000 hectáreas de extensión, el servicio era relativamente razonable y cómodo. Pero a medida que la ciudad creció y llegó a alcanzar más de cinco millones de habitantes y una extensión superior a 30.000 hectáreas, no sólo aumentó sustancialmente el parque automotor hasta alcanzar más de 20.000 vehículos, sino que se multiplicaron la anarquía, el caos, la ineficiencia, la incomodidad y la contaminación.

Esta crisis es fruto de la simple extensión de la ciudad, el aumento de la población y del parque automotor manteniéndose la infraestructura vial de la época.

El alcalde Enrique Peñalosa (1998-2000) incluyó en su programa de gobierno, como proyecto prioritario, ofrecer a la ciudad una solución al problema del transporte público. Se determinó la construcción de una infraestructura especial destinada de manera específica y exclusiva a su operación, a partir de corredores troncales especializados, dotados de carriles de uso único, estaciones, puentes, ciclorutas y plazoletas de acceso peatonal especial, diseñados para facilitar el uso del sistema a los usuarios. El Concejo de Bogotá aprobó el proyecto para la creación del sistema por medio del acuerdo 04 de 1999, que autorizó al alcalde mayor, en representación de Bogotá D.C., para participar conjuntamente con otras entidades del orden distrital en la constitución de la Empresa de Transporte de Tercer Milenio, TRANSMILENIO S.A., dada el 13 de octubre de 1999 como sociedad por acciones, bajo la forma de sociedad anónima de carácter comercial con aportes públicos. Es así como el 18 de diciembre de 2000, se inauguró la primera ruta que comenzó a operar con 14 buses entre las calles ochenta y sexta por la troncal de la Caracas. Durante este período se entregaron las troncales: Autonorte, Calle 80 y Caracas, y más adelante las tres nuevas troncales de transporte masivo: Américas, NQS y Avenida Suba. Durante la administración del actual Alcalde Gustavo Petro, entraron a operar las troncales de la Avenida Eldorado y la Carrera 10ª.

Actualmente el sistema cuenta con 112.9 Kms de vía en troncal en operación, 11 troncales en operación, 144 estaciones, 9 portales y 9 patio garajes. Moviliza en promedio 1'926.985 pasajeros diarios cubriendo el 30% de la demanda de transporte público de Bogotá.

Modelos.

En los modelos de localización se tropieza generalmente con innumerables inconvenientes provenientes entre otras cosas de los distintos criterios que se

pueden seguir para su determinación. Por otra parte en el modelo suelen entrar en juego no solo parámetros económicos si no otros parámetros menos mensurables como son los provenientes de causas políticas, sociológicas y hasta psicológicas.

Los modelos existentes en la bibliografía sobre localización espacial requieren funciones de demanda de todos los bienes de la zona en investigación, estructuras completas de los sistemas de transporte, el conjunto de las funciones de producción y de utilidad etc., cosas que generalmente no se conocen ni puede aspirarse a conocer. Por todo en los casos en que no se dispone de información suficiente ni de adecuados datos estadísticos se emplean métodos menos sofisticados pero no por ello despreciables pues, si no pueden dar una adecuada explicación del porqué de las estructuras representa en forma satisfactoria la estructura macroscópica en localizaciones existentes cuyo comportamiento medio se conocen.

Técnicas aplicadas.

Teoría de los grafos.

Se basa en una de las ramas de las matemáticas, y tiene como objetivo representar o describir gráficamente una relación cuantitativa propia de un fenómeno cualquiera. Grafo significa un conjunto de puntos unidos entre sí por arcos orientados. Su campo de aplicación es muy amplio: en la física, el transporte, las comunicaciones, economía, etc.

Teoría de Grafos y Sistemas de Información Geográfica.

En el conjunto de actividades económicas de la población, uno de los factores del territorio es la infraestructura ligada al uso del transporte. Las redes de transporte tienen la capacidad de incidir en la forma, la cohesión, los límites, la conexión e interacción (flujos) de un territorio, por lo tanto, el problema de la distribución espacial es aplicable a los desequilibrios en las mismas, que por sus características específicas es posible estudiarlas desde de la Teoría de Grafos y

los Sistemas de Información Geográfica; tal decisión se basa en la fuerte capacidad analítica y de abstracción que conjugan ambos enfoques, con resultados de sencilla interpretación y con posibilidades de aplicación en el ámbito de la planificación y políticas de intervención territorial.

El grafo es un término matemático utilizado para designar a un conjunto de puntos unidos entre sí por segmentos, que pueden representar un proceso o relación funcional de cualquier tipo, pero centra su atención en las relaciones topológicas entre sus elementos. Precisamente fue desarrollada por el matemático Leonhard Euler en el Siglo XVIII como una rama de la Topología Algebraica, e introducida en la Geografía en los años sesenta por W.L. Garrison y F.D. Marble, generalmente para estudiar la expresión de las redes de transporte sobre el espacio geográfico. (zarate & Rubio, 2006).

La Teoría de Grafos permite asociar a redes de transporte o de circulación una estructura sencilla pero abstracta de nodos y arcos conectados, porque sus elementos pueden asociarse fácilmente a objetos geográficos de la vida real. De esta forma los nodos pueden representar ciudades, paradas o estaciones, cruces de carreteras, aeropuertos, puertos, centroides de zona, o lugares de referencia; de manera similar, los arcos que conectan a los anteriores son asimilables a carreteras, líneas de ferrocarril, tendido de cables, trama de calles, canales, cauces fluviales, rutas aéreas o marítimas, etc. a través de los cuales se mueven flujos de personas, mercaderías, información, materia, etc.

La aplicación de la Teoría de Grafos responde principalmente a un análisis descriptivo explicativo, es decir, al estudio morfométrico de las redes para conocer su estructura y desarrollo, donde según Haggett (1976) se pone el acento fundamentalmente en las propiedades topológicas (conectividad, accesibilidad) más que en sus dimensiones reales. Bajo esta perspectiva, consideramos que se trata de un buen mecanismo de abstracción para evidenciar las relaciones funcionales e interacciones entre infraestructuras de transporte, asentamientos y actividades humanas con el territorio sobre el cual se emplazan. (Cardozo, Gomez, & Parras, 2009)

Medidas de distribución espacial.

Se refieren a las medidas estadísticas o matemáticas que sirven para evaluar los datos espaciales. Nos referimos a las medidas de distribución lineal específicamente, debido a que la red de transporte es un conjunto de líneas rectas o de curvas, veremos entonces la accesibilidad de los nodos individuales y las características globales del sistema de carreteras.

El método para medir la accesibilidad de un nodo se basa en la construcción de una matriz de accesibilidad (Matriz simétrica), en donde los nodos se ubicarán en la primera fila y en la primera columna de la matriz. Las cifras internas representan las características de la red, en este caso tiempos de viaje. Finalmente la matriz mostrará un rango clasificatorio cuyo orden determinará la accesibilidad del nodo en los términos especificados.

La accesibilidad es un tema muy importante para el desarrollo socioeconómico de una región, por este motivo analizarla es de suma importancia para conocer el comportamiento y posiblemente las falencias y/o ventajas que esta tiene basados en este dato.

Método del vehículo flotante.

El método se orienta hacia la evaluación de la operación del tránsito y determinar las velocidades y los tiempos de viaje a lo largo de un recorrido determinando las causas en la variación de las velocidades. Consiste en desplazar el vehículo a lo largo del recorrido a una velocidad que represente las condiciones normales de operación. Esta metodología es comúnmente usada en vehículos particulares pero también es aplicable a servicio público en el cual los aforadores (pasajeros) toman los datos necesarios haciendo uso del sistema, mientras el vehículo de servicio público realiza su recorrido en condiciones normales, tal como es el caso en el presente estudio. (Universidad Nacional de Colombia, 2007).

Accesibilidad en el presente proyecto.

La accesibilidad podemos definirla como “una medida de la facilidad de comunicación que una red ofrece mediante el uso de un determinado medio de transporte” (Escobar, Garcia, & Tolosa, 2011), Esta facilidad de comunicación previamente mencionada puede evaluarse bajo diferentes parámetros o variables, como costos; o en este caso teniendo en cuenta el tiempo usado para realizar los recorridos; es decir que la accesibilidad por lo menos para efectos de este trabajo será evaluada en términos de tiempo. El aumento o disminución de los tiempos de viaje pueden hacer más o menos accesible un punto (estación de la red de Transmilenio) e inclusive una zona de una región, ciudad o país.

Marco conceptual.

Accesibilidad: “medida de la facilidad de comunicación que una red ofrece mediante el uso de un determinado medio de transporte” (Escobar, Garcia, & Tolosa, 2011), en el caso de este proyecto la variable que se usara para medir la accesibilidad del sistema y sus estaciones serán los tiempos de viaje entre estaciones del sistema BRT Transmilenio.

Sistema BRT: La CEPAL define al sistema BRT (Bus Rapid Transit) como un modo de transporte automotor que utiliza buses operando en carriles con derecho de paso exclusivo, con el objetivo de aumentar la velocidad comercial, mejorar la confiabilidad de los tiempos de operación y el confort del pasajero. La CEPAL también identifica ciertas características de los sistemas BRT alrededor del mundo como el pago antes del abordaje, la incursión en tecnologías que maximicen la eficiencia del sistema para disminuir la resistencia del pasajero a usarlo, el uso de carriles exclusivos no necesariamente debe ser durante todo el recorrido, los carriles exclusivos permiten la movilización de vehículos de emergencia y por ultimo estos buses deben tener la publicidad suficiente que los diferencia de los demás sistemas de transporte. Luego de escuchar estas características podemos observar el Transmilenio, el medio de

transporte de objetivo del estudio cumple con estas características lo que le permite entrar en el grupo de sistemas BRT.

Ruta fácil: Las rutas fáciles dentro del sistema BRT son aquellas que dentro de su recorrido que van de un portal a otro portal no se saltan ninguna parada, es decir paran en todas las estaciones presentes durante su recorrido.

Matriz de accesibilidad: La matriz de accesibilidad como su nombre lo indica es una matriz que nos ayuda a identificar los puntos de mejor o peor accesibilidad dentro del sistema, esta matriz está dada en términos de tiempo contrarrestando el tiempo de viaje que hay desde todas las estaciones hacia todas las estaciones del sistema.

Metodología

ETAPA 1: DEFINICIÓN DE RUTAS, DIAS, HORARIOS Y FORMATOS PARA EJECUCIÓN DEL PROYECTO

En esta primera fase del proyecto se definió en primer lugar los días y los horarios para realizar las tomas de datos, es decir la programación de los recorridos, en este caso se tomaron datos en diferentes semanas en hora punta que para este trabajo se definió de 5:00PM a 8:00PM (Figura 1), los días en los que se realizó la toma de datos fue de lunes a jueves, dejando por fuera los días restantes (viernes, sábado y domingo), ya que presentan valores atípicos, esto se puede evidenciar en la encuesta de movilidad del año 2011 en la cual se analizaron los viajes entre semana y los días sábados por separado y se obtuvieron en los resultados que los días sábado no muestran picos tan altos como los demás (Figura 5). Las rutas a usadas en el desarrollo de este trabajo fueron las llamadas "ruta fácil". El último paso durante esta primera fase del proyecto fue la de la creación de los formatos donde se tomaron los datos recogidos en campo (Figura 6).

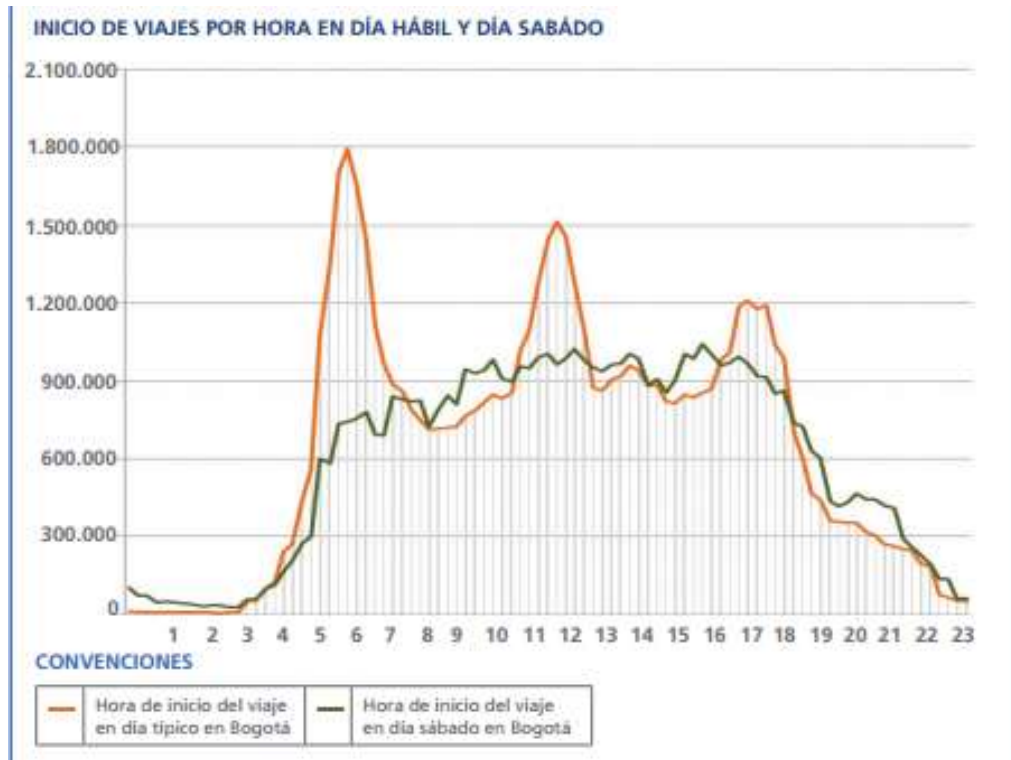


Figura 5. Cantidad de viajes por hora en día sábado y día típico **Fuente.** (Secretaria Distrital de Movilidad, 2011)

Fecha:		Hora salida:				Hora llegada:		
Descripcion del recorrido								
Estacion	Ruta	Tiempo al abrir las puertas	Tiempo al cerrar las puertas	Observaciones	N° semaforos	N° semaforos en rojo	N° baches	

Figura 6. Formato de toma de datos **Fuente.** Autores

ETAPA 2: TOMA DE DATOS

La fase de la toma de datos consistió en la realización del trabajo de campo, este se basó en: por medio del método de vehículo flotante tomar los tiempos de recorrido en el sistema, estos tiempos de recorrido fueron tomados desde todas las estaciones hasta todas las estaciones del sistema teniendo en cuenta los tramos seleccionados para hacer el barrido del sistema, únicamente de lunes a jueves entre 5:00PM y 8:00PM, y fueron tomados tres veces para poder realizar un promedio del tiempo de recorrido y así aumentar la precisión de los datos. La cantidad de recorridos realizados fue de 78 para poder realizar un barrido total de todo el sistema haciéndolos 3 veces, en ambas direcciones. Para tener todos los datos requeridos para la realización del proyecto, previendo que se realizaran 2 aforos diarios se tendrían 8 aforos semanales y 32 mensuales, llegando así a un tiempo de trabajo en campo de 2 meses y medio. Los formatos para la toma de datos además de tener las casillas pertinentes para anotar los tiempos de recorridos, como se observa en la figura 6 tienen una casilla de observaciones en las cuales se anotaron las evidencias necesarias que han podido ser detectadas por el aforador y que se tuvieron en cuenta para el análisis de los resultados. También se tuvo en cuenta los semáforos entre estaciones, los semáforos en rojo, los huecos encontrados por el bus y los sucesos atípicos como estrelladas. Los tiempos entre estaciones se tomaron iniciando el conteo en el momento en el que el Transmilenio cierra sus puertas hasta el momento en el cual las abre en la siguiente estación, ahí se toma el primer dato (Tiempo al abrir las puertas), el cronometro sigue corriendo con el fin de tener en cuenta los tiempos de abordaje, posteriormente cuando el Transmilenio cierra sus puertas se toma nuevamente otro dato (Tiempo al cerrar las puertas) y así sucesivamente durante todo el recorrido, esto nos permite tener los tiempos de viaje de todas las estaciones contra todas las estaciones teniendo en cuenta los tiempos de abordaje.

ETAPA 3: CREACIÓN Y ANALISIS DE LA MATRIZ

Esta fue la última fase del proyecto y tuvo como finalidad la elaboración de la matriz de accesibilidad por tiempos y el análisis de la misma, la matriz fue montada con los datos obtenidos en la fase anterior contrastando todas las estaciones del sistema contra todas las estaciones del sistema. La matriz ya montada brinda la información necesaria para poder definir las estaciones más afectadas en términos de accesibilidad por tiempo de viaje tanto negativa como positivamente, además de analizar los puntos más críticos se analizaron también las zonas que presentaron mejores o peores tiempos de accesibilidad y definir el porqué de los resultados obtenidos durante la realización del proyecto. En la figura 7 se muestra una imagen en zoom del formato de la matriz y de los tiempos presentes en ella, la primer columna contiene las estaciones de partida y la primer fila las estaciones de llegada.

	21 Ángeles	Alcala	Alqueria	Americas Cra 53	Av 1° de Mayo
21 Ángeles	0:00:00	0:51:07	1:04:49	1:35:45	1:34:53
Alcala	1:05:24	0:00:00	1:06:59	1:14:56	1:34:07
Alqueria	1:11:18	1:00:20	0:00:00	0:36:45	1:11:20
Americas Cra 53	1:33:23	0:58:06	0:37:07	0:00:00	0:56:50
Av 1° de Mayo	1:31:17	1:16:27	1:10:59	0:56:09	0:00:00
Av 39	0:50:50	0:27:23	0:57:32	0:42:42	1:01:53
Av. Chile	0:41:23	0:19:42	0:29:54	0:34:25	1:09:00
Av. El Dorado	0:49:29	0:27:34	0:20:53	0:25:24	0:59:59
Av. Jiménez	1:00:59	0:37:32	0:32:04	0:17:14	0:27:24
Av. Rojas	1:24:10	1:00:43	1:14:23	0:59:32	1:19:17
Avenida 68	0:42:36	0:34:37	0:48:19	1:19:15	1:27:24
Avenida Cali	0:49:46	0:41:47	0:55:29	1:26:25	1:34:34
Banderas	1:41:15	1:06:46	0:45:47	0:08:16	1:05:30
Biblioteca	1:40:04	1:17:42	1:10:47	0:55:57	0:52:34

Figura 7. Zoom del formato de la matriz trabajada durante la tercera fase del proyecto **Fuente.** Autores

Finalmente se realizaron unos trackeos por GPS usando el programa para Android *Mi Ruta* Con el fin de determinar distancias y velocidades en diferentes tramos de toda la red, posteriormente por medio de google earth se determinaron las distancias entre las diferentes estaciones. Los trackeos realizados brindan datos de velocidad máxima, velocidad media y distancia del recorrido y están subidos en una base de datos del programa.

Resultados Y Análisis De Resultados

Durante la tesis se realizaron aforos de diferentes troncales o tramos del sistema donde se anotaron los diferentes tiempos de viaje para dichos tramos, la red se dividió en diferentes ramales con el fin de superponer los datos de las diferentes troncales y hacer un barrido más rápido y preciso de toda la red. A continuación se mostrara un ejemplo de un formato con los datos tomados en campo.

Viaje 1							
Estacion de salida: Universidades			Estacion de llegada: Portal Dorado				
Fecha:	Hora salida:				Hora llegada:		
Descripcion del recorrido							
Estacion	Ruta	Tiempo al abrir las puertas	Tiempo al cerrar las puertas	Observaciones	Nº semaforos	Nº semaforos en rojo	Nº baches
Centro Memoria	K6	0:03:06	0:03:12				
Plaza de la Democracia	K6	0:04:17	0:04:28				
Ciudad Universitaria	K6	0:06:47	0:07:00		1		
Corferias	K6	0:08:54	0:09:06		1		
Quinta Paredes	K6	0:10:01	0:10:17	Demora en cerrar puertas			
Gobernacion	K6	0:11:21	0:11:31				
CAN	K6	0:12:22	0:12:33				
Salitre Greco	K6	0:13:40	0:13:52	Carrilera del tren para el TM			
El tiempo - Maloka	K6	0:14:58	0:15:08				
Av. Rojas	K6	0:16:10	0:16:22				
Normandia	K6	0:17:49	0:18:08				
Modelia	K6	0:19:28	0:19:37				
Portal Dorado	K6	0:21:23					

Figura 8. Formato de trabajo lleno con datos tomados en campo **Fuente.** Autores

También se mostraran los ramales en los cuales se dividió la red para realizar el trabajo.



Figura 9. Mapa de Transmilenio con los ramales determinados para hacer el barrido de toda la red **Fuente.** Autores

La siguiente tabla mostrara a que ramal equivale cada color

COLOR	TRAMO DEL SISTEMA
Rojo	Terminal – Portal Américas
Morado	Portal 80 – Calle 76
Café	Héroes – Portal Sur – San Mateo
Amarillo	Portal Suba – Escuela Militar
Beige	Universidades – Portal Dorado
Verde	Av. Jiménez – Portal Tunal
Lila	Santa Lucia – Portal Usme
Rosado	Av. Jiménez – Las Aguas
Azul	Portal 20 de Julio – Museo Nacional

Tabla 1. Tramos o ramales de la red definidos para hacer el barrido del sistema completo **Fuente.** Autores

Los primeros resultados obtenidos fueron las primeras tres (3) matrices una por cada viaje, de las cuales a través de un promedio se obtenía la matriz final o matriz promedio de la cual se muestra un zoom a continuación.

	21 Ángeles	Alcala	Alqueria	Americas Cra 53	Av 1° de Mayo	Av 39
21 Ángeles	0:00:00	0:55:17	1:05:36	1:25:14	1:25:14	0:41:41
Alcala	1:02:06	0:00:00	1:10:11	1:13:41	1:33:51	0:32:18
Alqueria	1:09:32	1:01:11	0:00:00	0:36:51	1:12:44	0:44:57
Americas Cra 53	1:27:42	0:56:44	0:36:39	0:00:00	0:57:34	0:29:46
Av 1° de Mayo	1:14:43	1:15:15	1:10:41	0:55:52	0:00:00	0:48:17
Av 39	0:46:05	0:26:51	0:56:01	0:41:12	1:01:22	0:00:00
Av. Chile	0:39:13	0:20:44	0:30:53	0:35:47	1:11:41	0:36:13
Av. El Dorado	0:47:32	0:28:14	0:21:28	0:26:23	1:02:16	0:34:29
Av. Jiménez	0:55:56	0:36:43	0:32:09	0:17:20	0:28:23	0:09:45
Av. Rojas	1:17:08	0:57:55	1:11:20	0:56:31	1:17:09	0:30:57
Avenida 68	0:41:03	0:35:28	0:49:06	1:17:53	1:27:02	0:25:29
Avenida Cali	0:49:23	0:43:48	0:57:25	1:26:13	1:35:21	0:33:48
Banderas	1:34:11	1:03:55	0:43:51	0:07:00	1:04:45	0:36:58
Biblioteca	1:34:09	1:15:57	1:09:57	0:55:08	0:52:41	0:37:58
Biblioteca Tintal	1:39:06	1:08:50	0:48:45	0:11:54	1:09:40	0:41:52
Bicentenario	1:23:15	1:04:02	0:59:28	0:44:39	0:08:14	0:37:04
Boyacá	0:44:15	0:38:40	0:52:17	1:21:05	1:30:13	0:28:40
C.C Santafe	1:13:51	0:12:13	1:11:42	1:26:09	1:46:19	0:44:46
CAD	0:49:26	0:30:09	0:19:11	0:24:05	0:59:59	0:32:11
Calle 40 Sur	1:15:44	1:07:32	1:01:31	0:46:43	0:44:15	0:29:32
Campin	0:44:21	0:25:04	0:25:52	0:30:46	1:06:40	0:38:52
CAN	1:13:38	0:54:25	1:07:50	0:53:01	1:13:39	0:27:27
Cardio Infantil	1:07:41	0:06:03	1:05:33	1:19:59	1:40:10	0:38:36
Carrera 43	1:21:33	0:51:18	0:31:13	0:05:00	0:52:08	0:24:20
Carrera 47	0:38:27	0:32:52	0:46:30	1:15:17	1:24:26	0:22:53
Carrera 53	0:39:49	0:34:14	0:47:51	1:16:39	1:25:47	0:24:14
Carrera 90	0:50:59	0:45:23	0:59:01	1:27:48	1:36:57	0:35:24
CDS Cra 32	1:17:36	0:47:21	0:27:16	0:08:58	0:48:11	0:20:23
Centro Memoria	1:00:49	0:41:35	0:55:00	0:40:11	1:00:49	0:14:37
Ciudad Jardin	1:32:56	1:13:42	1:09:09	0:54:20	0:01:16	0:46:44
Ciudad Universitaria	1:08:11	0:48:57	1:02:22	0:47:33	1:08:11	0:21:59
CII 100	0:50:55	0:07:19	0:48:46	1:03:12	1:23:23	0:21:50

Figura 10. Zoom de la matriz resultante **Fuente.** Autores

Finalmente con la obtención de la matriz resultante se puede obtener el tiempo promedio para llegar a cualquier estación de cualquier estación del sistema, las cuales ordenadas de mayor a menos quedan de la siguiente manera.

Estaciones	Tiempo
San Mateo	✗ 1:22:42
Terreros	✗ 1:19:04
Leon XIII	✗ 1:16:56
La Despensa	✗ 1:14:30
Portal Usme	✗ 1:14:20
Portal Americas	✗ 1:12:40
Portal 20 de Julio	✗ 1:11:40
Museo Nacional	✗ 1:11:40
Portal Suba	✗ 1:08:57
Country Sur	✗ 1:08:10
San Diego	✗ 1:08:00
Portal del Tunal	✗ 1:07:09
La Campiña	✗ 1:07:08
Patio Bonito	✗ 1:06:37
Molinos	✗ 1:05:44
Av 1° de Mayo	✗ 1:05:08
Terminal	✗ 1:04:58
Suba / Transversal 91	✗ 1:04:54
Consuelo	✗ 1:04:24
Las Nives	✗ 1:04:09
Parque	✗ 1:03:44
Ciudad Jardin	✗ 1:03:37
C.C Santafe	✗ 1:03:26
21 Ángeles	✗ 1:02:45
Socorro	✗ 1:02:44
Portal Norte	✗ 1:02:41
Biblioteca	✗ 1:02:31
Biblioteca Tintal	✗ 1:02:22
Policarpa	✗ 1:01:29
Portal Dorado	✗ 1:01:02
Portal 80	✗ 1:00:46

Figura 11. Estaciones con baja accesibilidad y sus respectivos tiempos

Fuente. Autores

Gratamira	🕒 1:00:25
San Victorino	🕒 1:00:17
Hospitales	🕒 0:59:26
Suba / Avenida Boyaca	🕒 0:58:57
Portal Sur	🕒 0:58:48
Modelia	🕒 0:58:04
Transversal 86	🕒 0:58:04
Toberin	🕒 0:57:38
Quirigua	🕒 0:57:05
Niza / Calle127	🕒 0:57:01
Normandia	🕒 0:56:38
Banderas	🕒 0:56:32
Cardio Infantil	🕒 0:56:16
Perdomo	🕒 0:56:05
Santa Lucia	🕒 0:56:01
Carrera 90	🕒 0:55:27
Av. Rojas	🕒 0:55:15
Mandalay	🕒 0:55:12
Mazuren	🕒 0:55:10
Humedal Córdoba	🕒 0:55:06
Madelena	🕒 0:54:16
El tiempo - Maloka	🕒 0:54:09
Bicentenario	🕒 0:54:09
Avenida Cali	🕒 0:54:07
Mundo Aventura	🕒 0:53:48
CII 146	🕒 0:53:45
Salitre Greco	🕒 0:53:03
Granja / Carrera 77	🕒 0:52:53
Shaio	🕒 0:52:42
Marsella	🕒 0:52:40
CII 142	🕒 0:52:23
Sevillana	🕒 0:52:07
CAN	🕒 0:51:58
Alcala	🕒 0:51:06
Calle 40 Sur	🕒 0:51:05
Gobernacion	🕒 0:51:03
Pradera	🕒 0:50:52
Venecia	🕒 0:50:50
Puentelargo	🕒 0:50:47
Minuto de Dios	🕒 0:50:36
Quinta Paredes	🕒 0:49:56
Prado	🕒 0:49:33
Quiroga	🕒 0:49:30
Alqueria	🕒 0:49:28
Boyacá	🕒 0:49:13
Suba / Calle 100	🕒 0:49:05
Corferias	🕒 0:49:00
Americas Cra 53	🕒 0:48:59
General Santander	🕒 0:48:45
CII 127	🕒 0:48:06
Ferías	🕒 0:48:04
Olaya	🕒 0:47:54
La Castellana	🕒 0:47:47
Universidades	🕒 0:47:29
Ciudad Universitaria	🕒 0:47:17
Suba / Calle 95	🕒 0:46:54
Avenida 68	🕒 0:46:47
NQS - Calle 38 A sur	🕒 0:46:45
Puente Aranda	🕒 0:46:35
Pepe Sierra	🕒 0:46:18
Las Aguas	🕒 0:46:12
Plaza de la Democracia	🕒 0:45:58
Rionegro	🕒 0:45:39
Restrepo	🕒 0:45:24
Carrera 53	🕒 0:45:13
NQS - Calle 30 sur	🕒 0:45:07
CII 106	🕒 0:44:56
Carrera 43	🕒 0:44:40
San Martin	🕒 0:44:13
Carrera 47	🕒 0:44:01
Fucha	🕒 0:43:59
Museo del Oro	🕒 0:43:27
CII 100	🕒 0:43:18
Zona Industrial	🕒 0:43:14
Sena	🕒 0:42:34
Nariño	🕒 0:42:16
Virrey	🕒 0:42:11
CDS Cra 32	🕒 0:41:24
Hospital	🕒 0:41:17
CII 85	🕒 0:40:58
Hortua	🕒 0:40:54
Tercer Milenio	🕒 0:40:43
Centro Memoria	🕒 0:40:33

Figura 12. Estaciones con accesibilidad media y sus respectivos tiempos

Fuente. Autores

Santa Isabel	✓	0:40:05
Heroes	✓	0:39:12
San Facon	✓	0:39:11
NQS / Calle 75	✓	0:39:00
Escuela Militar	✓	0:38:58
Av. Chile	✓	0:38:44
Comuneros	✓	0:38:43
CII 76	✓	0:38:40
Polo	✓	0:38:27
Simón Bolívar	✓	0:38:23
CII 72	✓	0:38:13
Coliseo	✓	0:38:03
Campin	✓	0:37:55
Flores	✓	0:37:49
De La Sabana	✓	0:37:48
CII 63	✓	0:37:21
Universidad Nacional	✓	0:37:11
Av. El Dorado	✓	0:37:03
CII 57	✓	0:36:56
CAD	✓	0:36:38
Marly	✓	0:36:29
Paloquemao	✓	0:36:17
CII 45	✓	0:36:12
Av 39	✓	0:35:40
Profamilia	✓	0:35:16
CII 26	✓	0:34:39
CII 19	✓	0:33:55
CII 22	✓	0:33:35
Ricaurte	✓	0:32:46
Av. Jiménez	✓	0:32:40

Figura 13. Estaciones con buena accesibilidad y sus respectivos tiempos

Fuente. Autores

En la parte superior se encuentran las tablas con las estaciones organizadas de mayor a menor, siendo las estaciones con indicador verde las calificadas con buena accesibilidad, es decir menos de 40 minutos en sus tiempos de viaje promedio; las estaciones con indicador amarillo son aquellas con accesibilidad media con tiempos de viaje entre 40 y 60 minutos; finalmente las estaciones con

indicador rojo son aquellas con baja accesibilidad y sus tiempos promedio de viaje son superiores a una hora.

Se puede observar que la mayor cantidad de estaciones se encuentran en el indicador amarillo, calificadas con accesibilidad media, luego le siguen las estaciones con baja accesibilidad y finalmente en la calificación de buena accesibilidad es el grupo con menos cantidad de estaciones. Por otro lado se observa que la estación menos accesible es San Mateo con un tiempo de viaje promedio de 1:22:42 y la Avenida Jiménez es la más accesible de todas con un tiempo de 00:32:40. Podemos observar que la gran mayoría de los portales del sistema se encuentran en el grupo del indicador rojo, por tal motivo se decidió graficar 3 variables la primera de ellas distancia, la segunda semáforos y la tercera baches en referencia a la calidad de la calzada, con esto se buscó determinar cuál de estas variables es la más influyente en la accesibilidad del sistema.

A continuación se observa un gráfico de barras que resume la accesibilidad del sistema estación por estación. Este gráfico se lee desde la esquina superior izquierda y hacia la derecha, en el momento en que se llega a la última estación de cada fila se baja a la fila siguiente y se comienza de nuevo en la parte izquierda del gráfico.

Se puede observar claramente la curva en la que se evidencia la disminución de la altura de las barras lo que significa que disminuye el tiempo de viaje, teniendo una diferencia de alrededor de 50 minutos entre la estación más accesible y la menos accesible.

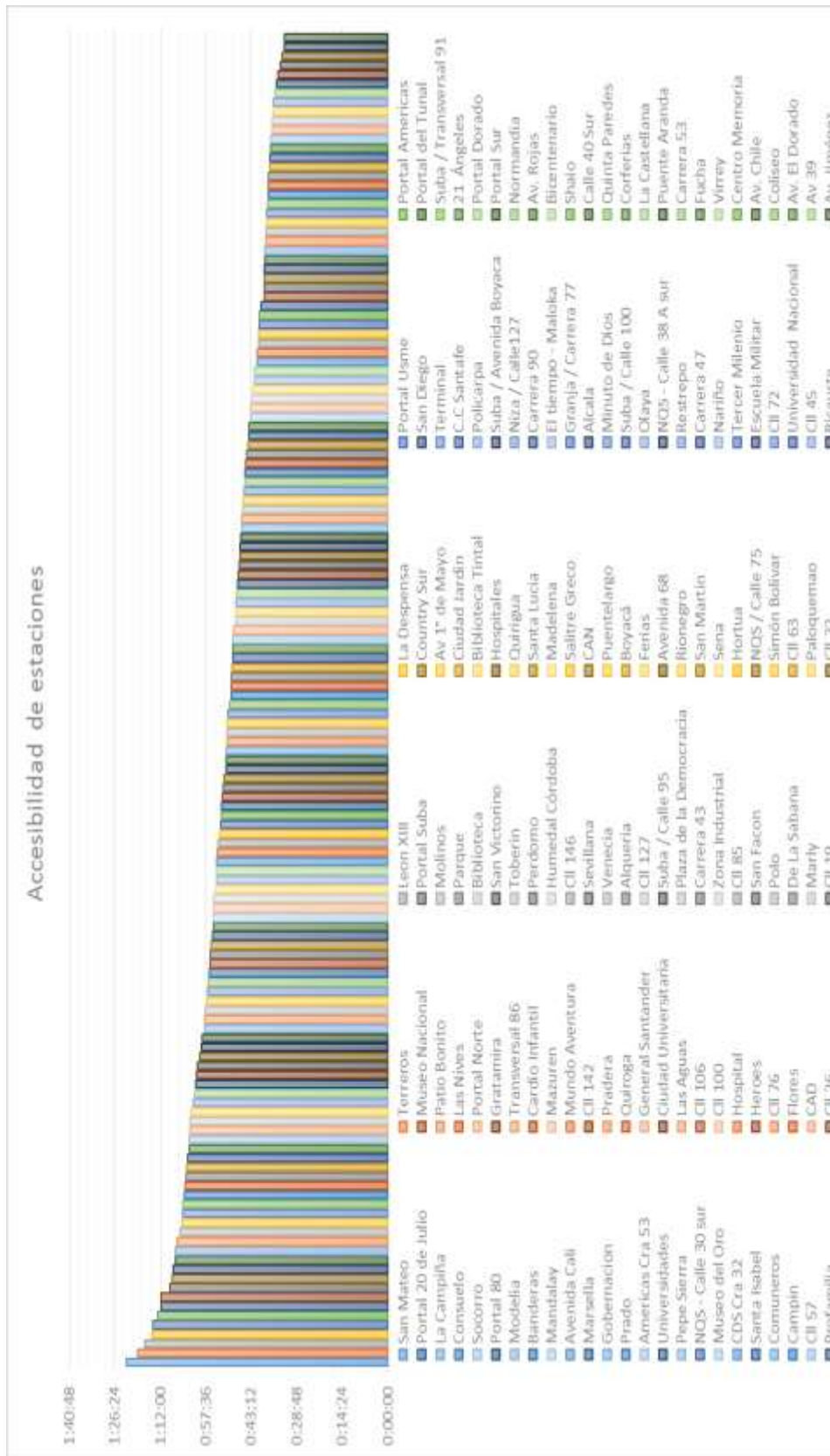


Figura 14. Gráfico de Accesibilidad en barras Fuente. Autores

Una vez graficadas las accesibilidades de cada estacion se procede a graficar dichos tiempos de viaje con las variables mencionadas anteriormente, en primer lugar se grafico contra la distancia, la cual fue hallada por medio de una matriz similar a la de los tiempos donde se determino la distancia promedio de cualquier estacion hacia cualquier otra estacion del sistema.

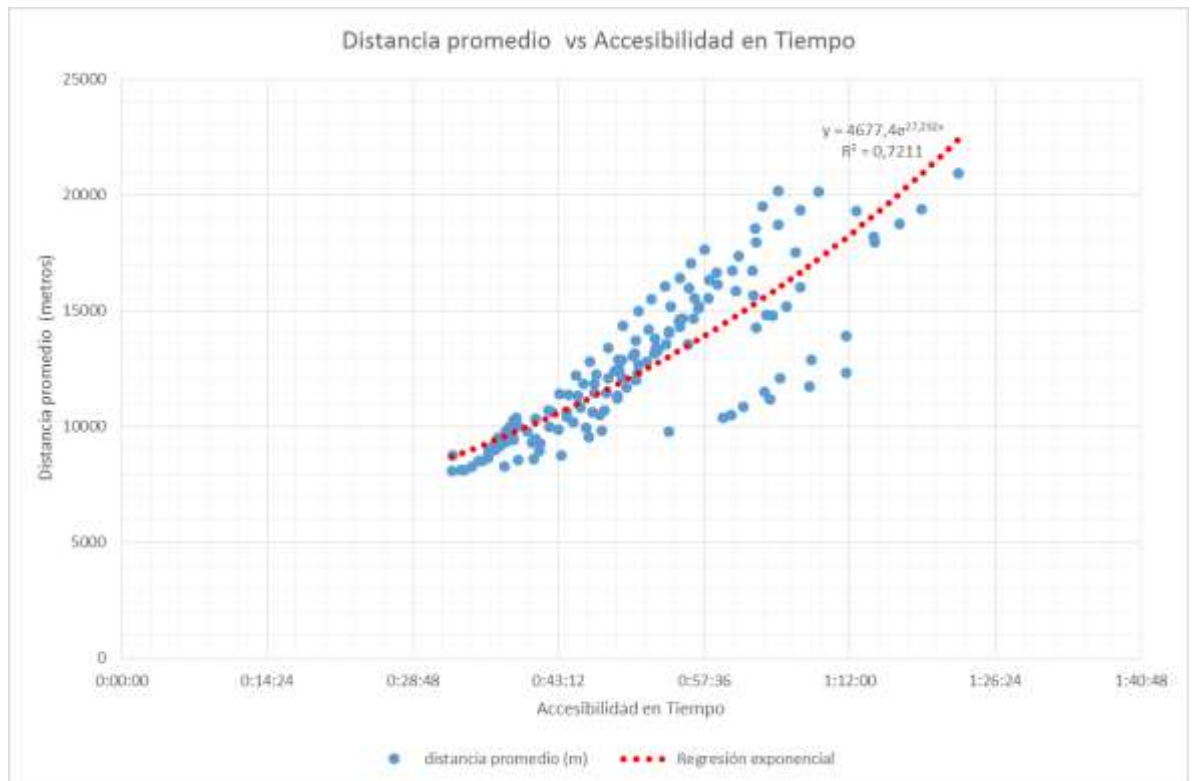


Figura 15. Distancia promedio Vs. Accesibilidad en tiempo **Fuente.** Autores

Se puede observar en la gráfica de accesibilidad contra distancia una relación directamente proporcional, puesto que se observa que a medida que las estaciones tienen un tiempo promedio de viaje más alto, también su distancia promedio respecto a todas las demás estaciones del sistema aumenta. Se evidencia de igual manera que se encuentran ciertos puntos dispersos en la gráfica, pero la tendencia es clara a aumentar el tiempo de viaje a medida que la distancia de igual manera lo hace.

El análisis de velocidad fue realizado por tramos definidos dentro de la red con la finalidad de determinar cómo se comporta el sistema en los diferentes ramales

que lo componen y además realizar un análisis de como la accesibilidad se ve afectada según el comportamiento de dichos tramos. Las velocidades media y máxima por tramo, son obtenidas según los trackeos por GPS realizados. A continuación se verán las gráficas de estas velocidades separadas por tramo y como es su comportamiento.

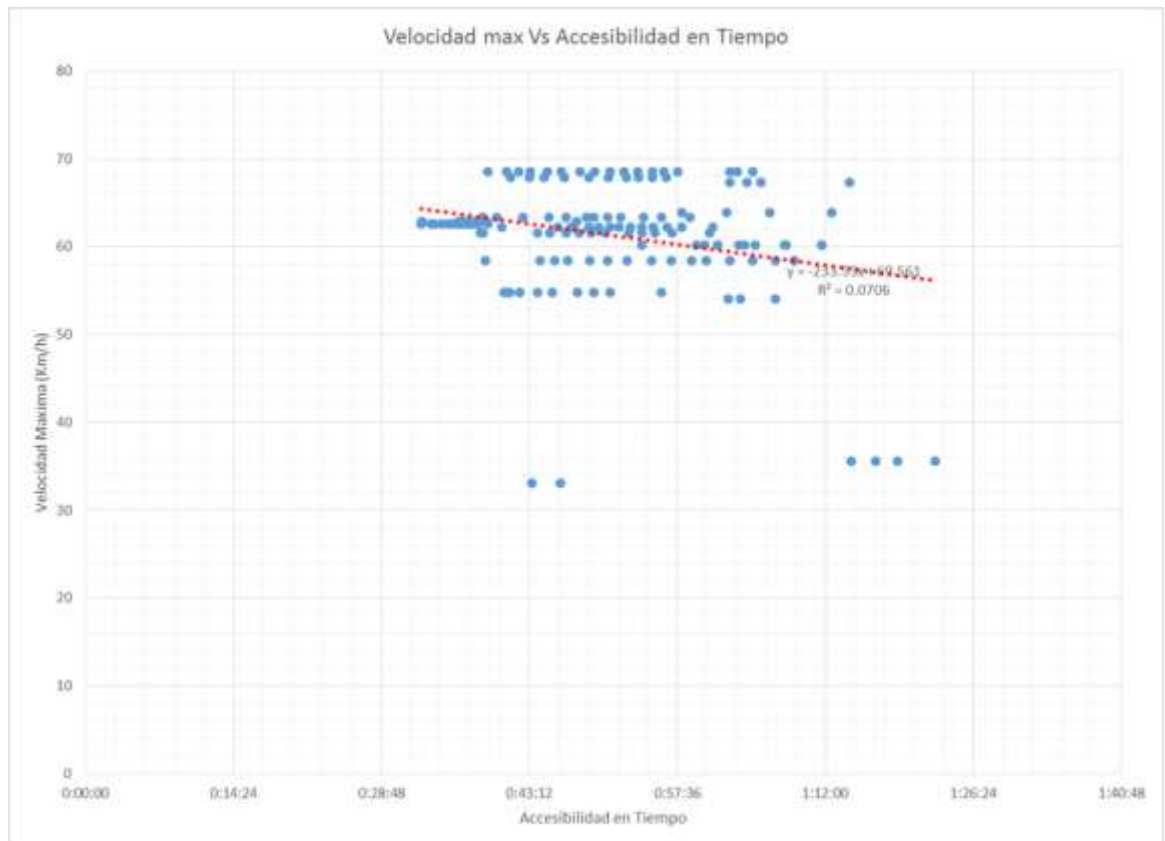


Figura 16. Velocidad Máxima Vs. Accesibilidad en tiempo **Fuente.** Autores

Se evidencia en esta grafica que la velocidad máxima en todos los tramos del sistema tiene cierta tendencia, puesto que los datos se encuentran agrupados en una zona común. La velocidad máxima varía de 55 a 68 Km/h, aunque se evidencian unos tramos que tienen una velocidad máxima de casi la mitad de las anteriores mencionadas con valores de 33 Km/h para estaciones como Museo del Oro y Las Aguas.

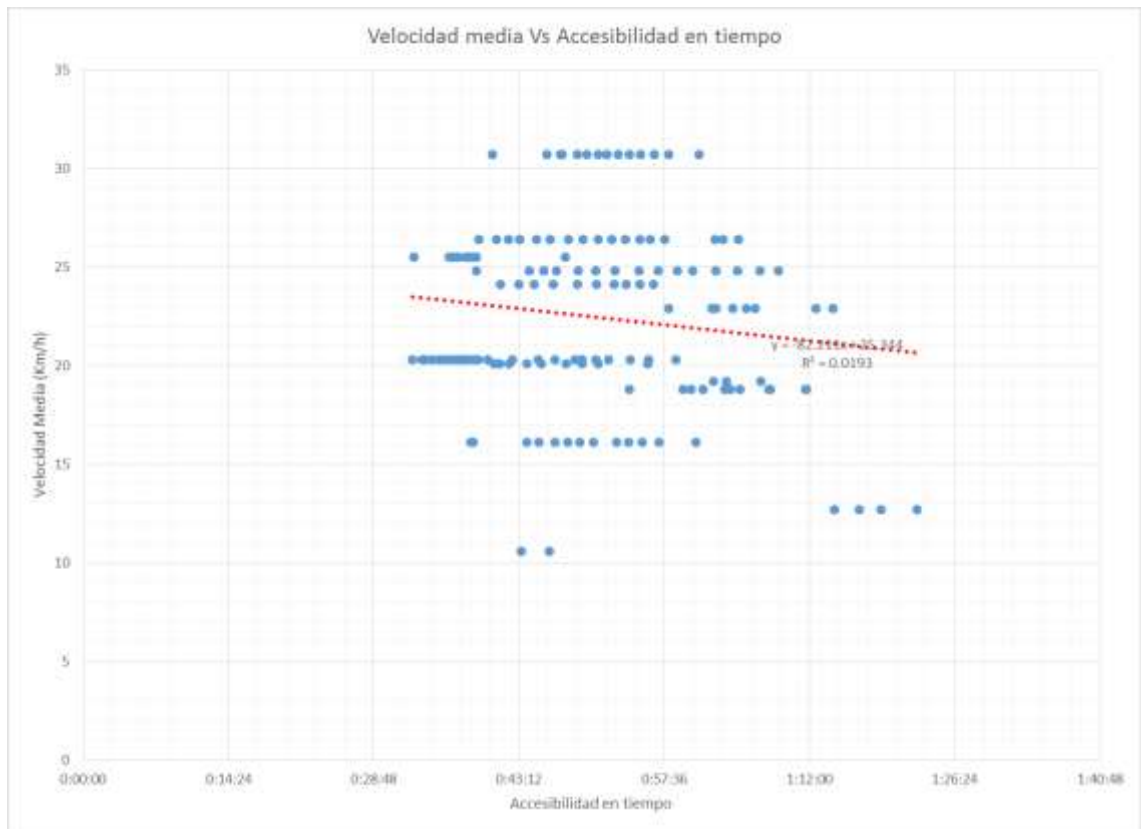


Figura 17. Velocidad Media Vs. Accesibilidad en tiempo **Fuente.** Autores

En esta grafica se pueden evidenciar nuevamente los grupos de estaciones separadas por tramos del sistema, acá la variación del valor de la velocidad media es significativa ya que no se encuentran grandes grupos de estaciones como en la gráfica de velocidad máxima. La velocidad media varía de 10 a 30 Km/h, en estaciones como Museo del Oro y Centro memoria respectivamente, lo que puede indicar el hecho de que la antigüedad de las calzadas influye en la accesibilidad de las estaciones que se encuentran en un tramo determinado. En este caso anteriormente mencionado, la calle 26 se encuentra en mejor estado que la calzada en el centro de la ciudad. Aunque no se evidencia una clara incidencia y/o relación de la velocidad media del sistema que indique que la accesibilidad de las estaciones en la red se vean afectadas por esta variable, se puede observar que en las estaciones para las cuales el tiempo es mayor de 60 minutos o un poco más las velocidades medias de los tramos donde estas se encuentran ubicadas son de las más bajas, lo que nos indica que para estas

estaciones se puede determinar que la velocidad media del tramo puede afectar negativamente la accesibilidad de dichas estaciones que superen la hora de viaje.

Por este sistema de tramos se puede realizar el análisis semafórico y de calidad de la calzada vial, las gráficas con los resultados de este análisis se observan a continuación.

El análisis de la incidencia de la densidad semafórica (Figura 18) en tramos del sistema sobre la accesibilidad en las estaciones del mismo muestra en la gráfica resultante claramente la existencia de densidades semafóricas distintas a medida que los tramos del sistema cambian, se puede observar que esta densidad puede variar desde 0,25 semáforos por kilómetro en la densidad más baja hasta casi 5 semáforos por kilómetro en la densidad más alta. También se ven diferenciados 4 grupos de densidades semafóricas en el gráfico, en cada uno de estos 4 grupos podemos observar entre 2 y 3 tramos del sistema; al no evidenciarse una clara incidencia de esta variable en la accesibilidad debido a que no se observa una relación que indique que la accesibilidad del sistema se ve afectada por la densidad semafórica, puede decirse que el análisis semafórico por tramos nos muestra claramente como varía dicha densidad a través del sistema aunque no se vea claramente como dicha variable afecta la accesibilidad de toda la red y de cada estación que la compone.

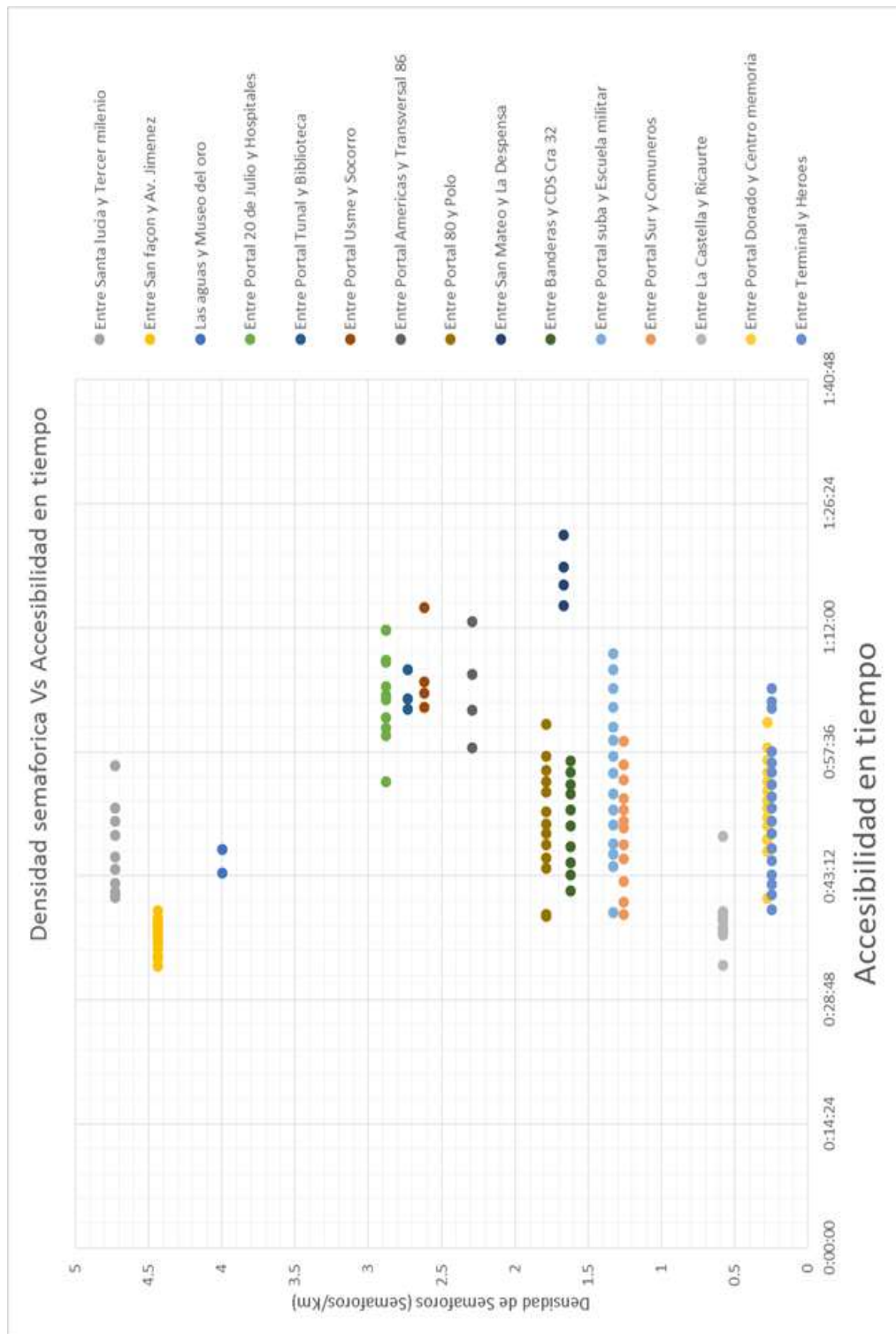


Figura 18. Densidad Semaforica Vs. Accesibilidad en tiempo **Fuente.** Autores

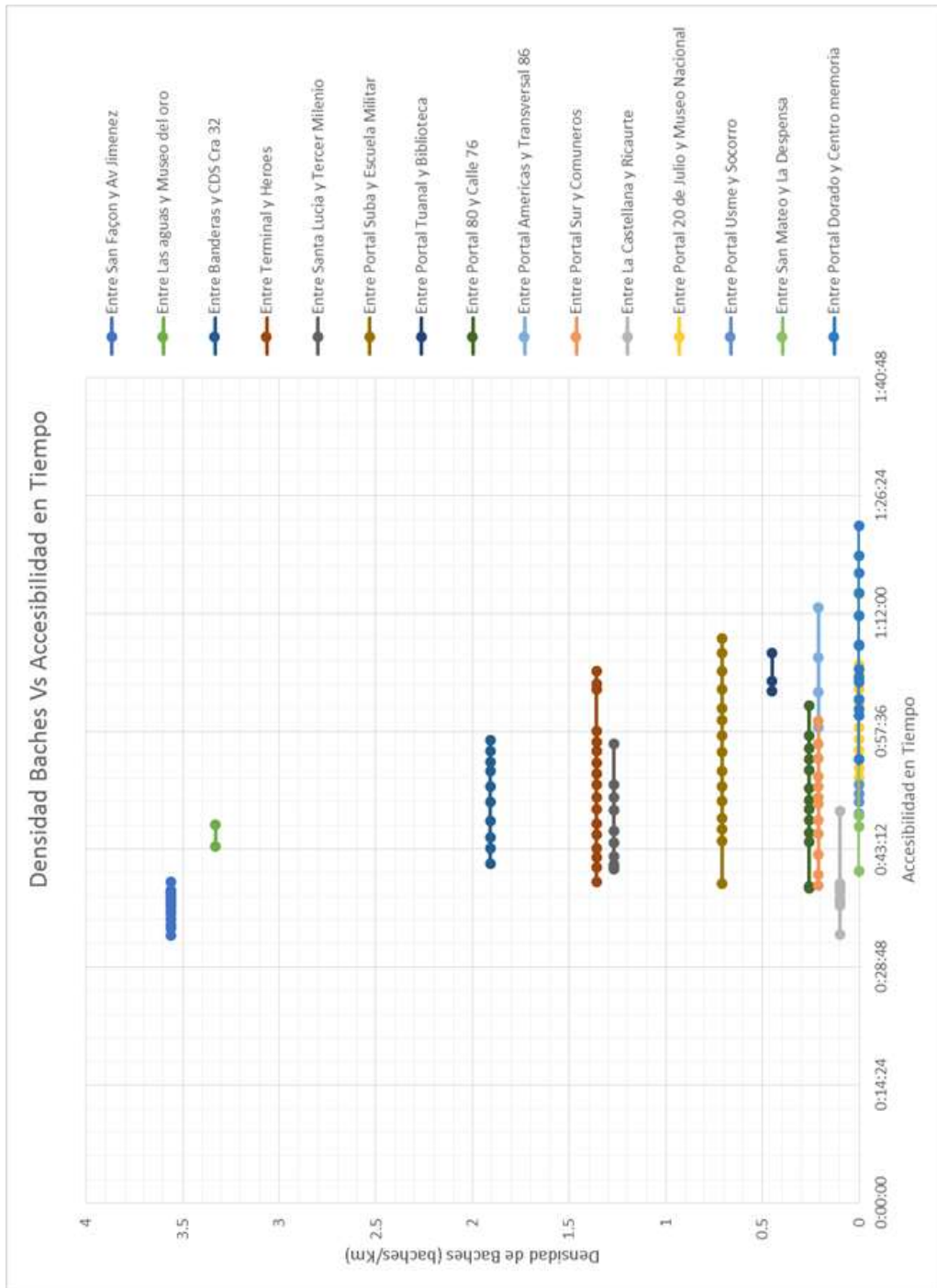


Figura 19. Densidad de Baches Vs. Accesibilidad en tiempo Fuente. Autores

Al igual que en la gráfica de densidad semafórica se evidencian grupos de tramos o troncales separados por diferentes densidades de baches, lo cual indica que la calidad de la malla vial varía en diferentes partes del sistema puesto que este ha sido construido en diferentes etapas y la densidad de buses también es distinta. La máxima densidad es de un poco más de 3,5 baches por kilómetro pero a diferencia de los semáforos en los baches se tienen densidades de 0, esto ocurre en las troncales más nuevas y a la vez las más alejadas del centro del sistema. Las densidades más bajas es decir 0 baches por kilómetro tienen lugar en troncales como la 26 y el 20 de Julio y las más altas en los tramos del centro del sistema y la ciudad a la altura de estaciones como la calle 22, calle 19 y Avenida Jiménez. Por otro lado se ve que estas densidades de baches altas están en los tramos donde las estaciones tienen mayor accesibilidad y las densidades nulas o casi nulas se encuentran en los tramos donde las estaciones son menos accesibles, por tal motivo se determina que el estudio de densidad de baches por tramos de la red del sistema no evidencia una relación alguna de la incidencia de esta variable sobre la accesibilidad en las estaciones de la red; es preciso aclarar que esta densidad al ser determinada por tramos, nos brinda la incidencia de la malla vial en dichos tramos y no la acumula a lo largo de toda la red.

La probabilidad de tomar semáforos en rojo durante un recorrido (Figura 20) puede llegar a influir en la accesibilidad del sistema, por tal motivo se decidió tener en cuenta esta variable y graficarla por tramos de igual manera que como se hizo anteriormente.

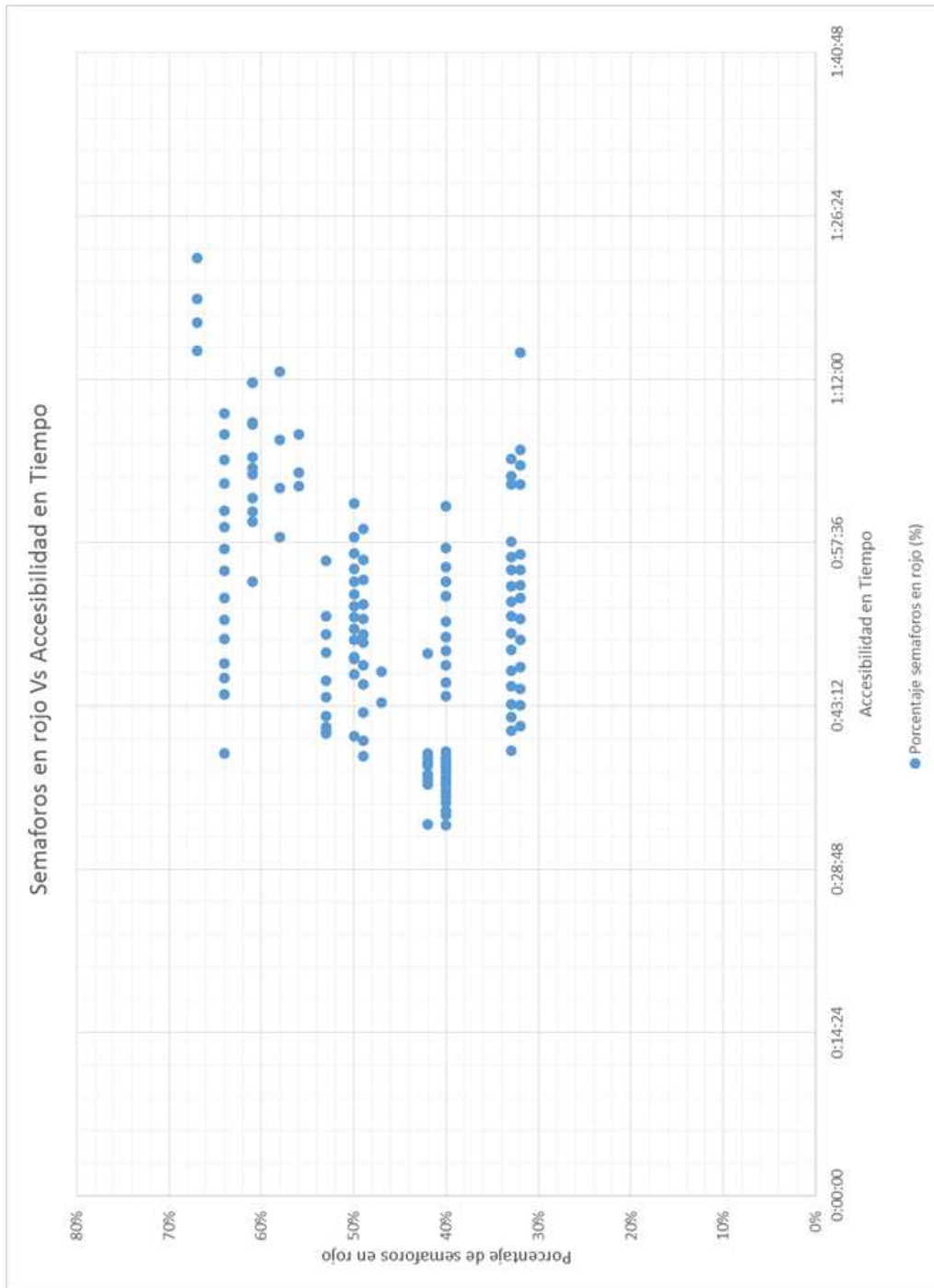


Figura 20. Semáforos en rojo Vs. Accesibilidad en tiempo **Fuente.** Autores

En este gráfico podemos observar la existencia de grupos al igual que en la gráfica anterior, en los cuales se encuentran los mismos tramos con los cuales se desarrolló el trabajo. Se observa que la probabilidad de tomar los semáforos en rojo en el sistema varía del 30% al 70% en los tramos, con una media del 48% de probabilidad. De acuerdo a esto se llega a la conclusión de que la incidencia de los semáforos en rojo sobre la accesibilidad si bien es una variable importante no es indicativo fiel de que pueda afectar la accesibilidad de la red puesto que en todos los viajes del sistema se tendrán 50% de posibilidades de tener que parar en un semáforo o seguir derecho. Por otro lado se observa una tendencia que indica que las estaciones para las cuales los tiempos de viaje son mayores a 60 minutos o un poco más la probabilidad de tomar semáforos en rojo aumenta por encima del 60%, por tal motivo se puede pensar que para dichas estaciones los semáforos en rojo pueden llegar a afectar su accesibilidad por el alto porcentaje de probabilidad de tomar los semáforos rojo durante el camino a dichos puntos.

Finalmente en este trabajo realizado por tramos al igual que el que se realizó por distancia, semáforos y baches promedio que se explica más adelante se tuvieron en cuenta tanto los tiempos de abordaje como los tiempos de trasbordo en los recorridos que esto fuera necesaria, esto con la finalidad de tener la mayor precisión posible en los tiempos de recorrido total.

Observando la Tabla 2 (Resumen de tramos analizados) se puede dar un resumen más claro de los datos anteriormente graficados según los tramos evaluados.

Tramo	Longitud (km)	Semaforos / Km	Probabilidad de tomar semaforos en rojo (%)	Baches / Km	Velocidad maxima (Km/h)	Velocidad media (Km/h)
Portal Suba - Escuela Militar	11,3	1,33	64%	0,71	58,4	24,8
Portal 80 - Calle 76	7,81	1,79	40%	0,26	61,3	16,1
Calle 76 - Terminal	11,8	0,25	33%	1,36	68,5	26,4
Heroes - Ricaurte	10,4	0,58	42%	0,10	62,9	25,5
Ricaurte - Portal sur	9,5	1,26	49%	0,21	63,3	20,3
Portal sur - San Mateo	4,2	1,67	67%	0,00	35,6	12,7
Ricaurte - Banderas	6,8	1,62	32%	1,91	67,9	24,1
Banderas - Portal Americas	4,8	2,29	58%	0,21	63,9	22,9
Ricaurte - Cll 76	9	4,44	40%	3,56	62,6	20,3
Portal Dorado - Universidades	10,6	0,28	50%	0,00	62,2	30,7
Las aguas - Jimenez	1,5	4,00	47%	3,33	33,1	10,6
Jimenez - Santa Lucia	5,5	4,73	53%	1,27	54,8	20,1
Santa Lucia - Portal Tunal	2,2	2,73	56%	0,45	54,8	19,2
Santa Lucia - Portal Usme	4,2	2,62	32%	0,00	67,3	22,9
Portal 20 de Julio - Museo Nacional	6,6	2,88	61%	0,00	60,2	18,8

Tabla 2. Resumen de tramos analizados **Fuente.** Autores

Luego de obtener los datos anteriores y analizarlos se procede a realizar nuevamente el análisis de estas variables pero esta vez no por tramos si no al igual que se hizo con la distancia, estación por estación para semáforos y baches.

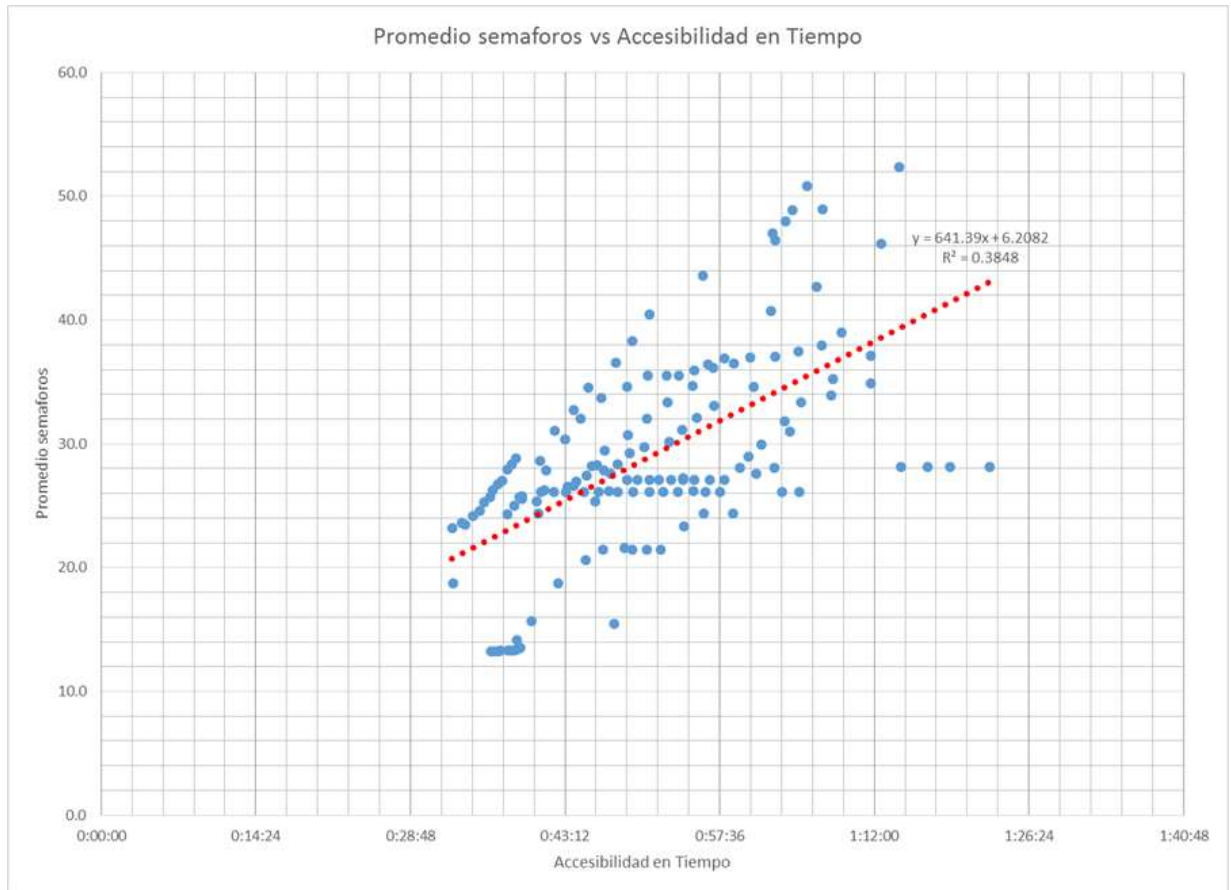


Figura 21. Promedio de Semáforos Vs. Accesibilidad en tiempo **Fuente.**
Autores

En este análisis a diferencia del realizado por medio de densidad semafórica en diferentes tramos del sistema, la gráfica obtenida permite observar que al igual que en la gráfica de Accesibilidad Vs. Distancia, el promedio de semáforos para llegar a alguna estación del sistema, influye en el tiempo promedio para llegar a dicha estación, es decir, la accesibilidad de la red y de cada una de las estaciones que la componen se ven afectadas según la cantidad promedio de semáforos que se deben tomar para llegar a un punto determinado; aunque no de una manera tan directa y evidente se puede observar que a medida que el tiempo de viaje aumenta, la cantidad de semáforos también lo hace, por lo cual

se tiene una línea de tendencia creciente a la derecha con pendiente positiva. Se evidencian también algunos datos dispersos los cuales poseen tiempos de viaje elevados pero una densidad semafórica baja, esto puede corresponder a que estas estaciones se encuentran en autopistas o sectores donde la presencia de semáforos no es necesaria a diferencia de las estaciones ubicadas en tramos como el del 20 de Julio por la carrera decima. En definitiva este análisis semafórico si evidencia una relación de la accesibilidad con la presencia de semáforos, pudiendo estos afectar negativa o positivamente a medida que aumentan o disminuyen respectivamente, por lo cual es una variable que incide directamente en la accesibilidad del sistema.

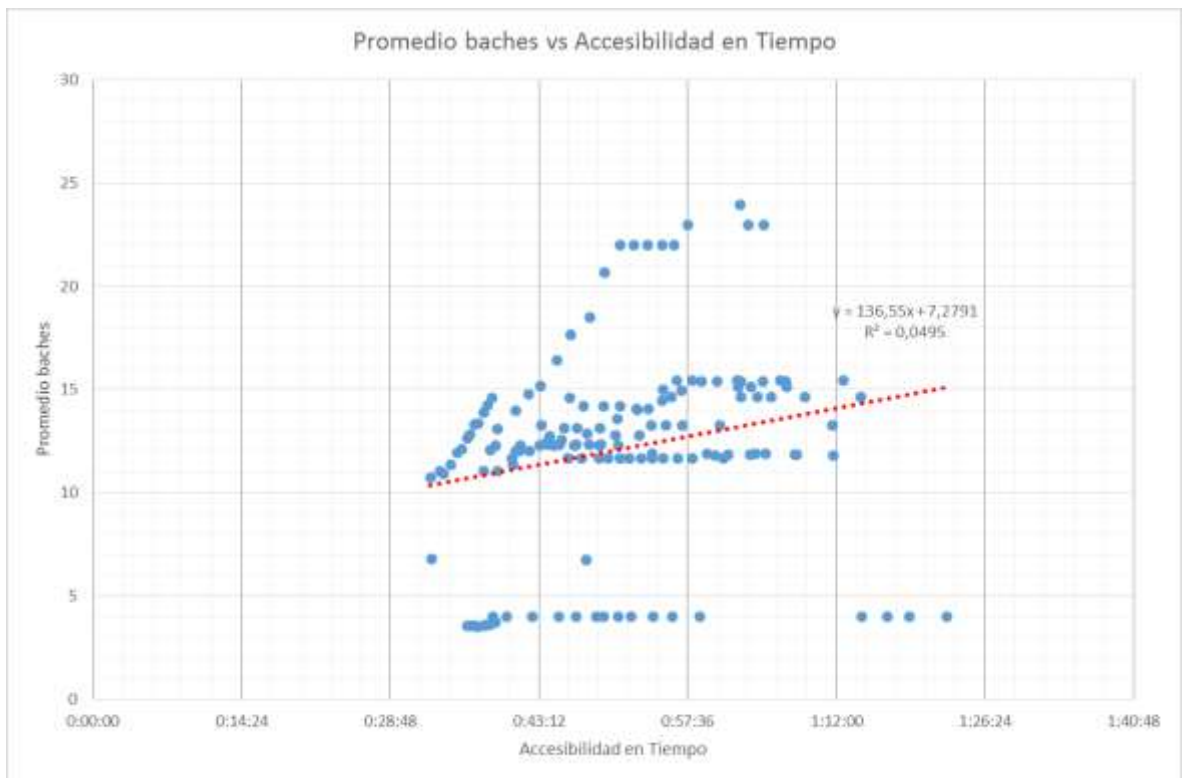


Figura 22. Promedio de Baches Vs. Accesibilidad en tiempo **Fuente.** Autores

Respecto a los baches la tendencia se mantiene aunque en menor medida, es decir que a mayor promedio de baches el tiempo de viaje también aumenta y así mismo la accesibilidad disminuye a pesar de no ser un resultado tan marcado como en los semáforos y en especial en la distancia. Se evidencia que la pendiente es menor según esta variable en cuanto a la línea de tendencia. Esto

puede ser resultado de la construcción en etapas del sistema además de su expansión desde el centro hacia los lados del sistema, lo que significa que los tramos con peores calidades de la calzada son los más antiguos, es decir los tramos del centro del sistema como la troncal Caracas, pero los tramos más alejados como la troncal de Soacha que termina en la estación de San Mateo y la cual tiene la peor accesibilidad tiene una malla vial en perfectas condiciones gracias a su reciente creación y puesta en operación. A pesar de que la influencia de esta variable no es tan marcada si se logra evidenciar que la accesibilidad del sistema se ve afectada a medida de que el promedio de baches aumenta, por tal motivo la calidad de la malla vial es un aspecto influyente en la accesibilidad de la red.

Finalmente con los datos anteriormente recopilados sobre la accesibilidad en términos de tiempo de toda la red se procedió a superponer dichos datos sobre un mapa de la red del sistema BRT Transmilenio.

A parte del mapa de la red del sistema se superpuso este mismo sobre un mapa de Bogotá, para poder observar la distribución espacial real de las estaciones en la ciudad.

Como se puede observar en la figura 23 a medida que la red se amplía, la accesibilidad de las zonas y las estaciones disminuye, lo que reafirma el hecho de que la distancia es la variable más influyente en la accesibilidad del sistema. Se observa que todos los portales se encuentran con indicador rojo, es decir en accesibilidad baja, puesto que estos están ubicados al final de la red.

Se pueden identificar trocales como el 20 de julio la cual tiene casi todas sus estaciones con indicador rojo y por otro lado las estaciones del centro de la red se encuentran con indicadores verdes.

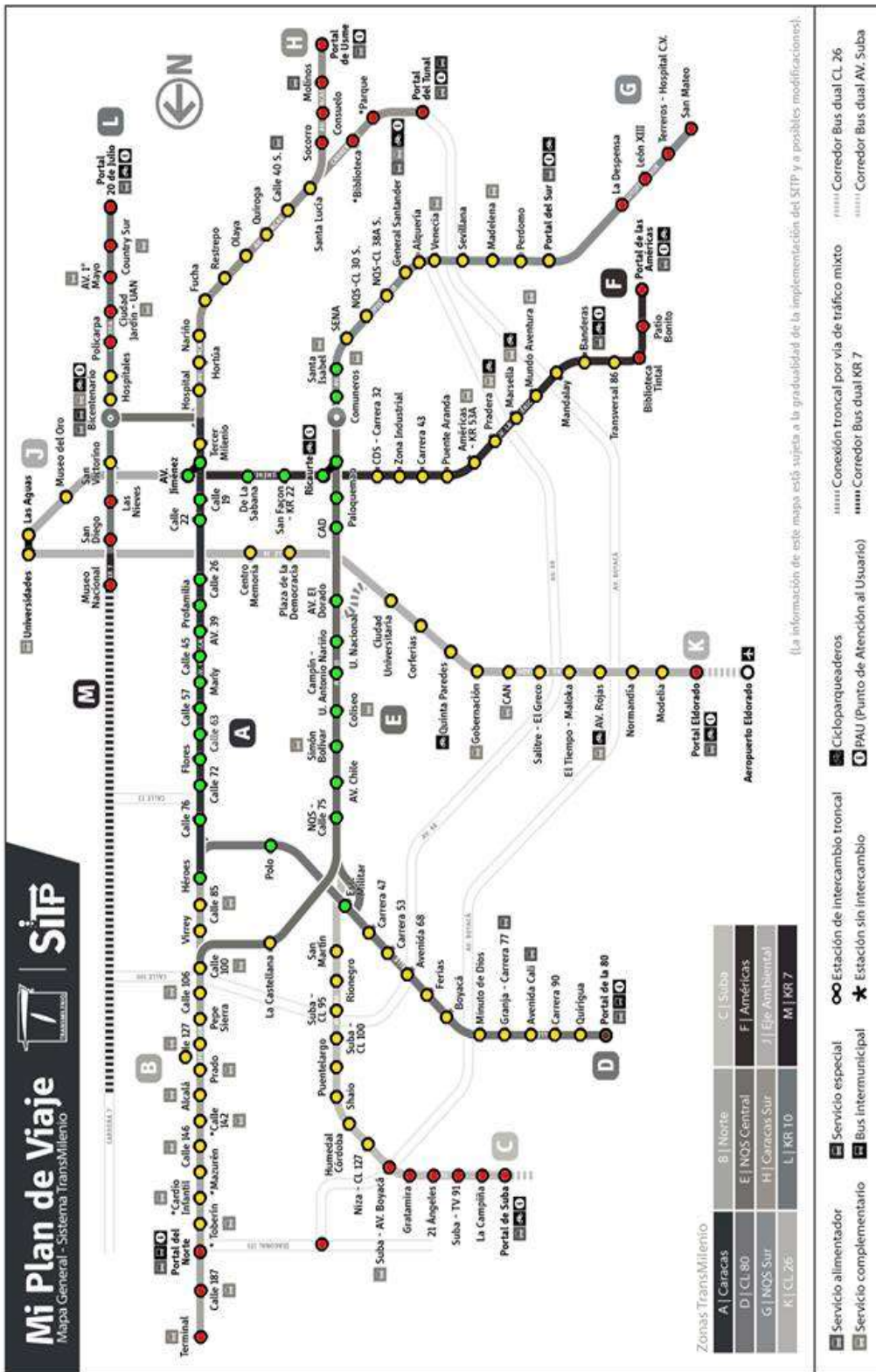


Figura 23. Distribución de las estaciones en los diferentes grupos de accesibilidad sobre la red de Transmilenio **Fuente**. Autores

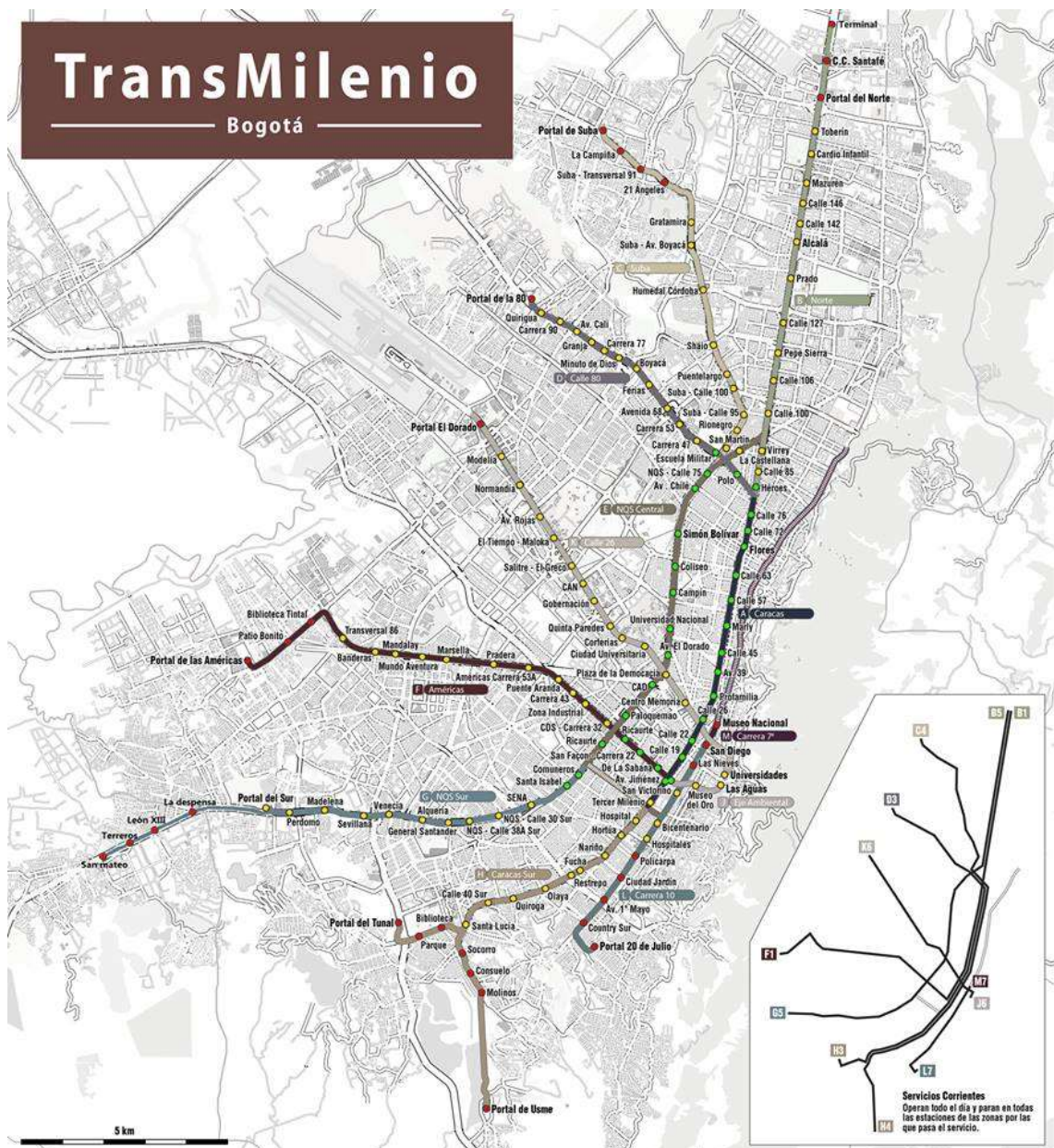


Figura 24. Distribución espacial de las estaciones en los diferentes grupos de accesibilidad sobre la red de Transmilenio y a su vez sobre un mapa real de Bogotá **Fuente.** Autores

Conclusiones

- Se determinó que las 3 variables analizadas (Distancia, semáforos y baches) tiene una implicación directa y son influyentes en la accesibilidad del sistema, aunque unas en mayor medida que otras. La distancia es la variable más influyente de todas mientras que los baches (Imagen 25, donde se ven ejemplos claros de los baches presentes en la red) son los que menos incidencia tienen sobre la accesibilidad de las estaciones. Se concluye así que la accesibilidad de una estación se ve afectada por la cantidad de baches y semáforos (Imagen 26, dicha imagen muestra semáforos en la red donde se hacen colas de hasta 4 o más buses articulados y biarticulados, lo que genera un aumento en los tiempos de viaje y una disminución de la accesibilidad en gran cantidad de las estaciones del sistema) en promedio que puede encontrar en el recorrido y en especial según su ubicación dentro de la red, siendo aquellas que se encuentran en los extremos las más afectadas y las que se encuentran en el medio las menos afectadas.



Figura 25. Baches a lo largo de la red de Transmilenio. **Fuente** Google Earth y Autores.



Figura 26. Semáforos en rojo con fila de articulados y biarticulados a lo largo de la red de Transmilenio. **Fuente** Google Earth y Autores.

- Se observa que si bien los semáforos y los baches son aspectos influyentes en la accesibilidad de la red del sistema BRT Transmilenio, al realizar el análisis por tramos nos muestra claramente como el comportamiento de estos cambian a lo largo del sistema y su ubicación. Por otro lado dichas variables no presentan una relación directa con la accesibilidad, puesto que de ese modo se realiza un estudio de los diferentes tramos y el comportamiento de cada uno de ellos por separado mas no como el comportamiento de cada tramo puede afectar al resto de la red.
- El estudio muestra que la velocidad máxima o media de los diferentes tramos no influye en la accesibilidad de las estaciones, puesto que se maneja una velocidad similar a lo largo de toda la red, por tal motivo no existe una correlación de la velocidad con la accesibilidad de la red.
- Los tiempos de la matriz resultante determinan los tiempos promedios de viaje desde cualquier estación hacia cualquier otra estación del sistema y permite agrupar las estaciones en tres grupos con tiempos de menos de 40 minutos, de 40 a 60 minutos y de más de 60 minutos como alta accesibilidad, media accesibilidad y baja accesibilidad respectivamente.

- La estación más accesible del sistema es la Avenida Jiménez que a su vez se encuentra en el centro de la red del sistema (Imagen 27), la estación menos accesible es San Mateo (Imagen 28), una de las estaciones más nuevas del sistema y a la vez una de las más alejadas de la red.



Figura 27. Estación Av. Jiménez, la más accesible de la red de Transmilenio. **Fuente** Google Earth y Autores.



Figura 28. Estación San Mateo, la menos accesible de la red de Transmilenio. **Fuente** Google Earth y Autores.

- El ordenamiento de las estaciones según su accesibilidad permite dividirlos en tres grupos según sus tiempos, el primer grupo contiene las estaciones más accesibles con tiempos menores de 40 minutos,

posteriormente el grupo más grande contiene la estaciones en accesibilidad media con tiempos de 40 a 60 minutos, finalmente el grupo de las estaciones calificadas con accesibilidad más baja, para las cuales los tiempos promedios superan los 60 minutos de viaje.

- La distribución espacial de los grupos previamente mencionadas mostrada en los mapas de las figuras 23 y 24, en los cuales se evidencia claramente que los puntos verdes, es decir las estaciones más accesibles del sistema se encuentran en el medio de la red, a medida que esta empieza a expandirse la accesibilidad empieza a disminuir pasando a las estaciones en color amarillo y llegando finalmente a las estaciones en rojo. Finalmente el mapa nos permite concluir que la accesibilidad de las estaciones y de la red en general disminuyen a medida que esta se expande de su centro hacia los extremos hasta llegar a los puntos más lejanos.
- La disminución de la accesibilidad en ciertas estaciones del sistema se evaluó a partir de 3 variables, las cuales son distancia de la estación, densidad semafórica y calidad de la calzada, con las cuales se encuentra una relación evidente al momento de interferir en los tiempos de viaje. Por otro lado se tuvo en cuenta datos de gran importancia e influencia en el trabajo como son los tiempos de transbordo y los tiempos de abordaje. Las tres variables principales analizadas muestran una evidente relación con la accesibilidad de las estaciones de la red, siendo la distancia la más influyente de todas y el estado de la malla vial la que menos influencia presenta.
- Se evidencia una alta relación en el estado de la malla vial según la antigüedad de los tramos del sistema, entre más antigua mayor densidad de baches y entre más nueva casi nula o muy baja. Se observa que no hay una alta relación con la accesibilidad en algunos tramos como por ejemplo entre San facon y Av Jimenez el cual tiene altas densidades. Pero

contradictoriamente en este tramo todas las estaciones se encuentran calificadas con buena accesibilidad (por debajo de los 40 minutos); por otro lado esta relación se cumple en tramos como el del 20 de Julio a Museo Nacional ya que tiene la cuarta densidad semafórica más alta del sistema y las estaciones en este tramo están calificadas con baja accesibilidad.

- Finalmente la accesibilidad del sistema se ve afectada por una variable principal que es más influyente que todas las demás, la distancia; la cual presenta una relación directa muy marcada con el aumento en los tiempos de viaje, lo cual la convierte en la principal razón para mejorar o empeorar la accesibilidad en las diferentes estaciones del sistema.

Recomendaciones Para Futuras Investigaciones

- Se recomienda complementar el estudio con aforos en buses expresos para determinar la variación en la accesibilidad de las estaciones al no tomar buses “ruta fácil”.
- Se recomienda realizar un trackeo GPS de estación contra estación para crear una matriz de distancia más precisa y evaluar más profundamente este parámetro en cuanto a la accesibilidad del sistema, puesto que esta variable es la más influyente de todas.

- Se recomienda analizar como cambiarían los tiempos de viaje si todos los tramos o troncales del sistema se encontraran con la misma calidad en su calzada.
- Se recomienda además de realizar un pequeño estudio sobre cuales semáforos de la red podrían ser retirados y esto sea capaz de generar un gran impacto positivo en la accesibilidad del sistema con el fin de aumentar las estaciones que se encuentren calificadas con buena accesibilidad y disminuir aquellas que están en el grupo de accesibilidad media.

Bibliografía

Cardozo, O., Gomez, E., & Parras, M. (2009). Teoria de Grafos y Sistemas de Informacion Geografica aplicados al Transporte Publico de pasajeros en Resistencia (Argentina). *Transporte y Territorio No 1*, 89-111.

CEPAL (2012) Boletín FAL, Edición No 312, No 8

Division de Recursos Naturales e Infraestructura , C. (2012). Division de Recursos Naturales e Infraestructura. *Edicion No 312, No 8*.

Escobar, D., Garcia, F., & Tolosa, R. (2011). *Análisis de accesibilidad de la región centro sur del departamento de Caldas*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

Secretaría Distrital de Movilidad, (. (2011). *Encuesta de movilidad*. Bogotá D.C.

Universidad Nacional de Colombia. (2007). *Guía de ingeniería de tránsito*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

zarate, M., & Rubio, B. (2006).

Cibergrafía

www.movilidadbogota.gov.co

<http://www.cepal.org/transporte/noticias/bolfall/2/48952/FAL-312-WEB.pdf>

<http://www.cepal.org/transporte/noticias/bolfall/2/48952/FAL-312-WEB.pdf>

<http://www.sutp.org/component/phocadownload/category/373a?download=46:3a-mto-es>

<http://www.transmilenio.gov.co/es/articulos/historia>

<http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/viewFile/7881/8160>

<http://www.docentes.unal.edu.co/vgvalenc/docs/GUIA%20Ingenieria%20de%20Transito%2001-07.pdf>