

[201024] Transporte Público Urbano en el Corredor de la Carrera Séptima de Bogotá, a través de una Flota de Buses Eléctricos

Dayanna Alejandra Agamez Marquéz 1^{a,c}, María José Camacho Cuello 2^{a,c}, Daniela María Dávila Payares 3^{a,c}, Amaranta López Sanchez 3^{a,c}

Alexander Cárdenas Ramos^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Abstract

The project seeks to carry out an operational and economic analysis, associated with the different alternatives of reinforcement of the transport fleet, through buses mobilized with gas, electric energy and hybrids. The public transport system in the city of Bogota has been one of the main concerns of all the administrations that have been there, since being the political and economic capital of the country, it has been growing exponentially, which has saturated the transport system in the city. Through the study of successful transport systems worldwide, we seek to find opportunities for improvement for the city of Bogota from a comprehensive analysis of urban mobility starting with a diagnosis, creation of the operational and financial model, simulation and ending with the analysis of the impact through management indicators.

Keywords: *transport, alternative energies, simulation by agents, financial evaluation of projects.*

1. Justificación y planteamiento del problema

En las grandes ciudades del mundo la movilidad es, sin duda, una de las principales causas de descontento entre los ciudadanos. Trayectos que toman más tiempo, congestión, inseguridad y contaminación, son algunos de los temas que generan malestar en los usuarios que utilizan los diferentes medios de transporte urbano. Actualmente la movilidad es un componente fundamental para satisfacer las necesidades de las personas, no solo por su función de brindar accesibilidad entre las diferentes áreas de la ciudad, sino principalmente como factor de desarrollo político, económico y sociocultural, que aparece en el modelo moderno de “ciudad global” (Romero Y Lugo-Morín, 2018).

Hoy en día, los ciudadanos prefieren el uso del automóvil particular por encima del transporte público. Esto se debe a diferentes factores tales como: la muestra de un estatus o condición social superior, la calidad deficiente de los autobuses (en comparación con un automóvil), la saturación de los buses en las horas pico, y la sensación de seguridad que les genera el automóvil ante la posibilidad de ser víctimas de la delincuencia. Esta preferencia ha tenido como resultado que en las horas pico se genere un alto volumen de flujo vehicular. Sin embargo, también son muchas las personas optan por el transporte público. Es importante destacar que, los efectos de la congestión vehicular recaen tanto sobre los ocupantes de los vehículos que circulan, como en las personas que utilizan el transporte público. En cierta medida, todos los habitantes de la ciudad se ven afectados por la contaminación acústica y atmosférica (Romero y Lugo-Morín, 2018).

Actualmente, los diferentes problemas ambientales que se han venido presentando son ocasionados en gran parte por la contaminación generada por los diferentes medios de transporte, tanto públicos como privados. Sin embargo, cabe resaltar que ciudades como Medellín y Ciudad de México, han implementado sistemas de transporte más amigables con el medio ambiente y también se han caracterizado por la promoción de otros tipos de medios de transporte tales como la bicicleta, la caminata o la patineta eléctrica.

En el caso de Ciudad de México, se debe mencionar que es una de las ciudades más pobladas de Latinoamérica y una de las que más problemas de movilidad ha presentado por su gran crecimiento poblacional. Esta ciudad cuenta con diferentes medios de transporte urbano como: metro, Metrobús y con servicios de transporte eléctrico como los trolebuses y el tren ligero. Adicionalmente, han empezado a integrar, de manera física y operacional, los sistemas de pago de toda la red de transporte público. Así mismo, como medida para combinar modos alternativos y no motorizados como la bicicleta, se puso en operación el carril de *trolebici*, el cual combina la bicicleta con el transporte eléctrico en uno de los corredores conocidos como cero emisiones. Esta iniciativa contribuye a disminuir la contaminación atmosférica incentivando la reducción del uso del automóvil (PacoZea, 2020).

Otro ejemplo que se puede destacar en América Latina es Chile, pues el país cuenta con diferentes medios de transporte como los buses interurbanos, metro, trenes, taxis y colectivos. En Santiago de Chile se destaca la Red Metropolitana de Movilidad, la cual cuenta con un sistema de información que brinda a los usuarios la facilidad de pagar con una tarjeta inteligente, que unifica el uso del metro y de los autobuses. Adicionalmente, cuenta con servicios agregados como tiendas y alimentación. Una de las actualizaciones de este servicio se dio en el año 2019 cuando se implementó una nueva flota de buses eléctricos y ecológicos que cobija alrededor de 6,2 millones de usuarios de 32 comunas ubicadas en la zona urbana, en un área de aproximadamente 680 km² (Mundo, 2017).

En Colombia, el transporte público en Medellín se ha convertido en un modelo a seguir para la región, ya que unifica en una sola tarjeta el servicio de autobús, metro, teleférico y tranvía. Este modelo de operación busca garantizar que las personas menos favorecidas tengan fácil acceso a un servicio de transporte público (Metro de Medellín, 20 febrero 2020). Por su parte, Bogotá, la ciudad más grande y poblada de Colombia, cuenta con un sistema de transporte conformado por el Sistema Integrado de Transporte Público (SITP), y Transmilenio (TM). El primero ofrece diferentes servicios de transporte (urbano, especial, complementario, troncal y alimentador), mientras que Transmilenio opera bajo el esquema Bus Rapid Transit (*BRT*¹). Esto quiere decir que cuenta con 114,4 km de cobertura, 9 portales, 143 estaciones regulares y 12 corredores en servicio que cubren 98 rutas ofrecidas en total por el sistema. Actualmente operan 2127 buses, entre los cuales se encuentran los articulados y biarticulados. En cuanto al SITP, existe un sistema urbano, especial y complementario que cuenta con 1.800 km de cobertura, 7.516 paraderos y opera en 13 zonas, las cuales abarcan 282 diferentes rutas y 5177 buses (Alcaldía de Bogotá, 2019).

Según una encuesta de movilidad llevada a cabo por la Alcaldía de Bogotá en 2019, en la ciudad se realizan 13,3 millones de viajes diarios, de los cuales 4.6 millones se realizan por medio del transporte público y el resto en otros medios de transporte como vehículos particulares, bicicleta, informales (Bicitaxi, Uber), entre otros. Los principales destinos de los bogotanos son el lugar de trabajo, y escuelas o universidades, los cuales corresponden a 3.582.250 viajes (Alcaldía de Bogotá, 2019).

En los últimos años se ha presentado una problemática creciente en Bogotá asociada a la congestión vehicular. Estos problemas evidencian atascos en diferentes horas del día, sin importar el tipo de vía, modo, si el vehículo es público o particular. En general, esta congestión se debe a factores como: la expansión geográfica y demográfica, el crecimiento acelerado del parque automotriz, la deficiencia en estructura vial y la carencia de un sistema de transporte público de calidad que sea capaz de abastecer de forma integral el sistema y que sea amigable con el medio ambiente.

Según expertos, la falta de un sistema masivo de transporte menos contaminante, el gran número de vehículos que funcionan con diésel, empezando con Transmilenio, además del problema que aún se mantiene con el SITP provisional, le está quitando oxígeno a la ciudad y generando alarmas permanentes por los nocivos efectos del material particulado (Semana, 2019).

¹ Modo de transporte que se caracteriza por el desarrollo de infraestructura en el que se le da prioridad al transporte público en relación con el transporte de otros vehículos.

En la Carrera Séptima, una de las vías más importantes de la ciudad, y la cual los ciudadanos reconocen como uno de los corredores más emblemáticos, icónicos y estratégico, la contaminación que se ha presentado ha llegado a ser de 49,65 microgramos por m^3 de material particulado, superando en algunas ocasiones la de la Avenida Caracas (Gómez, 2006). Con el fin de mejorar esta situación, el Gobierno Distrital ha implementado diferentes estrategias tales como la entrada del SITP sobre el corredor, la puesta en operación de buses híbridos padrones- duales del Transmilenio y la salida parcial de rutas del Transporte Público Colectivo (TPC). Como consecuencia de ello, se ha logrado reducir en un 17% el material particulado (PM10). Sin embargo, estas no son efectivas si no se hace reemplazo de rutas y frecuencias y, además, si se siguen utilizando los buses viejos en este corredor (EL TIEMPO, 2015).

En este corredor vial, desde el 2006, los alcaldes de las diferentes administraciones han propuesto alternativas para solucionar la movilidad, debido a que es importante lograr intervenirla lo más pronto posible. En la Tabla 1 se muestran las diferentes propuestas de cada alcalde:

Tabla 1.

Propuestas alcaldes. Autoría propia

Alcalde (periodo)	Propuesta	Fuente
2008-2012	Transmilenio Ligero	Alcaldía de Bogotá (diciembre, 2011). Consultado el: 18 de marzo del 2020 http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/2008_2012_bogotapositiva_c_informefinal_a_balancegeneral.pdf
2012-2016	Tranvía Ligero	Alcaldía de Bogotá (diciembre, 2012). Consultado el: 18 de marzo del 2020 http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/documentos/2012_2016_Bogota_Humana_Plan_Acuerdo489_2012.pdf
2016 – 2020	Troncal Transmilenio	Alcaldía de Bogotá (diciembre, 2017). Consultado el: 18 de marzo del 2020 http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/20160429_proyecto_pdd.pdf
2020 – 2024	Corredor Ecológico	Alcaldía de Bogotá (diciembre, 2019). Consultado el: 18 de marzo del 2020 https://bogota.gov.co/especiales-alcaldia-bogota/plan-desarrollo-claudialopez-2020-2024/

En la actual administración, que inició en enero de 2020, la alcaldesa Claudia López propuso un corredor ecológico para la Carrera Séptima, el cual estaría compuesto por movilidad limpia, andenes, más iluminación y arborización. Además, planea ampliar la extensión del actual ciclo ruta que se encuentra en este corredor. Sin embargo, aún no se sabe con claridad qué tipo de buses utilizará.

Teniendo en cuenta la información suministrada anteriormente, resulta necesario trabajar en torno a este importante corredor vial. Es por esto por lo que se busca responder la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué propuesta de modelo operacional se debería implementar en el corredor verde en la Carrera Séptima, para generar un impacto positivo en la movilidad y el medio ambiente?

2. Antecedentes

El 9 de abril de 1948, Bogotá presentó disturbios y actos violentos que desencadenaron en la liquidación de la empresa pública que administraba el sistema de transporte de pasajeros en la ciudad. Durante los años siguientes y hasta finales de los años noventa, el servicio de transporte público cubría solo el 80% de las rutas de transporte y la Empresa Distrital de Transportes Urbanos (EDTU) prestaba el servicio con autobuses y trolebuses, los cuales solo cubrían el 20% de las rutas y su principal eje de operación era la Avenida Caracas. Las dificultades económicas y la competencia con las empresas privadas, el progresivo deterioro de las flotas, los malos manejos administrativos y el desbordado crecimiento poblacional, llevaron a la empresa a su liquidación. Esta decisión convirtió a las empresas privadas en las únicas prestadoras del servicio y, además, se caracterizaban por ser contratistas de buses y administradoras de rutas asignadas por la Secretaría de Transito de Bogotá. Lo anterior generó un notable deterioro de la calidad y prestación del servicio, mayor congestión vehicular, accidentalidad y contaminación ambiental.

En 1996, luego de un estudio que tuvo como resultado la elaboración del Plan Maestro de Transporte Urbano, se inició la construcción del sistema de transporte masivo Transmilenio. Este se adaptó al exitoso modelo de la ciudad de Curitiba (Brasil). En ese momento, la ciudad empezó su más grande transformación en la prestación de servicio público de transporte.

Más tarde en el año 2006, se realiza la expedición del Decreto Distrital 319 del 15 de agosto, “Por el cual se adopta el Plan Maestro de Movilidad (PMM) para Bogotá, que incluye el ordenamiento de estacionamientos, y se dictan otras disposiciones”. Posteriormente, en el año 2009, se integró el transporte público colectivo con el de transporte masivo Transmilenio, siendo la Secretaria Distrital de Movilidad y Transmilenio los responsables de definir el nuevo Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) para la ciudad. Junto con esto, se creó el Decreto Distrital 309, “Por el cual se adopta el Sistema Integrado de Transporte Público para Bogotá” (2009) y nace lo que hoy se conoce como SITP:

El SITP “Será una red de transporte público articulada, organizada, con tarifa integrada a través de un pago y de fácil acceso con cobertura en toda la ciudad, que permitirá movilizar a los ciudadanos con unas mejores condiciones de viaje” (Aspilla y Rey, 2013, p.30).

Actualmente, al hablar del sistema de transporte encargado de la movilidad de los bogotanos, resulta necesario entender el funcionamiento de este. En el caso del Transmilenio, realiza su operación por medio de empresas operadoras que son las encargadas de comprar y operar los buses del sistema, así como también de contratar y capacitar los conductores de este. Este sistema de operación incluye servicios troncales y alimentadores, los cuales son ofrecidos por empresas privadas bajo estrictas condiciones establecidas en contratos de concesión con un control centralizado otorgados por TRANSMILENIO S.A. Del mismo modo, el SITP, también funciona por medio de empresas operadoras (Transmilenio, 2014).

La adquisición de la flota se realiza por medio de licitaciones para el funcionamiento de estos sistemas. La última realizada por Transmilenio fue la licitación N°1 de 2018, con la cual se buscaba seleccionar la(s) propuesta(s) más favorable(s) para la adjudicación de hasta seis (6) contratos de concesión, cuyo objeto era la financiación, compra y entrega de la flota al sistema Transmilenio para ser entregada al operador. Es decir, las empresas ganadoras de esta licitación debían cumplir con ciertas especificaciones; por ejemplo, que la flota cuente con tecnologías amigables con el medio ambiente y que los buses fueran biarticulados. Teniendo en cuenta estos criterios, los buses son entregados a la empresa Transmilenio y esta le otorga el poder a otra empresa para que sea la encargada de operar los buses y gestionar el mantenimiento de estos.

Con esta licitación, se buscaba la implementación de 1441 nuevos buses, de los cuales el 67% serán biarticulados. Es decir, 965 vehículos serán de este tipo y el restante serán articulados (EL TIEMPO, 2020). Con respecto al SITP, en noviembre de 2019, se adjudicaron 379 vehículos mediante un proceso de selección abreviada y 104 buses que fueron objeto de adiciones contractuales, para un total de 483 buses eléctricos cero emisiones. Así, con esta nueva flota tanto de Transmilenio como de SITP, se espera disminuir considerablemente la contaminación ocasionada por estos sistemas. Para poder adquirir esta flota y garantizar que el sistema siga funcionando, se implementa una tarifa que los usuarios deben cancelar para poder utilizar el mismo.

Dentro del sistema existen dos clases de tarifas, la tarifa técnica la cual indica lo que debe cancelar cada pasajero que utilice el sistema para cubrir los costos medios del mismo. Esta tarifa técnica se fija mediante la siguiente fórmula:

$$TTSITP = \frac{[(TTTM * PPTM) - \sum DctosTM - RTTMi] + (\sum iRTi) + (\sum iRZONAi) + (RSIRCI) + RMF + RA + RR + RFSITP + RP(1 - \%GSITP) * PPSITP}{RR + RFSITP + RP(1 - \%GSITP) * PPSITP}$$

Fórmula 1. Tarifa técnica

Donde: El primer sumando del numerador recoge el costo del subsistema Transmilenio; el segundo, los costos de los operadores troncales SITP, incluidos los de fase I y II que se hayan acogido al SITP; el tercero, los costos de los operadores zonales; el cuarto, los costos del concesionario del SIRCI (Sistema integrado de recaudo, información y servicio al usuario); el quinto, los costos del operador del modo férreo y otros modos o subsistemas (cuando se vinculen al sistema); el sexto, los costos de los operadores de alimentación del subsistema Transmilenio acogidos al SITP, incluido el concesionario de alimentación de Soacha; el séptimo, el costo del concesionario de recaudo del

subsistema Transmilenio que se acoja al SITP; el octavo, el costo fijo del administrador fiduciario del SITP; y el noveno, los costos de terrenos, patios y talleres, definidos por el gestor (Contraloría de Bogotá, 2015).

Así pues, la tarifa incluye todos los costos relacionados tanto con Transmilenio como con SITP y tiene en cuenta la cantidad de pasajeros pagos del sistema. La segunda es la tarifa usuario que constituye el valor que se descuenta de las TISC (Tarjetas Inteligentes sin Contacto), al hacer uso de los servicios del sistema, por lo cual es la que afecta directamente al usuario. Esta tarifa debe ser costeable (considerar la capacidad de pago de los usuarios), pero también sostenible, es decir, debe cubrir el costo medio de operación del sistema (Contraloría de Bogotá, 2015).

Como se mencionó anteriormente, estas tarifas se implementan teniendo en cuenta la demanda del sistema. De acuerdo con la encuesta de movilidad, realizada por la Secretaria de Movilidad en el año 2019, el total de viajes diarios de quienes habitan en Bogotá es 13,3 millones, de los cuales 4,6 millones corresponden a los viajes diarios totales en transporte público; 2 millones, a los viajes diarios totales en vehículo particular y, por último, 880.000 viajes diarios totales en bicicleta. Esto quiere decir que el medio de transporte público es el de mayor uso en la ciudad de Bogotá (Bogotá, 2019). Con respecto a la demanda de transporte público por parte de los usuarios en la Carrera Séptima, se observa un total de 18.000 pasajeros por hora-sentido, que se atiende en total con 300 buses. Adicionalmente, la velocidad promedio en este mismo es de 15 km/h promedio y en horas pico llega a ser de 8 km/h (Marín, 2017).

Debido a la gran demanda y congestión que presenta la ciudad, se han venido presentando problemas ambientales, tales como la contaminación atmosférica que representa el principal riesgo ambiental para la salud. Los contaminantes atmosféricos más relevantes son el material particulado (PM) (OPS, s.f). Actualmente, Colombia se encuentra en el puesto número 50 de países en el mundo con la peor calidad del aire, ocupando el puesto cinco en América Latina. En cuanto a ciudades, Bogotá ocupa el puesto número 49 en el continente, con un promedio de 13.9 microgramos de material particulado (Caracol Radio, 2020).

De acuerdo con la investigación realizada por Fredy Guevara, magíster en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, los buses articulados del sistema de Transmilenio contaminan el aire con PM 2,5 (material particulado). Además de ello, la investigación revela que los pasajeros que realizan recorridos entre 20 y 40 minutos están expuestos a inhalar altos niveles de este material particulado, ocasionándoles enfermedades respiratorias, cardiorrespiratorias o cáncer de pulmón (EL TIEMPO, 2019).

Debido a estos desafíos ambientales que se han venido presentando no solo en Colombia, sino también en países de América Latina, metrópolis como Ciudad de México han implementado medidas para mejorar esta situación.

Actualmente, el sistema de transporte en la Ciudad de México es integrado y se compone de diferentes medios como: metro, tren ligero, tren subterráneo, Metrobús, Mexibús, trolebús, RTP (Rutas de transporte público), colectivo, autobús urbano y taxis. Estos componen una red en la que a diario se realizan el 78.5% de los viajes totales de la ciudad, el resto se realizan en transporte privado como el automóvil. Los usuarios de estos servicios cuentan con una tarjeta recargable con la que pueden acceder a dichos medios de transporte (Medina, 2011).

En la siguiente tabla se pueden observar algunas de las características de los medios de transporte público disponibles en la Ciudad de México:

Tabla 2.

El transporte público en la ciudad de México: Incentivos a la Ineficiencia (2011).

TRANSPORTE	LINEAS DE RUTA	ESTACIONES	NUMERO DE VEHICULOS	COSTO PASAJE (COP)	AFLUENCIA ANUAL
Metro	11 líneas	193	335 trenes	\$518	1.415 millones
Tren ligero	1 línea	18	20 trenes	\$518	25 millones
Tren suburbano	1 línea	7	30 trenes	\$950 - \$2247	100 millones
Trolebus	9 rutas	-	252 vehiculos	\$518 y \$691 corredor cero emisiones	59 millones
Metrobus (BTR)	2 líneas	81	226 unidades	\$864	127 millones
Mexibus	1 línea	18	63 unidades	\$1.209	
RTP	88 rutas	Indefinidas	1.325 autobuses	\$345 - \$691	205 millones
Colectivo y autobuses	106 rutas	No definidas	59.508	\$518 - \$864	-

Recuperado de: <https://bit.ly/2w4huoW>

Adicionalmente, cabe mencionar que el sistema de transporte público en Ciudad de México otorga el beneficio de gratuidad a niños menores de 5 años, personas con discapacidad y adultos mayores de 60 años, solo con acreditar mediante identificación oficial su edad, y para el caso de las personas con discapacidad el documento oficial que así lo indique (Gobierno de la Ciudad de México, 2020).

El gobierno de la Ciudad de México, consciente de la problemática ambiental, construyó un corredor ambiental *Cero Emisiones*, con el objetivo de proporcionar, en forma exclusiva, el servicio de transportación de pasajeros sobre carriles confinados en el Eje Central, coadyuvando así con la política del Gobierno de la Ciudad de construir un corredor ecológico que genere beneficios tangibles para toda persona que circule sobre esta vialidad.

3. Objetivos

Diseñar un modelo que permita analizar la factibilidad de la implementación de un corredor verde de movilidad en la Carrera Séptima de la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta las diferentes variables operativas y financieras que hacen parte del sistema.

- Caracterizar las variables operativas y financieras que se deben tener en cuenta para la implementación de un corredor verde de movilidad.
- Articular el modelo operativo y financiero del corredor verde de movilidad de acuerdo con las características de la Carrera Séptima en la ciudad de Bogotá.
- Simular un tramo de la Carrera Séptima bajo el modelo operativo y financiero que se ha diseñado teniendo en cuenta la demanda del sistema de transporte.
- Medir el impacto económico y ambiental de la propuesta, en comparación con el sistema operativo actual de transporte en un tramo de la Carrera Séptima.

4. Metodología

Con el fin de caracterizar las variables operativas y financieras que se deben tener en cuenta para la implementación de un corredor ambiental de movilidad, se llevarán a cabo las siguientes actividades: 1) El análisis cualitativo de los sistemas de transporte mundial, 2) La identificación de los diferentes tipos de flotas con energía limpia y las principales variables para tener en cuenta y 3) La elaboración de un diagnóstico del desempeño de transporte en los sistemas seleccionados en las actividades previas. Estas actividades se realizarán con el apoyo de estudios de movilidad realizados previamente por la Secretaria de Movilidad y el Ministerio de Transporte, así como herramientas de ingeniería industrial e investigación cualitativa y cuantitativa.

Para articular el modelo operativo y financiero del corredor verde de movilidad, de acuerdo a las características de la Carrera Séptima en la ciudad de Bogotá, se realizará la definición de variables operativas de la propuesta de transporte en el corredor verde, se hará una investigación cualitativa y cuantitativa sobre los escenarios de implementación y su factibilidad, se seleccionará el modelo operativo, se hará la caracterización para el corredor verde y la construcción de un modelo de costos para el modelo operativo planteado. Acto seguido, se buscará proponer un modelo operativo y la caracterización del modelo de costos del sistema.

Una vez se cuente con el diseño del modelo operativo, es importante la simulación del corredor verde de movilidad de acuerdo con las variables y parámetros identificados en la Carrera Séptima. Se realizará el levantamiento de datos de todas las variables que constituyen el sistema, el desarrollo del análisis de entrada, la construcción del modelo en software, la validación y la verificación del modelo. Para esto, se utilizará la simulación de eventos discretos, SPSS y NetLogo.

Por otro lado, con el fin de medir el impacto económico y ambiental de la propuesta, comparado con el sistema operativo actual de transporte en el corredor caso de estudio, se realizará la identificación de los KPI's operativos de movilidad, la medición del modelo actual y el modelo simulado del corredor en la Carrera Séptima y el desarrollo de un análisis de cierre de brechas. Todo esto se hará midiendo el impacto económico a través de indicadores y del análisis de elementos de captura. De esta manera, se obtendrá la información sobre el impacto económico que generaría la propuesta.

5. Análisis de resultados

Para poder diseñar un modelo operativo y financiero para la Carrera Séptima de la ciudad de Bogotá, se tomarán en cuenta los diferentes modelos de movilidad de las principales ciudades de Latinoamérica. Esto con el fin de identificar las variables que se deben tener en cuenta para el modelo que se busca proponer. A continuación, se presentan los siguientes estudios de algunos de los sistemas de movilidad más importantes en Latinoamérica.

Santiago de Chile se caracteriza por tener uno de los mejores sistemas de transporte público en América Latina. Este sistema brinda cobertura a las 34 comunas de la provincia de Santiago, un área cercana a los 68 km^2 . Además de ello, cuenta con 6 líneas y 11.261 estaciones (Contact Chile, 2020).

El sistema de buses es operado por empresas privadas, el Metro de Santiago, y el sistema MetroTren. Actualmente se cuenta con 7060 buses en los cuales el chasis es fabricado por Volvo, Mercedes-Benz, Scania y Agrale. En el caso de las carrocerías, éstas son fabricadas principalmente por las empresas: Marcopolo, Caio, Neobus y Busscar; así como BYD y Yutong en los vehículos eléctricos. De acuerdo con su longitud, los buses articulados se clasifican en tres tipos: clase A, entre 8 y 11 metros; clase B, entre 11 y 14 metros; y, clase C, con más de 14 metros. A inicios de 2019, ingresaron 490 buses nuevos con tecnología Euro VI al sistema. A su vez, ingresaron 100 buses eléctricos de la marca Yutong, los cuales cuentan con puertos USB y Wi-Fi, además de aire acondicionado. La tarjeta bip es la forma de pago para el Metro, MetroTren Nos y buses Transantiago. Existe una tarifa establecida para todos los usuarios y una para estudiantes. Dicha tarjeta funciona cargando la cantidad de dinero deseada, y tiene un costo entre los USD 0.95-1.30 (Contact Chile, 2020).

Otra de las ciudades con un sistema de transporte público para destacar es São Paulo en Brasil. Este sistema, se compone de 6 líneas con una cobertura de 96 km en donde se encuentran distribuidas 84 estaciones. São Paulo Transporte (SPTrans) es la empresa de autobuses encargada de la gestión del sistema de transporte público por Ómnibus en São Paulo. Actualmente, se cuenta con 7000 líneas de ómnibus urbanos que poseen sistema de rastreo y sincronización GPS de sus unidades, lo que le facilita al usuario identificar toda la información acerca de los horarios y las paradas. Las líneas son operadas por concesionarias que cuentan con 17.000 autobuses incluyendo 290 trolebuses. El sistema de transporte público en São Paulo cuenta con un medio de pago innovador, el billete electrónico. Este puede ser utilizado en todos los autobuses, minibuses y metro. Para el año 2020 la tarifa es de R\$4,4 es decir 0,84 dólares. Las tarifas se modifican anualmente y varían de acuerdo con lo establecido por el SPTrans. Existen convenios con los que se le aplican descuentos a los estudiantes y adultos mayores. Los ómnibus cuentan con capacidad para 200 pasajeros, cámaras de seguridad, aire acondicionado y Wi-Fi gratis (SPTrans, 2020).

Por otro lado, Rio de Janeiro es otra de las ciudades de Brasil que se destacan por su red de transporte público, la cual está compuesta por metro, tranvía eléctrico y buses. El sistema de transporte BRT es administrado por un grupo

de empresas privadas de transporte de pasajeros, reunido en un consorcio. En los pasillos, cerca de 450 mil personas son transportadas por día. En él ya se hacen 8 mil viajes diarios con una flota de 440 autobuses (BRT Rio, 2019).

La ciudad cuenta con 3 líneas BRT con 60km de extensión, la línea Transoeste tiene 62 estaciones y 4 terminales (Alvorada, Campo Grande, Santa Cruz y Jardim Oceânico), y cada día transporta 216 mil pasajeros. Por su parte, la línea Transcarioca, cuenta con 39km de extensión, tiene 45 estaciones y cinco terminales (Alvorada, Fundão, Tanque, Taquara y Madureira), y moviliza a 234 mil pasajeros por día. Por otro lado, la línea Transolímpica, cuenta con 18 estaciones y tres terminales (Recreio, Centro Olímpico y Sulacap), tiene 26 kilómetros de pista exclusiva, y transporta 70 mil pasajeros al día. BRT Rio cobra la tarifa definida por el Ayuntamiento de la Ciudad de Rio de Janeiro para el Billete Único Carioca en el valor de R\$ 4,05 (BRT Rio, 2019).

Adicionalmente, la ciudad de Lima-Perú, cuenta con un sistema que está compuesto por Buses de Transporte Rápido (BRT) de alta capacidad, corredores exclusivos y estaciones. Existen 35 estaciones intermedias, una estación central subterránea y dos terminales de transferencias. Las rutas troncales se integran con las rutas alimentadoras y logran conectar el Norte y Sur de la ciudad uniendo a 18 distritos. Los buses son articulados de 18 metros con capacidad para 160 pasajeros. Estos buses son fabricados por la empresa Modasa en Lima y tienen tecnología Euro IV (Modasa, 2020).

La regulación de las tarifas es fijada por los organismos reguladores, quienes establecen una tarifa máxima y mínima para llegar a un precio justo. Tal fluctuación va acompañada de la entrega de subsidios a los operadores, que cubren parcialmente sus costos de operación.

A continuación, se muestra la siguiente tabla en donde se evidencia la recopilación de la información de aspectos relevantes de movilidad de las ciudades previamente mencionadas:

Tabla 3.
Recopilación información movilidad de ciudades latinoamericanas

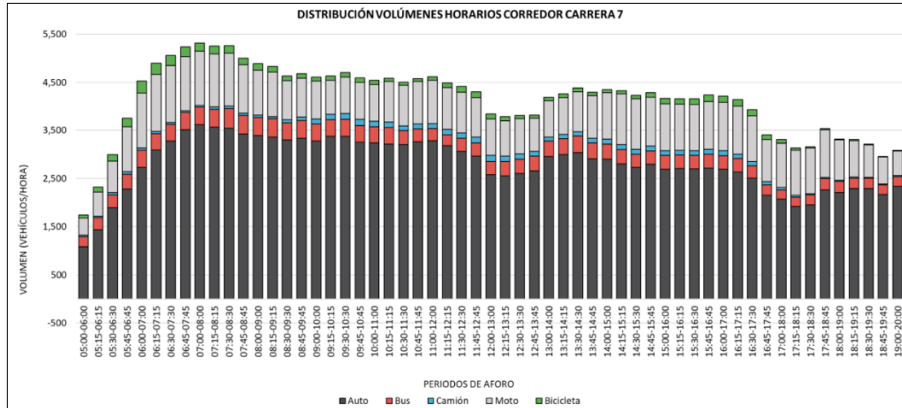
Ciudad	Tipo de vehículo	Tarifa	Frecuencia horaria	Tramos o líneas	Pasajeros hora sentido	Horario del sistema
São Paulo, Brasil	Autobuses Marcopolo viales BRS	0,84 USD	Aprox. entre cada 5 y 10 minutos.	6 líneas y 84 estaciones	40.000	5:00 AM-12:AM
Santiago de Chile, Chile	Marcopolo, <u>Caio</u> , <u>Neobus</u> y <u>Busscar</u>	1,22 USD	Aprox. entre cada 3 y 5 minutos.	6 líneas y 108 estaciones	40.000	6:00AM-11:00PM
Lima, Perú	Modasa con tecnología euro 4	0.35US-0.71US	Aprox. entre cada 3 y 5 minutos.	35 estaciones	45.000	5:300 AM – 10:00 PM
Rio de Janeiro, Brasil	Autobuses Marcopolo, Volvo, Mercedes Benz	0.76 US	Aprox. entre cada 5 y 10 minutos.	3 líneas 12 terminales 125 estaciones	20.000	5:00AM-11:00PM
Ciudad de México, México	Scania K130, Scania K310 con motor Euro III.	0.30 US	Aprox. entre cada 5 y 15 minutos.	3 líneas troncales y 85 estaciones	45.900	5:00 AM - 11:45 PM

Fuente: Elaboración propia a partir de BRT Rio (2019), SPTrans (2020), Contact Chile (2020) & Modasa (2020)

Una vez identificadas las diferentes variables de los sistemas de transporte público de diversas ciudades latinoamericanas, se tomarán como base para establecer el diseño del modelo operativo y financiero en el corredor

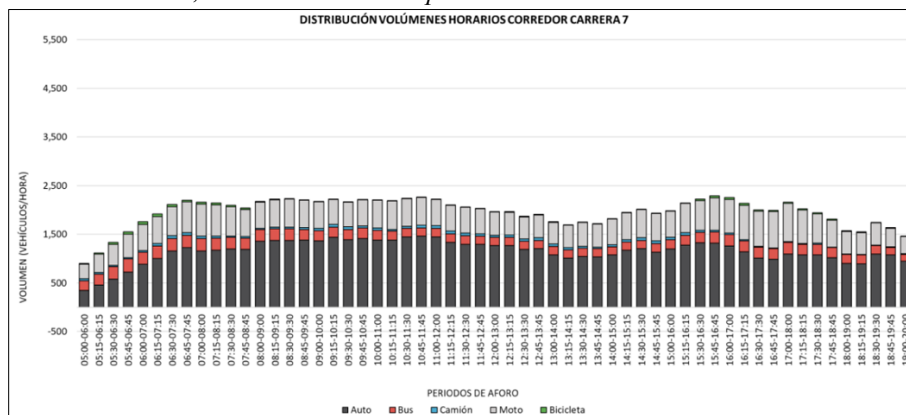
verde de la Carrera Séptima de Bogotá. Se estableció un contacto con la Secretaria de Movilidad de Bogotá, a través del cual se pudo obtener una valoración del corredor de la Carrera Séptima. En las siguientes gráficas se puede observar la variabilidad del flujo vehicular antes de la pandemia y durante:

Gráfico 1.
Distribución volúmenes horarios, corredor Carrera Séptima



Fuente: Secretaría Distrital de Movilidad, ET. Carrera 7, Diagnóstico Corredor-2018 (2020).

Gráfico 2.
Distribución volúmenes horarios, corredor Carrera Séptima



Fuente: Secretaría Distrital de Movilidad, ET, Carrera 7, Diagnóstico Corredor-septiembre 2020 (2020).

A partir de la información previa, se evidencia una disminución en el flujo vehicular. Esto se debe a los cambios en los horarios de entrada de algunas actividades económicas. Como consecuencia, el flujo vehicular se distribuye uniformemente a lo largo del día, eliminando picos representativos, para detalle ver Anexo 1.

Ahora bien, Bogotá es considerada una metrópolis, ya que cuenta con más de 8 millones de habitantes y además es el epicentro cultural y financiero de Colombia. Dentro de sus principales corredores viales se encuentran la Av. NQS, Av. Boyacá, Av. Carrera 68, Av. Calle 13, Av. Américas y la Carrera Séptima. Dichas arterias son importantes debido a que concentran el mayor flujo vehicular, así como también vinculan los diferentes nodos de generación de demanda tales como universidades, centros administrativos y financieros, áreas comerciales, productivas y sitios de entretenimiento.

La Carrera Séptima cuenta con una longitud de aproximadamente 19,2 km. Se encuentra dividida en cuatro tramos. El primer tramo comprende desde la Calle 32 hasta la Calle 100 con dos calzadas cada una con tres carriles. El segundo tramo abarca desde la Calle 100 hasta la Calle 116 con dos calzadas cada una con dos carriles. El tercer tramo, desde la Calle 116 hasta la Calle 183 con dos calzadas cada una con tres carriles. Y el cuarto tramo, desde la

Calle 183 hasta la Calle 200 con una calzada con un carril por sentido. La demanda de pasajeros que se maneja en la Carrera Séptima en cada sentido es de 22.000 pasajeros/hora y la oferta de buses es de 300 en operación, así como la velocidad promedio es de 25 km/h (Observatorio de Movilidad, 2008).

A continuación, se presentan las siguientes gráficas donde se muestran las velocidades promedio en el corredor en diferentes horas del día:

Gráfico 3.
Velocidad promedio Norte-Sur.

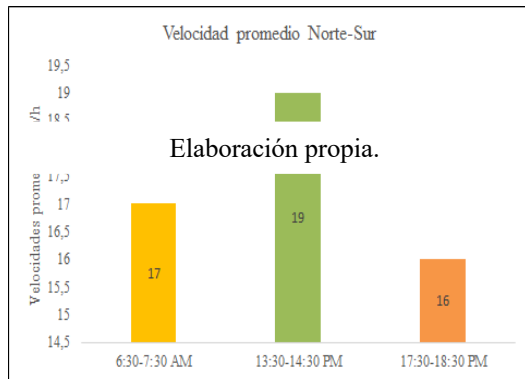
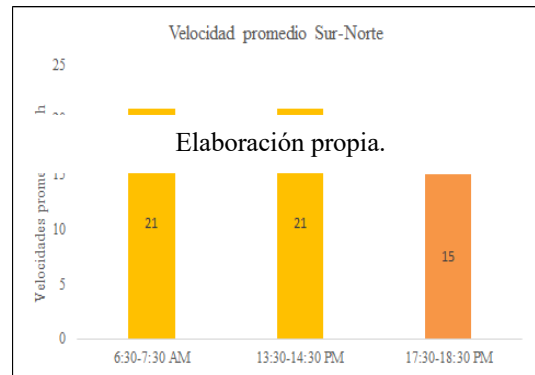


Gráfico 4.
Velocidad promedio Sur-Norte.



La Carrera Séptima impacta directamente tres

localidades: Localidad de Santa Fe, ubicada entre las Calles 1 y 39, y Avenida Caracas hasta el límite oriental de la ciudad; Localidad de Chapinero, ubicada entre Calles 38 y 100 y la Avenida Caracas hasta el límite oriental de la ciudad; y, la Localidad de Usaquén ubicada desde la Calle 100 hasta el municipio de Chía. Los puntos que presentan mayor congestión vehicular de estas cuatro localidades son:

Tabla 4.
Puntos de mayor congestión vehicular, Observatorio de Movilidad (2010).

PUNTO CRÍTICO	VOLUMEN
Calle 106	1.500 vehículos/hora
Calle 72 – Calle 75	4.600 vehículos/hora
Calle 92	2.300 vehículos/hora

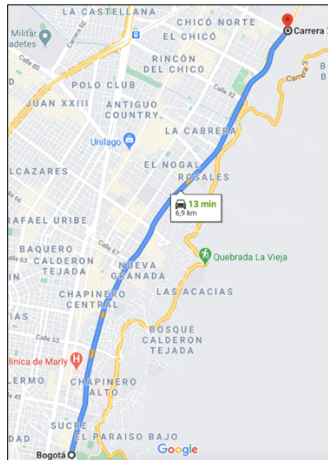
Recuperado de: Boletín Carrera Séptima No. 4 ISSN 2027-1026

https://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/2032/7494_boletin_movilidad_Carrera7_edicion_especial_1_301110.pdf?sequence=1

De acuerdo con las evaluaciones presentadas anteriormente, el corredor verde se implementará en el tramo que comprende desde la Calle 40 hasta la Calle 100 de la Carrera Séptima, que consta de 6,9 km, debido a que es en el que se presenta mayor congestión, mayor flujo vehicular y donde se encuentran nodos con mayor demanda. A continuación, se presenta el mapa del tramo seleccionado:

Imagen 1.

Tramo seleccionado de la Carrera Séptima.



Fuente: Google Maps (2020). Disponible en: <https://www.google.com/maps/search/google+maps+carrera+septima/>

Actualmente existen diferentes tipos de buses que se pueden implementar para el desarrollo de los sistemas de transporte tales como: diésel, híbrido (diésel-eléctrico), gas y eléctrico. A continuación, se presentan las características de cada uno:

Tabla 5.

Características de los sistemas de transporte.

Tipo de vehículo	Tecnología vehicular	Consumo Diésel (L/100km)	Precio Promedio bus (USD)	Contaminación (CO ₂ e g/mi)
Diésel	Motor de combustión interna diésel	39	\$200,000-\$225,00	2680
Híbrido (diésel-eléctrico)	Motor de combustión diésel y un motor con recarga eléctrica de batería	30	\$280,000-\$340,000	2212
Eléctrico	Motor con recarga eléctrica de batería	0	\$410,000-\$500,000	1078
Gas	Motor de combustión con gas natural vehicular	0	\$390,000-\$480,000	2364

Fuente: Grütter Consulting (2015). Rendimiento Real de Buses Híbridos y Eléctricos. Disponible en: http://www.repic.ch/files/4414/4126/7584/Grutter_FinalReport_esp_web.pdf

Luego de analizar y comparar las variables que identifican a cada uno de los tipos de buses, se ha decidido que, para la implementación del corredor verde sobre la Carrera Séptima, el tipo de bus que se tendrá en cuenta será de tipo eléctrico lo cual contribuirá a apoyar el Plan Distrital de Desarrollo Económico, Social y Ambiental en Bogotá del Acuerdo 761 para el periodo 2020-2024, impulsando la implementación de **energías limpias** que mejoren la calidad del aire a través del impulso a la electrificación de los vehículos que por ahí circulen.

Ahora se presentan las características de los diferentes tipos de buses eléctricos con mayor presencia en el mercado. Éstas serán tenidas en cuenta para la selección de bus:

Tabla 6.

Comparación de los buses eléctricos con mayor presencia en el mercado

Datos Técnicos	Volvo 7900 Electric	Mercedes-Benz eCitaro	BYD eBus Andino 12	MAN Lion's City 12E
----------------	---------------------	-----------------------	--------------------	---------------------

Motor	Motor eléctrico Volvo I-SAM, 130 kW/1.200 Nm	Eje propulsor ZF AVE 130 con motores junto a los cubos de rueda	AC motor de magneto permanente acoplados directamente a ruedas eje trasero	Motor central eléctrico
Potencia	200 kW	250kW	300kW	240kW
Torque	1.200Nm	2 x 485 Nm	1.100Nm	2.100 Nm.
Longitud de chasis	12m	12,135m	12m	12m
Peso Bruto Vehicular	19.500kg	20.000kg	19.600 kg	19.500kg
Neumáticos	275/70R 22.5	275/70 R22,5	295/80cR22,5	295/80 R 22, 5
Capacidad de pasajeros	105	90	80	88
Capacidad de la batería	200-250 Kwh	252 Kwh	324Kwh	480Kwh
Numero de sillas	35	29	35	25
Voltaje	600V	750V	540V	750V
Tiempo de carga	6 min	2h	2h	2-3h
Vida Útil	15 año	15 años	15 años	15 años
Costo de adquisición	450,000USD	500,000USD	380,000USD	400,000USD
Autonomía (km recorrido)	200km	170km	>350km	270km

Fuente: Elaboración propia a partir de *eCitaro*. (2020); *Volvo 7900 Eléctrico*. (2020); *eMovility*. (2020); *BYD*. (2020).

Una vez han sido identificadas las variables descritas en la Tabla 6, se destacan elementos asociados a autonomía, capacidad de pasajeros, vida útil, potencia, voltaje y capacidad de batería. En ese sentido, luego de analizar cada una de las cuatro alternativas de buses eléctricos se ha determinado que la opción que satisface los requerimientos y que mayor impacto positivo generaría es el eBus Andino 12 de la empresa BYD.

5.1 Propuesta del modelo operativo

Para diseñar el corredor verde, se inició con el análisis de la demanda del tramo seleccionado, lo cual facilitó la localización geográfica de los orígenes y destinos, permitiendo así una identificación adecuada de las características necesarias del sistema para satisfacer las necesidades de los usuarios. La demanda correspondiente al tramo comprendido entre la calle 40 y la calle 100 de la Carrera Séptima es de 9200 pasajeros/hora (Alcaldía de Bogotá, 2017). Posteriormente, se decidió implementar una estructura de sistema cerrado que consiste en limitar a un número de vehículos y operadores.

Ahora bien, para lograr un sistema que contemple una alta velocidad y capacidad se deben tener en cuenta tanto las diferentes variables involucradas en un diseño operacional, como sus características de diseño operacional, las bahías de parada múltiple en estaciones, los vehículos articulados con varias puertas anchas, el recaudo y la verificación de tarifa, el abordaje a nivel de plataforma y la optimización de la distancia entre estaciones. Para dicho diseño, es importante considerar los puntos que son cuello de botella. Estos serán aquellos lugares, previamente identificados, en donde se presenta mayor congestión vehicular.

Uno de los mecanismos que permitirá obtener una mejora en términos de velocidad y capacidad, es el sistema de transporte Inteligente (ITS), que brinda una oportunidad al sistema de seguimiento, control y localización de los operadores. Adicionalmente, se implementará un carril de uso exclusivo para bicicletas, que permitirá a los usuarios otra alternativa de transporte cero emisiones.

Para el cálculo del tamaño operativo de la flota para un corredor, se utilizó la fórmula de la Guía de Planificación de Sistemas BRT:

$$Fo = \frac{D * Tc}{Cb}$$

Formula 2. Cálculo del tamaño operativo

En donde Fo es el tamaño operacional de la flota por corredor; D corresponde a la demanda en el tramo crítico (pasajeros/hora); Tc corresponde al tiempo de desplazamiento para un ciclo completo (horas) y, Cb está asociada a la capacidad del vehículo (pasajeros/vehículo).

En este caso, la demanda del tramo seleccionado es de 9200 pasajeros/hora. El vehículo tiene una capacidad operativa de 80 pasajeros y se requiere de 40 minutos (0,7 horas) para completar el ciclo del corredor. En consecuencia, la estimación del tamaño operacional de la flota es: 80 vehículos.

Es importante mencionar que, la distancia entre estaciones es uno de los factores que afecta la capacidad y la velocidad del sistema BRT. Por lo tanto, de acuerdo con la Guía de Planificación de Sistemas BRT, la mejor forma de minimizar los tiempos de desplazamiento es ubicar las estaciones cerca de instituciones educativas, intersecciones con mayor demanda de flujo, complejos de oficina o residencias, sectores financieros, centros comerciales y puntos donde exista mayor congestión. De acuerdo con esto, la distancia entre estaciones para un corredor BRT es de 500 metros entre estaciones, teniendo en cuenta que el tramo seleccionado comprende 6,9 Km, se calculó el número de paraderos correspondientes al corredor verde de acuerdo con la siguiente formula:

$$\text{Número de paraderos} = \frac{6,9 \text{ km} * 1000}{500} = 13 \text{ paraderos}$$

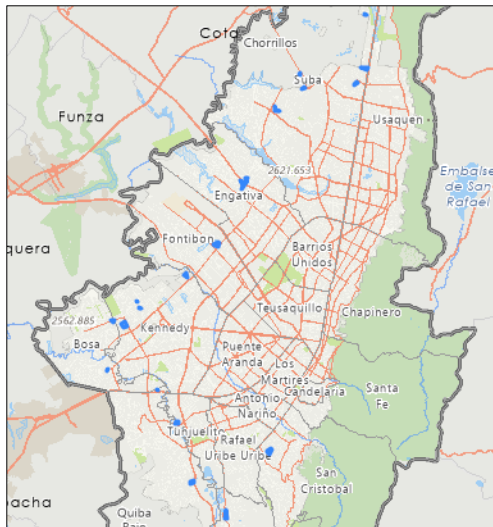
Fórmula 3. Cálculo del número de paraderos

Se debe tener en cuenta que el corredor vial tiene un doble sentido, por lo cual se tendrían que implementar estos paraderos tanto en el sentido norte-sur, como en el sentido sur-norte obteniendo un total de 26 paraderos.

Por otro lado, de acuerdo con la información de Datos Abiertos Bogotá, actualmente se cuenta con 19 parqueaderos. Estos parqueaderos se encuentran distribuidos en la ciudad para facilitar el desplazamiento de los vehículos al finalizar su jornada. Los vehículos que transitarán el corredor verde serán ubicados en los patios de Usme y Fontibón, debido a que en ellos actualmente se encuentran los puntos de carga. En cada patio se ubicará un total de 40 buses eléctricos. A continuación, se presenta la ubicación de los parqueaderos que se encuentran resaltados en color azul:

Imagen 2.

Ubicación de los patios troncales en Bogotá.



Disponible en:

<https://www.datos.gov.co/dataset/Patios-Troncales-de-Transmilenio/kdhw-6rk7>

5.2 Propuesta Modelo Financiero

En Colombia, el sector de transporte es el mayor consumidor de energía debido a que es dependiente de los combustibles fósiles por lo cual, el Ministerio de Minas y Energía (MME) propuso en el año 2016 el Programa de Uso racional y Eficiente de Energía y demás Formas de Energía No Convencionales (PROURE), con el fin de lograr el reemplazo de la flota de combustión del sector oficial por una flota de vehículos eléctricos. Dentro de los incentivos tributarios de acogerse a este programa, se encuentra la deducción de la renta líquida, la exclusión del IVA, y la exención de arancel (MME & UPME, 2016, pp 97-98).

Se pudo determinar que la inversión inicial es de \$488,740,151,703, distribuida en un año de obra, sin tener en cuenta los estudios que se deban realizar. Esta inversión incluye los costos relacionados con la adecuación de la vía, la construcción de los paraderos y estacionamientos de bicicletas, la compra de los buses [para los cuales se ajustó el costo de adquisición de estos](#), el sistema de pago y recolección de la tarifa, y toda la maquinaria y personal necesario para tal fin. En el año 2017 se aprobó un presupuesto acorde con las inversiones que se querían realizar en la Carrera Séptima. Dicho presupuesto osciló alrededor de 2,4 billones de pesos y se encuentra documentado en el CONPES 3900 de 2017 “Apoyo del Gobierno Nacional al sistema de transporte público de Bogotá y declaratoria de importancia estratégica”.

Los ingresos y costos del proyecto han sido proyectados con un aumento acorde con el IPC (Índice de Precios al Consumidor), para este se estima un valor promedio a partir del porcentaje de variación de los datos de los últimos diez años (2010 a 2019). Estos se presentan en el Anexo 2. De acuerdo con ello, el valor utilizado para el IPC es de 3,853%.

Para calcular los ingresos, primero se estableció la tarifa que el usuario deberá pagar para utilizar el sistema. Este cálculo financiero se realizó a partir de tres escenarios. El primero un escenario donde la tarifa es semejante al valor del Sitp \$2,300; el segundo donde la tarifa es similar al Transmilenio \$2,500 y el tercero una tarifa calculada a partir de los costos operacionales y de la cantidad de pasajeros pagos que se estima que el sistema tenga, dicha tarifa fue trazada en \$2,000.

Una vez comparados los resultados obtenidos con estos tres valores, se determinó que la tarifa que más se ajusta al sistema para el primer año es de \$2,200. Esta tarifa se calculó como el promedio de las tres anteriormente mencionadas, teniendo en cuenta que con ésta los ingresos permiten no solo cubrir los costos operacionales del sistema, sino que también facilitan empezar a cubrir el costo de inversión inicial.

Con respecto a los costos operacionales, se tuvieron en cuenta los salarios del personal (conductores, mecánicos, personal administrativo), la electricidad consumida por los buses, el mantenimiento de estos, la operación y

mantenimiento del sistema de recaudo, la operación y mantenimiento de la infraestructura, la operación y control del sistema, entre otros. Así mismo, se estableció un valor asociado a los imprevistos que se puedan presentar en la operación. Estos valores se calcularon para 15 años y van incrementando como se menciona anteriormente, de acuerdo con el promedio del IPC calculado. También se calcularon los gastos operacionales, los cuales se clasifican en los gastos administrativos y aquellos relacionados con el proyecto en los que se destacan gestión social, comunicaciones, entre otros, los cuales resultan en \$2,000,000,000 para el primer año.

Tabla 7.
Inversión inicial

Inversión Inicial					
Componente	Costo por unidad	Unidades de medida	Cantidad	Costo	Costo total COP
Estudio y diseño					\$18.000.000.000
Asfalto	800000	US por kilómetro	14	\$11.200.000	\$42.945.392.000
Bloques de separación	5000	US por kilómetro	14	\$70.000	\$268.408.700
Paisajismo	30000	US por kilómetro	14	\$420.000	\$1.610.452.200
Paraderos	100000	US por unidad	26	\$2.600.000	\$9.969.466.000
Estacionamiento bicicletas	8000	US por unidad	13	\$104.000	\$398.778.640
Señalización de los paraderos	800	US por unidad	26	\$20.800	\$79.755.728
Buses	282965	US por unidad	80	\$22.637.200	\$82.313.386.640
Tarjeta Inteligente	3,5	US por tarjeta	100000	\$350.000	\$1.351.696.500
Sistema de recolección	25000	US por unidad	80	\$2.000.000	\$7.723.980.000
Centro de control	2000000	US por unidad	1	\$2.000.000	\$7.723.980.000
Control de vehículos por GPS	1300000	US	-	\$1.300.000	\$5.020.587.000
Personal	-	Peso Colombiano	-	-	\$1.855.200.000
Máquinaria	-	US	-	\$105.000	\$403.698.750
Mantenimiento y operación	-	Peso Colombiano	-	-	\$80.000.000.000
Plan manejo de tráfico	-	Peso Colombiano	-	-	\$500.000.000
Actividades ambientales	-	Peso Colombiano	-	-	\$1.000.000.000
Ajustes	-	Peso Colombiano	-	-	\$520.000.000
Total					\$261.684.782.158
A.I.U	-	-	-	-	\$73.271.739.004
Total					\$334.956.521.162

Elaboración propia.

A partir de los ingresos que se busca generar con la operación del sistema, se realizó el estado de pérdidas y ganancias contemplando los costos y gastos tomados de los parámetros anteriormente descritos en un horizonte de tiempo de 15 años. Como se puede observar en el Anexo 2. Para el primer año de operación se obtiene una utilidad neta de \$1.519.312.100; la cual aumenta gradualmente en el horizonte de planeación.

A partir del estudio financiero realizado para la construcción y operación del corredor verde planteado, se realizó un análisis a profundidad de la factibilidad del proyecto en términos económicos, para determinar el beneficio a corto y mediano plazo de su ejecución.

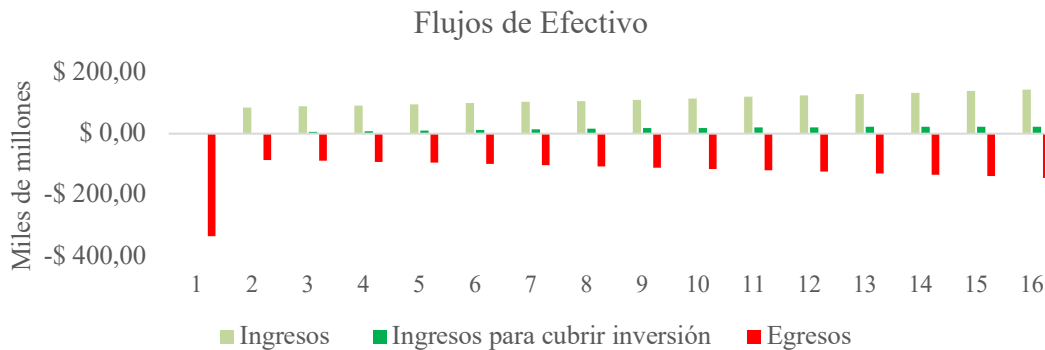
El resultado del análisis muestra la inversión inicial, **teniendo en cuenta los ajustes realizados**, que se estimó por un valor de COP \$334.956.521.162, la cual será distribuida en el primer año debido a que es el tiempo estimado para la construcción del corredor verde. A partir del año 1 se espera empezar con la operación del sistema, por lo cual **se ha hecho una estimación respecto a la demanda estimada de un nuevo servicio público**, obteniendo un ingreso

aproximado de COP \$87.516.000.000, incrementando su valor anualmente y estimando el valor futuro de acuerdo con el IPC. Dado que se tiene una obligación alta, debido al presupuesto que se utilizó para mantener un estado de liquidez positiva en los años, se mantiene siempre un incremento en la utilidad neta de la operación. Esto evidencia un buen comportamiento a lo largo del tiempo.

Para un análisis a profundidad, se calcularon algunos indicadores [financieros teniendo en cuenta la estimación de la demanda realizada](#), que ayudan a evaluar la viabilidad del proyecto en el horizonte de planeación de 15 años. Primero se calculó el VPN (Valor Presente Neto), el cual se estima en -\$ 99.883.422.345. Como complemento se calculó la TIR (Tasa Interna de Retorno) la cual da un valor de 3,26%. Por otro lado, se calculó el PRI (Periodo de Recuperación de la Inversión), con el fin de establecer el tiempo en el cual se recuperará la inversión inicial del Corredor Verde, este dio 19,33 años, [superando los años de proyección del proyecto](#).

En la siguiente gráfica se presentan los flujos de efectivo para los 15 años, en color rojo se representan la inversión inicial y los diferentes costos operativos que se presentan a lo largo de los años. En color verde claro se muestran los ingresos que cubren los costos operativos del sistema y en verde oscuro, los que ayudan a amortizar la inversión a lo largo del horizonte.

Gráfico 5.
Flujos de efectivo



Elaboración propia.

[Para conocer con mayor detalle el estudio financiero realizado para este proyecto, dirigirse al Anexo 2.](#)

5.3 Modelo de simulación

Para la simulación del corredor verde, se definió el uso de la herramienta NetLogo. Este es un software de simulación programable multi-agente de código abierto. Dicho software fue seleccionado de acuerdo con su lenguaje de programación simple y potente, que cuenta con una interfaz gráfica incorporada y documentación completa que permite replicarlo a través de la construcción de diferentes modelos asociados a sistemas productivos (Railsback Et Al., 2006).

NetLogo tiene la aplicabilidad de diferentes sistemas de simulación, y es adecuado para modelar sistemas complejos que evolucionan en el tiempo, modelar centenares o miles de individuos (autos, buses, personas, bacterias, organizaciones, etc.) que interactúan entre sí en un mismo entorno. Es una herramienta que también permite analizar las interacciones locales a nivel de individuos y los patrones que emergen de dichas interacciones en sistemas de transporte (NetLogo Fundamentos, 2019).

A nivel de transporte, NetLogo ha sido utilizado como programa de micro simulación para el control de tráfico, simulación de intersecciones de calles en un contexto de multiagentes y simulación de tráfico de autos. En el artículo “Sistema Dinámico y Adaptativo para el Control del Tráfico de una Intersección de Calles: Modelación y Simulación de un Sistema Multiagente” de Batolla, Et. Al (2018) de la Universidad Austral de Buenos Aires- Argentina, se utilizó

NetLogo para representar la reducción del tiempo de espera de conductores en una intersección, por medio de la variación de la frecuencia de los vehículos.

De igual manera, Camacho, Et. Al (2012) llevaron a cabo un estudio con el Departamento de Ingeniería de la Universidad de los Andes en Venezuela, en donde se realizó el desarrollo de un modelo multiagente para el flujo de automóviles presentes en una intersección utilizando NetLogo como plataforma de desarrollo. En este estudio se simularon diferentes escenarios de interés, con el fin de explorar los cambios en el comportamiento del sistema de movilidad y validar qué tan apropiadas son las estrategias de control de tráfico de autos aplicadas en las redes urbanas a nivel local. Los resultados de esta simulación permitieron evaluar el comportamiento del modelo vs la realidad.

Así pues, los componentes principales del entorno de programación son: agentes móviles (tortugas), agentes estacionarios (parches), variables y procedimientos, los cuales son programables según las necesidades del usuario. Los componentes de NetLogo fueron configurados de acuerdo con las siguientes características:

5.3.1 Agentes estacionarios

Para esta propuesta se realizó un modelo a escala en el que cada *patch* representa el ancho del carril con medidas de 3.25 m de ancho y 3.25 m de largo, los de color gris representan la vía y los de color verde representan el tramo peatonal. Se identificó que desde la calle 40 a la calle 100 de la Carrera Séptima se cuenta con tres carriles principales. En el modelo, cada carril se separa con una línea horizontal representada en el eje y en las coordenadas -1, 0, y 1. Se realizó un video en el que se muestra la simulación del corredor verde, para visualizarlo, el lector se puede dirigir al Anexo 3.

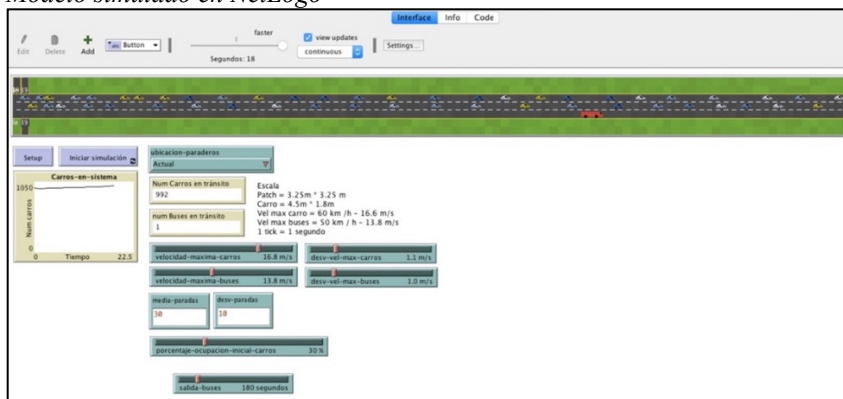
A continuación, se describen los supuestos que han sido identificados para el desarrollo del modelo de simulación:

- Se realizaron dos modelos por separado, uno por cada sentido (norte a sur y sur a norte), esto debido a que el programa no soporta la cantidad de elementos necesarios para simular los dos sentidos a la vez.
- No se tomaron en cuenta las curvas.
- Se estimó que la lógica de los conductores es perfecta² y que no toman decisiones emocionales sino solamente lógicas dependiendo de las leyes de tránsito y de los otros conductores.
- Por simplicidad del modelo no se incluyeron las motos ni los accidentes de tránsito.

A continuación, se muestra una imagen de la interfaz gráfica del modelo:

Imagen 3.

Modelo simulado en NetLogo



Elaboración propia.

² Los conductores manejan de acuerdo a las normas de tránsito, no sobrepasan la velocidad máxima establecida y no se estrellan.

Para medir las distancias correspondientes a las calles principales se utilizó la herramienta Google Maps, con el fin de conocer cuáles eran las calles más importantes que se interceptan con la Carrera Séptima y conocer los principales puntos de aglomeración. El tramo de la Carrera Séptima escogido tiene un total de 6,9 km por los que transitan carros, buses, bicicletas y motos. Los puntos de aglomeración afectan el modelo debido a que los tiempos de los buses en los paraderos son mayores, en el Anexo 4. se pueden observar dichos puntos.

Para la propuesta de corredor verde se simularon dos escenarios:

Tabla 8.
Escenarios propuestos.

Escenario	Tipo de Vehículo	Distancia entre paraderos
Primer escenario	Carros	N-A
	Buses	Distancias actuales
Segundo escenario	Carros	N-A
	Buses	500 m

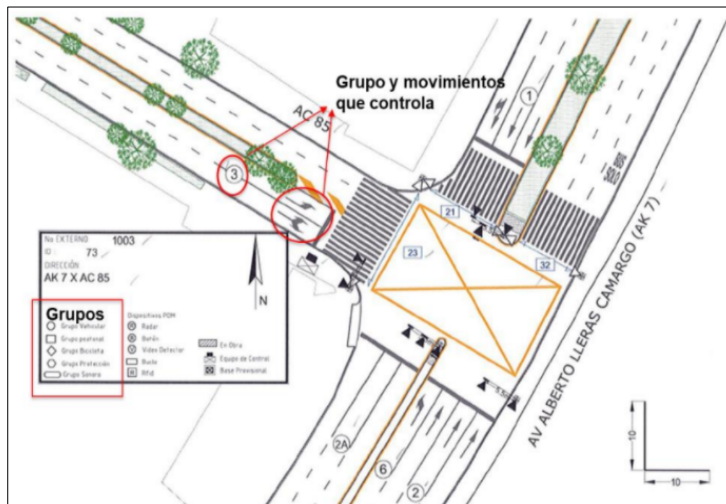
Elaboración propia.

Para el primer escenario, la distancia actual de los paraderos mencionada se puede ver en el Anexo 5.

Para establecer los tiempos de los semáforos, se utilizaron como base los planeamientos semafóricos compartidos por la Secretaria Distrital de Movilidad, para más información ver el Anexo 6. Para cada uno de estos hay unos planes establecidos según el día de la semana y el horario en el que se esté, para la simulación se escogió el plan correspondiente al horario de 6:30 am a 7:30 am.

Cada uno de los planeamientos contiene el esquema de la intersección, en donde se pueden observar los movimientos permitidos y el grupo semafórico que los controla. En la siguiente imagen, se muestra el esquema para la intersección de la Calle 85 con 7.

Imagen 2.
Esquema intersección Calle 85.

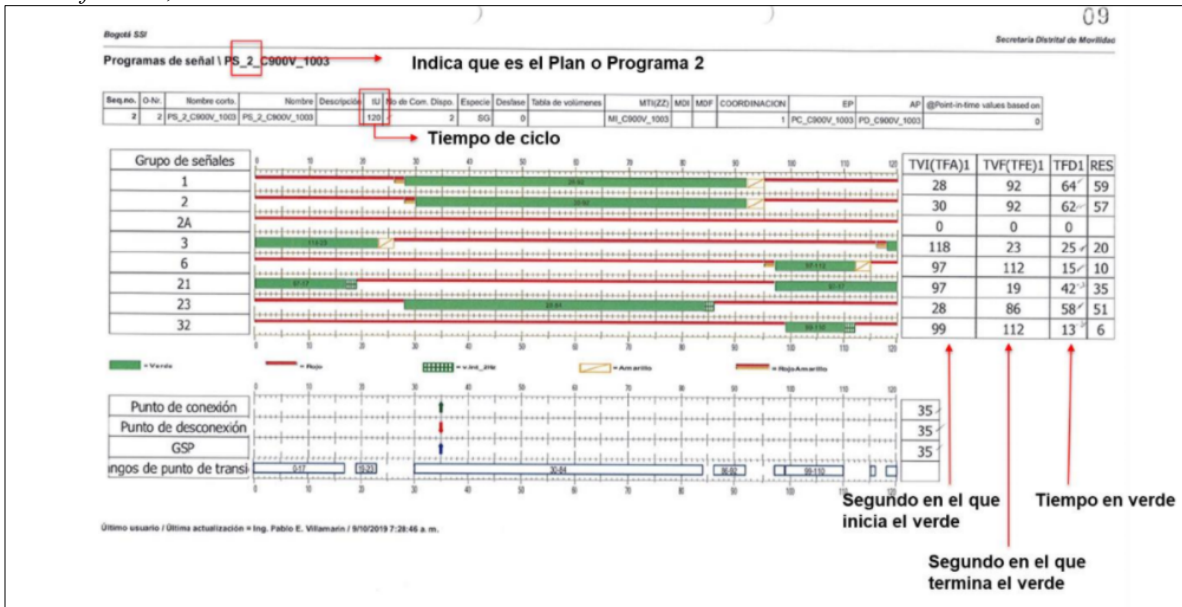


En este caso, para el acceso occidental, los movimientos Occidente-Norte y Occidente-Sur son controlados por el grupo de señales 3, en el caso del acceso sur, el giro Sur-Occidente es controlado por el grupo 6 y los directos Sur-Norte por el grupo 2. Todos los movimientos del acceso Norte son controlados por el grupo 1.

Conociendo la definición de los grupos y el plan escogido, es posible leer el planeamiento semafórico. Para el caso del grupo 3, el tiempo en verde inicia en el segundo 118 y termina en el segundo 23, es decir, tiene 25 segundos de verde, 3 de amarillo y 90 de rojo, como se puede ver en la imagen 3 a continuación:

Fuente: Secretaria Distrital de Movilidad, Acta de entrega del planeamiento semafórico, (2019)

Imagen 3.
Plan semafórico 2, intersección calle 85.



Fuente: Secretaria Distrital de Movilidad, Acta de entrega del planeamiento semafórico, (2019).

Este mismo proceso se realizó para cada una de las intersecciones presentes en el tramo escogido de la Carrera Séptima, para así asignar tiempos más cercanos a la realidad en la simulación. La información recolectada se encuentra en el Anexo 7.

5.3.2 Agentes móviles

Para los agentes móviles se manejó una escala de m/s para facilidad de visualización en el programa:

Tabla 9.

Escala del modelo en NetLogo

Vehículo	Velocidad máxima	Medidas reales a escala	Tiempo en los paraderos
Bus	13.8 m/s	12 m *1.8 m	30 seg
Carro	13.8 m/s	4.5 m*1.8 m	N/A

Elaboración propia.

Para la representación del carro, se tomaron medidas promedio de 4.5m *1.8m de acuerdo con el promedio de las medidas de los automóviles en Colombia (Automóviles Colombia, 2011). Para la representación del bus, se tomó como referencia el bus de la propuesta que tiene 12 m de largo y en la simulación su medida a escala es 12 m*1.8m. Adicionalmente, se tuvo en cuenta la tasa en la que vehículos y buses entran a la calle 40 de la Carrera Séptima:

Tabla 10.

Tasa de entrada de vehículos que entran a la calle 40 de la Carrera Séptima.

Tipo de vehículo	Tasa de entrada
Carro	4400 vehículos/hora
Buses	20 buses/hora

Elaboración propia.

Los carros, funcionan con las siguientes variables:

Tabla 11.*Variables para los carros en NetLogo*

Variable	Definición
<i>Speed</i>	Velocidad actual de los carros en el tiempo T_i
<i>Lane</i>	Carril actual por el cual transitan los carros
<i>Patience</i>	Número de veces que un carro puede frenar antes de querer cambiarse de carril
<i>Target-lane</i>	Carril elegido por un carro al momento de decidir que va a realizar un cambio de carril
<i>Aceleration</i>	Aumento de velocidad de un auto
<i>Deceleration</i>	Cambio en la velocidad cuando un auto quiere frenar
<i>Top-speed</i>	Velocidad máxima
<i>Min-speed</i>	Velocidad mínima a la que puede andar un carro
<i>Max-patience</i>	Nivel de tolerancia de un conductor antes de cambiarse de carril
<i>Target-final</i>	Destino del auto
<i>Bloking-Carro</i>	Es el carro más cercano que va en el mismo carril
<i>Semaforos-cercanos</i>	Indica cual es el semáforo más cercano

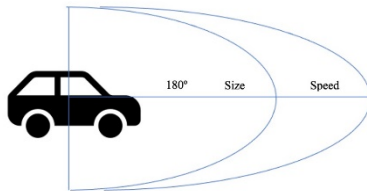
Elaboración propia.

Los carros se mueven en línea recta por su carril y tienen la autonomía de tomar la decisión de acelerar y desacelerar dependiendo de la distancia que haya entre cada carro con el carro más cercano. Cada segundo en el modelo de NetLogo, los carros toman esta decisión de la siguiente manera:

Tabla 12. Pseudocódigo para la programación de la toma de decisiones de los carros

1	set blocking-carro min-one-of (other carros in-cone (1.25 + 1.3 + 6 * speed) 180 with
2	[target-lane = [target-lane] of myself]) [distance myself]
3	set semaforos-cercanos min-one-of semaforos with [color = red] in-cone (1.25 + 1 + 6 *
4	speed) 180 [distance myself]

Elaboración propia.

Imagen 4.*Visión en cono de los carros.*

A cada carro se le asignó una visión en cono de 180 grados y una distancia que depende de la velocidad actual del carro, esto se da porque si un auto va más despacio mira a una distancia más corta. En cambio, si el auto va a una velocidad más alta su visión alcanza un mayor grado de distancia. Esta condición la aplican tanto al ir hacia adelante como al cambiar de carril.

Elaboración propia.

Al aparecer cada carro se le asigna un nivel de paciencia $10 + \text{random } 20$, que disminuye en una unidad cada vez que el carro tiene que frenar o desacelerar debido a una condición externa. Al llegar su paciencia a 0, el carro evalúa si cambiarse de carril es una opción viable y además decide cuál es el mejor carril según la visión que tiene a 15 metros. Si el carro decide que sus dos opciones de cambiarse de carril son igual de buenas elige una de las dos opciones al azar, esto lo hace mediante la siguiente función:

Tabla 13. Pseudocódigo para la programación de las posibles opciones para el cambio de carril.

1	to choose-new-lane;
2	let carril-izquierdo 999
3	let carril-derecho 999
4	if ycor = 0 or ycor = -1 [set carril-izquierdo count carros with [ycor = ycor + 1] in-cone
5	10 180]
6	if ycor = 0 or ycor = 1 [set carril-derecho count carros with [ycor = ycor - 1] in-cone 10
7	180]
8	ifelse carril-izquierdo > carril-derecho

```

9 | [set target-lane ycor - 1]
10 | [set target-lane ycor + 1]
11 | if carril-izquierdo = carril-derecho [set target-lane one-of [1 -1]]
12 | set heading ifelse-value ycor > target-lane [135] [45]
13 | set patience random max-patience + 20
14 | end

```

Elaboración propia.

Para el cálculo de la aceleración se tomó en cuenta el tiempo en que un carro se demora para acelerar de 0 a 60 km. Debido a que no todos los carros aceleran de igual manera, se decidió tener en cuenta un número aleatorio entre 0 y 1 para representar esta diferencia, en donde los carros más lentos tienen un número cercano a 0 y los más rápidos tienen el número más cercano a 1; de esta manera se obtuvo el cálculo:

$$\text{aceleración} = 2,5 m + (\text{núm aleatorio entre } 0 \text{ y } 1)$$

Para la desaceleración, se tuvo en cuenta que los carros desaceleran más rápido de lo que se aceleran y esto depende de la velocidad a la que el carro se desplace.

El movimiento de los carros se rige por la evaluación de las siguientes condiciones donde lo más importante es si tiene un carro adelante o si tiene un semáforo adelante. Si no tiene un carro adelante y no tiene semáforos adelante, el carro toma la decisión de acelerar. Si no tiene un carro adelante, pero tiene un semáforo en rojo, el carro siempre respeta la norma de tránsito. Además de ello, no se tuvieron en cuenta las faltas de tránsito debido a que no es una variable que influye en el modelo propuesto:

Tabla 14. Pseudocódigo para la programación de la toma de decisiones de los carros

```

1 | ifelse blocking-carro = nobody
2 | [ifelse semaforos-cercanos = nobody
3 | [speed-up-carro]
4 | [detenerse-semaforos]]
5 | [ifelse semaforos-cercanos = nobody
6 | [slow-down-carro
7 | set patience patience - 1
8 | if patience <= 0 [choose-new-lane move-to-target-lane]]
9 | [ifelse distance blocking-carro > distance semaforos-cercanos
10|11|2 | [detenerse-semaforos][
11 | set patience patience - 1
12 | slow-down-carro]]

```

Elaboración propia.

Los carros desaceleran dependiendo del punto en el cual toman la decisión de disminuir su velocidad. Es decir, entre más velocidad tenga un carro va a requerir más segundos para desacelerar. Si se encuentra con otro carro adelante, este disminuye su velocidad tomando la velocidad que tiene el carro de enfrente en el caso de que los dos vayan andando.

De acuerdo con el Programa de Gestión de la velocidad de la Alcaldía Mayor de Bogotá, la velocidad promedio en hora pico no supera los 20 km/h, (Alcaldía de Bogotá, 2019) y la velocidad en hora valle es de aproximadamente 26 km/h por lo cual se tuvo en cuenta esta velocidad como uno de los parámetros requeridos para la construcción modelo.

Los buses tienen su carril exclusivo, recogen en todos los paraderos, su tiempo de parada depende del tráfico de personas por la zona y de los puntos de aglomeración y funcionan con las siguientes variables:

Tabla 15.

Variables para los buses en NetLogo.

Variable	Definición
<i>Speed</i>	Velocidad actual de los buses en el tiempo T_i

<i>Lane</i>	Carril actual por el cual transitan los buses
<i>Acceleration</i>	Aumento de velocidad de un bus
<i>Deceleration</i>	Cambio en la velocidad cuando un bus quiere frenar
<i>Top-speed</i>	Velocidad máxima
<i>Min-speed</i>	Velocidad mínima a la que puede andar un carro
<i>Bloking-Bus</i>	Es el bus más cercano que va en el mismo carril
<i>Semaforos-cercanos</i>	Indica cual es el semáforo más cercano

Autoría propia.

Para los buses no se tendrá en cuenta el parámetro de la visión, ya que estos no tienen la posibilidad del cambio de carril debido a que solo tienen un carril habilitado. Por esta razón para los buses no se tuvo en cuenta la variable *Patience* ya que para la simulación los buses no adelantan. Se realizó un instructivo del modelo de simulación en donde se puede encontrar a detalle el modelamiento de la propuesta, para visualizarlo diríjase al Anexo 8.

Para ver la simulación del modelo de la propuesta sentido Sur-Norte diríjase al Anexo 9, para visualizar los resultados obtenidos de esta simulación diríjase al Anexo 10. Para ver la simulación del modelo de la propuesta sentido Norte-Sur diríjase al Anexo 11, para visualizar los resultados obtenidos de esta simulación diríjase al Anexo 12.

5.4 Medición del impacto económico y ambiental de la propuesta

Con la medición de estos indicadores se busca evaluar de una manera eficiente el funcionamiento del corredor verde con el objetivo de evaluar la sostenibilidad a un plazo de 15 años. Lo anterior permitirá identificar, medir y evaluar el impacto de la propuesta del corredor verde y posteriormente caracterizar la sostenibilidad de la propuesta.

8.1 Metodología de selección de KPI's:

El enfoque empleado para la selección de los indicadores de rendimiento es la propuesta por Christopher Palsson (2010b, p. 16), en la cual se propone el uso de una metodología de selección acorde a los objetivos y alcance del proyecto, ésta se resume en los siguientes apartados:

1. Revisión del estado del arte de publicaciones y proyectos de investigación que evalúan corredores de transporte ambientales en los aspectos metodológicos y los indicadores utilizados identificando factores críticos que afectan al resultado.
2. Recolectar en una lista los indicadores de interés.
3. Seleccionar un número de indicadores representativos.
4. Realizar un segundo filtro de la lista inicial y seleccionar los indicadores que se medirán.

De acuerdo con el Congreso celebrado en Gotemburgo en mayo del 2010, se acordó agrupar los KPI's en 5 grupos principales: Eficiencia, calidad del servicio, sostenibilidad ambiental, suficiencia en infraestructura y aspectos sociales. Teniendo en cuenta la propuesta que se quiere realizar, se identificaron los siguientes indicadores de interés:

Tabla 16.

Propuesta de indicadores de interés.

Indicador	Unidad
Duración del transporte	h
Sostenibilidad ambiental	g/m
Velocidad del transporte	Km/h
Flujo	Carros/h
Cuello de botella	Carros/h

Elaboración propia.

Después de comparar y analizar se seleccionaron los siguientes indicadores:

1. Sostenibilidad ambiental: Este grupo de indicadores refleja las emisiones de los principales contaminantes (emisiones de, P.M) que describen el impacto sobre el clima, así como la relación indirecta de los combustibles renovables que se utilizan.
2. Duración del transporte: Este indicador hace referencia a cuánto tiempo se demoraría un carro o bus en cruzar el tramo.
3. Velocidad de transporte: Este indicador hace referencia al tiempo promedio de velocidad de carros y buses en su recorrido por la Carrera Séptima.
4. Cuello de Botella: Este indicador busca realizar una evaluación del estado de los diferentes tipos de cuellos de botella, teniendo en cuenta barreras relacionadas con la capacidad de las vías como carriles únicos.
5. Flujo: Este indicador cuenta el número de carros cada 100 metros de distancia en donde se busca evidenciar en donde se acumulan los carros, puntos de interés para mejorar la Carrera Séptima.

5.5 Verificación del modelo

Para el análisis de los resultados se realizaron pruebas estadísticas en SPSS para 39 muestras por escenario. Para el modelo en sentido Sur – Norte (3 carriles) el primer escenario corresponde a la ubicación actual de los paraderos y el segundo escenario corresponde a la ubicación de los paraderos cada 500 metros, de igual manera se realizó el análisis para el modelo en sentido Norte – Sur (2 carriles) (Kirk, 2012).

Para este modelo, se realizaron estadísticos descriptivos, pruebas de normalidad (Kolmogórov-Smirnov) en donde todas las variables son normales, por eso, se aplicó la siguiente prueba de correlación:

Prueba de Correlación bivariada, la cual está basada en la asociación lineal, es decir, cuando los valores de una variable aumentan los valores de la otra variable pueden disminuir o aumentar proporcionalmente, se trabajó adicionalmente con la correlación de Pearson que es uno de los dos tipos de correlación bivariada que existen debido a que todas las variables del estudio siguen la curva normal (Sagaró, Zamora).

Para analizar la correlación bivariada se tuvo en cuenta el nivel de significancia, el cual indica si existe o no asociación entre dos variables. Cuando la significancia es menor a 0,05 si existe asociación entre las variables. Se definieron 6 hipótesis de evaluación con sus respectivas variables, a continuación, se presentan las hipótesis planteadas con su respectiva conclusión:

Tabla 17.

Hipótesis para la verificación del modelo.

Hipótesis	Variables	Resultado	Conclusión
1. La ubicación de los paraderos de buses influye en el tiempo de recorrido de los buses	-Distancia entre paraderos -Tiempo promedio de viajes	Significancia bilateral= 0,01	Existe una asociación entre la ubicación de los paraderos y el tiempo de recorrido de los buses, en la ubicación actual aumenta el tiempo de recorrido total de los buses
2. Entre más velocidad menos tiempo requiere el recorrido del trayecto	-Distancia entre paraderos -Velocidad promedio de los buses	Significancia bilateral= 0,00	Existe una asociación entre las variables, entre más velocidad el trayecto dura menos
3. La distancia entre paraderos influye en la	-Distancia entre paraderos	Significancia bilateral= 0,03	Existe una asociación entre las variables, la distancia a la que se

velocidad promedio de los buses	-Velocidad promedio de los buses		encuentran separados los paraderos influye en la velocidad de los buses
4. La distancia entre paraderos debería afectar el movimiento de los carros	-Distancia entre paraderos -Número promedio de carros	Significancia bilateral= 0,727	No existe una asociación entre las variables, la distancia entre paraderos no afecta el movimiento de los carros
5. El uso de un carril para bicicletas disminuye la velocidad promedio de los carros	-Modelo -Velocidad	Significancia bilateral= 0,00	Existe una asociación entre las variables, el uso de un carril exclusivo para bicicletas disminuye la velocidad promedio de carros
6. El uso de un carril para bicicletas genera más congestión en la vía	-Modelo -Count Carros	Significancia bilateral= 0,002	Existe una asociación entre las variables, el uso de un carril exclusivo de bicicletas genera más congestión en la vía

Autoría propia.

El archivo del análisis estadístico en SPSS se puede encontrar en el Anexo 13, para visualizar los resultados del análisis estadístico diríjase al Anexo 14.

5.6 Propuesta modelo ASIS

Con el fin de analizar el comportamiento de los agentes en un contexto más cercano al comportamiento actual de la Carrera Séptima, se realizó un segundo modelo de simulación (Ver anexo 15), en donde se tuvieron en cuenta las variables del modelo anteriormente descrito y adicionalmente se agregaron las siguientes variables:

Tabla 18.

VARIABLES ADICIONALES PARA EL MODELO NÚMERO 2 EN NETLOGO.

Variable	Definición
<i>Blocking -carro</i>	Permite que un bus vea si hay un carro bloqueando su trayecto
<i>Blocking- bus</i>	Permite que un carro vea si hay un bus bloqueando su trayecto
<i>Tiempo de parqueo</i>	Tiempo que se va a demorar un carro si decide parquearse en el carril de los buses

Los carros tienen la autonomía de tomar la decisión de parquearse en el carril de los buses con una probabilidad que puede variar entre 0 a 0.05, esta probabilidad se puede modificar con un *slider* para analizar distintos escenarios. El tiempo de parqueo de un carro que decida parquearse en el carril de los buses se distribuye normal con media de 180 segundos y varianza de 120 segundos. Cada segundo en el modelo de NetLogo, los carros toman esta decisión de la siguiente manera:

Tabla 19. Pseudocódigo para parqueo de carros en el carril de los buses

1	to carros-parqueados-funcion
2	ask carros
3	[let probabilidad-parqueo random-float 100
4	if probabilidad-parqueo < carros-parqueados
5	[if target-lane = 1 or target-lane = 0
6	[set target-lane ycor - 1 move-to-target-lane]
7	if target-lane = -1
8	[set speed 0
9	set color red]
10	

Cuando el carro decide parquear, se cambia al carril de los buses y se pone en color rojo. Si el tiempo de parqueo es 60 segundos, en el segundo 61 el carro mira si puede regresar a su carril, si no es posible sigue parqueado hasta que encuentre el momento en el que pueda salir y retomar su camino. El tiempo de abordaje que se tuvo en cuenta para los buses es de 30 segundos (Arhin et al., J Civil Environ Eng 2015).

En el momento en que los carros deciden salirse de la Carrera Séptima por alguna de las intersecciones, estos disminuyen su velocidad. En este modelo los carros y los buses interactúan, es por esto, que tienen la posibilidad de verse entre ellos, permitiendo que consideren si hay un bus o un carro al frente, para frenar a tiempo o realizar el cambio de carril. Para este modelo de simulación la velocidad que se tuvo en cuenta para los buses en hora pico fue de 17.93 km/h (EL TIEMPO, 2016) y en hora valle 23.03 km/h (fue calculado como una proporción teniendo en cuenta tres criterios (velocidad en hora pico y valle de los carros y velocidad en hora pico de los buses) cuyas fuentes se relacionan en las referencias) y una aceleración de 0.7 m/s².

7. Limitaciones, conclusiones y recomendaciones.

Los vehículos eléctricos generan emisiones asociadas a las materias primas y a su fabricación, que pueden llegar a ser entre 1.3 y 2 veces más alta a la de los vehículos convencionales, sin embargo, todas ellas a lo largo de su ciclo de vida son entre 17% y 31% más bajas que la de un vehículo Diesel y entre 26% y 30% inferiores a la de los vehículos de gasolina. Los vehículos eléctricos no generan emisiones durante su uso ya que no tienen tubo de escape, sin embargo, puede haber contaminación en la generación de la electricidad con la que se recarga su batería (ElDiario, 2018). La reducción de estas emisiones es altamente dependiente de la fuente de electricidad del país, en Colombia el factor de carbono es de 0,34 kgCO₂/kWh (Grütter Consulting, 2015).

Para comparar un vehículo eléctrico con otro convencional durante su uso, hay que considerar no solo las emisiones del motor, sino también las generadas en la obtención del combustible o electricidad. En este caso un bus híbrido produce 2.212 gramos de CO₂ por milla, los de gas natural 2.364 gramos de CO₂ por milla y un eléctrico de características similares produce 1.078 gramos de CO₂ por milla, es decir, entre un 45% y un 48% menos que los demás (Unión of Concerned Scientists, 2019). A partir de estos estudios, se puede evidenciar que la implementación de los buses eléctricos en el Corredor Verde no solo ayudará a disminuir la contaminación que se viene presentando, sino que adicionalmente mejorará la calidad de vida de las personas que se movilizan por este tramo ya que prioriza el transporte sostenible, privilegia al peatón, al ciclista y a las energías limpias. Este corredor verde hará que todos los ciudadanos se puedan desplazar en un ambiente con menos gases contaminantes, más espacios y totalmente eléctrico. (Alcaldía de Bogotá, 2020).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la simulación del modelo propuesto en NetLogo, estos resultados se explican de acuerdo con los KPI's mencionados anteriormente:

Modelo de la propuesta sentido Sur-Norte

La velocidad promedio de los buses en el modelo actual se encuentra en un rango dentro de los 40 km/h y 42 km/h, se evidencia que la velocidad de los buses es mayor a la de los carros debido a que estos cuentan con un carril exclusivo para movilizarse, esto permite que los buses transiten con mayor facilidad. Este carril exclusivo promueve el uso de transporte público al tener una velocidad mayor que la de los carros, generando facilidades de transporte y reducción de tiempo para los pasajeros. Además, presenta los siguientes beneficios: organiza la movilidad, disminuye los tiempos de viaje en bus, elimina el parqueo en la vía, evita el exceso de velocidad, instala paradas fijas y ordenadas y contribuye a la movilidad sostenible (Secretaría de Movilidad de Medellín, 2020). Esta es una investigación que se sale del alcance de este proyecto por lo cual se espera que se logre en futuras investigaciones seguir mejorando en este aspecto de velocidad que es valioso para los pasajeros.

Para los carros, la velocidad promedio se encuentra en un rango dentro de los 14 km/h y 15 km/h, esto se debe, a la cantidad de flujo vehicular que hay sobre la Carrera Séptima, esta cantidad, llega a alcanzar los 1200 carros transitando al tiempo. Esto demuestra la necesidad de estudios propositivos para la mejora del transporte público, el

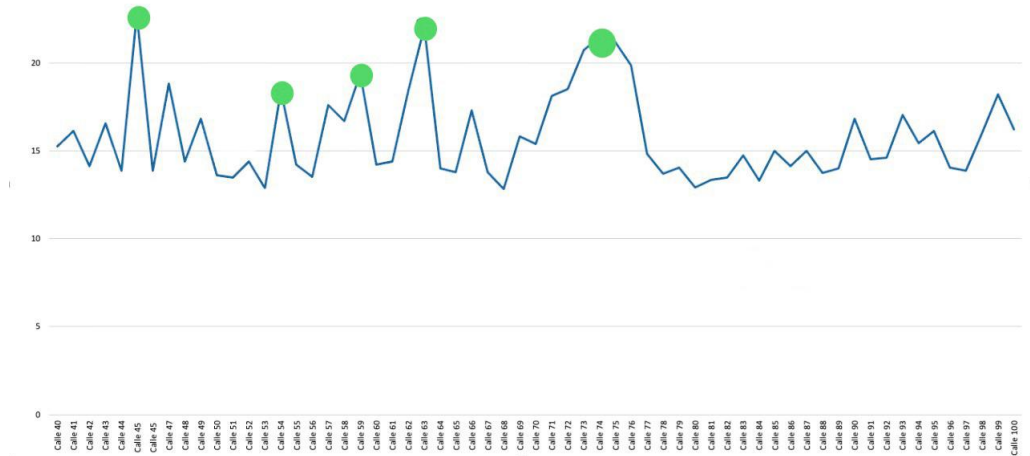
uso de carriles de buses eléctricos y diferentes alternativas que reduzcan la emisión, promuevan el transporte público y el uso de carro compartido.

Los paraderos actualmente en promedio están ubicados cada 295 metros, al estar más cerca, los buses se detienen a recoger pasajeros con una media de 30 segundos generando más tiempo de espera. Con la propuesta de ubicar los paraderos cada 500 metros, se evidencia una disminución en el tiempo promedio de recorrido de los buses, lo que significa una mejora en el sistema. Esta propuesta se basó en la Guía de planificación de Sistemas BRT en la que se evidencia que lo ideal es que los paraderos se encuentren ubicados cada 500 metros.

El promedio de tiempo de recorrido de los carros esta alrededor de los 18 min, esto, debido a que hay carros que toman salidas cercanas a su punto de ingreso a la Carrera Séptima y otros que la recorren completamente. Los puntos de aglomeración más importantes son: Calle 45, Calle 59, Calle 63 y el tramo comprendido entre la Calle 72 y la Calle 76. A continuación, se muestran los puntos con mayor demanda, es decir, los puntos que generan cuellos de botella en el sistema.

Grafica 6.

Puntos que generan cuellos de botella



Elaboración propia.

Los carros transitando la Carrera Séptima en el sentido sur norte, llegaron a ser en promedio 1200 carros, esto afecto la capacidad de NetLogo de computar variables ya que estos eran agentes individuales de toma de decisiones que influían en el resultado del modelo segundo a segundo.

Modelo de la propuesta sentido Norte-Sur

La velocidad promedio de los carros fue menor debido a la reducción a un carril, aunque se encuentra evidencia de lo importante que es el carril de las bicicletas, hay que revisar si el tema en la Carrera Séptima es viable, existen diferentes estudios que demuestran que los carriles de bicicletas empeoran la movilidad y al encontrarse este carril en la Carrera Séptima en donde existe una gran demanda de pasajeros, perjudica la movilidad (20 minutos, 2017).

En cuanto a la duración de los buses, nuevamente fue mayor en el modelo actual, con una media de 1397 mientras que la media de la modelo propuesta fue 1077, los puntos críticos, siguieron siendo los mismos, pero en este modelo de sur a norte disminuyo la cantidad de carros por sector ya que la fila de carros se vuelve más larga y no incluye el segundo carril de carros. Adicional a esto, el número total de carros transitando la Carrera Séptima disminuyo debido a que solo podían movilizarse por un carril.

Para el estudio financiero, se estimaron 15 años para realizar el horizonte de planeación, debido a que esta es la vida útil de los buses. Después del análisis de los indicadores planteados, con un VPN de -\$ 99.883.422.345, una TIR de 3,26% y un PRI de 19,33 años, se pudo evidenciar que a pesar de los valores no son positivos, están acordes a lo que sucede actualmente en todos los sistemas de transporte y además hay que considerar los demás aspectos relacionados con el proyecto

Se recomienda continuar realizando futuras investigaciones sobre propuestas de alternativas sostenibles. Se deja en evidencia la necesidad de seguir profundizando en la investigación de diferentes alternativas que permitan el surgir de diferentes ideas y propuestas que se puedan retro alimenten a favor de los ciudadanos. Se ha evidenciado durante los últimos años que varias ciudades del mundo buscan implementar un sistema de transporte que sea amigable con el ambiente y que al mismo tiempo cumpla las necesidades de los habitantes por lo cual es un tema de gran interés y con un amplio camino de investigación.

Modelo ASIS de la Carrera Séptima

Para el segundo modelo se realizó una corrida en la cual la velocidad de los carros no se vio afectada, esto debido a que son muy pocos los carros que se parquean sobre la Carrera Séptima (calculado como proporción del total de vehículos que se movilizan en el corredor). Adicional a esto, la velocidad no se ve afectada debido a que transitan más de 1200 carros en promedio. Para este modelo se simularon tres escenarios, a continuación, se observan los resultados:

Tabla 20. Resultados Modelo ASIS.

Escenario	Número de carros parqueados	Velocidad promedio de los buses
Primer escenario	10	19,66 km/h
Segundo escenario	20	15,42 km/h
Tercer escenario	30	11,78 km/h

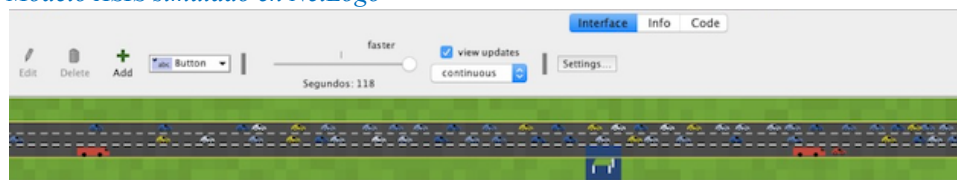
Elaboración propia.

En la tabla se pueden observar tres escenarios, para el primero se realizó una simulación teniendo en cuenta 10 carros parqueados aleatoriamente en la Carrera Séptima, para el segundo, 15 carros parqueados aleatoriamente y para el tercero 20 carros bajo las mismas condiciones. Se puede observar que la velocidad promedio de los buses varía dependiendo de cada escenario. La velocidad desciende en el corredor debido a estos nuevos escenarios en donde se contempla el parqueo de vehículos sobre el carril exclusivo de buses. El conflicto generado por los vehículos que se parquean sobre este carril hace que a medida que se encuentren más vehículos, la velocidad del corredor descienda aún más.

En este modelo es evidente que se presenta una congestión, y esto continuará sucesivamente hasta que no haya vehículos mal parqueados o se reduzca la demanda de vehículos en el corredor. A continuación, se observa la representación de los vehículos parqueados en el carril de los buses:

Imagen 5.

Modelo ASIS simulado en NetLogo



Elaboración propia.

Glosario

Recopilación de definiciones o abreviaciones sobre la disciplina tratada en el documento. Las definiciones deben estar soportadas en referencias.

Alimentadores: En este contexto, los buses alimentadores son los que permiten que los usuarios se movilicen desde y hacia las zonas aledañas a los portales (Transmilenio,2019).

Biarticulados: En este contexto, se refiere a los buses que están compuestos por dos articulaciones, lo que permite que la capacidad del bus sea mayor (Transmilenio,2019).

Flotas: Conjunto de vehículos de una empresa (RAE, s.f.).

Licitación: Participar en una subasta pública ofreciendo la ejecución de un servicio a cambio de la obtención de dinero u otros beneficios (RAE, s.f.).

PM (2.5): partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín, cemento o polen dispersas en la atmósfera y cuyo diámetro es igual o inferior a 2,5 µm. PRTR, s.f.).

Corredor Vial: se refiere a una amplia franja geográfica que sigue un flujo direccional general o que conecta generadores importantes de viaje. Puede contener un número de calles, carreteras, vías, canales y líneas de transporte público (Girardotti, Luis, 2003).

Tren ligero: denominado LRT (Light Rail Transit) es un sistema tranviario que circula en gran parte de su recorrido por una plataforma parcial o totalmente segregada del tráfico rodado y tiene prioridad semafórica (Metro de Medellín, s.f.)

Trolebus: Autobús de tracción eléctrica que toma la corriente de cables aéreos por medio de un trole (RAE, s.f.).

Troncales: Vías para servicios troncales que corresponden a los carriles centrales de las principales avenidas de la ciudad. Estos carriles exclusivos se acondicionan especialmente para soportar el paso de los buses (Transmilenio, s.f.).

Servicios troncales: Los servicios troncales circulan por corredores exclusivos iniciando y terminando su recorrido en los Portales o Estaciones de Cabecera (Transmilenio,2018)

BRT: es un sistema diseñado para mejorar la capacidad y la fiabilidad del transporte público en ciudades congestionadas. (ITF,2010).

Cuello de botella: Un cuello de botella se denomina a todo elemento que disminuye o afecta el proceso de producción en una empresa.

IPC: Es una medida del cambio (variación), en el precio de bienes y servicios representativos del consumo de los hogares del país conocido como canasta (RAE, s.f.).

Paisajismo: Se define como Paisajismo a una actividad cuya finalidad es la de modificar las características visibles, físicas y anímicas que presenta un espacio, ya sea rural o urbano (RAE, s.f.).

VPN: Es una fórmula financiera que permite evaluar los proyectos de inversión en el medio y en largo plazo y conocer si podremos o no maximizar esa inversión (RAE, s.f.).

TIR: es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión (RAE, s.f.).

Planteamiento semafórico: programar el encendido de las luces de los semáforos de tal forma que los vehículos puedan atravesar la vía, de extremo a extremo.

Pseudocódigo: forma de expresar los distintos pasos que va a realizar un programa, de la forma más parecida a un lenguaje de programación. Su principal función es la de representar por pasos la solución a un problema o algoritmo (RAE, s.f.).

Indicadores: comparación entre dos o más tipos de datos que sirve para elaborar una medida cuantitativa o una observación cualitativa (RAE, s.f.).

Referencias

- Aspilla, Y. y Rey, E. (2013). La implementación del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) de Bogotá y sus retos en el futuro.
- Batolla, T. Et. Al (2018). Simposio Argentino de Inteligencia Artificial. Retrieved 29 October 2020, from http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/70689/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Bogotá, A. d. (20 de Diciembre de 2019). *Movilidad Bogotá*. Obtenido 4 febrero, 2020 de https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Paginas/20-12-2019/resultados_preliminares_encuestamovilidad_2019-20191220.pdf.

Alcaldía de Bogotá (Diciembre, 2019). Estadísticas de oferta y demanda del sistema Integrado de Transporte Público –SITP.

Caracol Radio. (20 de Febrero de 2020). https://caracol.com.co/programa/2020/02/21/hora_20/1582247019_585124.html.

Camacho, J, Et. Al (2012). Simulación del tráfico de autos en una intersección: desde la perspectiva de una plataforma multiagente. *Ciencia e Ingeniería*, 33(2),85-93.[fecha de Consulta 29 de Octubre de 2020]. ISSN: 1316-7081. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=5075/507550796004>

Contraloría de Bogotá. (Agosto de 2015). <http://www.contraloriabogota.gov.co/sites/default/files/Contenido/Informes/Estructurales/Movilidad/2015%20Costos%20y%20Efectos%20en%20el%20D.C.%20Implementaci%C3%B3n%20SITP.pdf>

EL TIEMPO. (21 de Diciembre de 2015). <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16464520>.

EL TIEMPO. (7 de Marzo de 2019). <https://www.eltiempo.com/bogota/estudio-revela-que-transmilenio-genera-altos-niveles-de-contaminacion-334308>.

Metro de Medellín. (s.f.). de <https://www.metrodemedellin.gov.co/>.

mundo, B. (10 de febrero de 2017). *elmostrador*. <https://www.elmostrador.cl/noticias/pais/2017/02/10/transantiago-no-es-el-mejor-del-mundo-pero-tampoco-el-peor-saca-la-puntuacion-mas-elevada-en-america-latina/>.

OPS. (s.f.). https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=12918:ambient-air-pollution&Itemid=72243&lang=es.

PacoZea. (17 de Enero de 2020). <https://www.pacozea.com/implementan-carril-de-trolebici-sobre-el-eje-central-lazaro-cardenas-de-la-cdmx>.

Romero, G., & Lugo-Morín, D. (2018). El estado del arte de la movilidad del transporte en la vida urbana en ciudades latinoamericanas. *Transporte y Territorio*, 133-157.

Transmilenio. (4 de Septiembre de 2014). <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/146188/operacion/>.

EL TIEMPO. (12 de Enero de 2020). <https://www.eltiempo.com/bogota/transicion-tecnologica-de-los-buses-de-transmilenio-y-sitp-451156>.

Gomez, L. (11 de Febrero de 2006). *EL TIEMPO*. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1912985>.

Marín, A. (23 de Octubre de 2017). *BOGOTA*. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/obras/carrera-septima-con-transmilenio-mejora-la-movilidad>.

Semana Sostenible. (05 de Junio de 2019). <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/la-contaminacion-una-problematika-de-alto-costo/44470>.

Salvador Medina, S. M. (2019, 16 agosto). El transporte público en la Ciudad de México: incentivos a la ineficiencia - Distintas Latitudes. Recuperado 29 marzo, 2020 de: <https://distintaslatitudes.net/archivo/el-transporte-publico-en-la-ciudad-de-mexico-incentivos-a-la-ineficiencia>.

Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México, C. D. M. X. (s.f.). Corredor Cero Emisiones "Eje Central". <https://www.ste.cdmx.gob.mx/corredor-cero-emisiones-eje-central>.

Congreso de la Republica. (11 julio 2019). Ley Na 1964. <https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%201964%20DEL%2011%20DE%20JULIO%20DE%202019.pdf>.

Real Academia Española. (s.f.). Diccionario de la Real Academia Española [Diccionario]. <https://dle.rae.es/diccionario>.

Transmilenio. (25 enero 2019). Buses de Transmilenio. <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/151051/buses-de-transmilenio/>

Centro Internacional para la Investigacion del Fenomeno del Niño (CIIFEN). (s.f.) Efecto invernadero. http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=99&Itemid=342&lang=es.

PRTR.(s.f.). Partículas PM10. <http://www.prtr-es.es/Particulas-PM10,15673,11,2007.html>.

Girardotti, Luis. (abril, 2003). Prevision de la demanda en corredores. <http://materias.fi.uba.ar/6808/contenidos/DemandaCorredores.pdf>

Metro de Medellín. (s.f.). Metros ligeros: transporte eficiente alrededor del mundo. <https://www.metrodemedellin.gov.co/ald%C3%ADA/noticiasmetro/metrosligerostransporteeeficienteenelmundo>

Transmilenio. (s.f.). Troncales Sistema de Transmilenio. <https://www.transmilenio.gov.co/loader.php?lServicio=Rutas&lTipo=busqueda&lFuncion=troncales>.

Transmilenio.(18 diciembre 2018). Servicios troncales.
https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/146189/servicios_troncales/.

Contact Chile (2020) Transporte Público en Santiago de Chile.
<https://www.contactchile.cl/es/descubrir/santiago/transporte.html>.

SPTrans (2020). Red Metropolitana de Transporte de Sao Paulo. <http://www.sptrans.com.br>.

Observatorio de Movilidad, Boletín Carrera Séptima.
 (2008). [https://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/2032/7494_boletin_movilidad_Carrera7_edicion_n_especial_301110.pdf?sequence=1](https://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/2032/7494_boletin_movilidad_Carrera7_edicion_especial_301110.pdf?sequence=1).

Electromov.cl(2020) <https://www.electromov.cl/2019/12/12/tres-sistemas-de-tecnologias-para-cargar-buses-electricos-que-se-utilizan-en-el-transporte-publico/>.

Modasa. (s. f.). Modasa. <https://modasa.com.pe>.

BRT Rio. (s. f.). BRT Rio. Recuperado 18 de julio de 2020, de <http://brt.rio/es/conheca-o-brt/>.

Guía de Planificación de Sistemas BRT. (2010, enero). Autobuses de Tránsito Rápido. http://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/BRT-Guide-Spanish-complete_unlocked.pdf.

(Alcaldía de Bogotá, 2017). Competitividad y descontaminación, entre las bondades de la nueva séptima.
<https://bogota.gov.co/mi-ciudad/obras/carrera-septima-con-transmilenio-mejora-la-movilidad>.

Railsback, S. F., Lytinen, S. L., & Jackson, S. K. (2006). Agent-based Simulation Platforms: Review and Development Recommendations. <https://bit.ly/2IYEcz>.

eCitaro. (2020). Mercedes Benz. https://www.mercedes-benz-bus.com/es_ES/models/ecitaro.html.

Volvo 7900 Eléctrico. (2020). Volvo. <https://www.volvobuses.es/es-es/our-offering/buses/volvo-7900-electric/specifications.htm>.

eMobility.2020). eMobility. https://www.bus.man.eu/man/media/es/content_medien/doc/business_website_bus_master_1/emobility_1/br_MAN_eMobility_2020_de_screen.pdf.

BYD.(2020).BYD. http://bydelectricos.com/imagenescontenidos/productos_categoriasecundaria/2/585b3b4e159d7.pdf.

Enel X (15 noviembre 2019). Enel X entregará los puntos de recarga para los nuevos buses eléctricos del SITP in Bogotá.
<https://www.enelx.com/es/noticias-medios/press/2019/11/enel-x-entregera-puntos-de-recarga-nuevos-buses-sitp-in-bogota>.

Acta de las Reuniones del Comité Permanente de la Sección de América Latina y el Caribe, celebradas en la ciudad de Gotemburgo, Suecia el 11 y 15 de Agosto de 2010. (2010).
<https://www.ifla.org/files/assets/lac/minutes/Gotemburgo%202010%20español.PDF>.

Netlogo: Fundamentos. (s. f.). Fernando Sancho. Recuperado 2020, de <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=179>

Pruebas. (2011). Automoviles Colombia. <https://automovilescolombia.com/pruebas>.

(Alcaldía de Bogotá, 2019) Programa de Gestión de la velocidad.
<https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Paginas/2019-0318/Programa%20de%20Gestión%20de%20la%20Velocidad%20para%20Bogotá.pdf>.

Secretaria de Movilidad de Medellín. (Agosto, 2020). Carril preferencial.
<https://www.medellin.gov.co/movilidad/tpmedellin/carril-preferencial>

EL TIEMPO. (Marzo,2019). Según estudio, TransMilenio genera altos niveles de contaminación.
<https://www.eltiempo.com/bogota/estudio-revela-que-transmilenio-genera-altos-niveles-de-contaminacion-334308>.

Alcaldía de Bogotá. (Octubre,2020). ¿Qué es un corredor verde?. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/transformar-la-carrera-septima-que-es-un-corredor-verde>.

Kirk, R. (1995). Experimental Design, Procedures for the Behavioral Sciences. Recuperado de <https://bit.ly/2Xztwz5w>.

Sagaró, Zamora (2020) Técnicas estadísticas para identificar posibles relaciones bivariadas.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-67182020000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Esto es lo que contamina un coche eléctrico (y emite un 30% menos que otro de gasolina). (2018). El Diario.
https://www.eldiario.es/ballenablanca/transicion_energetica/contamina-electrico-emisiones-menores-gasolina_1_1830787.html

Arhin, Noël, Anderson, Lakeasha, Ribbiso and Stinson (2015). Predicting Dwell Time by Bus Stop Type and Time of the Day. Civil & Environmental Engineering. <https://www.hilarispublisher.com/open-access/predicting-dwell-time-by-bus-stop-type-and-time-of-the-day-2165-784X-1000189.pdf>

EL TIEMPO. (10 de abril 2016). <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16560364>