



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Modelo de introducción de tecnología vehicular para transporte público masivo por medio de simulación en sistemas dinámicos

John Hoover Cortés Gallo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Bogotá, Colombia

2023

Modelo de introducción de tecnología vehicular para transporte público masivo por medio de simulación en sistemas dinámicos

John Hoover Cortés Gallo

Tesis o trabajo de investigación presentada (o) como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Industrial

Director:

Javier Alveiro Rosero García, Ph.D.

Línea de Investigación:

Sistemas de Generación de Energía Renovable e
integración Redes Inteligentes (Smart Grid)

Grupo de Investigación:

Electrical Machines and Drives, EM&D

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Bogotá, Colombia

2023

“...cuanto más de cerca se mira un problema en el mundo real, tanto más borrosa se vuelve su solución”.

Bart Kosko

Agradecimientos

El desarrollo de esta investigación fue posible a la participación de varias personas que contribuyeron de manera directa. Por lo cual, el autor expresa su agradecimiento a Javier Alveiro Rosero García, por acoger el presente trabajo dentro de su grupo de investigación y dar las orientaciones para su desarrollo.

A Deysi Yasmín Rodríguez Aponte, Clemente Martínez Rozo y Nelson Duarte, profesionales del BRT de Bogotá que aportaron su juicio como expertos y orientaron sobre fuentes de información especializada.

A los profesores Juan Manuel García, Luis Gerardo Astaíza, Jorge Gaitán Villegas y Juan Pablo Ramírez Galvis por su generosa orientación sobre Dinámica de Sistemas y el uso del software Vensim.

Finalmente, a mi familia y a todas las personas que con su aporte hicieron posible su ejecución.

Resumen



Proponente:	John Hoover Cortés Gallo
e-mail:	jhcortesg@unal.edu.co
Programa:	Maestría en Ingeniería - Ingeniería Industrial
Director:	Javier Rosero García, Ph.D.
Título de la Tesis de Investigación:	Modelo de introducción de tecnología vehicular para transporte público masivo por medio de simulación en sistemas dinámicos.
Entidad:	Universidad Nacional de Colombia
Línea de Investigación:	Sistemas de Generación de Energía Renovable e integración Redes Inteligentes (Smart Grid)
Grupo de Investigación:	Electrical Machines & Drives, EM&D -COL0120979
Url:	www.ing.unal.edu.co/grupos/emd/

Los datos generados en dos décadas de funcionamiento del BRT de Bogotá, muestran su complejidad e incertidumbre con un alto impacto en aspectos ambientales, sociales y económicos. El BRT de Bogotá es uno de los más importantes entre los 187 ya implementados a nivel mundial, siendo atractiva la aplicación de la Dinámica de Sistemas para modelarlo y entender su funcionamiento. Si bien la mayoría de los modelos disponibles para los BRT se orientan a la optimización y eficiencia de la operación en el día a día, este trabajo busca aportar a la creación de un modelo de alto nivel agregado y de largo plazo. La identificación de los principales stakeholders con sus roles e intereses permitió crear un diagrama causal del sistema, donde la normatividad y la inversión en nueva flota son elementos clave para bucles de refuerzo y estabilizadores. El consecuente diagrama de flujos y niveles, permite cuantificar escenarios con la visualización del tamaño de la flota de buses y su composición tecnológica, así como algunos de sus impactos. Entre las ecuaciones desarrolladas resaltan las que relacionan el nivel de calidad percibida por los usuarios con la demanda del sistema. También se desarrolló una ecuación que permite cuantificar la cantidad de usuarios según el nivel poblacional y la extensión de las troncales implementadas. El cálculo del tamaño de la flota en operación se basó en modelos de Dinámica de Sistemas, influenciado por nuevos buses para reponer el agotamiento de la vida útil y la ampliación del tamaño de la operación por la ampliación de las troncales. Finalmente se plantean asuntos para continuar con esta investigación.

Palabras clave: Dinámica de Sistemas; modelo de transporte; transporte masivo; BRT.

Abstract



Author:	John Hoover Cortés Gallo
e-mail:	jhcortesg@unal.edu.co
Program:	Master in Engineering – Industrial Engineering
Advisor:	Javier Rosero García, Ph.D.
Job Grade Title:	Model for the introduction of vehicular technology for public mass transportation by dynamics systems simulation.
Organization:	Universidad Nacional de Colombia
Research Area:	Renewable Energy Generation Systems and Smart Grid integration
Research Group:	Electrical Machines & Drives, EM&D -COL0120979
Url:	www.ing.unal.edu.co/grupos/emd/

The data generated in two decades of operation of the Bogotá BRT show its complexity and uncertainty with a high impact on environmental, social and economic aspects. The Bogotá BRT is one of the most important among the 187 already implemented worldwide, and the application of System Dynamics to model it and understand its operation is attractive. Although most of the models available for BRT are aimed at the optimization and efficiency of day-to-day operation, this work seeks to contribute to the creation of a high-level aggregate and long-term model. The identification of the main stakeholders with their roles and interests allowed us to create a causal diagram of the system, where regulations and investment in new fleet are key elements for reinforcing and stabilizing loops. The resulting flow and level diagram allows scenarios to be quantified with the visualization of the size of the bus fleet and its technological composition, as well as some of its impacts. Among the equations developed, those that relate the level of quality perceived by users to the demand of the system stand out. An equation was also developed that allows quantifying the number of users according to the population level and the extension of the trunks implemented. The calculation of the size of the fleet in operation was based on System Dynamics models, influenced by new buses to replace the exhaustion of their useful life and the expansion of the size of the operation due to the expansion of the trunk lines. Finally, issues are raised to continue with this investigation.

Keywords: system dynamics; transport modelling; transportation; BRT.

Esta tesis de maestría se sustentó el 23 de abril de 2024 a las 9:00 a.m. en las oficinas de TRANSMILENIO S.A, y fue evaluada por los siguientes jurados:

Ricardo Montezuma Enríquez (Phd.)

Profesor

Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá

Deysi Yasmín Rodríguez Aponte (MEng.)

Funcionaria

TRANSMILENIO S.A.

Contenido

Agradecimientos	4
Resumen	V
Abstract	VI
Contenido	VIII
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XII
Lista de gráficos	XIV
Lista de anexos	XV
Lista de abreviaturas	XVI
Glosario	XVII
Introducción	1
1. Marco referencial	4
1.1 Crecimiento poblacional y densificación de Bogotá	6
1.2 BRT de Bogotá	8
1.3 Demanda de transporte del BRT de Bogotá	9
1.4 Estructura administrativa del BRT de Bogotá	11
1.5 Troncales del BRT de Bogotá	12
1.6 Tipología de buses del BRT de Bogotá	14
1.7 Normativa BRT Bogotá	16
1.8 Costos comparativos de operación buses del BRT de Bogotá	19
1.9 Satisfacción del BRT de Bogotá	21
1.10 Emisiones y análisis <i>Well to Wheel</i>	23
1.11 Baterías	24
2. Dinámica de Sistemas	26

2.1	Tipos de diagramas en la Dinámica de Sistemas	27
2.2	Bucles	28
2.3	Retraso	30
2.4	Vensim y diagrama de flujo	30
2.5	Análisis de Dinámica de Sistemas	32
3.	Metodología	33
4.	Resultados	36
4.1	Definición del problema, objetivos y alcance	36
4.2	Identificación de <i>stakeholders</i> , intereses e impactos	38
4.3	Generación de diagrama causal e identificar bucles	42
4.4	Heurística crítica de sistemas aplicada al diagrama causal	45
4.5	Generar diagrama de flujo	47
4.5.1	Población de Bogotá	47
4.5.2	Extensión de troncales	53
4.5.3	Cantidad de usuarios	54
4.5.4	Buses necesarios	58
4.5.5	Buses en operación	61
4.5.6	Buses nuevos	61
4.5.7	Buses en operación por tecnología vehicular	62
4.5.8	Empleos formales directos	65
4.5.9	Huella de carbono	66
4.5.10	Material particulado	67
4.5.11	Baterías desechadas	68
4.5.12	Siniestros graves evitados	69
5.	Análisis de resultados	70
5.1	Análisis estructural	70

X	Modelo de introducción de tecnología vehicular para transporte público masivo por medio de simulación en sistemas dinámicos	
5.2	Identificación de bucles	71
5.3	Análisis de robustez	73
5.4	Escenarios y análisis de sensibilidad	74
5.4.1	Banda poblacional	74
5.4.2	IPB Estándar	76
6.	Conclusiones y recomendaciones	78
6.1	Conclusiones	78
6.2	Recomendaciones	79
	Bibliografía	82
	Anexos	88

Lista de figuras

Figura 1. Relación entre la cantidad de usuarios, la población y la extensión de troncales.	10
Figura 2. Costo total por tecnología para buses articulados en Bogotá (Cápex y Opex) en USD/km. Extractado de Cuéllar 2023 [39]	20
Figura 3. Componentes del Costo total USD/km.veh. buses articulados en Bogotá.	20
Figura 4. Índice general de satisfacción componente Troncal	21
Figura 5. Estructura de percepción de calidad del servicio del BRT de Bogotá	22
Figura 6. Ejemplo de diagrama causal	27
Figura 7. Ejemplo de elementos diagrama causal	28
Figura 8. Ejemplo de Bucles	29
Figura 9. Ejemplo de retraso	30
Figura 10. Estrategia de modelado	34
Figura 11. Árbol de problema sobre BRT de Bogotá	36
Figura 12. Impactos generales del BRT de Bogotá	39
Figura 13. Identificación de impactos y <i>stakeholders</i> del BRT de Bogotá.	41
Figura 14. Diagrama causal	43
Figura 15. Datos tomados del software Rstudio para la regresión de población entre 2000 y 2019	49
Figura 16. Cálculo en el software Rstudio de las regresiones f_2 y f_3 para estimar la población de Bogotá entre los años 2020 y 2043	50
Figura 17. Resultado en Rstudio de varios modelos para explicar la cantidad de usuarios como variable dependiente de la extensión de las troncales y el nivel de población	56
Figura 18. Lookup en Vensim la ley 1964 de 2019 [41]	64
Figura 19. Gráfico de sensibilidad frente a valores extremos de la Banda Poblacional	75
Figura 20. Influencia de incrementar el IPB.	76

Lista de tablas

Tabla 1. Longitud de troncales de TransMilenio ya operativas o con alta probabilidad de implementación	12
Tabla 2. Plan de expansión de troncales de TransMilenio	14
Tabla 3. Flota Troncal vinculada BRT Bogotá 2023.	15
Tabla 4. Clasificación de la flota en 2023 según nivel de emisión	15
Tabla 5. Clasificación de la flota en 2023 según edad	16
Tabla 6. Listado de normativas internacionales relevantes para el presente trabajo	17
Tabla 7. Porcentaje mínimo exigido de vehículos nuevos eléctricos o de cero emisiones contaminantes adquiridos	18
Tabla 8. Comparativo de costos mensuales de operación por tecnología a cierre de 2013, asumiendo 1,2 kWh/km, costo de \$300/kWh, recorrido de 18.750 km/mes	19
Tabla 10. Cuantificación de emisiones por kilómetro recorrido según análisis “Del Pozo a la Rueda” aplicado en el BRT de Bogotá	23
Tabla 11. Cuantificación de emisiones por pasajero y kilómetro recorrido según análisis “Del Pozo a la Rueda” aplicado en el BRT de Bogotá	24
Tabla 12. Ejemplos de clasificación de sistemas según su complejidad e incertidumbre	26
Tabla 13. Resumen resultados de búsqueda en Scopus para varios softwares de simulación por dinámica de sistemas en el área de transporte	30
Tabla 14. Preguntas de la Heurística Crítica de Sistemas	32
Tabla 15. Miembros del equipo del proyecto	35
Tabla 16. Matriz de <i>stakeholders</i> del sistema BRT de Bogotá	40
Tabla 17. Matriz de identificación de intereses sobre el BRT	41
Tabla 18. Identificación de bucles en el diagrama causal	43
Tabla 19. Resultados de aplicación de la heurística crítica de sistemas al diagrama causal	46

Tabla 20. Validación y calibración de las regresiones f_2 y f_3 de utilizadas para estimar la demanda poblacional en el rango de 2020 a 2043	52
Tabla 21. Validación de calibración de modelo f_4	57
Tabla 22. Número de buses operativos por tipología tomado de TRANSMILENIO S.A.	59
Tabla 23. Factores de conversión	60
Tabla 24. Combinación de Política de movilidad sostenible y porcentajes de ingreso de vehículos	63
Tabla 25. Identificación de bucles en el diagrama de flujo	72
Tabla 26. Sensibilidad del modelo frente a valores extremos de la banda poblacional.	75

Lista de gráficos

Gráfico 1. Proyecciones de Población Pre COVID-19 y Post COVID-19	7
Gráfico 2. Elementos de un diagrama de flujo en Vensim	31
Gráfico 3. Diagrama de árbol de causas y usos	44
Gráfico 4. Diagrama de árbol población de Bogotá	48
Gráfico 5. Árbol de causas de la población de Bogotá	53
Gráfico 6. Extensión de las troncales en kilómetros	53
Gráfico 7. Árbol de causas de la cantidad de usuarios	54
Gráfico 8. Comparativo de los datos históricos de extensión de troncales (km), usuarios (Millones de usuarios por año) y Población (habitantes)	54
Gráfico 9. Árbol de causas de buses necesarios	58
Gráfico 10. Árbol de causas de buses en operación	61
Gráfico 11. Árbol de causas de buses nuevos	61
Gráfico 12. Estimación de los flujos de ingreso y baja de vehículos para la flota operativa del BRT	63
Gráfico 13. Árbol de efectos de la política de movilidad sostenible	64
Gráfico 14. Árbol de causas de empleos formales directos	65
Gráfico 15. Árbol de causas huella de carbono	66
Gráfico 16. Árbol de causas material particulado	67
Gráfico 17. Árbol de causas baterías desechadas	68
Gráfico 18. Árbol de causas siniestros evitados	69

Lista de anexos

A.	Anexo: Cronología del transporte público masivo a nivel mundial	88
B.	Anexo: Cronología del transporte público masivo en Bogotá	89
C.	Anexo: Estimación de población para Bogotá	94
D.	Anexo: Cronología legislación relacionada con el BRT de Bogotá	95
E.	Anexo: Diagrama de flujo completo (Aumentar al 200%)	97
F.	Anexo: Listado variables por stakeholder (Documen all)	98
G.	Anexo: Estructura de costos propuesta por Wang en 2024 [13]	100
H.	Anexo: Análisis estructural	101
I.	Anexo: Análisis de robustez	103
J.	Anexo: Análisis de sensibilidad	106

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
BRT	Bus Rapid Transit
BYD	Empresa Build Your Dream, fabricante y comercializadora de vehículos
CNG	Vehículos que funcionan con gas natural comprimido
Conpes	Consejo Nacional de Política Económica y Social
DOT	Diseño orientado al transporte
EV	Vehículos eléctricos (Electric vehicles)
HEVs	Vehículos eléctricos híbridos (Hybrid electric vehicles)
ICEVs	Vehículos con motor de combustión interna (Internal Combustion Engine Vehicle)
IDU	Instituto de Desarrollo Urbano
MIT	Massachusetts Institute of Technology
PAT	Plan de ascenso tecnológico [12]
SD	Dinámica de Sistemas, por su nombre en inglés “System Dynamics”
SDA	Secretaría Distrital de Ambiente
SDM	Secretaría Distrital de Movilidad
SITP	Sistema Integrado de Transporte Público. De acuerdo con el artículo 99 de la Ley 1955 de 2019, los Sistemas Integrados de Transporte Público (SITP) están conformados por más de un modo o medio de transporte público integrados operacional y tarifariamente entre sí. En el caso de Bogotá, está conformado por el componente troncal, el componente zonal y el componente alimentador.
SITM	Sistemas de transporte de pasajeros tipo BRT, que cuentan con infraestructura segregada para su uso exclusivo y cuyos agentes operadores y de recaudo son concesionados o públicos, y operan bajo las características físicas, operativas y financieras indicadas en el Documento Conpes 3167 y el Documentos Conpes 3260.
SITR	Sistemas Integrados de Transporte Regional
TM	Transmilenio
TT	Terminal de transporte
UMV	Unidad de Mantenimiento Vial
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
UNAL	Universidad Nacional de Colombia

Glosario

Bus articulado: es un autobús de dos secciones cuya capacidad es de 160 pasajeros. Cuenta con una articulación central y comúnmente posee dos ejes en el tramo delantero y un eje en el trasero, unidos por una articulación tipo fuelle que conecta internamente los habitáculos donde viajan los pasajeros

Bus biarticulado: similar al bus articulado, cuenta con más de dos secciones y su capacidad aumenta a 250 pasajeros

Bus padrón: es un autobús de una sola sección y capacidad normal de 80 pasajeros. Se emplea como alimentador hacia las estaciones de las líneas troncales o en rutas auxiliares que no poseen infraestructura de plataforma elevada, dada su mayor versatilidad para permitir que el pasajero acceda al nivel del piso de la vía o el andén

Bucle: es una cadena cerrada de relaciones causales en un diagrama causal.

Bucle negativo: es aquel cuya cantidad de relaciones negativas es impar. Este tipo de bucle conduce a una situación estable del sistema.

Bucle positivo: es aquel que posee un número par de relaciones negativas. Este tipo de bucles conduce a una situación inestable del sistema.

Diagrama causal: también denominado “Diagrama de Forrester” es un diagrama que recoge los elementos clave del sistema las relaciones entre ellos.

Modelo: representación formalizada de un sistema.

Movilidad sostenible: “Se entenderá por movilidad sostenible aquella que es capaz de satisfacer las necesidades de la sociedad de moverse libremente, acceder, comunicarse, comercializar o establecer relaciones sin sacrificar otros valores humanos ecológicos básicos actuales o futuros. Es decir, debe incluir principios básicos de eficiencia, seguridad, equidad, bienestar (calidad de vida), competitividad y salud de conformidad a lo dispuesto por el World Business Council for Sustainable Development”. Extractado de la ley 1964 de 2019.

Sistema: conjunto de elementos, normas o cosas que relacionadamente contribuyen a un fin.

TRANSMILENIO S.A.: empresa gestora del sistema de transporte público masivo de Bogotá.

TransMilenio: sistema de buses de transporte público de Bogotá.

Transporte masivo de pasajeros: combinación organizada de infraestructura y equipos, en un sistema que cubre un alto volumen de pasajeros y da respuesta a un porcentaje significativo de las necesidades de movilización urbana.

Vehículo eléctrico: “Un vehículo impulsado exclusivamente por uno o más motores eléctricos, que obtienen corriente de un sistema de almacenamiento de energía recargable, como baterías, u otros dispositivos portátiles de almacenamiento de energía eléctrica, incluyendo celdas de combustible de hidrógeno o que obtienen la corriente a través de catenarias. Estos vehículos no cuentan con motores de combustión interna o sistemas de generación eléctrica a bordo como medio para suministrar energía eléctrica”. Extractado de la ley 1964 de 2019.

Vensim: software de simulación de tipo industrial para mejorar el rendimiento de sistemas reales. Sus funciones enfatizan la calidad del modelo, las conexiones a los datos, la distribución flexible y los algoritmos avanzados.

Introducción

La movilidad sostenible es asunto de máxima importancia en la agenda mundial debido a su impacto en el cambio climático y en la calidad de vida de los habitantes de grandes ciudades como Bogotá [1]. La creciente problemática ambiental, social y de salud atribuible a la operatividad del transporte, junto con el acelerado avance de alternativas tecnológicas, producen escenarios de toma de decisiones con creciente complejidad debido a la cantidad de participantes y sus conexiones de forma diferencial. Esta complejidad está además acompañada de una creciente incertidumbre originada por contextos cambiantes y de alta impredecibilidad. En estos sistemas de alta complejidad e incertidumbre, la Dinámica de Sistemas es reconocida como una valiosa herramienta de análisis y de aplicación en constante crecimiento [2], [3], [4].

La movilidad de la ciudad de Bogotá ha evolucionado en los albores del siglo XXI con sistemas de transporte masivo basados en sistemas tipo Bus Rapid Transit (BRT). EL BRT se caracteriza por su operación en carriles exclusivos, con buses y plataformas a nivel que permiten minimizar los tiempos de parada durante los abordajes y evacuación de los pasajeros. Además, desligan el tiempo de parada de la operación de recaudo [5].

El ente gestor del sistema de transporte público masivo de Bogotá es la empresa TRANSMILENIO S.A., quien se encarga de toda la gestión, control y planeación del sistema que además lo componen la infraestructura, el sistema de operación y el sistema de recaudo [5].

La expansión progresiva del BRT y su articulación con otros medios de transporte plantea retos no solamente administrativos y de inversión, sino también de toma de decisiones cada vez más racionales en un contexto con requerimientos ambientales y sociales [6].

La evolución tecnológica hacia sistemas de transporte que utilizan fuentes energéticas con sostenibilidad ambiental y económica plantea el reto de toma de decisiones que, al ser de interés público, requieren de la intervención estatal a través de normativas que proporcionen incentivos y un marco decisorio que aclare el camino correcto en las inversiones. Además, deben considerar los objetivos de corto plazo y los horizontes de implementación e impactos que pueden abarcar varias décadas [7], [8], [9]. Este desarrollo normativo ha sido acompañado y soportado en investigaciones y desarrollo de tecnologías limpias durante las últimas décadas [10], [11]. En Bogotá, el Plan de Ascenso Tecnológico [12] creado en el año 2013, establece firmemente las bases para convertir la ciudad en un “laboratorio” donde su movilidad sirva como fuente de información y conocimiento.

Los avances tecnológicos y la reconfiguración de los costos energéticos plantean cambios favorables hacia los vehículos eléctricos [13], cuya favorabilidad se veía cimentada hasta ahora

en componentes de sostenibilidad ambiental y social [14], [15]. Dichos avances tecnológicos y de costos deben ser entendidos con criterios holísticos y racionalidad sistémica [2], [4], [16]. Los análisis de tipo prospectivo se centran cada vez más en respaldar la toma de decisiones de inversión en tecnologías de transporte basándose en criterios de beneficio ambiental y social que tradicionalmente eran relevados a segundas instancias, opacados por criterios meramente de oportunidad o rentabilidad financiera [17], [18], [19]. Esto se refleja en los informes de planeación y operación del BRT [21], [22]. Dichos informes no solamente muestran los resultados operativos [23] sin que incentivan una participación más amplia en el análisis de sus resultados y proyección del futuro deseable [24]. Este desarrollo tecnológico, con una atención participativa y gubernamental, incentivan la aplicación de técnicas de análisis como la prospectiva o la teoría de complejidad [25] en el desarrollo y aplicación de políticas específicas [6], [26].

Eventos como la Pandemia de 2020 han resaltado la necesidad de disponer de herramientas de modelamiento que respalden la simulación y la toma de decisiones ante cambios grandes e inesperados en las condiciones y supuestos con los que se ha planeado el desarrollo del BRT como lo han sido las proyecciones del nivel poblacional [27] o los impactos derivados de las decisiones sobre opciones tecnológica para el funcionamiento del BRT [28], [29], [30], [31], [32]. La agitada realidad del presente siglo, caracterizada por una alta variabilidad en las condiciones bases de diseño y el incremento en la cantidad de participantes, plantea la necesidad de evolucionar desde “la planeación inflexible” hacia el “planteamiento dinámico”. Es decir que, el proceso mismo de planeación es tan relevante y útil como el plan que genera [2], ya que es necesario actualizar continuamente los planes en un entorno donde fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas, cambian constantemente. Es precisamente en este contexto donde la Dinámica de Sistemas está afianzándose como herramienta para abordar el entendimiento de los problemas mediante su modelamiento, facilitando así su entendimiento y gestión [33], [34], [35], [36].

La aplicación de técnicas de medición de impactos sociales, económicos y ambientales del BRT [37], [38], [39], son fuentes de información valiosa para cuantificar las conexiones de los componentes del BRT entendido como un “sistema” y, así generar normativas cada vez más conectadas con la realidad presente y previsible de su contexto local y regional [40], [41], [42]. Las bases de datos estadísticas clave, como el nivel poblacional, que soportaron la toma de decisiones para planear el BRT actual de Bogotá [43], se enfrentan a fenómenos imprevisibles e influyentes como la migración internacional, la pandemia, o el reordenamiento nacional por avances en los procesos de paz [43], [44], [45]. Así mismo es importante prestar atención a los

aspectos laborales y de satisfacción de los empleados directos y los usuarios del BRT [46], [47] que reflejan el avance en la formalización del empleo y el enfoque integral de bienestar humano.

En resumen, el BRT es un sistema de alta complejidad e incertidumbre, con impactos directos sobre la movilidad sostenible y cuya planeación, implementación y control, requieren de modelos flexibles que faciliten la toma de decisiones. En ese contexto, la Dinámica de Sistemas provee herramientas de reconocida y creciente aplicación.

1. Marco referencial

El transporte público masivo basado en fuentes energéticas tradicionales de combustibles fósiles como el diésel está generando impactos indeseados de tipo ambiental, social y económico, entre otros, donde la movilidad basada en nuevas fuentes energéticas, o tecnologías más eficientes o menos contaminantes como el transporte eléctrico aparecen como una alternativa deseable [6].

El sector del transporte es responsable en algunos países de cerca del 28 % de las emisiones de dióxido de carbono y otros contaminantes, debido al consumo generalizado de combustibles fósiles [7]. El uso de tecnologías más eficientes, más sostenibles y menos contaminantes como las derivadas del desarrollo de los vehículos eléctricos para el transporte masivo es una alternativa cada vez más atractiva, en especial por sus beneficios sobre el impacto ambiental y el uso racional de las fuentes energéticas sostenibles [7], [8]. Estas tecnologías sostenibles son caso de estudio con recientes reportes en múltiples ciudades a nivel mundial [9], [10].

La tecnología de movilidad basada en vehículos eléctricos presenta varios beneficios que han sido corroborados en la medida que se ha ido implementando su utilización:

Eficiencia y economía: el uso de vehículos que combinan motores eléctricos y de combustión interna, denominado vehículo híbrido ha demostrado un aprovechamiento energético superior en un 63 % a los tradicionales impulsados a partir de motores de combustión [5].

Ambientalmente amigable: los vehículos eléctricos eliminan las emisiones directas de material particulado, dióxido de carbono y compuestos nitrosos. Además, reducen la generación de ruido contaminante, de especial interés en zonas urbanas, en particular para el desarrollo del transporte nocturno, según estudios adelantados en varias ciudades como Barcelona y Berlín [24].

Sustentabilidad: algunas fuentes de energía eléctrica (hídricas, solares, eólicas) son de tipo sostenible y en el caso de Colombia representan cerca del 70 % de la generación de tal tipo de energía [8], situación que posiciona a Colombia como un país de gran atractivo para la implementación de movilidad basada en vehículos eléctricos.

Impulsor de nuevos negocios y mercados: el nacimiento en Bogotá de nuevas empresas dedicadas a la comercialización de este tipo de vehículos: Lucky Lion, Ecobicis, Bicielectron, entre otras, paralelo a la creación de nuevas líneas de negocio en empresas ya establecidas (por ejemplo, Praco–Didacol, Hino y BYD), han facilitado la realización de planes piloto para probar el uso de estas tecnologías en empresas como Nutresa y Ramo. Estas

iniciativas son hasta el momento gestionadas como secreto industrial, siendo sus resultados aún desconocidos a nivel público.

Estratégico nacional: la estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC) es un programa del ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible que busca desligar el desarrollo económico del país y el consecuente aumento en la generación de los gases de efecto invernadero. Consecuentemente, la ley 1964 de 2019 en su artículo 8 párrafo 3 establece los porcentajes mínimos de vehículos eléctricos o de cero emisiones contaminantes a ser incluidos en la ampliación o reposición de flota del Sistema de Transporte Masivo, avanzando progresivamente hasta un 100% en el año 2035 [41]

La movilidad en la ciudad de Bogotá y su impacto integral en el bienestar general tanto ambiental, como social y económico, confluyen en la necesidad de analizar integralmente la implementación de nuevas tecnologías en su BRT. Tal preocupación se evidencia en la normatividad distrital (Documento Conpes Distrital número 30 de 2023 [1]) y en la normativa nacional (Resolución 762 de 2022). En este mismo sentido, el Acuerdo Distrital 790 de 2020 declara la emergencia climática en Bogotá y en su mandato cuatro establece la necesidad de implementar medidas para que en el año 2030 las emisiones de gases efecto invernadero se hayan reducido a la mitad de las producidas en el año 2020. Esto reafirma la necesidad de herramientas de modelado que permitan entender el BRT de forma integral facilitando la simulación de escenarios.

El actual desarrollo e implementación de tecnologías para el transporte público masivo, es llamado a analizarse desde el concepto del “giro de la movilidad” [14], según el cual el transporte se entiende como mucho más que la sola estructura física y de insumo a través de la cual se da el movimiento de las personas. Así mismo la movilidad se entiende como la experiencia de habitar la ciudad mientras suceden los desplazamientos, es decir, que deben considerarse sus impactos ambientales, sociales y económicos. Este entendimiento del BRT, lo convierte en un sistema con alta complejidad [15], [25]. La complejidad del BRT se debe a la gran cantidad de participantes en su planeación, implementación y administración.

La oferta y demanda en la operación del BRT tiene alto grado de incertidumbre debido a la variabilidad de los factores que lo influyen [26]. Un buen ejemplo es la inesperada disminución en su demanda por protestas sociales, evasión o la pandemia COVID-19.

Es así que se requiere analizar la introducción de tecnología vehicular para transporte público masivo con pensamientos holísticos que incluyan el entendimiento de las interrelaciones e impactos de sistemas sostenibles y eficientes que respondan a la creciente demanda de transporte y movilización en las grandes ciudades.

La Dinámica de Sistemas es una herramienta introducida en la década de 1950, ampliamente recomendada para el modelamiento de sistemas complejos en ambientes de incertidumbre [2], [3]. Su aplicación ha ganado gran participación en el análisis de los problemas relacionados con el transporte y análisis de sistemas complejos [4].

Para abordar el modelamiento del BRT de Bogotá es necesario repasar primero varios de sus factores clave como son el comportamiento de su demanda par a relacionarlo con el crecimiento poblacional y la oferta de troncales. Igualmente es necesario repasar el rol de TRANSMILENIO S.A. como ente gestor del BRT que integra todos sus stakeholder. Finalmente se aborda el repaso de algunos impactos del sistema, que son incluidos en el modelamiento.

1.1 Crecimiento poblacional y densificación de Bogotá

Diversos reportes como la recopilación presentada en 2014 por Shepherd [4], identifican la estrecha relación entre el nivel poblacional de las grandes ciudades y el comportamiento de sus sistemas de transporte. Investigaciones realizadas en ciudades como Tokio, Toronto o Dalian, donde el nivel poblacional determina no solamente el desempeño de los sistemas de transporte, sino su planeación y decisiones de inversión en infraestructura.

Según el DANE [27], [43] las proyecciones demográficas para Bogotá basadas en los censos de los años 1993, 2005 y 2018, contrastadas con los análisis de las Naciones Unidas en su indicador World Population Prospect, mostraban un crecimiento sostenido de la población de Bogotá, situándose en un valor cercano a 7.5 millones de habitantes para el 2018. A partir de allí se esperaba un crecimiento acentuado hasta el año 2023 debido especialmente a fenómenos de inmigración interna y proveniente de Venezuela. Posteriormente, en el año 2023 el DANE [27] plantea una corrección a las proyecciones debido al impacto de la pandemia originada en 2020 por el COVID-19.

En el gráfico 1, se detalla el aumento sostenido de la población de Bogotá en los últimos años atribuido especialmente a la migración regional y el aumento de la expectativa de vida.

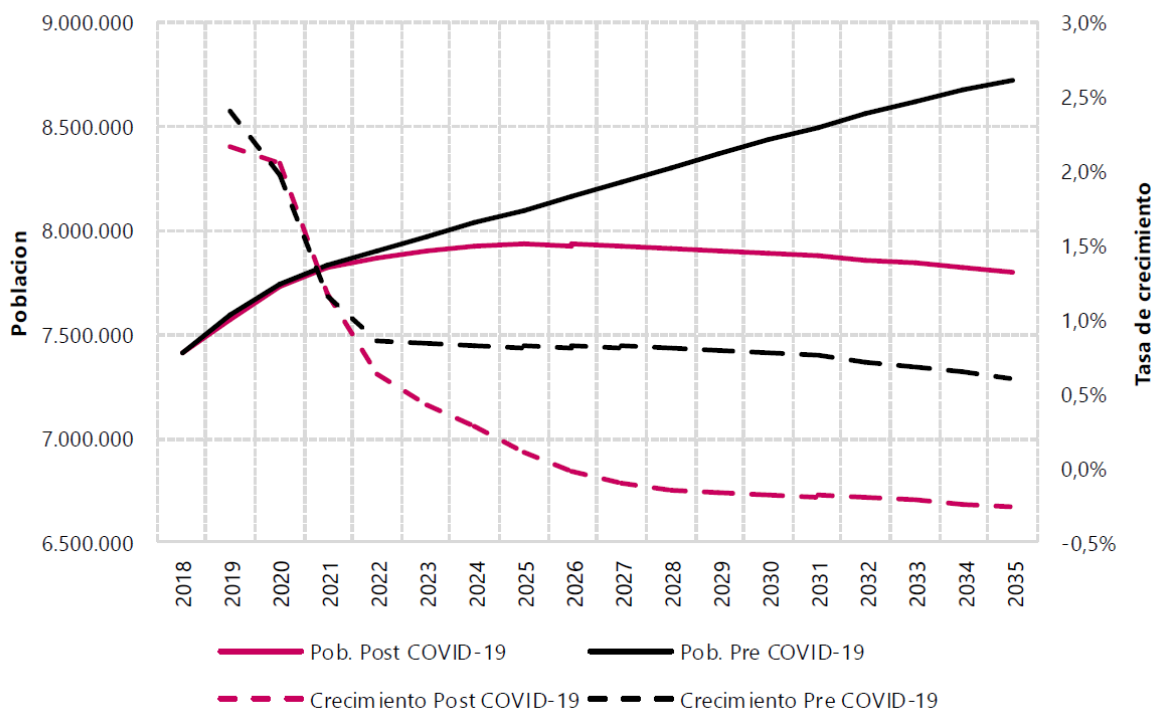


Gráfico 1. Proyecciones de Población Pre COVID-19 y Post COVID-19

Fuente: tomado de DANE 2023 [27].

Según el ajuste de proyecciones demográficas realizado en 2023 por el DANE [27], se está dando un fenómeno de estancamiento en el nivel poblacional debido a efectos combinados de disminución de la inmigración de población venezolana, disminución de inmigración nacional por el conflicto armado, disminución nacional de la fecundidad y aumento de la probabilidad de muerte entre los 15 y 40 años [27], [44].

Las recientes proyecciones muestran una detención del crecimiento poblacional hacia el 2025 e inclusive una posible disminución con una población que se prevé se sitúe cerca a los 8 millones de habitantes.

Si bien el crecimiento de la población urbana es un fenómeno ampliamente evidenciado a nivel mundial [8], y está acompañado del cambio de componente rural a urbano, en el caso de Bogotá tiene una especial característica y es que la ciudad se vuelve cada vez más densa, es decir que su ritmo de crecimiento poblacional supera el ritmo de expansión territorial.

La iniciativa denominada “Atlas de expansión urbana”, liderada por la Universidad de Nueva York y disponible en el link <http://www.atlasofurbanexpansion.org>, compara las 200 ciudades más grandes del mundo, con datos que en el caso colombiano son aportados por el DANE y complementados con imágenes satelitales de las últimas dos décadas. Muestra como

el crecimiento poblacional de Bogotá es sostenido y tiene valores similares al de las demás ciudades del mundo (cercano al 2.5 % anual). De otro lado, la huella superficial de Bogotá (porción edificada) crece al 1 % anual, mientras el resto de las ciudades lo hacen a ritmos cercanos del 4.5 % anual. Esto produce en Bogotá una mayor densificación que crece a un 1 % anual, mientras en el resto de las ciudades la densidad poblacional tiene tasas negativas de cerca de 1.5 %.

Este fenómeno de densificación tiene como hipótesis la influencia del conflicto armado que en las últimas décadas ha restringido la expansión territorial urbana, aunque las tasas de crecimiento de la población sean similares a las del resto de ciudades del mundo.

La densificación de Bogotá plantea retos especiales de uso del suelo urbano y puede considerarse como una oportunidad para aprovechar intensivamente los sistemas de transporte masivo, pero trae consigo la menor disponibilidad superficial para vías con amenaza de saturación y hacinamiento, lo que refuerza el interés por analizar y aprovechar mejor el transporte masivo urbano. Así mismo, los cambios en las proyecciones poblacionales plantean nuevos escenarios para visualizar la planeación de los sistemas de transporte masivo.

1.2 BRT de Bogotá

Bogotá ha experimentado en el último siglo la implementación y abandono de diversas tecnologías para atender su necesidad de transporte público masivo, pasando por tranvía de mulas, tranvía eléctrico, Trolebus, autobuses a gasolina y diésel (ver Anexo B), llegando al siglo XXI con la implementación de un BRT que se encuentra en un momento coyuntural de conexión con sistemas complementarios de transporte como cable, metro y trenes de cercanías. Así mismo, el dinamismo tecnológico a nivel mundial y local de uso de nuevas alternativas tecnológicas está especialmente influenciado por la preferencia de fuentes energéticas más eficientes en términos ambientales y económicos. Estas razones justifican la generación de herramientas que faciliten el entendimiento del BRT y sus impactos para dimensionar y orientar su desarrollo.

El BRT (Bus Rapid Transit) es un sistema de transporte público masivo conformado por autobuses que transitan en una proporción significativa de su recorrido con prioridad de paso, carriles dedicados y al centro de las vías, estaciones para cobro y/o abordaje de los buses y plataformas de abordaje al nivel del autobús [19].

El BRT de Bogotá, tiene las siguientes características generales, en su grado de implementación actual que cubre las primeras tres fases del sistema:

- Uso de carriles exclusivos (o carriles segregados del tráfico mixto). Y denominados troncales. Con una longitud instalada y en operación de 126.9 km.

- Los vehículos BRT tienen una mayor capacidad de pasajeros que los buses de tránsito convencionales. Utilizando una mezcla de tamaños de buses, siendo los más grandes los biarticulados de 250 pasajeros y 27 m de largo.

- Pago de la tarifa y validación del viaje en estaciones. Estas estaciones son de cuatro tipos según su servicio: portales, intermedias, sencillas y de transferencia.

- Puntos de paradas fijos con plataformas.

- Puertas de servicio a la izquierda y circulación de carril rápido a la Derecha. Algunos buses (denominados padrones duales) poseen además puertas de servicio a la derecha, lo que les permite conectarse con carriles mixtos donde hacen paradas a la derecha, sin necesidad de estaciones a nivel alto.

Desde su puesta en marcha en el año 2000, el BRT de Bogotá se ha convertido en el principal medio de transporte público masivo, siendo además referente para otras ciudades del mundo, en especial por su tamaño y demanda cercana a 600 millones de usuarios anuales [46].

El entendimiento de la estructura administrativa del BRT de Bogotá, identifica a la empresa TRANSMILENIO S.A., como ente gestor, donde confluyen las principales decisiones sobre su planeación y administración, con un rol de liderazgo en su desempeño misional.

1.3 Demanda de transporte del BRT de Bogotá

Atendiendo la buena práctica de abordar el entendimiento de un sistema partiendo del entendimiento de su cliente o razón de la existencia del sistema, repasaremos en este capítulo algunas cifras y aspectos relativos a la demanda del BRT de Bogotá.

La demanda del BRT de Bogotá, tiene comportamientos típicos estacionales, tanto diarios como mensuales. A nivel anual, el comportamiento es más suavizado y creciente. Los siguientes datos fueron extractados principalmente de la información pública de TRANSMILENIO S.A. [23], con datos al año 2023.

Un día hábil tiene una demanda superior en un 70 % a un día no hábil [23]. Por lo tanto, es común que el día hábil se analice con mayor detenimiento pues presenta más exigencia de la capacidad instalada.

El día hábil presenta picos de demanda hacia las 6:00 a.m. y las 5:00 p.m. con valores de aproximadamente 230.000 entradas al sistema. Entre estas dos horas se presenta un valle con centro al medio día. Transitoriamente algunas administraciones han buscado suavizar este comportamiento con la introducción de incentivos tarifarios a los usuarios, pero no han sido

perennes. Igualmente se han propuesto iniciativas de cambio de horario hábil para las empresas de la ciudad, en especial las estatales, pero su implementación no ha sido ampliamente acogida como para evidenciar resultados medibles en la suavización de la demanda de usuarios.

A nivel semanal, la demanda del día hábil tiene un comportamiento más estable y cercana a 2.45 millones de pasajeros por día hábil en el 2023. Se observa que los días de semana santa e inicio de año, aunque son hábiles, presentan reiterativamente menor demanda, posiblemente debido a vacaciones colectivas a nivel empresarial y estudiantil.

A nivel anual, se observa un crecimiento sostenido que evoluciona desde los 117 millones de usuarios en el 2001, primer año de operación; hasta los 660 millones de usuarios anuales en el 2015.

En resumen, la demanda del BRT, presenta componentes estacionales tanto a nivel diario, como semanal y mensual, pero a nivel anual se observa un comportamiento de crecimiento sostenido [48]. Este comportamiento facilita la creación de un modelo de nivel agregado a unidades anuales, donde las altas variabilidades de las estacionalidades mensuales, semanales o diarias se no tienen relevancia.

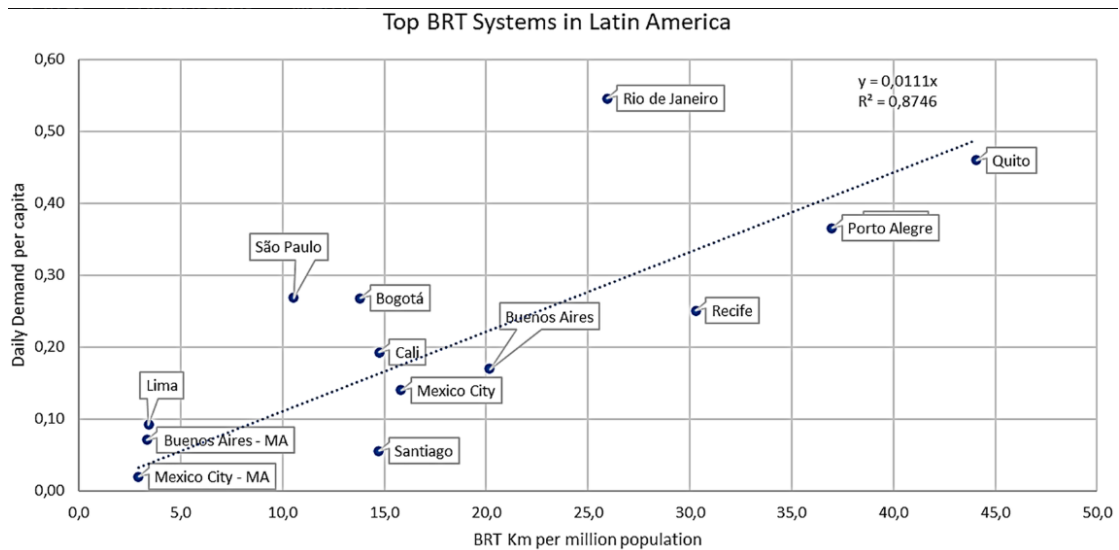


Figura 1. Relación entre la cantidad de usuarios, la población y la extensión de troncales.

Fuente: Tomado Hidalgo [51]

La figura anterior, elaborada por Hidalgo et al [51, muestra que el tamaño de la demanda del BRT se relaciona directamente con el tamaño de la población y la oferta de extensión de troncales.

1.4 Estructura administrativa del BRT de Bogotá

La Alcaldía mayor de Bogotá, administra la movilidad de la ciudad a través de la coordinación de cinco entidades principalmente:

- Transmilenio S. A. – TM.
- Secretaría Distrital de Movilidad – SDM.
- Terminal de Transporte – TT.
- Instituto de Desarrollo Urbano – IDU.
- Unidad de Mantenimiento Vial – UMV.

La empresa Transmilenio, o Empresa de Transporte del Tercer Milenio S. A., administra el Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá, o SITP que opera en Bogotá y Soacha, y del cual hace parte el BRT de Bogotá. Su operación inició en diciembre del año 2000 con las troncales de la avenida Caracas (hasta la avenida de los Comuneros) y la calle 80.

La estructura de accionistas de Transmilenio S.A. está conformada así:

- 70.05 % Alcaldía mayor de Bogotá.
- 9.96 % Instituto de Desarrollo Urbano – IDU.
- 3.34 % Instituto Distrital de Cultura y Turismo – IDCT.
- 3.33 % Unidad Administrativa de Rehabilitación y Mantenimiento Vial – UMV.
- 3.33 % Metrovivienda – MV.
- 3.33 % Fondo de Prevención y Atención de Emergencias – FOPAE.
- 3.33 % Instituto Distrital de Patrimonio Cultural – IDPC.
- 3.33 % Fondo de Vigilancia y Seguridad de Bogotá – FVS.

Esta conformación accionaria evidencia el peso significativo que tiene la alcaldía en las decisiones estratégicas de Transmilenio y por lo tanto del BRT de la ciudad de Bogotá.

Internamente la empresa Transmilenio S.A., posee una definición de estructura organizacional con tres macroprocesos: Alta Gerencia, Gerencia de la Integración y Dirección y Control de la operación (ver figura siguiente).

Transmilenio actúa como ente gestor de todo el sistema de transporte Público Masivo de Bogotá y en particular del BRT. La prestación directa del servicio a los usuarios se hace a través de las empresas que contrata como operadores del sistema y que se presentan en la Tabla 3.

La asignación de la operación se hace a través de licitación pública y por períodos que normalmente son de varios años.

Se pueden identificar en esta estructura, la existencia de una “Oficina de Asesoría de Planeación” cuya orientación misional se relaciona con la aplicación del modelo objeto de este trabajo. Igualmente existe una “Dirección Técnica de Buses” y una “Dirección Técnica de BRT”,

que son los procesos directamente encargados de administrar la operación del BRT, y por lo tanto de generar la información pública que ha sido tomada para generar y calibrar el modelo.

1.5 Troncales del BRT de Bogotá

La implementación de las troncales del BRT de Bogotá se ha planeado y ejecutado por fases, estando disponibles a la fecha las primeras tres fases con una extensión total de 114.9 km [23].

Para el presente estudio, se incluyen todas las troncales resumidas en la Tabla 1. Allí se consideran los tramos de las pretroncales de la carrera 7 y calle 26 debido a que en la práctica operan con buses padrones que circulan en parte de los corredores de la Calle 26, Carrera 10 y Carrera 7. Las troncales de sus tres primeras fases han entrado en operación sucesivamente así:

- Fase I: 2000 – 2002.
- Fase II: 2003 – 2006.
- Fase III: 2012 – 2015.

En el 2023 se adelanta la construcción de las troncales alimentadoras de la línea 1 del metro sobre la Avenida 68 y la Avenida Ciudad de Cali.

Tabla 1. Longitud de troncales de TransMilenio ya operativas o con alta probabilidad de implementación

Fase	Corredor	Longitud (km)	Año de puesta en servicio
I	Calle 80	10,1	2000
	Caracas -Usme	18,3	2000
	Autopista Norte	10,3	2001
	Caracas -Tunal	1,7	2002
	Eje ambiental	1,9	2002
II	Américas	13	2003
	NQS	19,3	2005
	Suba	13	2006
	Soacha	3,6	2013
III	Calle 26 (sin aeropuerto)	12,2	2012
	Carrera 10	7,3	2013
	Calle 6	2,2	2015
III Pretroncal	Calle 26	2	2014
	Carrera 7	12	2030
Alimentadoras metro	Avenida 68	16,9	2026
	Avenida Ciudad de Cali	7,4	2026
	Calle 13	11,4	2027
	Avenida Boyacá	34,4	2035
		197,0	

Fuente: Datos tomados del documento Conpes 4104 de 2023 [6] y el informe 89 de 2023 de

La construcción de la troncal de la calle 13 entre Puente Aranda y el río Bogotá, fue presentada con Declaratoria de Importancia Estratégica en el documento Conpes 4104 de 2023 para ser ejecutada entre 2024 y 2035. Se resalta su importancia para disminuir los tiempos de transporte de las localidades que abarca, mejorar la conexión con la Línea 1 del Metro, actualmente en construcción; y favorecer la conexión regional con los municipios vecinos al occidente de la ciudad (Facatativá, Madrid, Mosquera y Funza).

La Troncal de la Avenida Boyacá, con una extensión de 34.4 km y que permita conectar los extremos sur y Norte de la ciudad desde Yomasa hasta la Avenida San José y la Avenida San José entre Avenida Boyacá y la Autopista Norte, no tiene aún definición sobre su construcción y probablemente dependerá de la terminación de las primeras dos líneas del Metro y su integración con el BRT. De sus 34,4 km visualizados, se asume para ese estudio que en el horizonte de estudio (2023-2043) solamente se implementarán 6,4 km hacia el año 2034.

La ampliación de la red Troncal del BRT de Bogotá está sujeta o relacionada con la implementación de nuevos modos en el SITP. Algunas de estos modos se relatan a continuación:

- Cable aéreo Localidad de Ciudad Bolívar y Altos de Cazucá, actualmente en proceso de licitación y con operación esperada para el año 2027.

- Metro pesado. Actualmente en construcción, desde el portal de las Américas hasta la calle 100 (24 km) y posterior extensión hasta la calle 127.

- Corredor férreo de Occidente: de la Carrera 10 hasta el municipio de Facatativá, y Ramal al Aeropuerto.

- Cable aéreo Localidad de San Cristóbal, proyectado para entrar en operación en el año 2025.

- Sistema de trenes ligeros: conformado por un anillo de 78.3 km.

- Corredor férreo del sur: de la Estación de la Sabana hasta Soacha.

- Carrera 7: Tranvía urbano desde la Estación del Museo Nacional hasta la Calle 110, y de allí hasta la Carrera 9 a la altura de la Estación de Usaquén hasta llegar a la Calle 170 en el norte de la ciudad de Bogotá.

- Avenida 68: conectando la autopista Sur con la carrera séptima.

Este repaso de la implementación de la red de troncales del BRT de Bogotá muestra un avance progresivo con alta probabilidad de continuidad en su extensión e integración con otros elementos del SITP [22]. En la tabla 2 se presenta el esquema más completo contemplado a la fecha por TRANSMILENIO S.A. para implementación de troncales y una visualización a largo plazo de su implementación según su priorización estratégica.

Tabla 2. Plan de expansión de troncales de TransMilenio

Año	Proyecto	Inicio	Fin	Longitud (km)
2020 - 2024	Troncal Carrera 7	Calle 32	Calle 235	25,3
	Extensión Caracas Sur	Estación Molinos	Portal Usme	4
	Troncal Av. 68	Carrera 7	Av. NQS	16,9
	Troncal Av. Ciudad de Cali	Límite distrito	Portal Américas	7,3
	Soacha Fase II y III	Estación San Mateo	Calle 30 Sur Soacha	3,9
	Troncal Avenida Boyacá	Yomasa	Av. Guaymaral	40,3
	Troncal Calle 13	Carrera 50	ALO	10,9
	Extensión Troncal Américas	Av. NQS	Carrera 50	2,7
2024 - 2030	Extensión Troncal Calle 80	Portal 80	Límite distrito	3
	Extensión Troncal Autonorte	Calle 193	Calle 245	6,4
	Troncal Av. Villavicencio	Av. NQS	Portal Tunal	4,5
	Extensión Calle 26	Portal Eldorado	Aeropuerto El Dorado	2,3
	Troncal Avenida Mutis	Av. Caracas	Límite distrito	13,8
	Extensión Caracas Sur	Portal Usme	Yomasa	3,1
> 2030	Troncal Av. El Polo	Carrera 7	ALO	6,9
	Troncal Av. Ciudad de Cali	Av. Américas	Calle 170	16,5
	Troncal ALO	Lím. Distrito - Soacha	Av. Guaymaral	29,2
	Troncal Calle 170	Carrera 7	ALO	9,3
	Troncal Av. Ferrocarril del Norte	Av. Guaymaral	Autonorte	19,1
	Troncal Av. Ferrocarril del Sur	Av. NQS - Calle 22	Av. Villavicencio	9
	Troncal Av. Jorge Gaitán Cortés	Av. Villavicencio	Av. NQS - Calle 8 Sur	6,3
	Troncal Calle 127	Carrera 7	Límite distrito	13,5
TOTAL				254,2

Fuente: Plan marco del SITP 2019 [22]

En este listado se incluyen todas las opciones planteadas y priorizadas, independientemente de que ya tengan asignación o previsión de recursos para su implementación.

1.6 Tipología de buses del BRT de Bogotá

Los buses del BRT de Bogotá se clasifican según su capacidad de transporte de pasajeros en Biarticulados 250 pasajeros, Articulados 160 pasajeros y Padrones duales 80 pasajeros. En la siguiente tabla se muestra un resumen de sus cantidades actuales por tipología.

Tabla 3. Flota Troncal vinculada BRT Bogotá 2023.

Operador	Biarticulados (250)	Articulados (160)	Padrones duales (80)	Total
SOMOS BOGOTÁ USME S.A.	164	96	0	260
SI 18 SUBA S.A.S.	130	0	0	130
SI 18 NORTE S.A.S.	60	179	0	239
SI 18 CALLE 80 S.A.S.	111	0	0	111
GMOVIL S.A.S.	87	38	53	178
CONSORCIO EXPRESS USAQUÉN S.A.S.	84	36	135	255
CONSORCIO EXPRESS SAN CRISTÓBAL S.A.S.	138	51	84	273
CAPITALBUS S.A.S.	260	0	0	260
BMO SUR S.A.S.	238	202	0	440
	1.272	602	272	2.146

Fuente: Extractado de informe TRANSMILENIO S.A. 2023 [23]

Esta división por capacidad de los buses incrementa a complejidad del sistema para su modelamiento.

Otra clasificación de especial interés para el presente trabajo y validada en 2023 por el Consejo de Política Económica y Social del Distrito Capital [1], se basa en el nivel de generación de gases contaminantes y material particulado. La clasificación se resume así

Vehículos de cero emisiones:

- Eléctrico
- Hidrógeno

Vehículos de bajas emisiones:

- Diésel con estándar Euro VI
- Gas con estándar Euro VI
- Híbridos Euro VI o superior

Respecto al nivel de emisión la flota para el año 2023 se clasifica así [23]:

Tabla 4. Clasificación de la flota en 2023 según nivel de emisión

Clasificación	Porcentaje de flota
Euro IV	3%
Euro V	19%
Euro V con filtro	33%
Euro VI	34%
Híbrido (Diésel Euro V – eléctrico)	11%

Fuente: adaptado de informe 89 de 2023 de TRANSMILENIO S.A. [23].

La flota troncal posee una dispersión de edades según los siguientes grupos reportados por TRANSMILENIO S.A. [23]:

Esta dispersión de edades y la vida útil estimada de los vehículos (que fluctúa entre 12 y 15 años dependiendo de la tipología de bus) hacen de la renovación de flota una actividad de constante revisión con especial interés para la actualización tecnológica.

Tabla 5. Clasificación de la flota en 2023 según edad

Clasificación	Porcentaje de flota
0-3 años:	57 %
3-5 años:	12 %
5-10 años:	24 %
mayor a 10 años:	7 %

Fuente: adaptado de informe 89 de 2023 de TRANSMILENIO S.A. [23].

1.7 Normativa BRT Bogotá

La legislación Nacional, directamente relacionada con el BRT de Bogotá está integrada principalmente por:

- 16 documentos Conpes, resaltando el 3991 de 2020 que resume los lineamientos para la movilidad urbana y regional.

- 8 decretos emitidos principalmente por el ministerio de transporte, siendo el documento seminal el decreto 3109 de 1997 que sentó las bases definitorias para la financiación y construcción del BRT.

- 2 leyes que definen la conformación de organismos y mecanismos de control y que en la década presente se preocupan cada vez más por los aspectos de sostenibilidad y coordinación regional.

- Documentos de políticas: resaltan tres documentos, cuyo tema central es el planteamiento de estrategias orientadas a alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), mundialmente acogidos y muy particularmente en lo relacionado con el objetivo 11 “Ciudades y comunidades sostenibles” y el “objetivo 13 Acción por el clima”:

- Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire – PPCCA.
- Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDDB).
- Política Nacional de Cambio Climático.

- En 1989 la ley 86 y posteriormente la ley 310 de 1996, sentaron las bases normativas para el Sistema de Servicio Público Urbano de Transporte Masivo y que serían la base fundamental para establecer la primera fase del BRT de Bogotá.

Paralelo a esto y muy especialmente desde 1992, la normativa internacional avanzaba en el objetivo de mitigar el cambio climático y la contaminación del aire. Es así como se han realizado varios acuerdos, en la tabla 6 se resumen algunos de ellos:

Tabla 6. Listado de normativas internacionales relevantes para el presente trabajo

Año	Nombre	Objetivo pertinente para esta investigación
1992	Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)	Abordaje temático del problema del cambio climático
1997	Protocolo de Kioto	Reducir las emisiones de los gases responsables del efecto invernadero
2007	COP 13 – Bahli	Hoja de ruta de Bahli
2009	COP 15 -Copenhague	Financiación a largo plazo, reto 2°C
2012	Objetivos de desarrollo sostenible	En el objetivo 13 aborda el cambio climático
2015	Acuerdo de París	Reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático
2016	Proclamación de Marrakech	“Estándares de emisión” de la Unión Europea para vehículos de combustión interna
2018	COP 24 – Katowice	Reglas del Acuerdo de París
2021	COP 26 -Glasgow	Pacto Climático de Glasgow

Fuente: elaboración propia.

La implementación progresiva del BRT de Bogotá con inicio de operación en el año 2.000, fue acompañada por normativa nacional donde resaltan los documentos Conpes 3260 de 2003 y Conpes 3368 de 2005, que se orientaron a definir la Política Nacional de Transporte Urbano Masivo (PNTUM). Sin embargo, aún no se plasmaba la determinada orientación a considerar los asuntos de tecnologías limpias dentro de la reglamentación del BRT de Bogotá.

En el año 2010 el Ministerio de Transporte, dentro de la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono, propone en el Plan de Acción Sectorial de Mitigación (PAS) Sector Transporte, la “Sustitución del 75 % de la flota de buses articulados de los sistemas de transporte masivo (SITM) en año 2040”. Esto evidenció la preocupación de orden nacional y muy puntualmente desde el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 para que se consideraran las tecnologías limpias dentro del BRT de Bogotá.

La legislación distrital, ha sido generada en su gran mayoría por la Alcaldía Mayor de Bogotá en 28 decretos, donde resalta el decreto 477 de 2013, denominado “Plan de ascenso tecnológico” [12] que contempla la “gestión y coordinación de un banco de información” que permita el acceso público de la información no confidencial generada en las pruebas de nuevas tecnologías para el transporte masivo de Bogotá. Así mismo, fija las directrices para la renovación tecnológica del BRT hacia tecnologías más limpias y enfoca su desarrollo a través de la

coordinación de tres entidades: Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá, Secretaría de Medio Ambiente de Bogotá y TRANSMILENIO S.A.

Más puntualmente la ley 1972 de 2019, establece que:

- A partir del 1 de enero de 2019, se exige el estándar Euro VI como requisito para todos los vehículos diésel en circulación

- A partir del 1 de enero de 2030, mínimo el 20 % de la flota total nueva del BRT debe ser eléctrica o de cero emisiones.

- A partir del 1 de enero de 2035, todos los vehículos diésel en circulación deben cumplir con el estándar Euro VI (artículo 5).

Un componente importante del PAT para el presente trabajo de investigación es la disposición que hizo sobre la necesidad de generar escenarios propicios para la reposición de vehículos usados por vehículos de cero o bajas emisiones en ruta.

Posteriormente, en el año 2019, la ley 1964 en su Parágrafo 3 del Artículo 8 [41] establece las siguientes fechas y porcentajes mínimos exigibles para los vehículos nuevos adquiridos para operación en el BRT por cualquier motivo (aumentar la capacidad transportadora de los sistemas, cuando se requiera reemplazar un vehículo por destrucción total o parcial que imposibilite su utilización o reparación y cuando finalice su vida útil y requiera reemplazarse) los cuales deben ser eléctricos o de cero emisiones contaminantes.

Tabla 7. Porcentaje mínimo exigido de vehículos nuevos eléctricos o de cero emisiones contaminantes adquiridos

Año	% mínimo de vehículos adquiridos eléctricos o de cero emisiones contaminantes
2025	10 %
2027	20 %
2029	40 %
2031	60 %
2033	80 %
2035	100 %

Fuente: elaborado según datos de la ley 1964 de 2019 del Congreso de Colombia. [41]

El Acuerdo 732 de 2018 Concejo de Bogotá, D.C. establece que desde el año 2025, el 100 % de los vehículos nuevos que operen en el componente troncal deben propulsarse con motores eléctricos o tecnologías que generen cero emisiones directas de material particulado.

El artículo 172 de la Ley 2294 de 2023 por medio de la cual se establece el Plan de Desarrollo 2022-2026 [49] establece la cofinanciación entre 40% y 70% de Sistemas Integrados de Transporte Masivo con estándares de cero y bajas emisiones.

El artículo 49 de la ley 2099 de 2021 establece incentivo tributario para la energía utilizada en la carga o propulsión de vehículos eléctricos o sistemas eléctricos de transporte masivo de pasajeros [50]

1.8 Costos comparativos de operación buses del BRT de Bogotá

Varios estudios [9], [18], [21], han reportado una ´previsible favorabilidad de los vehículos eléctricos en sus costos operativos, debido principalmente a la favorabilidad en el costo energético. Pero estos análisis no mostraban favorable el costo de inversión de capital en compra del vehículo y en el reemplazo de las baterías, siendo estos costos una barrera fuerte para su aceptabilidad frente a opciones de vehículos basados en combustibles fósiles [5], [9], [10]. Un estimado preliminar de datos se observa en la tabla 8.

Tabla 8. Comparativo de costos mensuales de operación por tecnología a cierre de 2013, asumiendo 1,2 kWh/km, costo de \$300/kWh, recorrido de 18.750 km/mes

Concepto	Articulado diésel Euro IV	Articulado eléctrico
Nómina operadores	5.517.894	5.517.894
Lavado	1.198.634	1.198.634
M/O Mantenimiento	825.000	825.000
Otros consumibles	136.843	136.843
Subtotal costos comunes	7.678.371	7.678.371
Combustibles	9.660.153	-
Energía eléctrica	-	6.750.000
Llantas	197.060	226.619
Lubricantes y grasas	502.759	175.966
Filtros	114.301	-
Chasis	966.162	386.465
Carrocería	407.657	407.657
Subtotal costos diferenciadores	11.848.092	7.946.707
Total	19.526.463	15.625.078

Fuente: Informe final de actividades BID 2013 [18].

Esta cifra, aunque preliminar, concuerda con lo reportado en otros informes, en los cuales se espera una reducción de 18 % a 20 % en los costos de operación anuales de los buses eléctricos frente al tradicional bus diésel.

Reportes generados después de 2020 [13], [20], [39] muestran que los avances tecnológicos en los costos de baterías, el encarecimiento de los combustibles fósiles y la relativa estabilidad del costo de la energía eléctrica, plantean unos nuevos resultados del costo comparativo de cada tecnología (capital, mantenimiento, energía, reemplazo de baterías) [39].

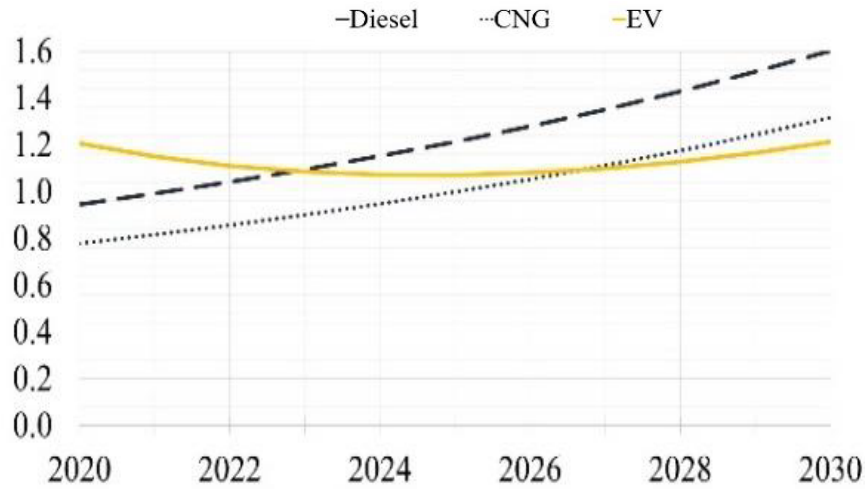


Figura 2. Costo total por tecnología para buses articulados en Bogotá (Cápex y Opex) en USD/km.

Extractado de Cuéllar 2023 [39]

Según la figura anterior, desde 2023 la tecnología eléctrica para buses articulados de Bogotá se presenta más atractiva en costos totales que la tradicional tecnología Diésel. Esta misma favorabilidad en costos totales de la tecnología eléctrica frente a la tecnología a gas comprimido vehicular se visualiza a partir de 2027.

En la figura siguiente se muestra la participación de los componentes de costo al costo total y su evolución por tecnología. En ella se puede observar que la favorabilidad previsible en el costo total de los buses articulados eléctricos para Bogotá se atribuye a una disminución en el costo de las baterías y de compra inicial del vehículo, mientras que los vehículos basados en combustible fósil presentan aumento en su costo energético y de adquisición.

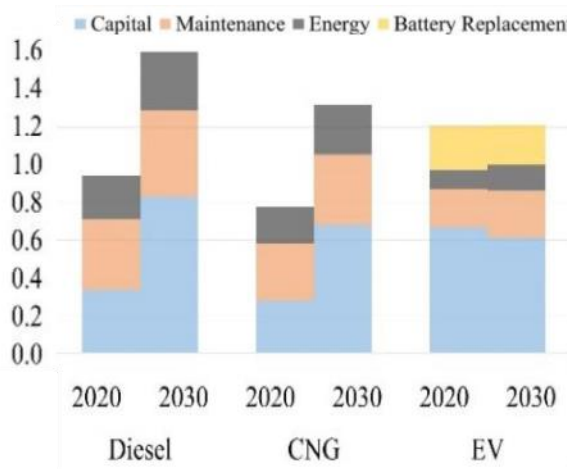


Figura 3. Componentes del Costo total USD/km.veh. buses articulados en Bogotá. Extractado de Cuéllar 2023 [39]

Estudios similares realizados para varios Estados de Estados Unidos en 2023 [20] reportan resultados similares, donde la tecnología eléctrica siempre se presenta más favorable en costos frente a otras tecnologías.

El estudio realizado en el Reino Unido y reportado en 2024 por Wang de 2023 [13] concluye que los vehículos eléctricos ya empiezan a presentar costos totales inferiores entre un 11% y 30% frente a los tradicionales de Diesel. Además de corroborar esta observación ya mencionada arriba, el estudio de Wang [13] propone una estructura para calcular el costo total (Cápex y Opex) para vehículos de transporte, apoyando así la diferenciación en costos de las tecnologías disponibles.

1.9 Satisfacción del BRT de Bogotá

La empresa TRANSMILENIO S.A. mide la satisfacción de los usuarios del BRT de Bogotá, con encuestas realizadas a través de empresas especializadas. En mayo de 2023 se generó el reporte del trabajo realizado por la empresa Proyectamos Colombia S.A.S. [47].

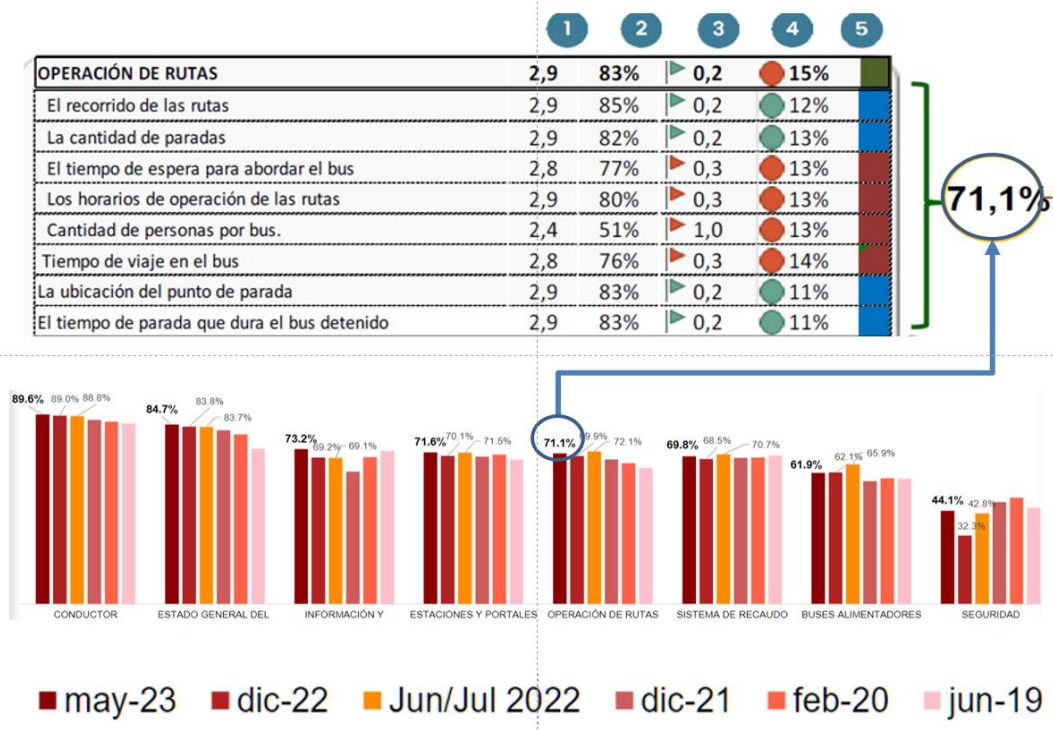


Figura 4. Índice general de satisfacción componente Troncal

Fuente: tomado del informe de Satisfacción General TRANSMILENIO S.A., 2023 [47].

La “Operación de rutas” hace parte de la medición de satisfacción del componente troncal y sus ocho elementos son directamente relacionables con el tamaño de la flota en operación y su cantidad de vehículos necesarios.

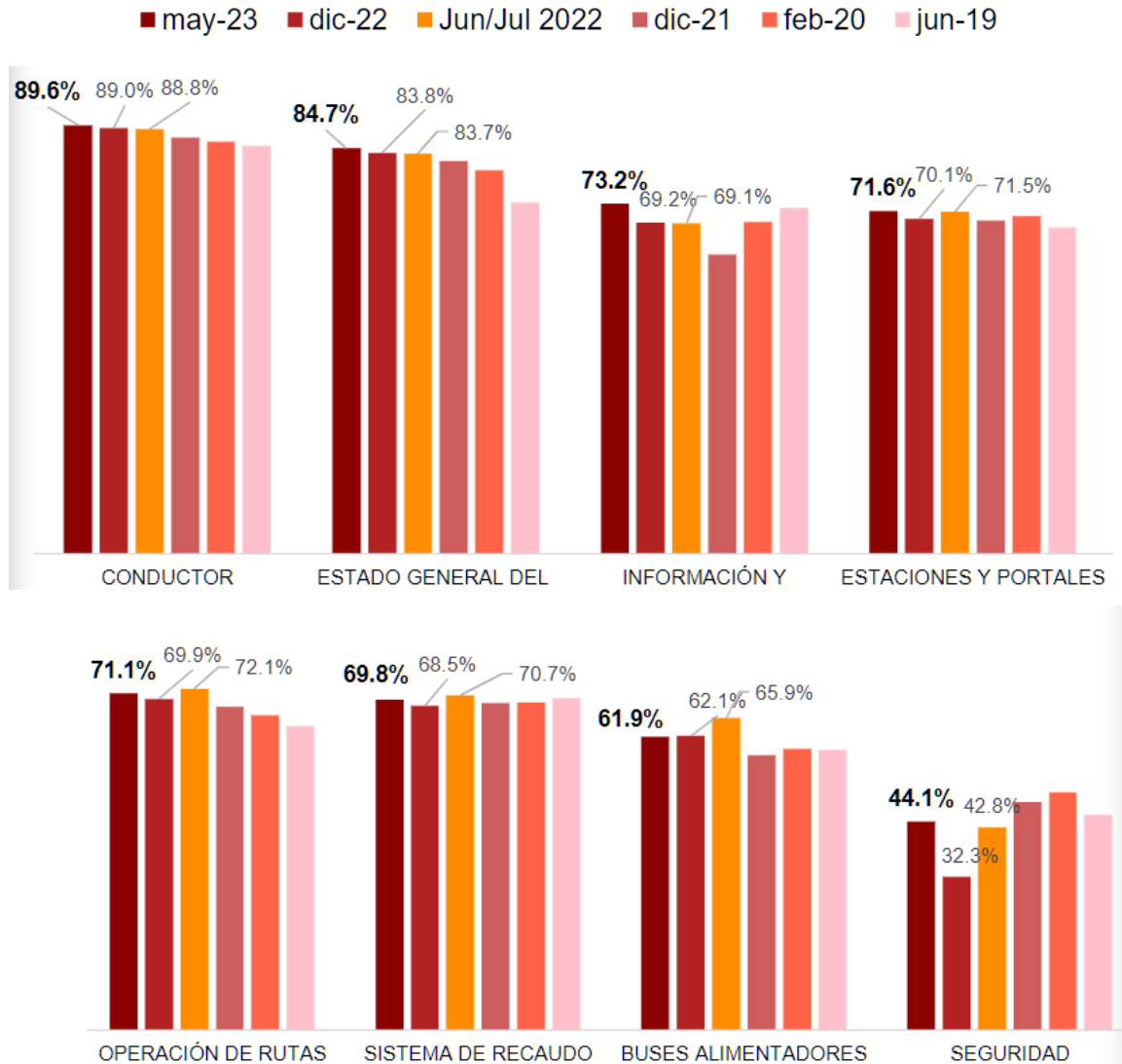


Figura 5. Estructura de percepción de calidad del servicio del BRT de Bogotá

Fuente: www.transmilenio.gov.co [47]

Las encuestas de percepción ciudadana sobre la movilidad en Bogotá, comparativamente entre 2019 y 2023 (Bogotá cómo vamos ,2023) muestran que la ciudadanía es cada vez más afecta hacia las opciones de modos sostenibles. Resalta que TransMilenio sigue ganando participación entre las opciones utilizadas para desplazarse en las actividades habituales, representando el 40% en el año 2023.

1.10 Emisiones y análisis *Well to Wheel*

La calidad del aire es de importancia global, tanto por su efecto sobre el calentamiento global debido a los gases de efecto invernadero, como por sus consecuencias sobre la salud humana debidas al material particulado que es responsable de enfermedades cardiovasculares y respiratorias [1].

El impacto ambiental de emisiones vehiculares se da no solamente durante la operación de los vehículos, si no por generación de la fuente energética y de construcción y renovación del vehículo mismo. Esta cuantificación encuentra sustento en la metodología denominada *Well to Wheel* o metodología “Del Pozo a la Rueda” [38], [39].

Si bien desde el Protocolo de Kioto, es formalmente aceptada la medición integral de los gases de efecto invernadero por metodologías que recojan toda la incidencia operativa del vehículo, de su generación de la fuente energética y de la construcción del vehículo y su renovación, todo esto resumido en la llamada Huella de Carbono para los gases de efecto invernadero y que se miden en CO₂ equivalente, la legislación colombiana clasifica los vehículos del BRT considerando únicamente la generación de emisiones durante su operación [41], [42].

Así mismo, la medición del material particulado, especialmente El PM2.5 que impacta en la generación enfermedades cardiorrespiratorias debería hacerse por metodologías como la *Well to Wheel* (Del Pozo a la Rueda) o de ciclo de vida, incluye tanto las emisiones generadas en la operación del vehículo, como las que se generan al producir su fuente energética. En la tabla 10 se muestra el resultado de un estudio realizado específicamente para Bogotá [38], para varias tipologías de vehículos de transporte urbano.

Tabla 10. Cuantificación de emisiones por kilómetro recorrido según análisis “Del Pozo a la Rueda” aplicado en el BRT de Bogotá

Emisión	Unidad de medida	Tipo de vehículo			
		Diésel	Gas	Híbrido	Eléctrico
CO ₂ eq	kg/km	4	2,2	1,5	0,59
PM2.5	mg/km	550	15	250	50

Fuente: datos extraídos y adaptados de [37].

En la tabla 10 se resumen datos de emisiones extraídos de estudio realizado en el BRT de Bogotá bajo condiciones comunes de operación. Los buses corresponden a articulados operando en troncal. El dato correspondiente al bus híbrido fue estimado por el autor a partir de los datos disponibles para las otras tipologías de buses [29].

Estos datos por si solos ya muestran la bondad operativa del bus eléctrico frente a la tradicional tecnología basada en el diésel.

Tabla 11. Cuantificación de emisiones por pasajero y kilómetro recorrido según análisis “Del Pozo a la Rueda” aplicado en el BRT de Bogotá

Tipo de vehículo	PM2.5 (mg/km-pasajero)	CO ₂ eq (g/km-pasajero)
BRT TransMilenio eléctrico	0.4	3.7
Automóvil Eléctrico	1.3	14.0
Bus B5 35-60 pasajeros	21.1	15.0
Bus GNV 120 pasajeros	0.1	18.1
Bus GNV 16-19 pasajeros	0.8	18.4
Bus B5 16-19 pasajeros	2.9	22.1
Bus B5 19-32 pasajeros	9.2	19.8
BRT TransMilenio B5	3.4	26.9
Automóvil E10 con TWC; < 1400 c.c.	4.2	54.8
Automóvil E10 sin TWC; < 1400 c.c.	5.1	69.6
Automóvil E10 con TWC; >1400 c.c.	5.3	73.3
Taxi GNV	1.8	100.0
Automóvil E10 sin TWC; > 1400 c.c.	6.7	94.7
Taxi E10	7.6	102.8
Motocicleta 4-tiempos, <150 c.c.	11.6	118.1
Motocicleta 4-tiempos, >150 c.c.	18.8	167.1

Fuente: datos extraídos y adaptados de [38].

En la tabla 11 se puede observar que al cuantificar comparativamente las emisiones medidas no solamente por kilómetro recorrido sino por pasajero transportado, la opción del BRT con vehículos de gran capacidad de pasajeros es ampliamente beneficiosa con respecto a las opciones de transporte privado o público de vehículos más pequeños como automóviles, motocicletas o taxis.

1.11 Baterías

En 2005 el decreto 4741 de la Presidencia de la República, seguido en 2009 por el decreto 372 del Ministerio de Medio Ambiente, y en 2010 por la resolución 1297, establecieron la clasificación de las baterías de plomo ácido como residuos peligrosos y la obligatoriedad de someterlas a un Plan de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo para su retorno a la cadena de producción-importación-distribución-comercialización. Igualmente se establecieron los lineamientos para formalizar su logística inversa.

El Decreto 284 de 2018 de la Presidencia de la República ordena actividades para la recolección, almacenamiento y aprovechamiento de los residuos de aparatos eléctricos, concentrando su actividad en empresas recolectoras especializadas y con aprobación directa bajo Licencia Ambiental. En 2020 el Documento 30 del Consejo de Política Económica y social del Distrito Capital establece la necesidad de generar lineamientos claros para el aprovechamiento y disposición de las baterías generadas por vehículos eléctricos [1].

La operación centralizada de un BRT representa por sí misma una excelente oportunidad de administrar la logística inversa de las baterías que genera.

2. Dinámica de Sistemas

La Dinámica de Sistemas se ha identificado como una herramienta valiosa para el estudio de problemas de gran escala con alta complejidad e incertidumbre [3], donde concurren múltiples actores de comportamiento variable y que causan respuestas diversas en cada tipo de participante en el sistema. Su desarrollo fue aportado por Jay Forrester del Massachusetts Institute of Technology (MIT) en 1958.

Los sistemas aptos para ser modelados por Dinámica de Sistemas deben tener las siguientes características:

- Dinámicos: contienen elementos que cambian de valor a través del tiempo.
- Complejos: tienen gran cantidad de variables y participantes.
- Con bucles de realimentación: las conexiones entre sus componentes forman cadenas de relaciones circulares causa efecto.
- Con retrasos: los efectos de algunas variables sobre otras no son inmediatos
- Con comportamientos rupturistas: con cambios bruscos a través del tiempo.

Tabla 12. Ejemplos de clasificación de sistemas según su complejidad e incertidumbre

		Complejidad (número de partes)	
		Baja	Alta
		Incertidumbre (impredecibilidad)	Alta
Elecciones presidenciales	Ciudad		
Lotería	Cerebro		
Baja	Artículo pirotécnico		Reactor Químico
	Clima		Guerra
	Familia		Hormiguero
Salón de clase	Sistema solar		
Péndulo	Reloj		
Cuarto frío	Banco		
Martillo	Canal de Panamá		

Fuente: elaboración propia.

Los casos de transporte son considerados un campo de aplicación de la Dinámica de Sistemas. El trabajo de Abbas y Bell [1994. "System Dynamics Applicability to Transportation Modeling." *Transportation Research Part A* 28 (5): 373–390] identificó las bondades de la Dinámica de Sistemas para el modelado del transporte y el soporte en los análisis de políticas y otros asuntos estratégicos, con aportes al entendimiento de los posibles impactos de políticas públicas.

El libro publicado por Sterman en el año 2000 [2], constituye una generalizada guía académica de la utilización de la Dinámica de Sistemas para políticas de gobierno, salud, industria de automóviles y estudios urbanos.

En esencia, la Dinámica de Sistemas utiliza un bucle causal estándar. En este bucle, el estado del sistema genera decisiones en un momento específico que desencadenan en acciones que afectan el desempeño del sistema, cerrándose el bucle con la toma de nuevas decisiones inspiradas por los cambios manifestados en el sistema.

La aplicación de la Dinámica de Sistemas plantea inicialmente modelos cualitativos de relacionamiento entre los componentes de un sistema que permiten generar hipótesis sobre su interacción. Estos se denominan diagramas causales o diagramas de causa – efecto.

Estos diagramas causales soportan el desarrollo de modelos de flujo que permitan cuantificar los comportamientos del sistema bajo diversos escenarios [4]. Diversos modelos de Dinámica de Sistemas (SD) para el transporte urbano han sido planteados y evaluados en varias ciudades del mundo [4], [7], [16], [21], [28], [30], [31], [32].

2.1 Tipos de diagramas en la Dinámica de Sistemas

Diagrama causal: visualiza los elementos claves que componen un sistema y las relaciones entre ellos tal como se muestra en la siguiente figura.

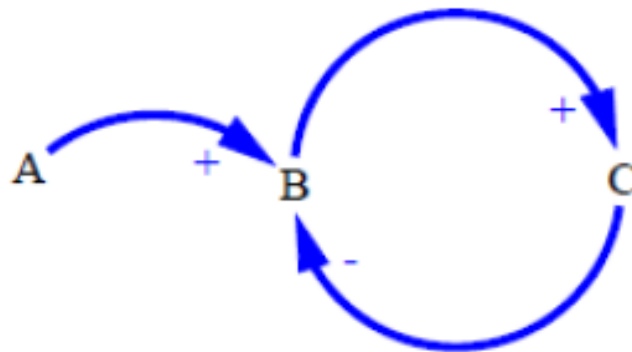


Figura 6. Ejemplo de diagrama causal

Fuente: tomado de García y Miguel [7].

Los elementos que componen el sistema (tales como A, B y C en la anterior figura), se colocan sobre el diagrama conectándolos con flechas que expresan la influencia que unos tienen sobre otros. Los signos colocados cerca a la flecha representan si la influencia es positiva o negativa. Una influencia positiva (por ejemplo, la de A sobre B) significa que, al aumentar el valor del componente inicial, se produce un aumento en el valor del componente influido (al aumentar A, aumenta B). De similar manera, un signo negativo representa una influencia causal negativa, es decir, que al aumentar el valor de la variable influenciadora (origen de la flecha), disminuye el valor de la variable influenciada (al aumentar C, disminuye B).

Diagrama de Forrester: muestra el diagrama causal utilizando los símbolos de la Dinámica de Sistemas. La siguiente es la simbología adoptada para el siguiente trabajo, muy influenciada por la usada naturalmente en el software Vensim.






Nomenclatura	Símbolo	Definición
Fuente		Fuente prácticamente inagotable. Un nivel que no tiene interés.
Variable de Estado		Acumulación de flujo. Nivel.
Variable de Flujo		Variación del nivel/estado.
Variable auxiliar	Variable	Ayudan a la comprensión del modelo.
Tubería		Canal de transmisión de una magnitud física, ésta se conserva.
Canal		Canal de transmisión de información, que no es necesario que se conserve.
Constante	Constante	Parámetro del modelo que no cambia de valor.

Figura 7. Ejemplo de elementos diagrama causal

Fuente: tomado de Rueda M. [33].

Diagrama de flujo: su elaboración recoge los elementos identificados en el diagrama causal y lo plasma en una herramienta específica de software para simular el comportamiento del sistema en varios escenarios.

El diagrama causal es la herramienta seminal de la Dinámica de Sistemas, siendo la base para formular los relacionamientos creando el diagrama de flujo del sistema. No todos los bucles y relacionamientos identificados en el diagrama causal son susceptibles de ser reflejados directamente en el diagrama de flujo, debido a las limitaciones de disposición de información específica del comportamiento de las variables. La identificación de estas limitaciones es una valiosa herramienta para proponer investigaciones sobre el comportamiento de los elementos del sistema [2], [3].

2.2 Bucles

Cuando se observa un diagrama causal es común identificar cadenas cerradas de relaciones causales, las cuales se denominan bucles. Por ejemplo, las correspondientes en la siguiente figura a las secuencias ABEDA, DBED y ABECA.

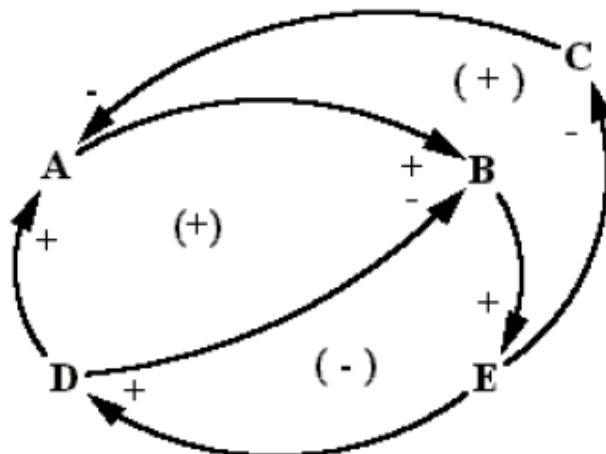


Figura 8. Ejemplo de Bucles

Fuente: Juan Manuel García [34].

Los bucles merecen especial atención pues actúan como elementos que estabilizan o desestabilizan el sistema en términos de converger hacia un objetivo determinado, es decir, alcanzar un estado de equilibrio.

Los bucles se denominan negativos o positivos, dependiendo del conteo de relaciones negativas que contengan:

- Bucles negativos, son los que poseen un número impar de relaciones negativas. se identifican visualmente en el diagrama por un signo “(-)”. Su actividad estabiliza el modelo al dirigirlo hacia un objetivo determinado o estado estacionario. En la figura anterior, el bucle DBED es negativo pues posee solamente un relacionamiento negativo.

- Bucles positivos, son los que poseen un número par de relaciones negativas. se identifican visualmente en el diagrama por un signo “(+)”. Su actividad desestabiliza el modelo al alejarlo de un objetivo determinado o generar fluctuaciones que no convergen en un estado estacionario. En la figura anterior, el bucle ABEDA es positivo pues todos sus relacionamientos son positivos. Igualmente, el bucle ABCEA es positivo pues posee dos relacionamientos negativos.

En la práctica, los sistemas poseen bucles positivos y negativos, el comportamiento final dependerá de cuál sea el bucle dominante en una combinación particular de valores o escenario.

El concepto de bucle es valioso para el análisis de la Dinámica de Sistemas, pues permite plantear intervenciones sobre las variables que intervienen, buscando la convergencia del sistema hacia valores objetivo o buscando el entendimiento de la influencia combinada de dichas variables.

2.3 Retraso

Cuando el efecto que produce el cambio en una variable se demora en ser reflejado sobre el valor de la variable que es influenciada, se produce un “retraso”. En la figura siguiente se muestra cómo se representa gráficamente este retraso con dos líneas que cruzan la flecha que une la “Acción” con el “Estado Real”.

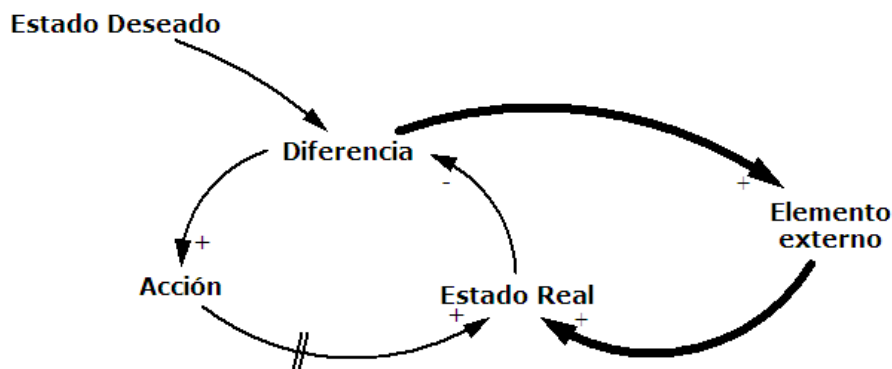


Figura 9. Ejemplo de retraso

Fuente: Juan Manuel García [34].

Ejemplos de variables que poseen retrasos en su desempeño, son las políticas, las cuales tardan un lapso de implementación después que han sido promulgadas.

2.4 Vensim y diagrama de flujo

La representación del diagrama causal en software especializado para análisis de Dinámica de Sistemas produce el “Diagrama de flujo”. La simulación computarizada de problemas de transporte a través de Dinámica de Sistemas cuenta con varios softwares en el mercado. Una consulta en Scopus, utilizando la siguiente ecuación de búsqueda:

TITLE-ABS-KEY (“software” AND transportation AND “System Dynamics”) AND PUBYEAR < 2015

, donde la palabra “software” es reemplazada secuencialmente con los nombres de varios softwares generalmente conocidos: Dínamo, Ithink, Powersim, Stella y Vensim; arroja los resultados presentados en la tabla 13.

Tabla 13. Resumen resultados de búsqueda en Scopus para varios softwares de simulación por dinámica de sistemas en el área de transporte

Software	N.º máx. de citas por documento	N.º de documentos	País (N.º de documentos)	Area
Vensim.	62	15	China (13)	Engineering
Dynamo	20	16	United States (4)	Engineering
Stella	8	1	Australia (1)	Environmental Science
Powersim	4	4	Italy (2)	Engineering
Ithink	0	1	United States (1)	Social Sciences

Fuente: elaboración propia.

Estos resultados evidencian la aplicación de estos softwares para abordar el análisis de problemas de transporte, especialmente dentro del área de ingeniería. Además, respalda la decisión de utilizar Vensim como herramienta para la ejecución del presente trabajo de investigación.

La representación gráfica de un diagrama de flujo está compuesta por: nivel, válvula, conectores y variables auxiliares.

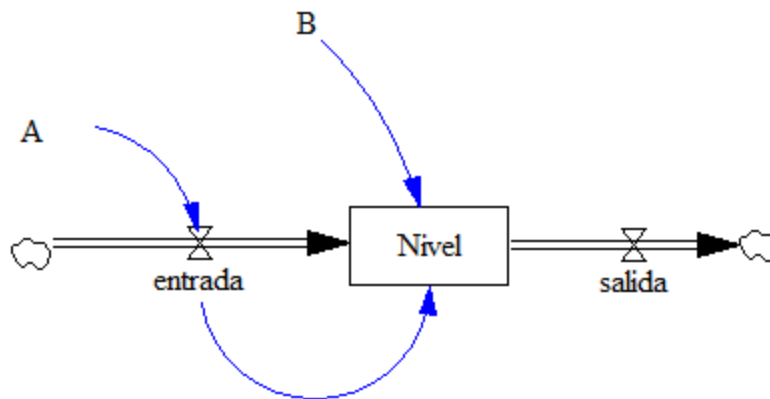


Gráfico 2. Elementos de un diagrama de flujo en Vensim

Fuente: elaboración propia.

Nivel: corresponde a una variable que acumula un valor a través del tiempo. Varían en función del comportamiento de otros elementos del modelo. También se denominan “stock”. Dentro del diagrama se representan con un rectángulo en cuyo interior se expresa el nombre de su variable.

Válvulas: son los reguladores de flujo de entrada o de salida de un nivel. Normalmente corresponden a velocidades de flujo que pueden depender de otras variables, como “A” en el gráfico anterior o del valor mismo del nivel.

Conector: es una flecha que transmite información entre los elementos del diagrama de flujo.

Variables auxiliares: son datos que ayudan a la definición de otros elementos. Usualmente corresponden a parámetros que reflejan el comportamiento de elementos externos al modelo pero que son utilizados en sus cálculos. En el diagrama anterior aparecen las variables A y B

Nubes: se conectan a las variables de nivel y son fuentes infinitas o sumideros infinitos de material.

2.5 Análisis de Dinámica de Sistemas

La utilización de la Dinámica de Sistemas para buscar la solución a un problema específico o el entendimiento de un sistema complejo implica la consideración de varias observaciones sobre su alcance y limitaciones [2], [34]:

- Simplicidad: el modelo final debe ser lo más simple posible. La complejidad dada por gran número de variables y relacionamientos puede dificultar tanto o más su análisis como el problema original analizado. El modelo debe ser una síntesis de los elementos preponderantes o de interés para el investigador.

- Entendimiento antes que pronóstico: aunque en un primer abordaje, un modelo puede ser visto como un conjunto de ecuaciones matemáticas que permiten cuantificar un estado posible del sistema, su principal objetivo es simular cómo se comporta el sistema frente a cambios en dichas variables, buscando facilitar su entendimiento y la consecuente toma de decisiones frente a múltiples escenarios que se puedan presentar.

- Entorno: el modelo creado está influenciado por un ambiente externo que define sus componentes, relaciones y posibles valores. Por lo tanto, un modelo está sujeto a la percepción que el investigador tiene del entorno que rodea el sistema que estudia, aportando una dosis de subjetividad al modelo. El modelo es pues “la representación explícita de un modelo mental” [2].

El marco de reflexión planteado por la “Heurística Crítica de Sistemas” planteado por Ulrich en 1987 [35], es una herramienta útil para fomentar el análisis de un sistema, ayudando a explorar y definir sus límites. Su aplicación se basa en responder 12 preguntas agrupadas en cuatro bloques. Cada pregunta debe ser respondida desde el cuestionamiento “es” y el cuestionamiento “debería ser”. Los desfases entre estos cuestionamientos inspiran el análisis del sistema:

Tabla 14. Preguntas de la Heurística Crítica de Sistemas

Motivación	Control o poder
¿Quién es el cliente o beneficiario de este sistema?	¿Quién es el tomador de decisiones?
¿Cuál es el propósito del modelo?	¿Qué decisiones tiene este bajo su control?
¿Cómo saber si hay una mejora? (medida de mejoramiento)	¿Qué condiciones no tiene bajo su control?
Experticia	Legitimidad
¿Quién o quiénes son los expertos en el sistema?	¿Quién vigila los intereses de los afectados?
¿Qué conocimiento se asume como relevante para la situación?	¿Qué oportunidades tienen los afectados de defender sus intereses?
¿Qué garantiza que las recomendaciones de los expertos se pueden implementar?	¿Qué cosmovisión determina el diseño?

Fuente: adaptado según la propuesta de Ulrich [35].

3. Metodología

La metodología de pensamiento sistémico resumida por Bilash [48] para el modelamiento y simulación basada en Dinámica de Sistemas, conforma la base de la secuencia de actividades aplicada en el presente proyecto, utilizando el software Vensim como herramienta para conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar el modelo desarrollado.

Inicialmente se hace la conformación del equipo de investigación, que permite el enfoque y abordaje de la revisión de casos previos, la normatividad pertinente y las entrevistas con expertos que permitan identificar el problema, sus participantes e intereses.

La identificación de los participantes con sus intereses e impactos del sistema a analizar es la base para identificar las relaciones causales que se representan en un primer diagrama causal que seguirá refinándose en el transcurso de la investigación, permitiendo ir organizando e identificando los relacionamientos y bucles principales.

El árbol causal se somete a una secuencia organizada de interrogantes basada en la metodología de análisis de Heurística Crítica de Sistemas, propuesto por Ulrich [35], y cuyo objetivo es promover un ambiente crítico que permita ajustar el diagrama causal, perfeccionando sus componentes y encontrando las bases para proponer los escenarios que debería soportarse con el modelo desarrollado.

Con el diagrama causal como base central, se aborda la construcción del diagrama de flujo, donde las variables se conectan a través de ecuaciones que permitan cuantificar su relacionamiento. En esta etapa es determinante el levantamiento de información de campo, disponible en estudios previos o en publicaciones de los *stakeholder* identificados en los pasos previos.

Las variables se organizan a través del análisis estructural que las clasifica y liga en grupos de acuerdo al cruce de dos perspectivas: la perspectiva externa y la perspectiva del modelador. El resultado de esta clasificación sienta las bases para la presentación gráfica de los resultados del modelo y así perfeccionarlo con un análisis de sensibilidad que identifica sus valores extremos, dando confianza sobre el desempeño del modelo.

Dado que en este trabajo el objetivo es generar el modelo que explique la Dinámica del Sistema, no se hará exhaustivo análisis de calibración del mismo. Las entrevistas con expertos se centrarán básicamente en la calidad de los componentes del diagrama de flujo (variables, unidades de medida, ecuaciones, parámetros).

Finalmente se generan escenarios que permitan observar el funcionamiento del modelo, desarrollado, consignado las recomendaciones identificadas para el sistema analizado, su contexto y futuras investigaciones.

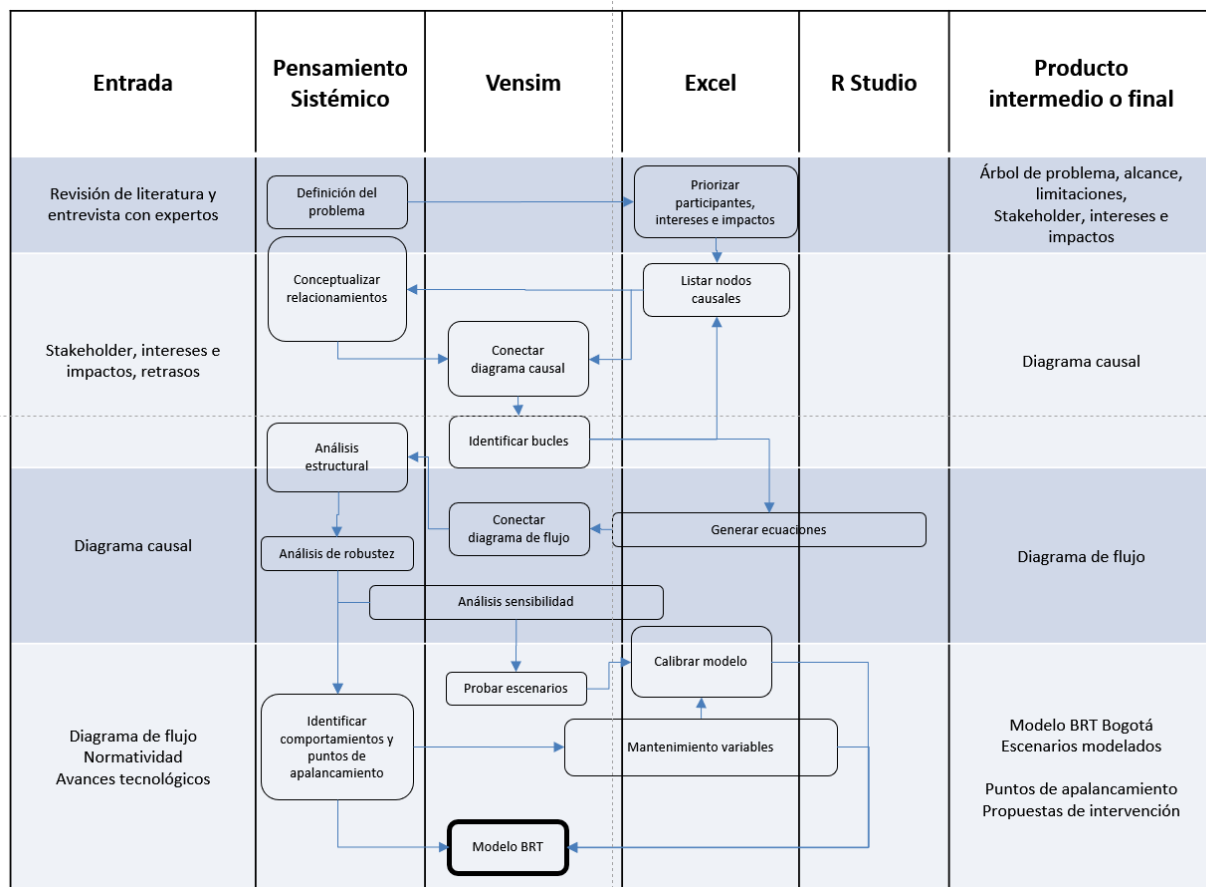


Figura 10. Estrategia de modelado
Fuente: elaboración propia.

Así pues, la metodología implica tanto una fase cualitativa, donde se plantean las diferentes situaciones a estudiar, los actores y sus relacionamientos bajo entornos específicos, normalmente políticas de comportamiento e inversión, para luego pasar a una fase cuantitativa donde se prueban diferentes valores de los relacionamientos buscando establecer un modelo cuantitativo que muestre los niveles que llevan a puntos de balanceo de los relacionamientos y por lo tanto ayude a enriquecer el análisis y previsión de efectos de la aplicación de diferentes acciones.

La figura anterior muestra el esquema general de aplicación de la metodología, donde las primeras actividades de esta metodología (marco referencial y Vensim) son de tipo descriptivo y avanzan hacia actividades de tipo proyectivo.

Dado que el objetivo general de esta investigación es modelamiento, el desarrollo o implementación de la metodología es por sí mismo un resultado. Es decir que en el apartado reservado a “Resultados” se presenta mayor detalle de la metodología aplicada.

Tabla 15. Miembros del equipo del proyecto

Nombre	Rol en el proyecto	Formación o experiencia	Responsabilidades	Fecha vinculación
John Hoover Cortés Gallo	Proponente y ejecutor	Ingeniero Químico, estudiante de maestría en Ingeniería Industrial con experiencia en logística de transporte	Responsable de todas las actividades relacionadas con el desarrollo del proyecto y alcance de los objetivos planteados.	Octubre 2015
Javier Rosero García	Director	Doctor en Ingeniería electrónica, experiencia en investigación y dirección de trabajos de grado	Direccionamiento conceptual y programático del proyecto	Noviembre 2015
Clemente Martínez Rozo	Asesor temático	Experto en mantenimiento de BRT	Apoyo en la identificación de fuentes de información y análisis de los resultados. Especialmente actividad 8,2 y 8,5	Noviembre 2017
Juan Martín García	Asesor informático	Doctor Ingeniero Industrial por la UPC (España), y diplomado en la Sloan School of Management del Massachusetts Institute of Technology (MIT-USA).	Apoyo en la instalación y manejo de Vensim. Actividad 8,3	Junio 2016

Fuente: elaboración propia.

4. Resultados

En este capítulo se consignan las evidencias de la aplicación de la metodología adoptada para la presente investigación. Vale la pena anotar que la esencia de esta metodología es el Pensamiento Sistémico, lo que conlleva a una depuración continua de los resultados obtenidos en cada paso, cuyas iteraciones no son necesariamente mostradas en detalle, sino los resultados finalmente obtenidos al final de la investigación.

4.1 Definición del problema, objetivos y alcance

El problema: La problemática de la movilidad sostenible en la ciudad de Bogotá tiene identificados los siguientes seis factores estratégicos a intervenir, según la Secretaría Distrital de Planeación [1]:

- 1) Poca información disponible.
- 2) Incentivos (económicos y no económicos) limitados y de difícil accesibilidad.
- 3) Aprovechamiento de las baterías de vehículos eléctricos.
- 4) Infraestructura de recarga de vehículos eléctricos.
- 5) Estrategia de comunicación y pedagogía.
- 6) Espacios desarticulados de investigación e innovación.

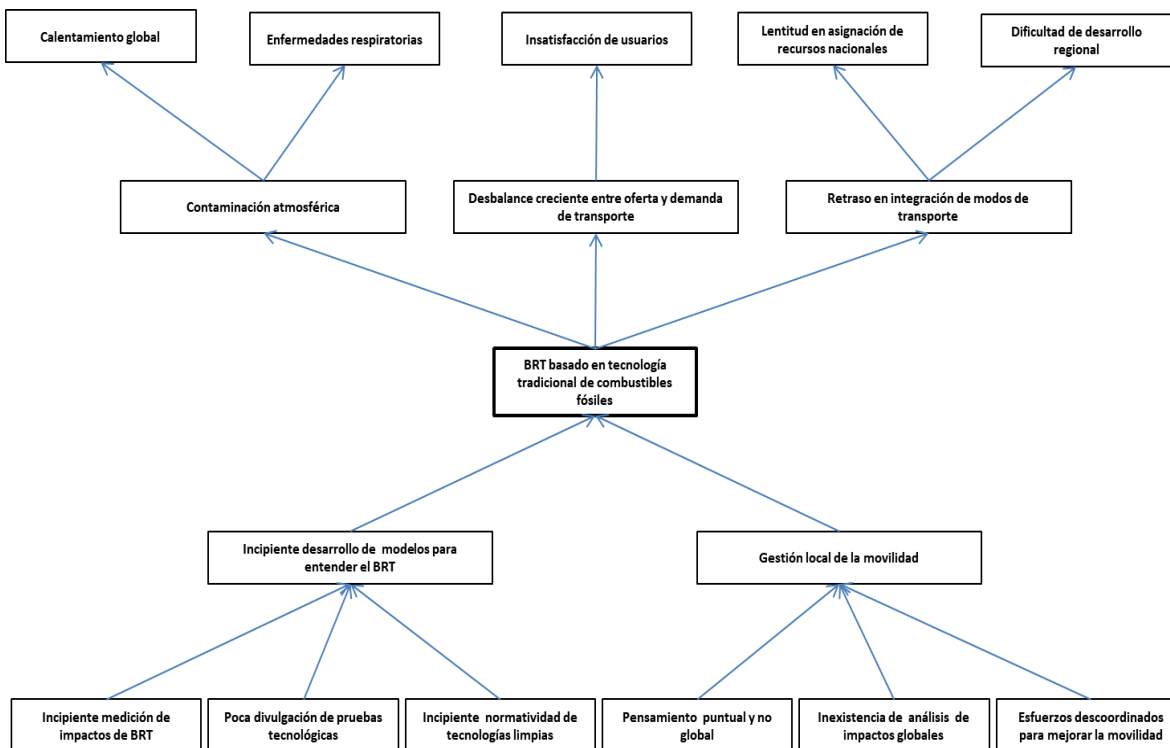


Figura 11. Árbol de problema sobre BRT de Bogotá

Fuente: elaboración propia partir del Documento CONPES D.C. 30 de 2023 [1].

La pregunta que se pretende responder con el presente proyecto es: ¿Cuál sería un modelo para explicar el posible crecimiento e impactos del BRT de Bogotá?

El modelo debe tener un enfoque sistémico que muestre la relación entre los actores del BRT y los principales impactos del desarrollo tecnológico del BRT a la luz de la normatividad y los planes existentes de expansión del servicio.

Objetivo general: Construir un modelo de introducción de tecnología vehicular comparativo diésel - eléctrica para transporte público masivo en Bogotá que considere componentes técnicos, económicos, de infraestructura, social, medio ambiente y de política que permita simular la participación de la tecnología eléctrica en dicho transporte por medio de simulación en dinámica de sistemas para los próximos 20 años.

Objetivos específicos:

- Estimar impactos de la participación de la tecnología eléctrica vehicular en el sistema de transporte público masivo en eficiencia, medio ambiente, salud pública, economía y cultura en la ciudad de Bogotá.
- Analizar posibles impactos de la participación de la tecnología eléctrica y la tradicional en el sistema de transporte público masivo en infraestructura de vía, de red eléctrica y de tecnología de comunicación e información.
- Proponer la estructura de costos para la operación de la tecnología vehicular que incorpore criterios de economías de escala, utilizando tecnologías de tracción eléctrica que permita determinar los costos de capital, costos de operación diferenciados en costos fijos y variables, costos equipos, infraestructura, recursos tecnológicos, recurso humano e insumos
- Proponer dos escenarios de masificación de tecnología vehicular basados en políticas de gobierno, regulación de medio ambiente y tecnológico.

Alcance:

El alcance físico del modelo a desarrollar se limita por el componente troncal de TransMilenio.

El alcance mínimo del análisis será de 20 años (2023-2043).

Los cubos temporales de análisis serán de años.

La flota vehicular será representada en un bus tipo que promedia los tamaños de los vehículos según su capacidad actual y número de unidades de partida de cada tamaño.

Este proyecto se limita por:

- Los actuales planes de desarrollo de la ciudad de Bogotá y municipios aledaños.

- La tecnología de vehículos disponible comercialmente.
- Los avances tecnológicos e investigativos reportados en las revistas científicas.

El software a utilizar para el modelamiento es el software Vensim, disponible en la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá y cuya pertinencia y bondades han sido demostrados para modelar los casos relacionados con el transporte urbano [4], [7], [9], [32].

La generación de resultados obedece a la aplicación sistemática de la metodología planteada.

4.2 Identificación de *stakeholders*, intereses e impactos

Los entes participantes o interesados en el modelo se identifican partiendo de una identificación de los impactos que el BRT de Bogotá genera y las posibles entidades que son afectadas o cuya misión está relacionada con dichos impactos.

La revisión de literatura [1], [8], [15], [16], [17] permitió identificar cinco categorías de impactos que se relacionarían con un modelo que busque analizar con enfoque sistémico la implementación y operación del BRT de Bogotá. Estos impactos son ambiental, energético, en movilidad, económico y social.

Estos cinco impactos del BRT de Bogotá, son mutuamente interrelacionados e influyentes, por lo que su abordaje y administración debe ser visto con un enfoque sistémico.

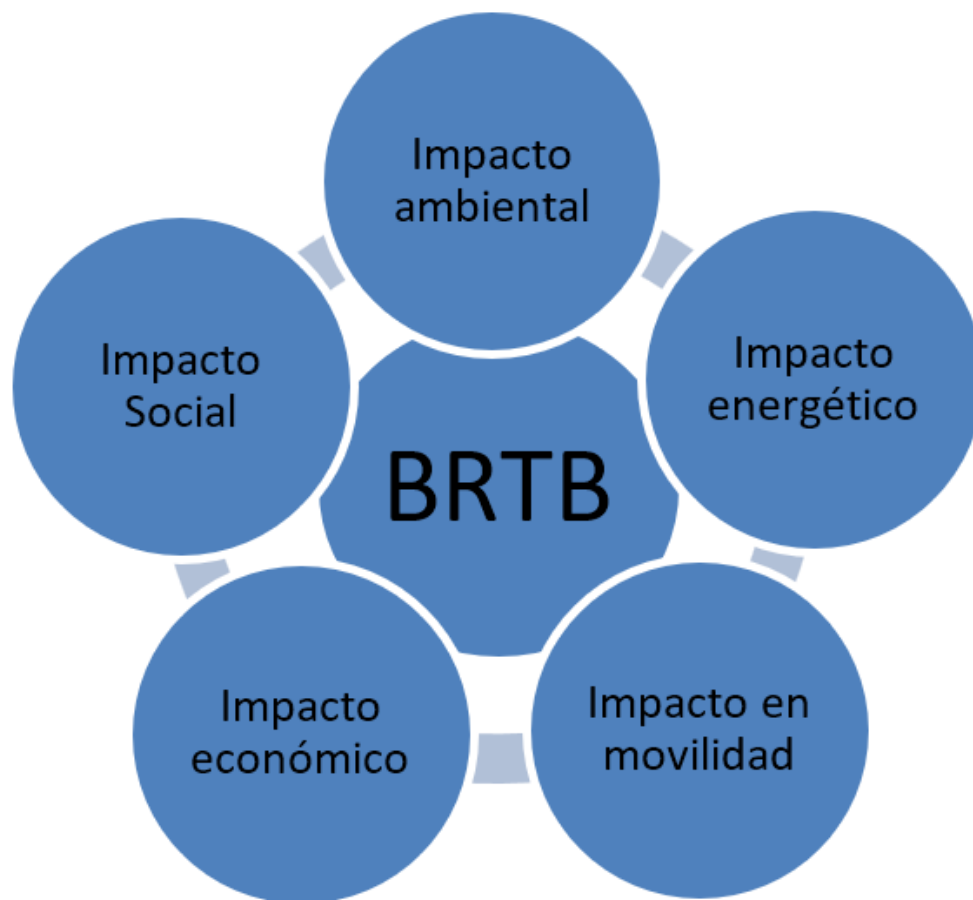


Figura 12. Impactos generales del BRT de Bogotá

Fuente: elaboración propia.

La revisión de literatura [1], [4], [6], [36] y de las páginas web de TRANSMILENIO S.A., la UPME y el observatorio de movilidad de la Cámara de Comercio de Bogotá, con énfasis en los impactos identificados previamente, establece un listado de entidades relacionadas con la problemática a estudiar que permite generar la siguiente matriz de *stakeholders*, donde el nivel de autoridad se estableció de acuerdo a la responsabilidad y/o capacidad de la institución para influir alrededor del BRT de Bogotá, de otro lado su preocupación o conveniencia se refiere a la priorización que dentro de su agenda estratégica le da al BRT de Bogotá y por lo tanto al análisis de información que le facilite la toma de decisiones, es decir su grado de interés en un modelo relacionado con el BRT como lo es el objeto del presente trabajo.

Por ejemplo, el Consejo Distrital de Política Económica y Social del Distrito Capital identifica a nivel distrital las siguientes entidades clave:

- Secretaría Distrital de Movilidad
- Secretaría Distrital de Ambiente

- Secretaría Distrital de Gobierno
- Secretaría de Educación Distrital
- Secretaría Distrital de la Mujer
- TRANSMILENIO S.A

Los *stakeholders* así identificados son sometidos a una calificación de Pareto binario, de acuerdo con su nivel de autoridad sobre las decisiones del sistema y su preocupación o conveniencia del desempeño del mismo. El resultado se muestra en la siguiente tabla:

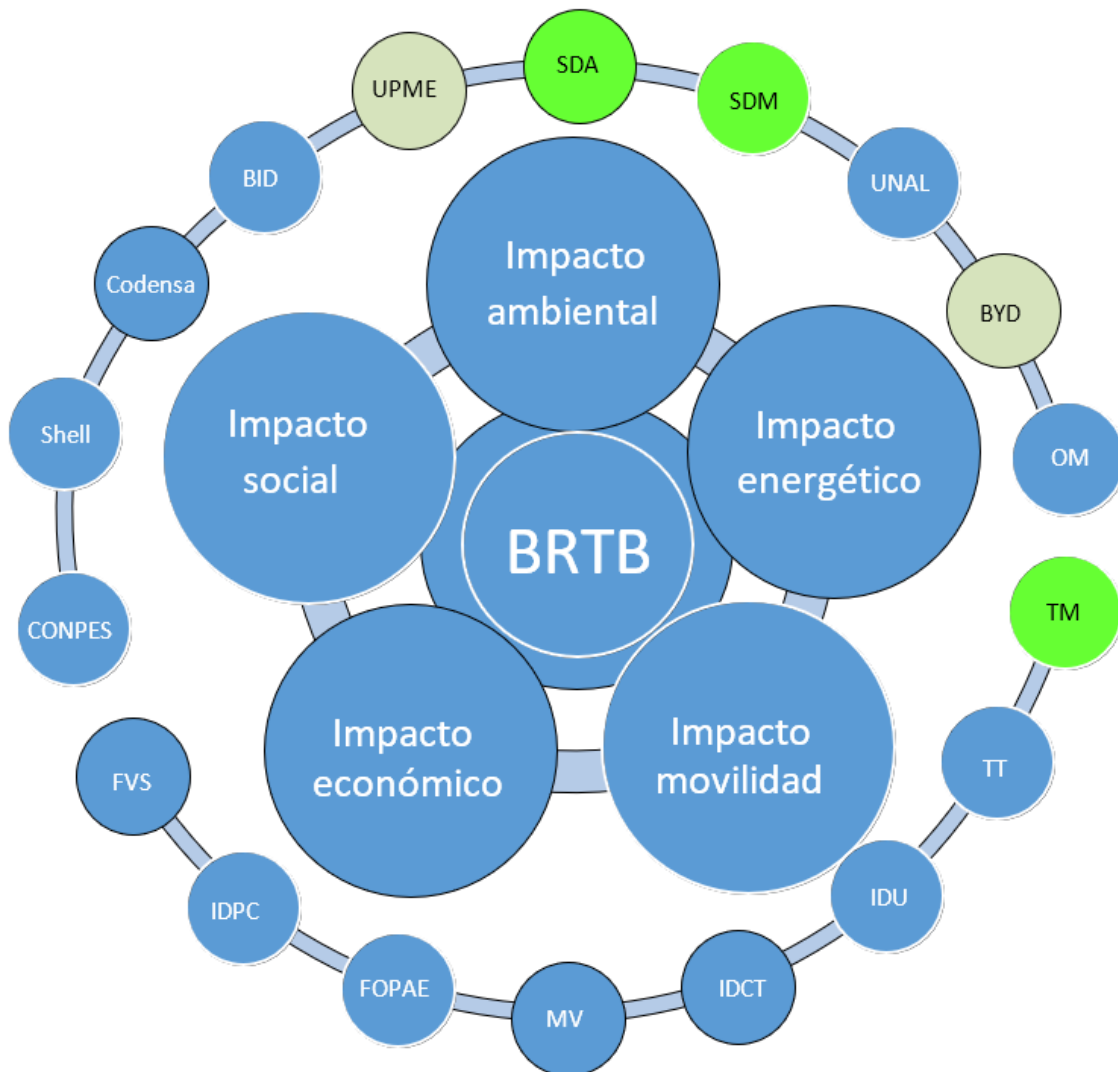
Tabla 16. Matriz de *stakeholders* del sistema BRT de Bogotá

#	Stackeholder		Poder	Interés	Pareto		
	Rol	Empresa ejemplo	Nivel de autoridad	Preocupación o conveniencia	Peso	% del peso	% acumulado
1	Administración del BRT	Transmilenio	5	5	25	17%	17%
2	Institucionalidad sectores de transporte	SDM	5	5	25	17%	34%
3	Institucionalidad sectores de ambiente	SDA	5	5	25	17%	51%
4	Institucionalidad sectores de energía	UPME	5	5	25	17%	68%
5	Fabricante de vehículos	BYD, Volvo	3	4	12	8%	77%
6	Formuladores de política	CONPES	4	3	12	8%	85%
7	Academia/ Investigación	UNAL	1	5	5	3%	88%
8	Proveedores de servicios e infraestructura	Shell, Codensa	1	3	3	2%	90%
9	Métricas, perspectiva de usuarios	OM	1	3	3	2%	92%
10	Entidad financiera	BID	1	2	2	1%	94%
11	Ejecución de infraestructura en movilidad	IDU	1	2	2	1%	95%
12	Terminal de Transporte	TT	1	1	1	1%	96%
13	Mantenimiento Vial	UMV	1	1	1	1%	97%
14	Desarrollo de cultura y turismo	IDCT	1	1	1	1%	97%
15	Mercado inmobiliario	MV	1	1	1	1%	98%
16	Prevención y atención de emergencias	FOPAE	1	1	1	1%	99%
17	Conservación patrimonio cultural	IDPC	1	1	1	1%	99%
18	Seguridad de la ciudad	FVS	1	1	1	1%	100%

Fuente: elaboración propia.

La clasificación de *stakeholders* así obtenida conlleva a enfocarse en los primeros cinco roles y sus empresas representativas (TRANSMILENIO S.A., SDM, SDA, UPME y BYD), para la definición del modelo.

A continuación, se hace un repaso de los principales impactos que tiene el sistema:



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Identificación de impactos y *stakeholders* del BRT de Bogotá.

Fuente: elaboración propia.

Partiendo del cruce entre impactos y *stakeholders*, se identifican y depuran los intereses de los principales componentes que expliquen el funcionamiento de un modelo para el BRT de Bogotá. Los resultados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 17. Matriz de identificación de intereses sobre el BRT

	Stakeholder				
	Ente gestor del sistema	Institucionalidad de los sectores de transporte	Institucionalidad de los sectores de ambiente	Institucionalidad de los sectores de energía	Fabricante de vehículos

	TRANSMILENIO S.A.	SDM	SDA	UPME	BYD, Volvo	
Impacto	Energético	Costo de consumo energético Política de inversión			Agotamiento de combustibles fósiles Uso de fuentes de energía renovable	Tecnología energética
	Ambiental	Cumplimiento de regulaciones sobre emisiones		Generación de residuos sólidos, líquidos y gaseosos	Uso de fuentes energéticas limpias y sostenibles	Vida útil vehículos Vida útil baterías Emisiones
	Movilidad	Cantidad de buses Tipología de buses Política de reposición	Proyecciones de demanda			
	Económico	Costo de operación Extensión de troncales	Cantidad de vehículos del sistema	Costo de disposición de residuos	Costo diésel Costo GNV Costo electricidad	Precio inicial del bus Tecnología de fuente energética
	Social	Crecimiento de la demanda	Accesibilidad, calidad y seguridad del sistema			

Fuente: elaboración propia.

Finalmente se definen los principales stakeholder, por escogencia de los principales roles y sus representantes así:

- TRANSMILENIO S.A.: ente gestor del sistema
- SDA y SDM: encargados del control de impactos
- Proveedores tecnológicos y operadores: ofrecen las opciones tecnológicas y administran su eficiencia operativa
- Usuarios: representan la razón de ser del sistema
- Ministerio de Transporte y Alcaldía Mayor: en ellos confluye la generación de normativas.

4.3 Generación de diagrama causal e identificar bucles

Una vez identificados los principales intereses e impactos de los *stakeholder* del BRT de Bogotá, se utilizan para plantear siete elementos de relacionamiento:

- Satisfacción de usuarios.
- Cantidad de usuarios.
- Necesidad de flota en operación.

- Inversión en nueva flota.
- Flota en operación.
- Normativa de inversión.
- Impactos.

Estos elementos corresponden principalmente a la actividad de los siguientes actores: usuarios, Secretaría de Ambiente, Secretaría de movilidad, operadores, TRANSMILENIO S.A., Ministerio de Transporte y Alcaldía de Bogotá.

Las previsible conexiones entre estos elementos se dibujaron sobre la herramienta Vensim, inspiradas por los intereses e impactos desarrollados en el paso anterior. Su lógica se valida a través de los bucles identificados por Vensim.

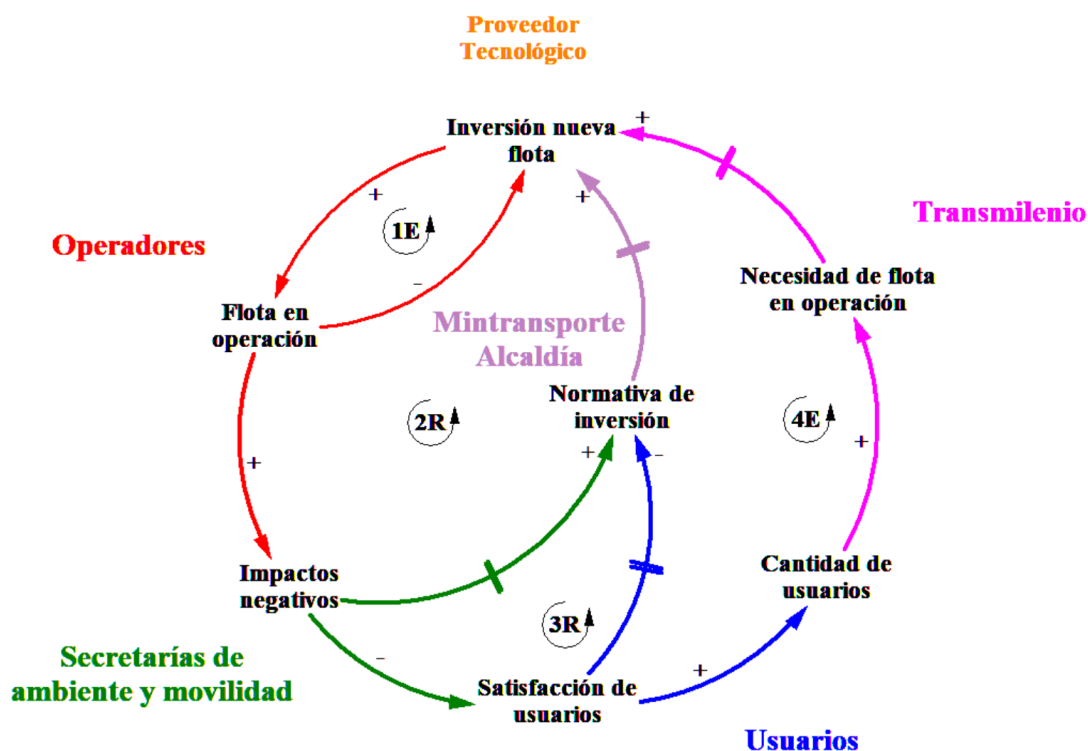


Figura 14. Diagrama causal

Fuente: elaboración propia.

Dado que los “impactos” de la operación del BRT bajo diferentes opciones de utilización tecnológica, es el objetivo central de esta investigación, se tomó como base para identificar con Vensim los posibles bucles, dando el siguiente resultado:

Tabla 18. Identificación de bucles en el diagrama causal

Código de bucle Tipo de bucle	Descripción corta
Elementos relacionados	
4E Estabilización Impactos negativos Satisfacción de usuarios Cantidad de usuarios Necesidad de flota en operación Inversión nueva flota Flota en operación	Los impactos generados por un uso específico de tecnologías de BRT, afectan la satisfacción de los usuarios, lo cual puede modificar la cantidad de personas que hacen uso del BRT e impone unas exigencias diferentes sobre la cantidad de flota en operación para movilizarlos. Esta nueva necesidad de aumentar o disminuir la flota, afecta las decisiones de inversión en nueva flota, lo que modifica la cantidad de buses en operación y sus impactos operativos. Este bucle B4 envuelve los demás bucles
3R Refuerzo Impactos negativos Satisfacción de usuarios Normativa de inversión Inversión nueva flota Flota en operación	Los impactos generados por un uso específico de tecnologías de BRT, afectan la satisfacción de los usuarios con lo cual se genera presión sobre la normativa de inversión que debe acatarse para la inversión en nueva flota, lo que modifica la configuración de la flota en operación y genera unos nuevos impactos. Este bucle envuelve el bucle B2, al incluir la satisfacción de los usuarios como elemento influenciador del sistema
2R Refuerzo Impactos Normativa de inversión Inversión nueva flota Flota en operación	Los impactos generados por un uso específico de tecnologías de BRT, generan presión sobre la normativa de inversión que debe acatarse para la inversión en nueva flota, lo que modifica la configuración de la flota en operación y genera unos nuevos impactos
1E Estabilización Inversión nueva flota Flota en operación	La inversión en nueva flota modifica el tamaño de la flota en operación, lo cual es tenido en cuenta para los cálculos de inversión en nueva flota

Fuente: elaboración propia.

Esta forma de analizar los elementos del sistema y sus relacionamientos es la esencia de la dinámica de sistemas y contrasta fuertemente con el pensamiento lineal.

Las herramientas de Vensim para árbol de usos, aplicada al elemento “Inversión nueva flota” se visualiza así:

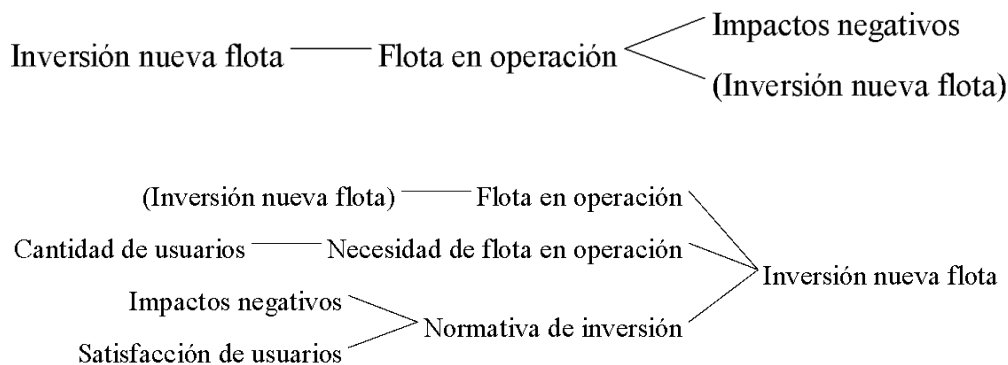


Gráfico 3. Diagrama de árbol de causas y usos

Fuente: elaboración propia.

En estos diagramas de árbol de causas y usos, extraído directamente de Vensim se observa que los impactos de la operación del BRT son efecto directo de la operación de este y a la vez pueden influenciar la normativa en nueva inversión. Si bien la relación entre el nivel de operación y sus impactos tiene reportes que ayudan a su entendimiento, la relación cuantitativa entre los impactos y su normatividad es aún incipiente.

Se observa que la inversión en nueva flota incentiva el bucle 2R, que es un bucle de refuerzo de todo el sistema, donde el incremento en la flota aumenta los impactos y estimula nueva normativa. Pero en este bucle existen varias demoras y un bucle anidado de estabilización donde el aumento de la flota desestimula la inversión nueva. Este conjunto del bucle de refuerzo 2R, contrastado con las demoras de varios de sus elementos y el bucle estabilizador 1E, genera un comportamiento típico de arquetipo de proceso y compensación, donde el sistema se autorregula para no crecer indefinidamente, logrando su estabilización. En este arquetipo, los elementos de normativa y de inversión en nueva flota son de especial atención pues corresponden a intervenciones directas de los stakeholders sobre el sistema. Estas intervenciones pueden estar influenciadas por elementos del entorno como pueden ser los ambientes políticos, económicos y sociales de la ciudad. Además, se alerta sobre la importancia de gestionar las demoras para lograr más rápidamente la estabilización del sistema en nuevos estados de desempeño.

De otro lado, se puede observar un arquetipo de límite de crecimiento del sistema, con punto de apalancamiento en la satisfacción de los usuarios que por un lado estimulan el bucle 3R que jalona el dinamismo del sistema, pero se ralentiza por su demora en el estímulo de la normatividad. Simultáneamente, la satisfacción de los usuarios actúa positivamente en el bucle 4E que se orienta a estabilizar el sistema. Así pues, la satisfacción de los usuarios y su participación en estos dos bucles genera un arquetipo de límite de crecimiento de todo el sistema.

4.4 Heurística crítica de sistemas aplicada al diagrama causal

Al aplicar la heurística crítica de sistemas al diagrama causal desarrollado en el capítulo anterior, se obtiene la siguiente tabla.

En esta tabla se resalta la necesidad de que el BRT sea entendido regionalmente, aunque su operación sea netamente local.

Tabla 19. Resultados de aplicación de la heurística crítica de sistemas al diagrama causal

Fuentes de motivación	Es	Debe ser
Cliente o beneficiario de este sistema	El operador El usuario	La ciudad como un todo La región como un todo
Propósito del modelo	Identificar actores y sus relaciones	Identificar puntos de apalancamiento para el desarrollo del sistema
Medición de mejoras	Cuantificación de beneficios en movilidad y medio ambiente	Sostenibilidad del sistema Sostenibilidad del entorno
Fuentes de control o poder	Es	Debe ser
Tomador de decisiones	TRANSMILENIO S.A. Alcaldía Mayor de Bogotá	Colegiado regional (TRANSMILENIO S.A., Alcaldías, Gobernación)
Decisiones	Tamaño del BRT Tecnologías utilizadas Planeación operativa	Sinergias regionales Integración regional
Condiciones que no tiene bajo su control	Conexión regional	Tecnologías utilizadas
Fuentes de experticia	Es	Debe ser
Expertos en el sistema	Fabricantes de vehículos TRANSMILENIO S.A.	Ministerios de transporte y ambiente TRANSMILENIO S.A.
Conocimiento relevante para la situación	Comportamientos de la demanda	Proyecciones tecnológicas
Garantía de que las recomendaciones de los expertos se pueden implementar	Documentos CONPES Casos de estudio	Desarrollo de pruebas piloto
Fuentes de legitimidad	Es	Debe ser
Vigila los intereses de los afectados	Secretaría de ambiente Secretaría de Movilidad	Ministerios nacionales Veedurías urbanas
Oportunidades de los afectados para defender sus intereses	Pronunciamiento en elecciones populares	Encuestas de satisfacción y enlace con reformas al BRT Colegiados regionales
¿Qué cosmovisión determina el diseño?	Concepción local de movilidad	Concepción holística de impacto local y regional en cambio climático, desarrollo social y movilidad

Fuente: elaboración propia.

La identificación de por lo menos 18 entidades participantes directamente como *stakeholders* del BRT de Bogotá demuestra claramente que este es un caso típico de complejidad que requiere herramientas para su coordinación y análisis, lo que concuerda con los planteamientos de la técnica de Dinámica de Sistemas.

Resaltan tres de las dieciocho entidades identificadas ponderando su nivel de autoridad y su grado de preocupación o conveniencia:

- TRANSMILENIO S.A.
- Secretaría de Movilidad de Bogotá.
- Secretaría de Ambiente de Bogotá.

Esta priorización concuerda con la definición hecha por la Alcaldía mayor de Bogotá en el Plan de Ascenso Tecnológico [12]. La utilidad de esta identificación es orientar a estas tres entidades la búsqueda de información pertinente y o validación de los resultados del presente trabajo.

La coordinación de estas entidades debería además considerar los problemas del BRT con visión regional y de integración modal. Especial atención se debe dar a la definición de los puntos de conexión del BRT con otros modos de transporte masivo local o regional. Por ejemplo, los puntos de conexión del tren-tram con el BRT, pueden ser puntos de oferta de servicios comerciales, bancarios y estatales, de tal manera que faciliten la experiencia de los usuarios y el desarrollo e integración de la región. Igualmente, los puntos extremos del BRT pueden reforzar la existencia de parqueaderos para bicicletas, patinetas, motocicletas, autos y otros vehículos de transporte de tal manera que facilite al usuario el trasegar de su primera y última milla.

4.5 Generar diagrama de flujo

Una vez identificado el diagrama causal principal, se crean los elementos del “Diagrama de flujo” donde es necesario especificar sus relacionamientos en términos de ecuaciones. La representación gráfica de dicho diagrama de flujo se muestra en el Anexo E.

Además, se consigna en el Anexo F, las variables que lo conforman con su identificación básica de unidad de medida, ecuación y valores referenciales.

A continuación, se explican cada uno de sus elementos.

4.5.1 Población de Bogotá

La población de Bogotá es una variable dependiente de varios factores externos al sistema modelado en este trabajo y por lo tanto su estimación se basará en los reportes del DANE. En términos generales se asume que se puede estimar con una regresión dependiendo únicamente del tiempo e influye directamente en la cantidad de usuarios del BRT y por ende en la cantidad de buses y su nivel de recaudo:

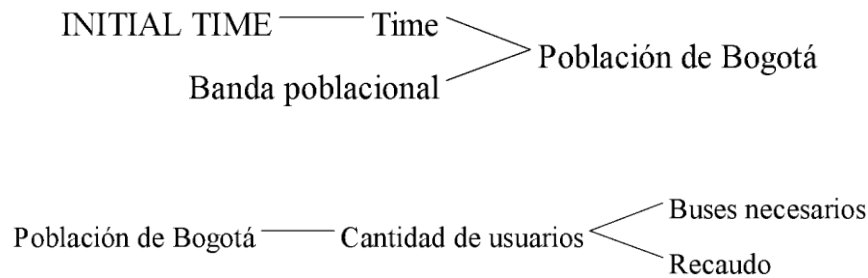


Gráfico 4. Diagrama de árbol población de Bogotá

Fuente: elaboración propia.

Partiendo de los datos aportados por el DANE [27], [43], se generaron tres regresiones.

Inicialmente se hace una prueba visual en Excel del ajuste de varios tipos de modelos, encontrando que el polinomio de grado 3 es el que mejor refleja el comportamiento de las series en el intervalo de interés hasta el año 2043 y extendiendo hasta el 2050.

Después se calculó cada polinomio apoyado en el software Rstudio que además generó su análisis de conformidad estadística.

Para evaluar la calibración de cada regresión, finalmente se calculó el error simple como la diferencia entre el valor reportado por el DANE y el valor calculado por cada modelo, encontrándose diferencias menores a $\pm 2\%$.

f1, Población histórica 2001-2019: la primera regresión (denominada f1) utiliza los datos históricos entre los años 2000 y 2019, para establecer los cálculos que permitan calibrar el modelo.

$$f_1(X) = a + bX^1 + cX^2 + dX^3$$

Población de Bogotá = $f_1(\text{Time}-2000)$, con Time entre 2000 y 2019

Donde:

f_1 = Población de Bogotá, en el intervalo 2000 a 2019

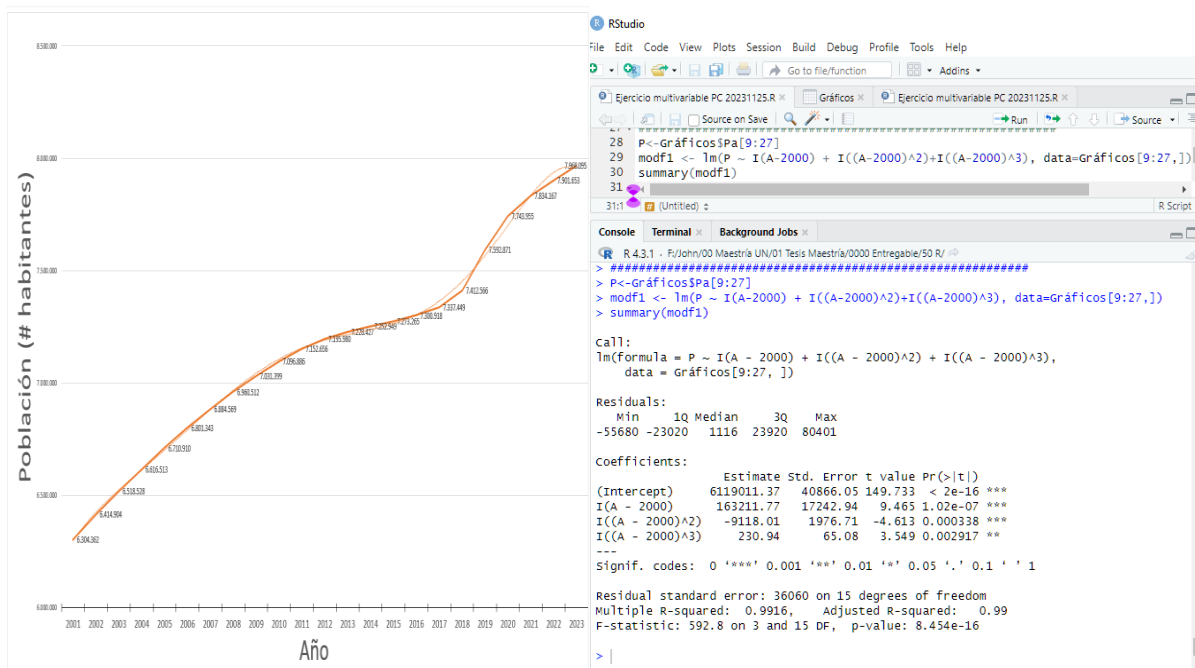
X = Time-2000, año entre 2000 y 2019. Se resta 2000 para mejorar la precisión en número de cifras significativas al copiar los datos de Rstudio y pasarlos a Vensim

$$a = 6.119.011,37$$

$$b = 163.211,77$$

$$c = -9.118,01$$

$$d = 230,94$$



Línea de Rstudio	Año	Población según DANE 2018 (habitantes)	Población según regresión f1 (habitantes)	Error Simple (habitantes)	Error Simple (%)
9	2001	6.304.362	6.273.336	-31.026	-0,5%
10	2002	6.414.904	6.410.810	-4.094	-0,1%
11	2003	6.518.528	6.532.820	14.292	0,2%
12	2004	6.616.513	6.640.750	24.237	0,4%
13	2005	6.710.910	6.735.987	25.077	0,4%
14	2006	6.801.343	6.819.917	18.574	0,3%
15	2007	6.884.569	6.893.924	9.355	0,1%
16	2008	6.960.512	6.959.394	-1.118	0,0%
17	2009	7.031.399	7.017.714	-13.685	-0,2%
18	2010	7.096.886	7.070.268	-26.618	-0,4%
19	2011	7.152.656	7.118.443	-34.213	-0,5%
20	2012	7.195.980	7.163.623	-32.357	-0,4%
21	2013	7.228.427	7.207.196	-21.231	-0,3%
22	2014	7.252.949	7.250.546	-2.403	0,0%
23	2015	7.273.265	7.295.058	21.793	0,3%
24	2016	7.300.918	7.342.119	41.201	0,6%
25	2017	7.337.449	7.393.115	55.666	0,8%
26	2018	7.412.566	7.449.430	36.864	0,5%
27	2019	7.592.871	7.512.451	-80.420	-1,1%

Figura 15. Datos tomados del software Rstudio para la regresión de población entre 2000 y 2019

Fuente: elaboración propia.

El valor R cuadrado múltiple de 0.9916, la alta significancia de los coeficientes y el bajo error calculado se tuvieron en cuenta para la elección de este polinomio.

Población estimada 2020-2043: se tienen dos series de datos base para el cálculo, uno generado por la proyección del DANE según el censo de 2018 con el cual se haya la función f₂.

La segunda serie de datos corresponde a la corrección publicada en 2023 por el DANE considerando los efectos del COVID-19 en la tasa de natalidad de la población bogotana y su consecuente disminución en las estimaciones del nivel poblacional.

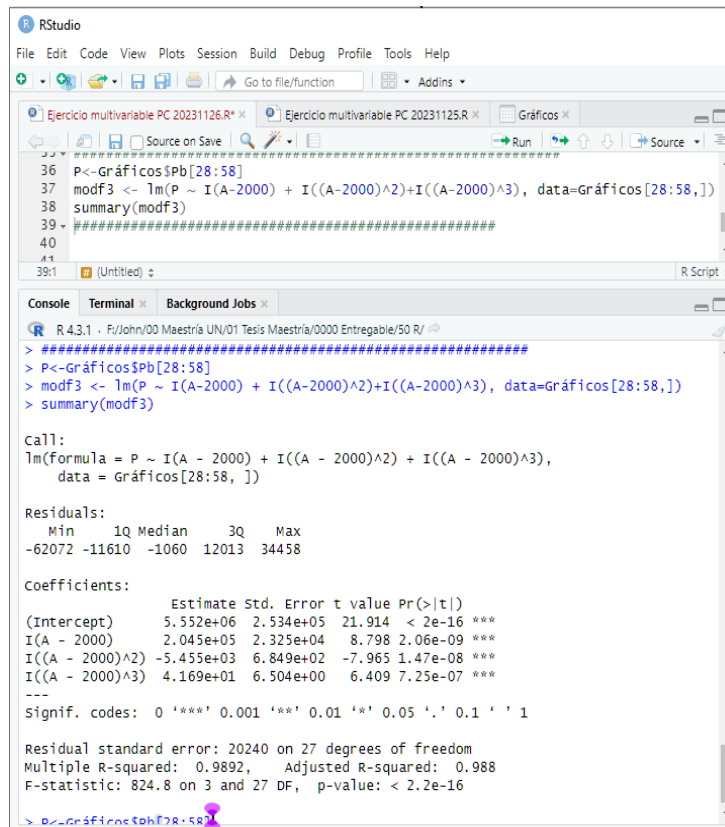
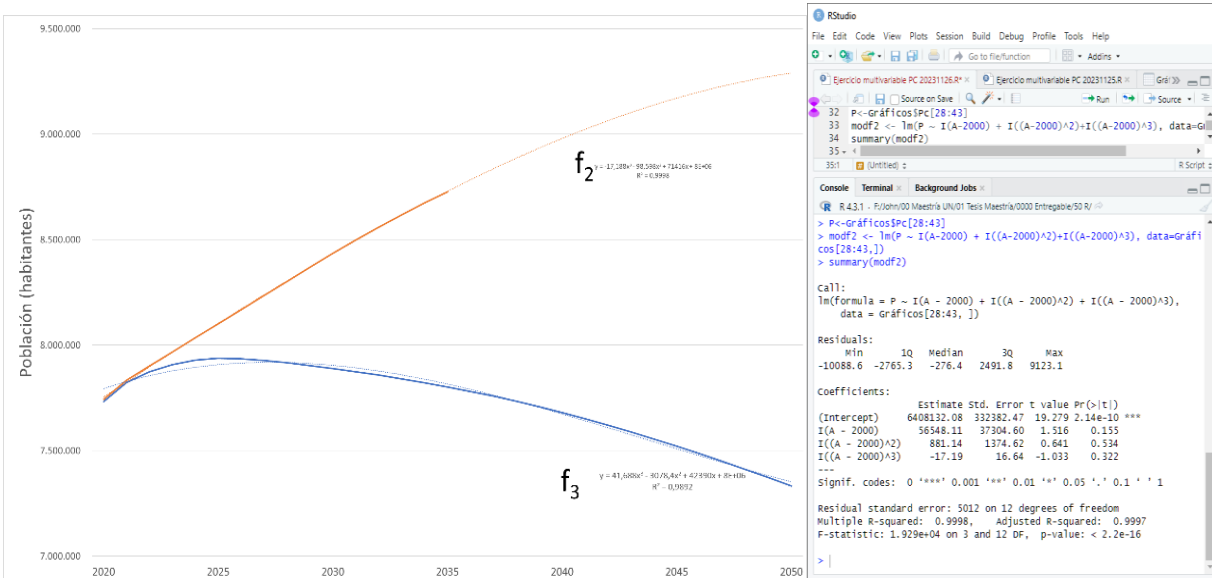


Figura 16. Cálculo en el software Rstudio de las regresiones f_2 y f_3 para estimar la población de Bogotá entre los años 2020 y 2043

Fuente: elaboración propia.

El cálculo de las regresiones para cada una de las dos series arrojó los siguientes polinomios:

$$f_2(X)=e + fX^1 + gX^2 + hX^3$$

Donde:

f_2 = Población de Bogotá, en el intervalo 2020 a 2043 tomando los datos proyectados por el DANE con el censo del año 2018.

X = Time-2000. Se resta 2000 para mejorar la precisión en número de cifras significativas al copiar los datos de Rstudio y pasarlos a Vensim

$$e= 6.408.132,08$$

$$f= 56.548,11$$

$$g= 881,14$$

$$h= -17,19$$

$$f_3(X)=i + jX^1 + kX^2 + nX^3$$

Donde:

f_3 = Población de Bogotá, en el intervalo 2020 a 2043 tomando los datos proyectados por el DANE teniendo en cuenta el ala disminución en la tasa de crecimiento de la población por efecto del COVID-19.

X = Time-2000. Se resta 2000 para mejorar la precisión en número de cifras significativas al copiar los datos de Rstudio y pasarlos a Vensim

$$i= 5.552.000,00$$

$$j= 2045.500,00$$

$$k= -5.455,00$$

$$n= 41,69$$

La calibración de las regresiones f_2 y f_3 se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 20. Validación y calibración de las regresiones f_2 y f_3 de utilizadas para estimar la demanda poblacional en el rango de 2020 a 2043

Linea de Rstudio	Año	f2				f3			
		Población Según censo DANE 2018	Población según regresión f2	Error Simple (habitantes)	Error Simple (%)	Población con ajuste DANE COVID19	Población según regresión f3	Error Simple (habitantes)	Error Simple (%)
28	2020	7.743.955	7.754.030	10.075	0,1%	7.732.161	7.793.520	61.359	0,8%
29	2021	7.834.167	7.825.029	-9.138	-0,1%	7.823.334	7.826.936	3.602	0,0%
30	2022	7.901.653	7.895.623	-6.030	-0,1%	7.873.316	7.854.695	-18.621	-0,2%
31	2023	7.968.095	7.965.711	-2.384	0,0%	7.907.281	7.877.047	-30.234	-0,4%
32	2024	8.034.649	8.035.189	540	0,0%	7.929.539	7.894.243	-35.296	-0,4%
33	2025	8.101.412	8.103.954	2.542	0,0%	7.937.898	7.906.531	-31.367	-0,4%
34	2026	8.168.421	8.171.902	3.481	0,0%	7.935.754	7.914.163	-21.591	-0,3%
35	2027	8.235.512	8.238.931	3.419	0,0%	7.927.891	7.917.389	-10.502	-0,1%
36	2028	8.302.442	8.304.938	2.496	0,0%	7.916.369	7.916.459	90	0,0%
37	2029	8.368.915	8.369.819	904	0,0%	7.902.910	7.911.622	8.712	0,1%
38	2030	8.434.700	8.433.471	-1.229	0,0%	7.888.838	7.903.130	14.292	0,2%
39	2031	8.498.716	8.495.792	-2.924	0,0%	7.874.103	7.891.232	17.129	0,2%
40	2032	8.559.942	8.556.677	-3.265	0,0%	7.858.086	7.876.178	18.092	0,2%
41	2033	8.618.319	8.616.024	-2.295	0,0%	7.840.757	7.858.219	17.462	0,2%
42	2034	8.673.804	8.673.730	-74	0,0%	7.822.145	7.837.604	15.459	0,2%
43	2035	8.726.402	8.729.691	3.289	0,0%	7.802.297	7.814.584	12.287	0,2%

Fuente: elaboración propia.

Las dos regresiones se combinan para ser utilizadas en el modelo en Vensim, soportándose en una nueva variable denominada “Banda Poblacional”. Dicha variable, es un porcentaje entre 0 % y 100 %, indicando el peso relativo en la combinación que se le quiere dar a la variable original f_2 :

La Banda Poblacional corresponde al porcentaje de aporte de dos estimaciones poblacionales sobre la población proyectada. Su nivel de 100 % corresponde a la proyección realizada según el censo de 2018, denominada f_2 . Su valor de 0 % corresponde a la corrección de la proyección poblacional publicada por el DANE en 2023 que se ve afectada por la pandemia del 2020 y se denomina f_3 :

Banda Poblacional =0 %, significa que el modelo tomará la función f_2

Banda Poblacional =100 %, significa que el modelo tomará la función f_3

$$\text{Población} = f_3 + \text{Banda Poblacional}/100 * (f_2 - f_3)$$

$$\text{Población} = f_3 + \text{Banda Poblacional}/100 * f_2 - \text{Banda poblacional}/100 * f_3$$

$$\text{Población} = \text{Banda Poblacional}/100 * f_2 + (1 - \text{Banda poblacional}/100) * f_3$$

Donde:

f_2 = estimación de la población según censo de 2018.

f_3 = estimación de la población según corrección del DANE por efecto de COVID-19.

Banda Poblacional: porcentaje de la diferencia entre f_2 y f_3 .

La población así calculada refleja un valor creciente pero ligeramente desacelerado, combinando y reflejando las estimaciones del DANE.

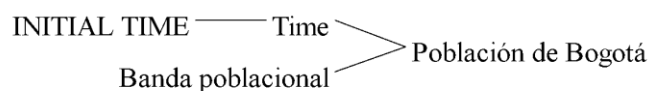


Gráfico 5. Árbol de causas de la población de Bogotá

Fuente: elaboración propia.

Así parametrizado en Vensim, este árbol de causas de la Población, se escoge cada regresión o combinación de las dependiendo del rango del período de cálculo y el peso relativo dado a las estimaciones del DANE.

Los componentes de “INITIAL TIME” y “Time”, se definen como parámetros del modelo y definen el horizonte de modelado y, la unidad de tiempo y sus incrementos.

4.5.2 Extensión de troncales

Los datos de troncales a construidas, en construcción y visualizadas, se consignaron en Vensim apoyado en la opción *lookup* y dependiendo únicamente del tiempo:

A continuación, se muestra una imagen de su cargue en Vensim.

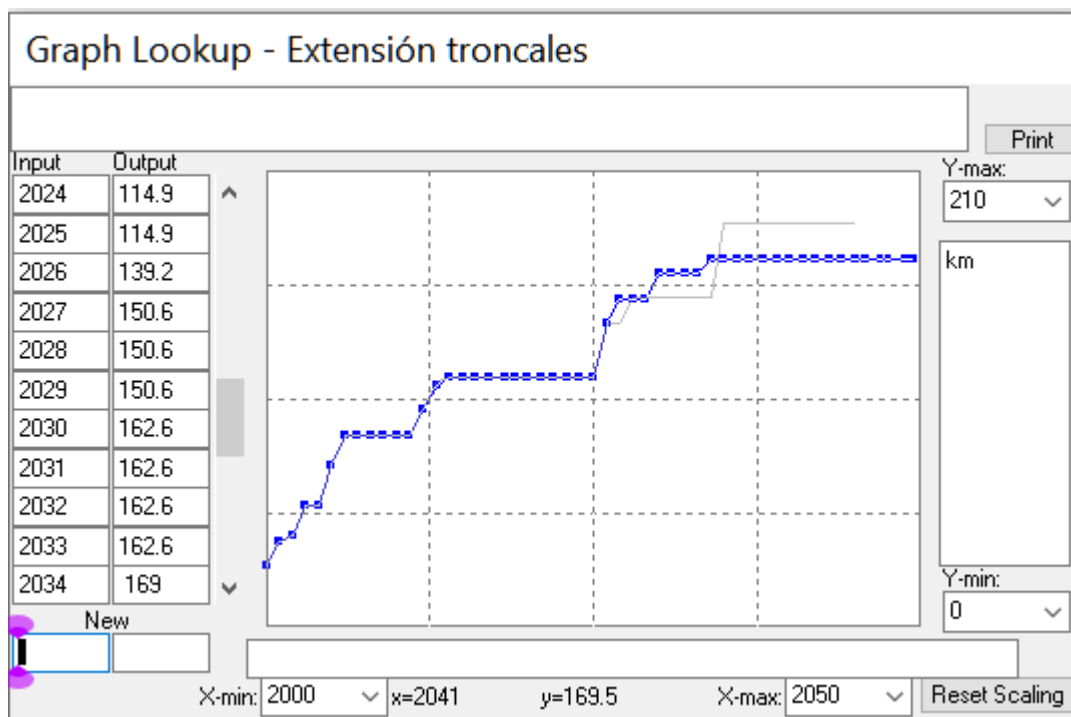


Gráfico 6. Extensión de las troncales en kilómetros

Fuente: elaboración propia con Vensim partiendo de los datos históricos reportados en la página de TRANSMILENIO S.A. [23] y la planeación visualizada en documentos como el Conpes 4104 de 2022 [6].

4.5.3 Cantidad de usuarios

La cantidad de usuarios se define como los millones de viajes (Mega usuario) validados en el BRT durante un año. Dicha magnitud se estima según el siguiente árbol de causas:

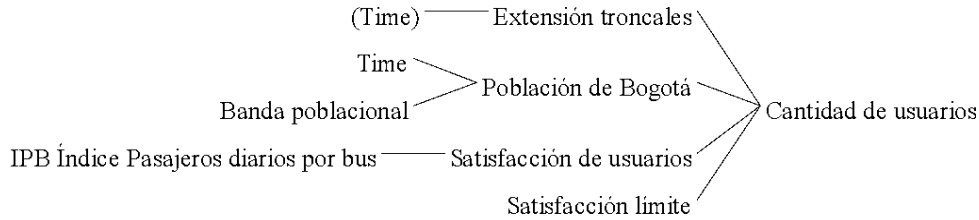


Gráfico 7. Árbol de causas de la cantidad de usuarios

Fuente: elaboración propia.

La cantidad de usuarios del BRT medido como millones de usuarios al año, se estima partiendo de la hipótesis de que es función tanto la oferta de troncales, como de la cantidad de habitantes de Bogotá y su nivel de satisfacción con la operación del sistema.

La extensión de las troncales se mantuvo constante en el período 2006 a 2011. Por lo tanto, se asume que el crecimiento de los usuarios en ese período es explicado por el aumento de la población en dicho lapso y que su relación es directamente proporcional.

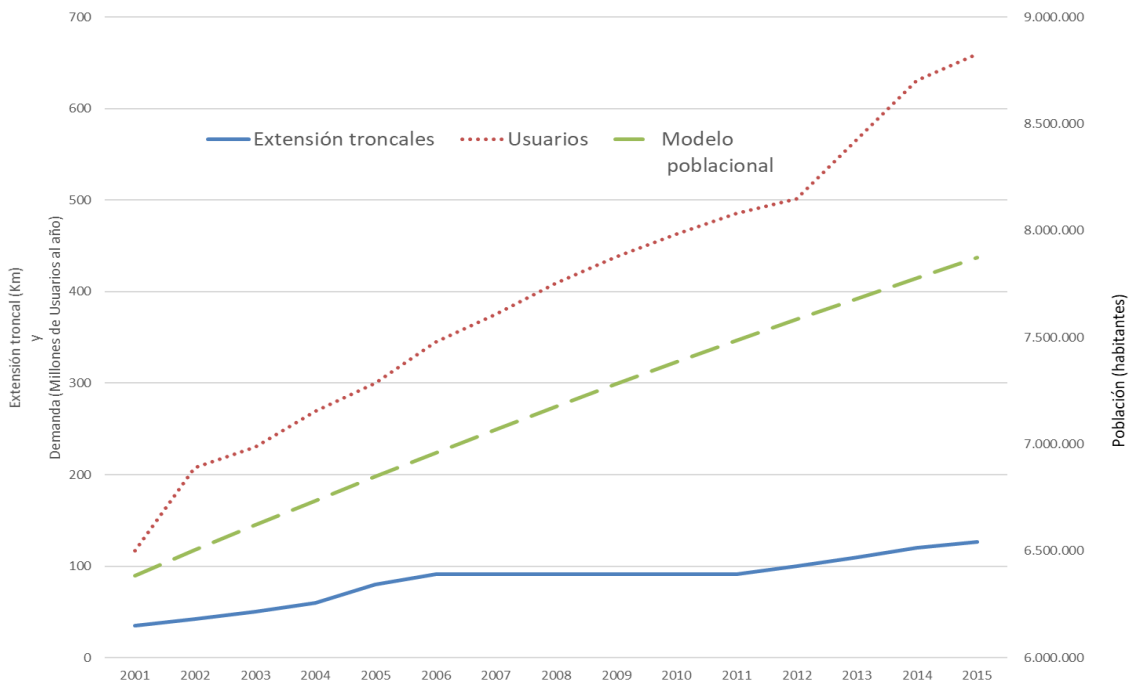


Gráfico 8. Comparativo de los datos históricos de extensión de troncales (km), usuarios (Millones de usuarios por año) y Población (habitantes)

Fuente: elaboración propia según los datos reportados por TRANSMILENIO S.A. [23].

De otro lado se observan acentuamiento en el aumento de la cantidad de usuarios en los años que se implementan las fases I, II y III de TRANSMILENIO S.A. (2001, 2006 y 2013). Por si solo esto muestra una favorabilidad a la hipótesis de que la cantidad de usuarios es directamente proporcional a la oferta de troncales.

Con estas observaciones en mente, se prueban polinomios donde la cantidad de usuarios es función de la extensión de las troncales y la población.

$$\text{Usuarios} = f_4(\text{ET}, P)$$

Donde ET: extensión de troncales en operación, medida en km.

P= Población de Bogotá

En la siguiente imagen se muestran algunos resultados después de aplicar en el software Rstudio modelos polinómicos y de interacción entre la extensión de troncales y la población, para hallar su correlación con la cantidad de usuarios.

Así se seleccionó el siguiente modelo, basado en su mejor calificación estadística:

$$U = a + b * \text{ET}^3 + c * P^3$$

Donde:

U= usuarios, Mega usuario/año, millón de viajes/año.

P= población de Bogotá medida en cantidad de habitantes.

ET= extensión de troncales en operación, medida en km.

a= valor de intercepto.

b= coeficiente de la extensión de las troncales elevado al cubo.

c= coeficiente de la población elevada al cubo.

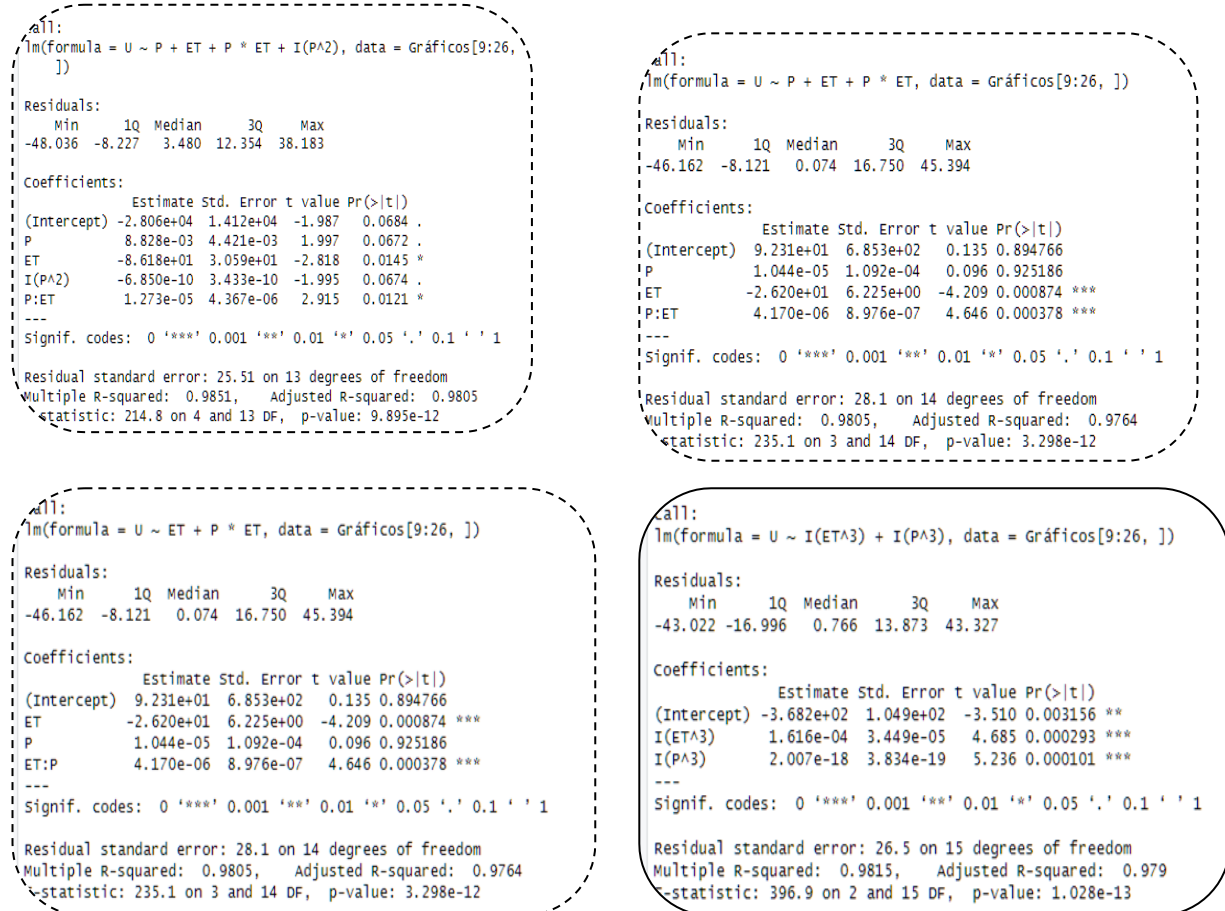


Figura 17. Resultado en Rstudio de varios modelos para explicar la cantidad de usuarios como variable dependiente de la extensión de las troncales y el nivel de población

Fuente: elaboración propia.

La correlación así escogida, se prueba sobre los datos históricos apoyándose en un indicador de error simple. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 21. Validación de calibración de modelo f4

Linea	Año	Población (habitantes)	Extensión troncales (km)	Usuarios reales reportados por Transmilenio (millones de usuarios/año)	Usuarios estimados según modelo f ₄ (millones de usuarios/año)	Error simple (millones de usuarios/año)	Error simple (%)
9	2001	6.304.362	38,70	117	144	27	19%
10	2002	6.414.904	42,30	208	174	-34	-20%
11	2003	6.518.528	55,30	230	215	-15	-7%
12	2004	6.616.513	55,30	270	240	-29	-12%
13	2005	6.710.910	74,60	300	305	6	2%
14	2006	6.801.343	87,60	345	371	26	7%
15	2007	6.884.569	87,60	376	395	19	5%
16	2008	6.960.512	87,60	409	417	7	2%
17	2009	7.031.399	87,60	438	438	0	0%
18	2010	7.096.886	87,60	463	457	-6	-1%
19	2011	7.152.656	87,60	485	474	-11	-2%
20	2012	7.195.980	99,80	501	540	39	7%
21	2013	7.228.427	110,70	566	608	42	7%
22	2014	7.252.949	112,70	631	628	-3	0%
23	2015	7.273.265	114,90	660	648	-11	-2%
24	2016	7.300.918	114,90	702	657	-44	-7%
25	2017	7.337.449	114,90	698	669	-29	-4%
26	2018	7.412.566	114,90	689	693	4	1%
27	2019	7.592.871	114,90	703	755	52	7%
28	2020	7.743.955	114,90	335	808	473	58%
29	2021	7.834.167	114,90	366	841	475	56%
30	2022	7.901.653	114,90	520	866	346	40%

Fuente: elaboración propia con datos tomados de TRANSMILENIO S.A. [23].

Las altas diferencias en la estimación de usuarios para los años 2001 y 2002 pueden atribuirse al inicio del sistema y su acoplamiento operativo y de demanda general.

En los años 2020 y 2021, la cantidad de usuarios reales es baja, atribuible a la pandemia COVID-19.

Finalmente, en 2022 persiste la cantidad baja estimada, atribuible tanto al rezago fruto de la pandemia del 2020, como a un fenómeno acentuado de evasión de pasajes [37].

Finalmente se utiliza una corrección de la estimación de cantidad de usuarios basada en la Teoría Prospectiva de toma de decisiones, aplicada a la influencia de la satisfacción de los usuarios.

La corrección utilizada se sustenta en que existe:

Relación directamente proporcional entre la satisfacción de los usuarios y su demanda de viajes.

Un nivel de “satisfacción límite” esperada por el usuario a partir de la cual aumenta su nivel de percepción de buen servicio haciendo positiva su favorabilidad a viajar en el BRT. De otro lado, por debajo de ese nivel de satisfacción límite, el usuario reacciona desfavorablemente en su decisión de usar el BRT.

El factor así concebido se expresa como:

$$1 + \frac{SU - SL}{SU + SL}$$

Donde:

SU: satisfacción de usuarios, porcentaje

SL: Satisfacción límite, porcentaje

Finalmente, considerando la entrada en operación de la primera línea del metro en el año 2030, se prevé que el Metro atraiga incrementalmente cerca de un 3% de la demanda anual de todo el sistema, por cinco años hasta un máximo de 15%. Esto se refleja en la fórmula de cálculo de cantidad de usuarios, soportándose en la función RAMP de Vensim. La fórmula para cantidad de usuarios se codifica así:

$$U = (-368,2 + 2,01 * 10^{-18} * P^3 + 0.000161 * ET^3) \left(1 + \frac{SU - SL}{SU + SL} \right)$$

Cantidad de usuarios =SIMULTANEOUS((1-RAMP(0.03, 2030, 2035))*
(-368.2+2.01e-18*Población de Bogotá^3+0.000161*Extensión troncales^3)*
(1+DELAY1((Satisfacción de usuarios-Satisfacción límite)/(Satisfacción de usuarios+ Satisfacción
límite),2)),1000)

También se aplica un retraso de 4 años al componente de satisfacción de usuarios, pues si bien su medición está siendo anual, el uso e impacto general sobre la actitud de los usuarios se intensifica cada cuatro años según la periodicidad de participación ciudadana en elecciones presidenciales o de alcaldía.

4.5.4 Buses necesarios

Se asume que la cantidad de buses tipo necesarios depende fundamentalmente de la cantidad de usuarios a atender y la capacidad de pasajeros (usuarios) en cada bus tipo.

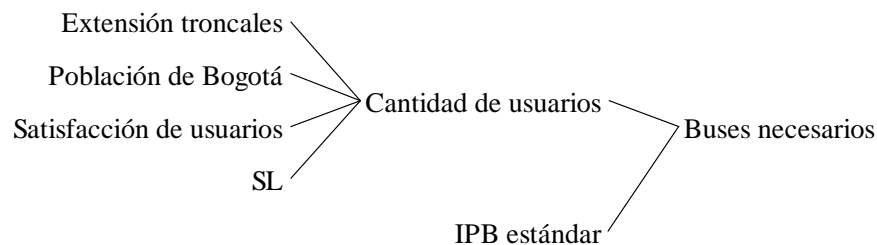


Gráfico 9. Árbol de causas de buses necesarios

Fuente: elaboración propia.

La equivalencia de buses necesarios para una cantidad de usuarios plantea una complejidad especial dada la diferente capacidad de los buses en operación (articulado, biarticulado y padrón) y la cantidad relativa de cada uno de ellos en el total de la flota.

Para poder consolidar los diferentes tamaños de bus en una sola categoría se utiliza la figura de “bus tipo”, siendo la capacidad de un bus tipo el promedio ponderado de las capacidades de los buses en operación. Este estándar permite hacer un cálculo de la totalidad de flota representada en una sola unidad de medida de tamaño de bus, que después puede ser detallado para cada tamaño de bus de acuerdo con las decisiones de composición de la flota en diferentes mezclas de tipologías de buses según su capacidad:

$$C_{BT} = \frac{C_{BA} * N_{BA} + C_{BB} * N_{BB} + C_{BP} * N_{BP}}{N_{BA} + N_{BB} + N_{BP}}$$

Donde:

C_BT= capacidad de un bus tipo, pasajeros/bus.

C_BA= capacidad de un bus articulado, 160 pasajeros/bus.

C_BB= capacidad de un bus biarticulado, 250 pasajeros/bus.

C_BP= capacidad de un bus padrón, 80 pasajeros/bus.

N_BA= número de buses articulados en operación.

N_BB= número de buses biarticulados en operación.

N_BP= número de buses padrón en operación.

En la siguiente tabla se muestra la aplicación de esta ponderación para la flota operativa entre 2016 y 2022.

Tabla 22. Número de buses operativos por tipología tomado de TRANSMILENIO S.A.

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
N_{BA} Número de buses articulados 160 pasajeros por bus	1434	1433	1434	1109	763	761	762
N_{BB} Número de buses biarticulados 250 pasajeros por bus	310	310	359	757	1330	1330	1192
N_{BP} Número de buses padrón 80 pasajeros por bus	262	262	261	261	273	273	272
C_{BT} Capacida del bus tipo pasajeros por bus tipo	163	163	166	182	201	201	198
N_{BT} Número de buses tipo	1.803	1.802	1.866	2.120	2.583	2.582	2.407
Usuarios pasajeros por año	701,5	698,18	689,08	702,99	335,49	366,13	519,96
IPB estándar pasajeros diarios por bus tipo	1.067	1.062	1.012	909	356	389	592

Fuente: cálculo propio de capacidad ponderada para un bus tipo y de ITB estándar.

En el año 2019 se incorporaron nuevos buses biarticulados, lo que mejoró la capacidad del bus tipo, incrementándola desde 163 pasajeros/bus tipo en 2016 a 201 pasajeros por unidad tipo en 2023. Esto también tuvo impacto en mejora de los indicadores de eficiencia de la flota.

Tabla 23. Factores de conversión

Tamaño de bus	Capacidad (pasajeros/bus)	Factor de conversión (Bus / bus tipo)
Articulado	160	0.8
Biarticulado	250	1.25
Padrón	80	0.4
Bus tipo	200	1

Fuente: elaboración propia.

El **IPB estándar** (Índice de Pasajeros diarios por bus tipo), es una medición de la eficiencia operativa de la flota y constituye un indicador clave para el dimensionamiento de la flota necesaria. En la tabla 22 se puede observar cómo su valor se mantuvo relativamente estable entre 2016 y 2018, para caer a partir de 2019. Dicha caída se puede explicar por protestas en 2019, entrada en operación de nuevos buses y pandemia de COVID-19.

Basado en lo anterior se fija un valor inicial de pasajeros transportados diariamente por bus tipo:

$$\text{IPB estándar} = 916 \frac{\text{usuarios}}{\text{bus tipo} * \text{día}}$$

Este IPB estándar difiere del IPB reportado por TRANSMILENIO S.A., pues este último coloca en el denominador la suma de todos los buses utilizados sin importar su capacidad. Además, considera únicamente los buses que utiliza en la operación, no contabilizando los buses que se mantienen en reserva o en mantenimiento. Otra diferencia por señalar en el cálculo es que TRANSMILENIO S.A., aplica un factor de 22.5 días mensuales de operación. Para efecto del IPB estándar, se tiene en cuenta el dimensionamiento de la flota expresada en buses tipo. Este valor estándar de operación puede ser por sí mismo un valor objetivo de administración de la flota a nivel de planeación que refleja la eficiencia en la utilización de la flota disponible.

$$\text{Buses necesarios} = \frac{\text{Cantidad de usuarios} \left(\frac{M \text{ usuario}}{\text{año}} \right) * 1.000.000 \left(\frac{\text{usuario}}{M \text{ usuario}} \right)}{\text{IPB estándar} \left(\frac{\text{usuario}}{\text{bus tipo} * \text{día}} \right) * 365.25 \left(\frac{\text{día}}{\text{año}} \right)}$$

4.5.5 Buses en operación

Corresponde al tamaño total de la flota en operación troncal del sistema BRT. Y se compone de la suma de la cantidad de buses en operación por cada tipología.

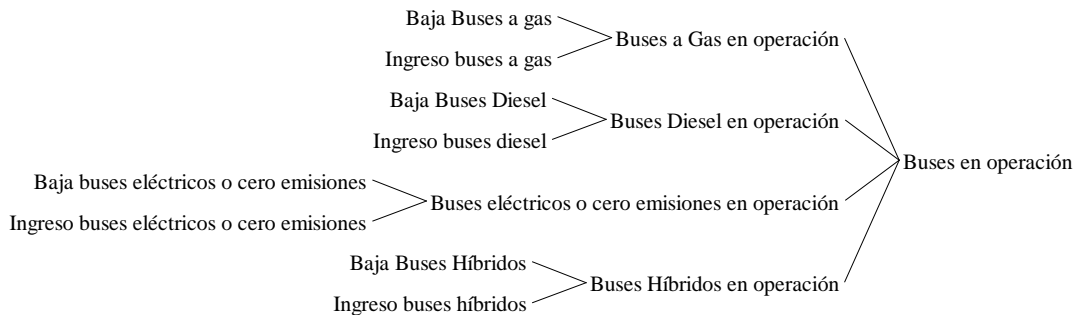


Gráfico 10. Árbol de causas de buses en operación

Fuente: elaboración propia.

Se simplifica el problema de pensar en la cantidad específica de cada tamaño de bus al utilizar el bus tipo como unidad de medida. Los tiempos dedicados a mantenimiento o a espera en patios, o viajes en vacío se ve simplificado también por el indicador de “IPB estándar” que refleja la eficiencia total de utilización de la flota.

4.5.6 Buses nuevos

Es una estimación de la cantidad total anual de buses tipo que deben reponerse, para atender el balance entre demanda total de buses por parte de los usuarios y la flota operativa disponible.

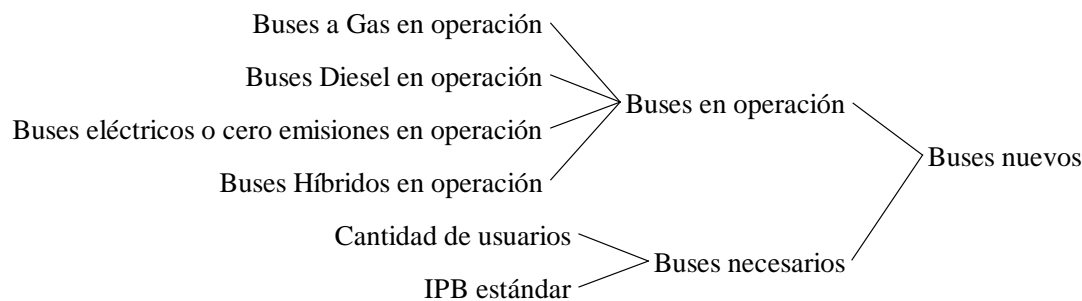


Gráfico 11. Árbol de causas de buses nuevos

Fuente: elaboración propia.

Más aún, la renovación de la flota se debe descomponer en la cantidad de buses que se deben renovar en cada tipología para atender su obsolescencia por vida útil o por cantidades exigidas por la ley a renovar de cada tipología.

Dado que su cálculo considera los buses en operación y la demanda de buses, por si solo es una variable estabilizadora del sistema.

En consideración a que el transporte público es un servicio de altísima incidencia en el bienestar general de la ciudad y de importancia estratégica para el desarrollo integral de la misma, se asume que, en el caso de tener excedentes de buses, estos no se retiran inmediatamente del sistema, sino que se mantienen como reserva hasta el cumplimiento de su vida útil y simplemente el nivel de buses nuevos es cero:

IF THEN ELSE((Buses necesarios-Buses en operación)<=0 , 0 ,(Buses necesarios-Buses en operación))

Esto se refleja en la ecuación de cálculo de buses nuevos cuyos valores permitidos son positivos.

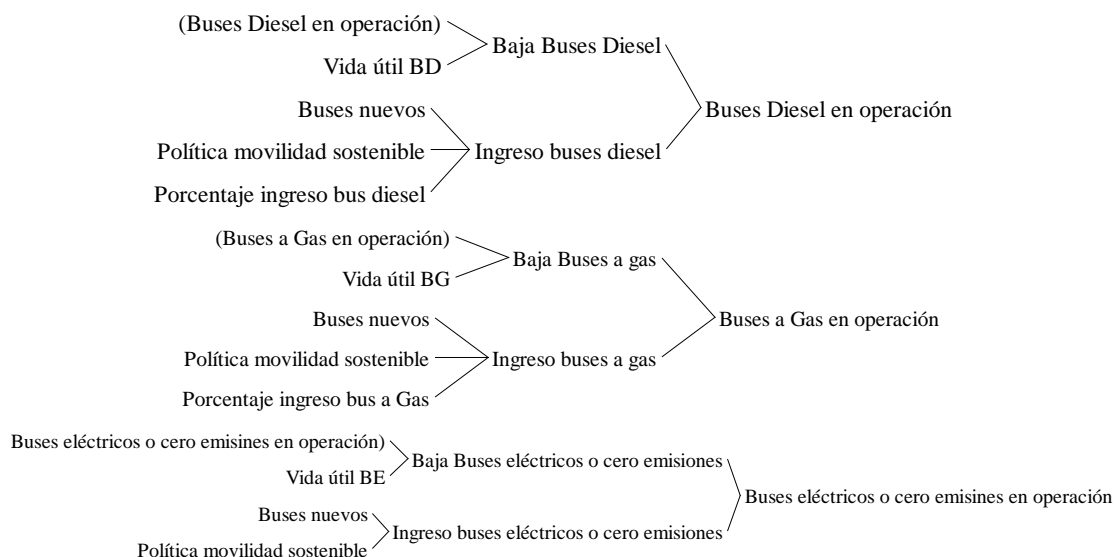
4.5.7 Buses en operación por tecnología vehicular

Este tamaño de flota se entiende que agrupa en buses tipo la flota de cada tecnología según su fuente energética de propulsión.

Además de la tipología de los buses según su fuente energética de propulsión (diésel, gas, electricidad, etc.), resume en “unidades tipo” los diferentes tamaños de bus, posibilitando un dimensionamiento y administración global de la flota y reduciendo así su complejidad.

Es por esencia una variable de nivel y de importancia para definir elementos de apoyo operativo en el sistema, tales como patios, talleres, repuestos, personal de mantenimiento, estaciones de recarga, etc.

Su nivel se basa en la estimación de los flujos de ingreso y baja de vehículos para componer la flota operativa del BRT.



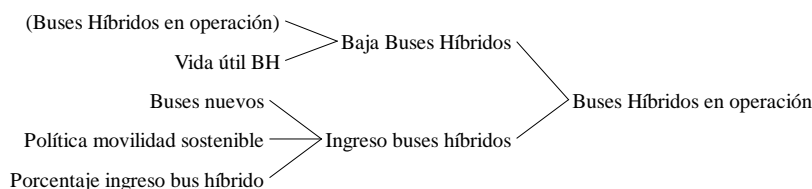


Gráfico 12. Estimación de los flujos de ingreso y baja de vehículos para la flota operativa del BRT

Fuente: elaboración propia.

El ingreso de buses atiende a:

- Reponer los que cumplen su vida útil
- Para atender la inversión en nuevos vehículos necesarios para atender la demanda insatisfecha.

No se consideran necesidades de reposición por siniestros, debido a la ausencia de datos históricos o inexistencia de evidencia sobre la ocurrencia de esta causa de eventos.

El ingreso así concebido, está gobernado por lo establecido en la Ley de movilidad sostenible [41], según la cual deben cumplirse porcentajes mínimos de vehículos eléctricos o de cero emisiones en la nueva flota. La sola existencia de dicha ley revela la necesidad de intervención gubernamental para impulsar el uso de estas tecnologías y se asume que esas cantidades serán las aplicadas por los entes encargados de la decisión de compra.

Las cantidades de vehículos a ingresar en las demás tecnologías se estiman según una probabilidad de selección asignada por el autor según la revisión de investigaciones previas. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 24. Combinación de Política de movilidad sostenible y porcentajes de ingreso de vehículos

Año	Política movilidad sostenible Ley 1964 de 2019 % mínimo de vehículos adquiridos eléctricos o cero emisiones	Porcentaje de ingreso bus contaminante		
		60 %	30 %	10 %
		Diesel	Gas	Híbridos
2025	10 %	54 %	27 %	9 %
2027	20 %	48 %	24 %	8 %
2029	40 %	36 %	18 %	6 %
2031	60 %	24 %	12 %	4 %
2033	80 %	12 %	6 %	2 %
2035	100 %	0 %	0 %	0 %

Fuente: elaboración propia según Ley 1964 de 2019 [41] y reportes de estudios previos [5], [9], [17].

El **porcentaje de ingreso de buses** contaminantes refleja la probabilidad de selección de cada opción tecnológico, entendiendo que es una decisión de tipo de racionalidad procesal, influida por múltiples factores como la disponibilidad de la tecnología, su servicio de mantenimiento, su costo y su madurez técnica [6], [17].

En Vensim la **política de movilidad sostenible** es declarada a través de una función lookup cuya representación se puede observar en la siguiente figura.

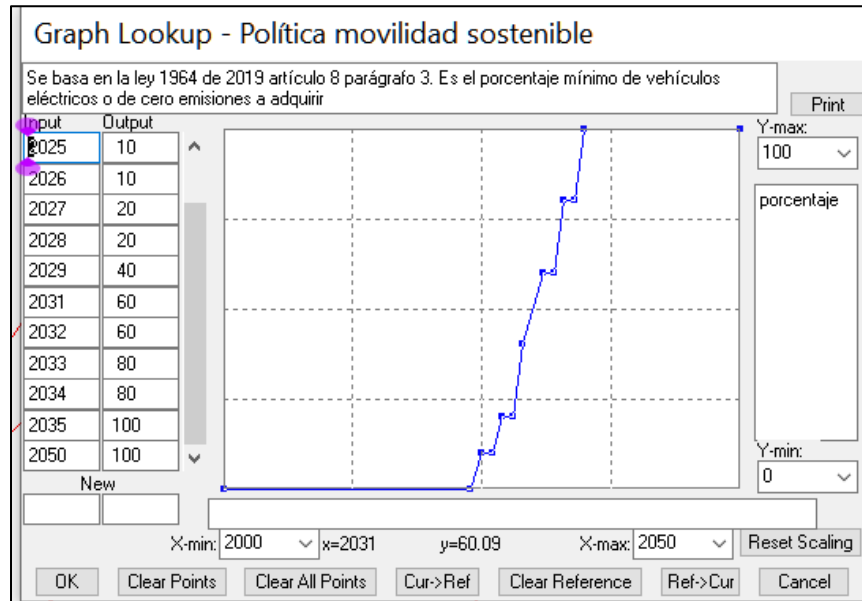


Figura 18. Lookup en Vensim la ley 1964 de 2019 [41]

Fuente: elaboración propia.

Dicha política de movilidad sostenible es una variable de frontera del sistema que direcciona las decisiones de incorporación de nuevas tecnologías como se muestra en el siguiente árbol de efectos:

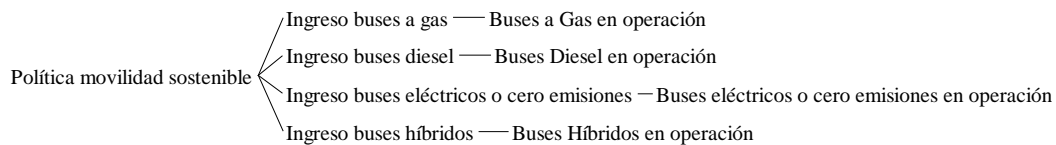


Gráfico 13. Árbol de efectos de la política de movilidad sostenible

Fuente: elaboración propia.

Así, por ejemplo, el Porcentaje ingreso bus a gas, es la cantidad de buses a gas, dentro de un total de buses contaminantes (no eléctricos o cero emisiones) a incluir en un ingreso anual de vehículos y correspondería en el año 2025 al 27 % del total de buses adquiridos y al 30 % de buses contaminantes.

La **baja de vehículos**, o flujo de salida de vehículos se debe a que cumplen su vida útil o por que exceden la cantidad máxima permitida por la ley.

En este momento la ley 1972 de 2019 establece en su artículo 5 que para el año 2035 el total de la flota debe superar las exigencias de la norma Euro VI para emisiones de vehículos Diesel. TRANSMILENIO S.A. debe hacer seguimiento a su cumplimiento. Para 2035 los

vehículos que existían en el 2019 habrán cumplido su vida útil de 15 años. Además, desde la renovación masiva del año 2019, solamente deben ingresar vehículos que superan esta norma.

Así mismo, dicha ley 1972 de 2019 establecía en su artículo 9 que para el año 2030 los Sistemas de Transporte Masivo deberían cumplir con mínimo un 20 % de su flota en tecnología de cero emisiones, pero en diciembre de 2023 modificó dicha ley dejando la exigencia para el total de la flota del SITP, lo cual desborda el alcance de análisis de la presente investigación que solamente cubre el componente troncal.

La **vida útil** de cada tecnología se fijó en 15 años según información directa verbal con experto de TRANSMILENIO S.A. Es susceptible de revisión a futuro por avances tecnológicos o repotenciación de vehículos.

4.5.8 Empleos formales directos

Es la cantidad total de empleos operativos y administrativos directos formales atribuibles a la operación del componente troncal de TransMilenio.

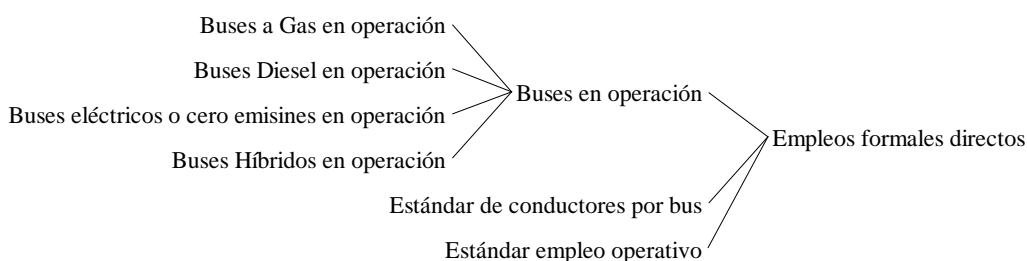


Gráfico 14. Árbol de causas de empleos formales directos

Fuente: elaboración propia.

Aunque por esencia es una variable de nivel, su dinámica depende de múltiples factores externos al sistema, pero la esencia de su demanda proviene del nivel de operación de TransMilenio, es decir, la cantidad de vehículos en operación.

Su cálculo utiliza:

- El número de **buses en operación** proyectado por el modelo.
- El **estándar de conductores por bus**, fijado para esa investigación en 2.1 conductores / bus según el dato de 5.170 conductores activos y 2.364 buses en troncal, publicados en el informe No. 87 de TRANSMILENIO S.A. de agosto de 2023.
- El dato calculado con la multiplicación de los dos valores anteriores, arroja la necesidad de conductores operativos en el componente troncal. Si este dato se divide por el **estándar de empleo operativo** que es el porcentaje de empleos operativos directos formales por cada 100 empleos directos totales (administrativos y operativos) del sector de transporte público de

pasajeros de Bogotá. Su dato estimado por la Cámara de Comercio de Bogotá es de 70 %. Así se obtiene la estimación de cantidad total de empleos formales directos atribuibles a la operación del componente troncal de TransMilenio.

Su pertinencia en la presente investigación es evidenciar la magnitud de empleos formales que demanda el componente troncal de TransMilenio, generando un alto impacto social. Un análisis más profundo identificaría la necesidad de mano de obra especializada para atender las necesidades de las nuevas tecnologías, por ejemplo, para las labores de mantenimiento o reabastecimiento de vehículos y repuestos específicos de cada tecnología.

4.5.9 Huella de carbono

La huella de carbono o emisión de gases de efecto invernadero, se mide en toneladas de CO₂ equivalente y se estima basándose en los datos estándar de emisión de gases de efecto invernadero reportados por investigaciones aplicadas al BRT de Bogotá [38] y la cantidad de buses operativos en operación de cada tipología vehicular calculada y proyectada por el modelo.

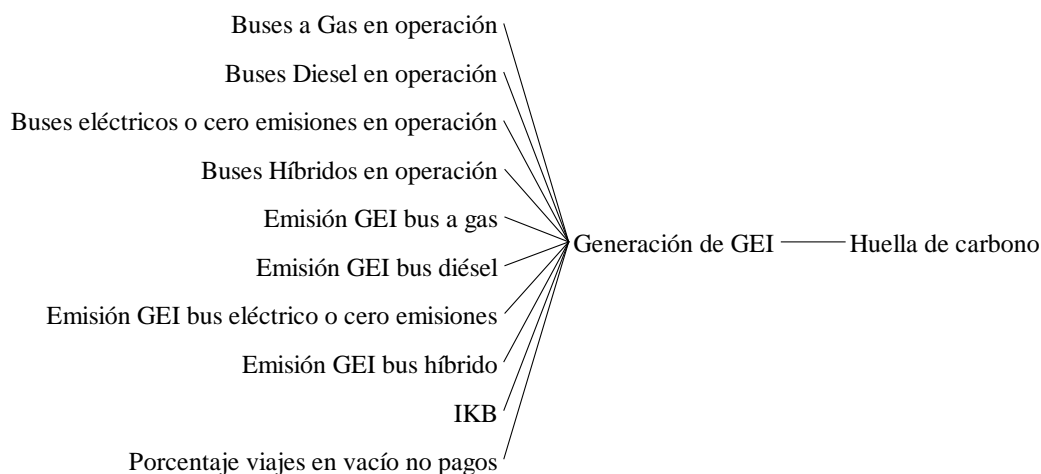


Gráfico 15. Árbol de causas huella de carbono

Fuente: elaboración propia.

La cantidad así obtenida es luego multiplicada por el índice de kilómetros recorridos diariamente por cada bus denominada **IKB estándar**, cuyo valor se asume en 259 km/bus-día, inspirado en el valor adoptado dentro del Conpes 2041 de 2023 como base para planear la operación de la nueva troncal de la calle 13 de Bogotá [6].

TRANSMILENIO S.A. calcula y publica este indicador de eficiencia IKB estándar considerando los buses activos y los viajes pagos. Es decir que hay viajes que se hacen en vacío que no se consideran en este indicador y pueden corresponder a un 5 a 10 % del total de viajes, según entrevista con los encargados de la operación.

4.5.10 Material particulado

El material particulado es una variable de nivel con especial interés como variable de resultado debido a su efecto en la salud por generación enfermedades cardiovasculares y respiratorias [1], [38].

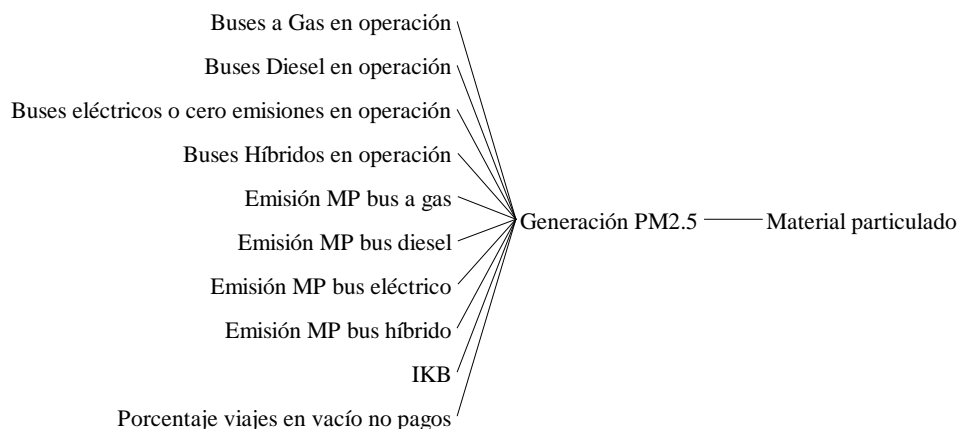


Gráfico 16. Árbol de causas material particulado

Fuente: elaboración propia.

Aunque el material particulado tiene diferentes tamaños de partícula, en el presente trabajo se eligió el material particulado de 2,5 micrómetros de diámetro pues es el que se ha detectado con mayor incidencia en la salud humana por su facilidad de ingreso al cuerpo a través de los alvéolos pulmonares [38].

Su cálculo se basa en:

- La cantidad de **buses** o tamaño de la flota discriminada por cada tipología de tecnología, calculada y proyectada por el modelo a través del horizonte de simulación de 20 años

- El estándar de **Emisión MP**, o emisión de material particulado de 2.5 micrómetros de diámetro de partícula, estimado como constante para cada tipología de vehículo y definido a partir de estudios específicos en el BRT de Bogotá [38]

- El parámetro **IKB estándar** o indicador de kilómetros recorridos diariamente por bus de la flota operativa, definido en 259 km/bus tipo-día, de acuerdo con los datos asignados por TRANSMILENIO S.A. en la planeación de las próximas troncales [6]

- El porcentaje de viajes en vacío no pagos que corresponde a viajes realizados por el operador y que TRANSMILENIO S.A. no incluye en el cálculo del IKB. Su valor se fijó en 5 % según entrevista con expertos del BRT de Bogotá.

4.5.11 Baterías desechadas

La generación de baterías por la operación el BRT y su previsible aumento, seguramente planteará retos especiales en un horizonte próximo debido a su alto costo y capacidad contaminante, lo que las hace un excelente caso de estudio para implementación de cadenas de abastecimiento que incluyan actividades de economía circular. A nivel global los objetivos de desarrollo sostenible promueven el desarrollo de este tipo de prácticas y a nivel nacional ya se tienen algunas leyes base para su implementación, por ejemplo:

- Decreto 4741 de 2005 de la Presidencia de la República.
- Decreto 372 de 2009 del Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.
- Resolución 1297 de 2010 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

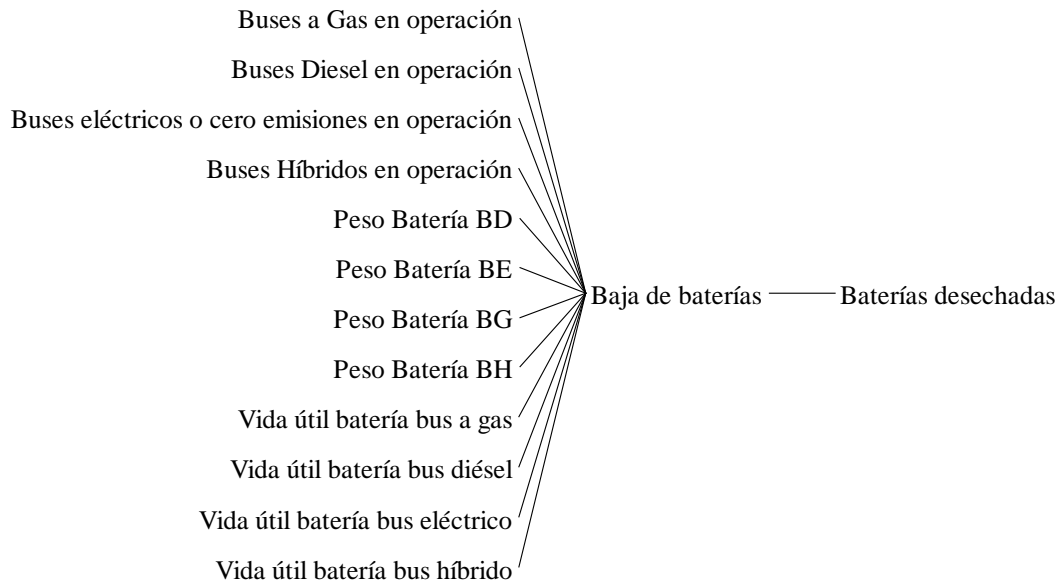


Gráfico 17. Árbol de causas baterías desechadas

Fuente: elaboración propia.

Tal como se muestra en el anterior árbol de causalidad generado desde Vensim, la cantidad de baterías desechadas se calcula basado en:

- La cantidad de **buses** o tamaño de la flota discriminada por cada tipología de tecnología, calculada y proyectada por el modelo a través del horizonte de simulación de 20 años.
- El **peso** unitario de cada batería, según datos suministrados directamente en los patios de TransMilenio por personal experto en el mantenimiento de los buses troncales.
- La **vida útil** de cada batería según la tecnología. Este dato fue suministrado por entrevista directa con personal de mantenimiento de empresas operadoras de los buses troncales de TransMilenio.

4.5.12 Siniestros graves evitados

Desde sus inicios el BRT ha sido identificado como una herramienta para disminuir la cantidad de siniestro en las troncales, debido principalmente a la minimización del conflicto especial de los actores viales en las troncales, al implementar infraestructura de carriles especializados para diferentes formas de movilidad (articulados, bicicletas, peatones, automóviles, etc.) [6].

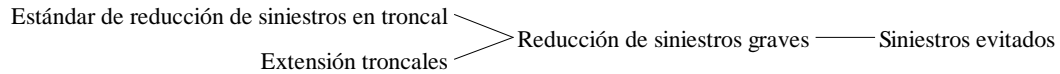


Gráfico 18. Árbol de causas siniestros evitados

Fuente: elaboración propia.

Su cálculo se basa en la proyección de ampliación progresiva de la red de troncales y en el estándar de reducción de siniestros por kilómetro de troncal implementado.

5. Análisis de resultados

El diagrama de flujo obtenido, conformado por 62 variables, es sometido a una serie de verificaciones y pruebas según la metodología explicada por Bilash [3]. Este análisis no es necesariamente secuencial, aunque forzosamente así se consigna (estructural, bucles, robustez, sensibilidad) pues en él se plasma la esencia del pensamiento sistémico, según el cual todos los elementos están interconectados y el análisis es un proceso cíclico y no necesariamente secuencial. Así pues, lo acá consignado es el resultado final alcanzado en la presente investigación y no necesariamente es un constructo terminado, sino más bien un marco de referencia para seguir desarrollando el modelo.

5.1 Análisis estructural

Aplicando la herramienta “*Document all*” de Vensim se genera un listado de las 62 variables del diagrama de flujo con sus características principales:

- Código interno
- Nombre
- Ecuación
- Unidad de medida
- Comentarios

Este listado es complementado con otras características como el tipo y subtipo de la variable dentro de Vensim y la asignación de *stakeholder* clave de cada variable.

El listado así generado se presenta en el anexo F, y se va depurando sucesivamente a medida que avanza la investigación. Su importancia inicial es servir como herramienta de validación con los expertos entrevistados, para perfeccionar el diagrama de flujo.

El análisis estructural propiamente dicho consiste en asignar clasificaciones a las variables desde dos perspectivas:

Perspectiva externa: cada variable es clasificada en uno de tres grupos por parte de observadores externos del modelo. El objetivo de esta clasificación es identificar cómo el observador externo percibe que está conformado el sistema y así facilitarle la presentación de resultados durante las simulaciones. Una buena inspiración para acercarse a este entendimiento del observador externo, surge mirando la estructura de los informes periódicos disponibles públicamente en la página de TRANSMILENIO S.A. [23]. Los grupos de variables a generar son:

- Demanda: se asigna esta clasificación a las variables directamente relacionadas con exigencias al sistema. En el caso del BRT de Bogotá, una variable claramente identificada es la población de Bogotá, dado que desde allí surge la necesidad de servicio del sistema.

- Oferta: corresponde a las variables que, a juicio del observador externos, se relacionan con el funcionamiento del BRT. Un ejemplo es la flota en operación.

- Impacto: son las variables que, a juicio de un observador externo del modelo, muestran las interrelaciones con su medio. Ejemplo del presente modelo son las emisiones de material particulado.

Perspectiva del modelador: el listado de variables es clasificado por el líder del desarrollo del modelo. Esta clasificación refleja el entendimiento de dicho modelador sobre la estructura interna del modelo con un enfoque causa-efecto en el cual los parámetros fijan el escenario donde se desarrolla una corrida, las variables de conexión traducen el estímulo a través del sistema y finalmente las variables de desempeño muestran el estado alcanzado por el sistema y sus efectos hacia el exterior. Esta agrupación se usa más adelante para identificar las variables que diferencian un escenario de otro y que requieren de la asignación de un valor. La clasificación así entendida implica la asignación de cada variable a uno de los siguientes grupos:

- Desempeño: son variables que muestran los resultados del cálculo del modelo para reflejar el estado del sistema. Normalmente son las variables que se usan como resultado de la simulación y se presentan de manera gráfica como resultado de un escenario para análisis de los expertos sobre el comportamiento del sistema. Se pudiera decir que son los síntomas visibles del estado del sistema. Un ejemplo es la cantidad de buses en operación por cada tecnología

- Conexión: son las variables del modelo que se usan como puentes para traducir el efecto de una variable sobre otra. Son de importancia para la creación y análisis de bucles. Constituyen los puentes entre los elementos del sistema. Un ejemplo es la cantidad de buses necesarios para mantener el desempeño de la flota y su respuesta a la demanda de los usuarios.

- Parametrización: son las variables que requieren de la asignación de un valor para el funcionamiento del modelo. Refleja condiciones de un escenario específico. Un ejemplo es el porcentaje de ingreso de bus diésel en el momento de realizar la compra de una reposición de vehículos donde ya está definida una cantidad de vehículos con emisiones en operación pero que hay libertad de elegir entre buses a gas, diésel o híbridos.

La tabla con los resultados de esta clasificación se consigna en el Anexo H. Igualmente se muestra la organización de las variables de Desempeño y las de Parametrización.

5.2 Identificación de bucles

Una vez cumplida la primera versión del análisis estructural, que generó la organización de las variables por perspectivas del modelador y de expertos, se utiliza la herramienta “*Loops*”

de Vensim para identificar los bucles presentes en el diagrama de flujo. En la siguiente tabla se resume su resultado:

Tabla 25. Identificación de bucles en el diagrama de flujo

Código de bucle, longitud y componentes	
Loop Number 10 of length 1 Buses Diesel en operación Baja Buses Diesel	Loop Number 13 of length 1 Buses eléctricos o cero emisiones en operación Baja buses eléctricos o cero emisiones
Loop Number 12 of length 1 Buses a Gas en operación Baja Buses a gas"	Loop Number 1 of length 2 Cantidad de usuarios IPB Índice Pasajeros diarios por bus Satisfacción de usuarios
Loop Number 3 of length 7 Cantidad de usuarios Buses necesarios Buses nuevos Ingreso buses eléctricos o cero emisiones Buses eléctricos o cero emisiones en operación Buses en operación IPB Índice Pasajeros diarios por bus Satisfacción de usuarios	Loop Number 2 of length 7 Cantidad de usuarios Buses necesarios Buses nuevos Ingreso buses híbridos Buses Híbridos en operación Buses en operación IPB Índice Pasajeros diarios por bus Satisfacción de usuarios
Loop Number 4 of length 7 Cantidad de usuarios Buses necesarios Buses nuevos Ingreso buses diésel Buses Diesel en operación Buses en operación IPB Índice Pasajeros diarios por bus Satisfacción de usuarios	Loop Number 5 of length 7 Cantidad de usuarios Buses necesarios Buses nuevos Ingreso buses a gas Buses a Gas en operación Buses en operación IPB Índice Pasajeros diarios por bus Satisfacción de usuarios
Loop Number 6 of length 3 Buses Híbridos en operación Buses en operación Buses nuevos Ingreso buses híbridos	Loop Number 7 of length 3 Buses eléctricos o cero emisiones en operación Buses en operación Buses nuevos Ingreso buses eléctricos o cero emisiones
Loop Number 8 of length 3 Buses a Gas en operación Buses en operación Buses nuevos Ingreso buses a gas	Loop Number 9 of length 3 Buses Diesel en operación Buses en operación Buses nuevos Ingreso buses diésel
	Loop Number 11 of length 1 Buses Híbridos en operación Buses Híbridos

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, la aplicación de la función de Vensim "*Check model*" (Ctrl+T), alerta que las siguientes variables no tienen conexión de realimentación hacia el sistema modelado:

- Baterías desechadas.
- Empleos formales directos.

- Huella de carbono.
- Material particulado.
- Muertos evitados.

Esta observación es un sobresaliente hallazgo pues plantea el interrogante sobre la manera en la cual se están usando las mediciones de los impactos del BRT [45], [46], [47] para crear o refinar la normatividad existente o ajustar las decisiones operativas del BRT como el ingreso de nuevos vehículos. En la normatividad se observa ya la inclusión del resultado de estos impactos [12], [40], [41], [50]. Sin embargo, no se encontró reporte de indicadores de desempeño que permita establecer su relacionamiento con el ajuste de la normatividad. Así las cosas, existe un reto de los observatorios tecnológicos para profundizar en la investigación del relacionamiento con los entes legislativos como el Ministerio de Transporte o la Alcaldía Mayor de Bogotá, de tal suerte que se pueda reflejar en el modelo su interacción.

5.3 Análisis de robustez

El objetivo de este análisis es validar que el modelo se comporta con resultados lógicos aún en los extremos más amplios de las variables

Con las variables de desempeño ya expresadas de manera gráfica y las variables de parametrización disponibles en diales, como se observa en el anexo H, se repasan los valores extremos de cada uno de los parámetros, observando el desempeño de las variables de resultado. Este primer barrido, permite identificar rangos muy altos o muy estrechos para las variables de parametrización e igualmente permite identificar variables de apalancamiento del modelo o de alta incidencia en los resultados.

Fruto de este primer barrido se identificaron las siguientes variables de apalancamiento del modelo:

- Banda poblacional.
- IPB estándar.
- Porcentaje ingreso de bus eléctrico.
- Vida útil baterías bus eléctrico.

Esta información sirve para analizar con expertos el rango de valores permitidos para cada variable del modelo y puede ser fuente de planteamiento de escenarios.

En el Anexo I se presentan los resultados del barrido de valores de los parámetros y ejemplos gráficos de sus respuestas en las variables de desempeño. Estos valores se generaron bajo tres corridas sucesivas:

- **Current:** es una primera corrida del modelo utilizando los parámetros en su valor "*Initial*" declarado para cada uno de los parámetros.

- **Alto:** es un escenario en el cual los parámetros del modelo se sitúan en su valor extremo (alto o bajo) de tal manera que produzca el valor extremo más alto en los resultados.
- **Bajo:** es un escenario en el cual los parámetros del modelo se sitúan en su valor extremo (alto o bajo) de tal manera que produzca el valor extremo más bajo en los resultados

Así validado el comportamiento del modelo ante valores extremos de los parámetros, se da por concluido su análisis de robustez y se puede pasar al análisis de sensibilidad.

5.4 Escenarios y análisis de sensibilidad

La verificación de la sensibilidad del modelo se hace a través de escenarios basados en las variables de apalancamiento del modelo.

El análisis de sensibilidad cumple pasos muy parecidos al de robustez, pero se centra en analizar el efecto sobre las variables de desempeño de las variables escogidas como apalancamientos del modelo.

Así, se plantean escenarios donde se modifica específicamente la variable de interés, dejando las demás en sus valores más probables y así validar la utilidad del modelo para prever y analizar el efecto de la variable sobre el sistema.

5.4.1 Banda poblacional

La banda poblacional refleja la probabilidad de ocurrencia de dos escenarios de crecimiento poblacional publicados por el DANE [27], [43]. Se consideran tres posibles escenarios:

- **BP0**, corresponde a un valor de 0% para la Banda Poblacional. Esto reflejaría la proyección poblacional realizada por el DANE en 2023 según la cual la población de Bogotá disminuirá en los próximos años debido al efecto de la pandemia del año 2020, que afectó las tasas de natalidad y ha generado desplazamientos hacia zonas rurales, contrario a lo que se venía viviendo en las décadas pasadas donde la inmigración de personas provenientes de Venezuela y de las zonas en conflicto, apalancaban el crecimiento poblacional.
- **BP100**: corresponde a una proyección poblacional con los datos que poseía el DANE en el censo de 2018. Según esta, la población de Bogotá crecería sostenidamente en todo el horizonte del presente estudio (20 años). Esta constituye hoy la proyección más aceptada para el crecimiento poblacional de Bogotá, habiendo sido base para la planeación y aprobación de proyectos de expansión del sistema de transporte masivo de

Bogotá que incluye no solamente en su componente de BRT si no en inversiones para la primera línea del metro de la ciudad y conexión del SITP con trentram y cable [6].

- **BP50:** corresponde a un escenario donde el crecimiento poblacional se situaría en el promedio de las dos proyecciones extremas anteriores.

El resumen de los resultados arrojados por el modelo para el año 2043 se muestran en la siguiente tabla y gráfica de sensibilidad. Y gráficas con sus tendencias mayor detalle se muestra en el anexo J.

Tabla 26. Sensibilidad del modelo frente a valores extremos de la banda poblacional.

Máx. de 2043		Corrida		
Variable	U	BPO	BP50	BP100
Baterías desechadas	Ton	5.936,6	7.123,6	8.492,8
Cantidad de usuarios	Mega usuario/año	1.129,7	1.379,5	1.677,9
Empleos formales directos	personas	9.577,8	11.590,3	13.974,4
Huella de carbono	Ton	223.040.000,0	237.330.000,0	252.723.000,0
Material particulado	Ton	2.348,1	2.476,2	2.613,8
Muertos evitados	mueartos	341,8	341,8	341,8

Fuente: elaboración propia.

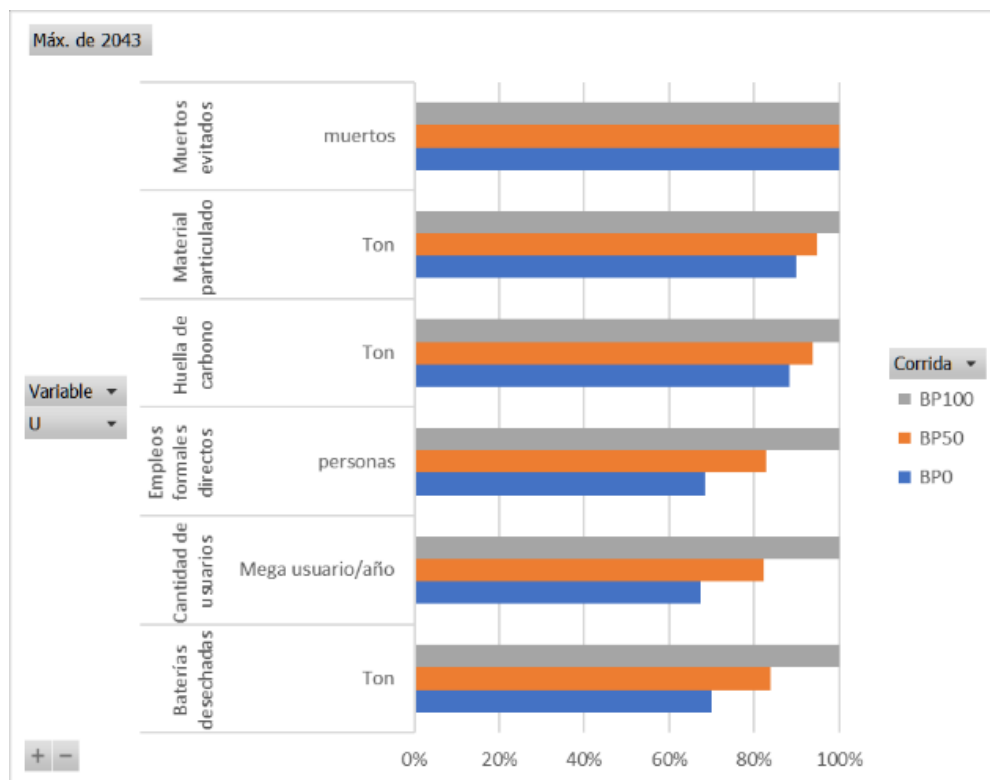


Figura 19. Gráfico de sensibilidad frente a valores extremos de la Banda Poblacional

Fuente: elaboración propia.

Soportado en estos datos se puede afirmar que la desaceleración del crecimiento poblacional producido por la pandemia del 2020, puede significar una disminución de 30 % en la demanda de usuarios que se tiene planeada.

De otro lado, el cambio producido en los impactos ambientales de la operación del BRT es previsiblemente menor y puede significar solo una disminución del 10 %, aunque la demanda caiga en un 30 %. Esto es atribuible a que la planeación del sistema considera la migración gradual de la flota troncal hacia tecnologías limpias o de cero emisiones directas.

Llama la atención que el modelo no muestra cambio en la cantidad de muertes evitadas en el componente troncal. Esto es atribuible a que se maneja un factor de reducción de muertes que se relaciona con la extensión de las troncales y no es sensible al volumen poblacional de la ciudad.

5.4.2 IPB Estándar

El IPB estándar (Cantidad de pasajeros diarios por bus tipo), refleja la productividad de la de la flota y puede estar relacionado tanto con la optimización del tamaño de la flota y su programación, como con los tamaños de los buses. Factores estos que son de interés histórico por su impacto en los resultados económicos de la operación del BRT. Con el presente modelo se plantea el efecto de lograr mejoras significativas en este indicador, manteniendo en su valor normal los otros parámetros del modelo.

Tomando como valor central el fijado de 916 pasajeros por bus tipo diario y observando las variaciones históricas cuantificadas y publicadas en los informes de TRANSMILENIO S.A. [22], [23], se decide explorar la influencia en el tamaño de la flota y en la satisfacción de los usuarios de elevar el número IPB hasta 1000 pasajeros diarios por bus. Los resultados se muestran en la siguiente figura:

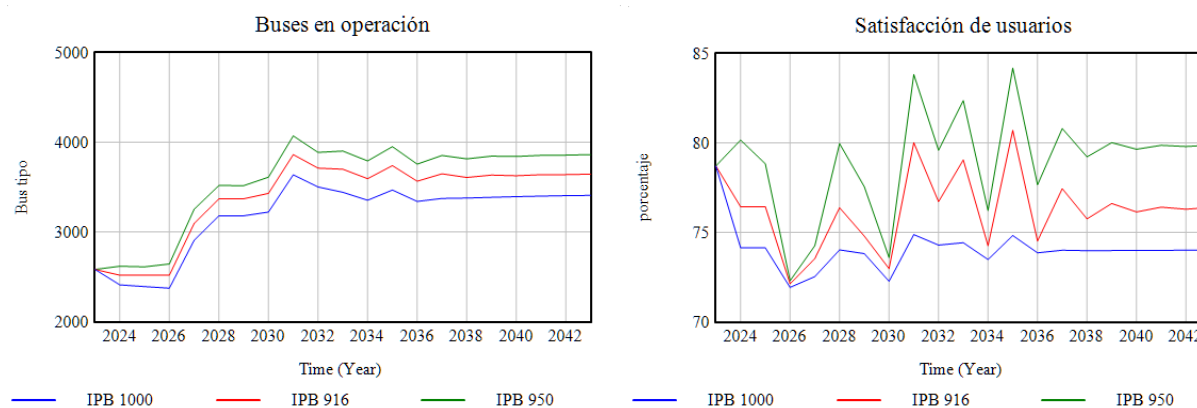


Figura 20. Influencia de incrementar el IPB.

Fuente: elaboración propia.

En esta figura se puede observar que el tamaño de la flota en operación puede disminuir en cerca de 450 buses tipo, pasando para el año 2043 de 3863 a 3409 buses tipo, lo cual sería altamente atractivo para la rentabilidad del sistema.

Sin embargo, la satisfacción de los usuarios puede verse disminuida en 6% bajando desde 80 % a 74 %, lo que la situaría en el umbral de satisfacción límite actualmente fijado en 75 % y que pudiera llevar a pérdida paulatina de usuarios por percepción de mala calidad en el servicio.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Existe un contexto de favorabilidad hacia la tecnología eléctrica, soportado en tres hechos sobresalientes: en primer lugar sus costos totales se han favorecido por avances tecnológicos que reducen el costo de reemplazo de baterías, paralelo a un encarecimiento de los combustibles fósiles; en segundo lugar se están generando incentivos para la cofinanciación de inversiones lo que se orienta a derribar la barrera de alto cápex; en tercer lugar la presión de la normativa de descarbonización exige su implementación.

Los **stakeholder** principales del BRT de Bogotá son: Los usuarios, la Secretaría de Ambiente, la Secretaría de movilidad, los operadores, los proveedores tecnológicos, TRANSMILENIO S.A., el Ministerio de Transporte y la Alcaldía Mayor.

El **diagrama causal** desarrollado para el BRT de Bogotá está conformado por siete nodos. La normatividad regula los bucles de refuerzo que se apalancan en los impactos. De otro lado, la inversión en flota nueva regula los bucles estabilizadores, pero está afectada por retrasos.

Los **costos totales** (Cápex y Opex) de la tecnología eléctrica el BRT de Bogotá muestra su favorabilidad a partir del año 2023 frente a la tecnología diésel y desde el 2027 frente al Gas natural. Los incentivos de cofinanciación estatal para inversión en esta tecnología y las metas normativas para disminución de los impactos ambientales favorecen su implementación. Sin embargo, hay barreras de información que dificultan la implementación.

La **integración** del BRT con otros elementos del sistema de transporte masivo, tales como líneas de metro, cable y tren tram, plantea cambios en su demanda para los cuales no se encontraron reportes específicos que faciliten su modelamiento.

El modelo generado, si bien permite hacer una aproximación al entendimiento del sistema, identificando sus componentes y relacionamientos principales, corresponde a una aproximación inicial susceptible de desarrollo futuro.

6.2 Recomendaciones

Analizar las proyecciones de inversión del BRT a la luz de variaciones en el **crecimiento poblacional** de Bogotá.

Hacer seguimiento especial a la baja progresiva de los buses que no cumplen con La ley 1972 de 2019 (que representaron el 29 % de la flota en el año 2023) para que en el año 2035 toda la flota supere la norma **Euro VI**. Con altísima probabilidad esta exigencia será cumplida pues para esa fecha los vehículos que ingresaron a la flota en el 2019 habrán cumplido su vida útil de 15 años y desde la renovación masiva del año 2019 solamente ingresan vehículos que superan esta norma. Puede ser interesante observar si las decisiones de reemplazo continúan enfocadas a tecnología Diesel Euro VI o se inclinan a buses eléctricos.

Refinar el cálculo de desechos operacionales, tales como las **baterías** en una concepción de economía circular que promueva la implementación de su logística inversa y facilite la inversión en desarrollo tecnológicos de vida útil y el peso.

Desarrollar investigaciones que permitan afinar el entendimiento y modelamiento de la satisfacción de los usuarios y su influencia sobre la demanda de viajes en el BRT y los impactos de todo el sistema.

A futuro (años 2030-2040), según el avance de la integración de "**Bogotá región**" con los municipios vecinos, puede refinarse la estimación de "Cantidad de usuarios" para explicar más adecuadamente la influencia de las poblaciones integradas con Bogotá sobre la demanda del BRT y sus impactos.

Avanzar en el desarrollo del modelo conectando cuantitativamente la relación causal entre los **impactos del BRT y la normatividad** que lo rige. Esto facilitaría la creación de nuevos bucles dentro del diagrama de flujo y así permitir un análisis más sistémico de las variables que lo conforman.

Profundizar en el **retraso** que tiene la demanda de usuarios cuando entra en operación una nueva troncal. Este conocimiento se puede utilizar para planear la sincronización entre la inversión en nuevos vehículos y su demanda, o para crear estrategias que incentiven a los usuarios a usar más prontamente la nueva troncal.

Utilizar las proyecciones de necesidad de **empleos directos**, ligándola a la proyección de reconfiguración tecnológica de la flota. Esto permitiría prever la demanda de personal especializado para cada tecnología. El fruto de dicho análisis de oferta y demanda en el mercado laboral puede impactar la definición de programas de capacitación especializada de tal manera que pueda suplir la demanda creciente de personal capacitado en las nuevas tecnologías.

Profundizar en la investigación de emisiones del BRT de Bogotá y otras ciudades de Colombia utilizando el análisis de ciclo de vida **Well to Wheel**. Esa investigación puede llevar a perfeccionar la reglamentación sobre Movilidad Sostenible, por ejemplo, la Ley 1964 de 2019 [41], para que reconozca criterios de priorización tecnológica basados en Huella de Carbono y no únicamente por el nivel de emisiones en operación.

Afirmar la asignatura de **“Pensamiento Sistémico”** y la herramienta de “Dinámica de Sistemas” como elementos transversales de los programas de pregrado y posgrado enfatizando en su aplicación al modelamiento de sistemas de importancia central en cada disciplina curricular. Dada la disponibilidad, acceso gratuito, flexibilidad y existencia de cursos específicos, el software Vensim elegido para el presente trabajo se recomienda para futuras investigaciones basadas en Dinámica de Sistemas.

Estructurar **Proyecto de Inversión para la sustitución total de la flota BRT troncal** de Transmilenio por vehículos eléctricos, siguiendo las siguientes fases:

Exploración metodológica

- Investigación del Estado del Arte
- Marco conceptual
- Justificación de la Dinámica de Sistemas
- Construcción del Modelo SD v1.0
- Parametrización del modelo SD
- Calibración del modelo SD
- Análisis de resultados preliminares
- Conclusiones

Análisis de viabilidad tecnológica:

- Revisión de las opciones tecnológicas
- Modelo de Simulación Dinámica v2.0... v5.0
- 7. Incorporación de las características ABM (modelo basado en agentes)
 - Exploración de escenarios
 - Selección del escenario óptimo
 - Condiciones y supuestos de Viabilidad
 - Recomendaciones de política pública

- Definición de factibilidad financiera, jurídica y ambiental:
 - Definición del CAPEX
 - Definición del OPEX
 - Construcción del Flujo de Caja
 - Análisis de Rentabilidad (tasa de descuento)
 - Incorporación del Análisis de Riesgo
 - Condiciones y supuestos de Factibilidad Financiera
 - Factibilidad Jurídica de una Asociación Público Privada
 - Factibilidad Ambiental
 - Recomendaciones de Política Pública

Bibliografía

- [1] CONPES D.C. Consejo Distrital de Política Económica y Social del Distrito Capital, “Conpes, Documento 30, POLÍTICA PÚBLICA DE MOVILIDAD MOTORIZADA DE CERO Y BAJAS EMISIONES 2023-2040”, 2023, [online]
https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/doc_conpes_d.c._30_pp_movilidad_0_v2.pdf
- [2] J. D. Sterman, *Business dynamics systems thinking and modeling for a complex world*. Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, McGraw-Hill, 2000.
- [3] K. B. Bilash, M. A. Fatimah y M. N. Kusairi. *System Dynamics - Modelling and Simulation*. Springer Texts in Business and Economics, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2017.
- [4] S. P. Shepherd, “A review of system dynamics models applied in transportation”, *Transportmetrica*, vol. B2, no. 2, pp. 83-105, 2014, [online]
<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21680566.2014.916236>. Consultado el 29 de octubre de 2015
- [5] R. Montezuma, *Presente y futuro de la movilidad urbana en Bogotá: retos y realidades*. Bogotá: Veeduría Distrital, 2000.
- [6] Departamento Nacional de Planeación, “Conpes, Documento 4104, Declaración de Importancia Estratégica Regional del Proyecto de Inversión Diseño, Construcción y Puesta en Operación de la Línea 2 del Metro de Bogotá, Incluidas sus Obras Complementarias y del Proyecto de Inversión Construcción de la Troncal de la Calle 13 desde la Troncal Av. Las Américas hasta el Límite de la Ciudad, Río Bogotá del Sistema TransMilenio”, 2023, [online]
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4104.pdf>
- [7] I. García y L. J. Miguel, “Is the electric vehicle an attractive option for customers?”, *Energies*, vol. 5, no. 1, pp. 71-91, 2012, [online] <http://www.mdpi.com/1996-1073/5/1/71>
- [8] Secretaría de Movilidad de Bogotá. Diagnóstico para la política pública de movilidad motorizada de cero y bajas emisiones. 2009. [online]
https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/diag_ppmm0be_final.pdf#page=304&zoom=100,92,224
- [9] B. Morales Quintana, “Modelo de masificación de vehículos eléctricos en Bogotá”, tesis de maestría en Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2014, [online] <http://www.bdigital.unal.edu.co/48580/>

- [10] Ö. Turan y G. Yücel, "Analyzing Electric Vehicle Diffusion Scenarios for Istanbul" en Proceedings of the System Dynamics Conference, System Dynamics Society, 2014, [online] <http://www.systemdynamics.org/conferences/2014/proceed/papers/P1035.pdf>
- [11] E. A. Velandia Durán, *La bici y la ebike. Alternativas de transporte sustentable para Bogotá*. Universidad de La Salle y Codensa S.A. ESP, 2015.
- [12] Alcaldía Mayor de Bogotá, "Decreto 477 de 2013: Por medio del cual se adopta y estructura el Plan de Ascenso Tecnológico para el Sistema Integrado de Transporte Público y se dictan otras disposiciones", 2013, [online] <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=55072#>
- [13] Z. Wang et al, "A total cost of ownership analysis of zero emission powertrain solutions for the heavy goods vehicle sector", *Journal of Cleaner Production* 434 (2024)
- [14] D. Z. Singh, "Ciudades, prácticas y representaciones en movimiento: Apuntes para un análisis cultural de la movilidad como experiencia urbana", *Tiempo social*, vol. 30, no. 2, pp. 35-5, 2018.
- [15] J. Jolonch, *Análisis del transporte masivo y la movilidad en Bogotá*. Universidad del Rosario, 2013, [online] <http://revistas.urosario.edu.co/index.php/empresa/article/view/2039>
- [16] H. Haghshenas, M. Vaziri y A. Gholiamialam, "Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan" *Cities*, vol. 45, pp. 104-115, 2015.
- [17] M. V. Díaz Merchán, "Vigilancia tecnológica y prospectiva del vehículo eléctrico y tecnologías periféricas", tesis de maestría en Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2014, [online] <http://www.bdigital.unal.edu.co/48580/>
- [18] J. Cajiao, *Informe final de actividades consultor de apoyo a la división CCS en Colombia*. BID, diciembre de 2013.
- [19] Endesa. *Transporte Eléctrico: Iniciativa de Eficiencia Energética y Mitigación de Emisiones*, 2010.
- [20] TH. Basma et al, Total cost of ownership of alternative powertrain technologies for class 8 long-haul trucks in the United States, ICCT The International Council on Clean Transportation, April 2023.
- [21] S. Y. Park, J. W. Kim y D. H. Lee, "Development of a market penetration forecasting model for Hydrogen Fuel Cell Vehicles considering infrastructure and cost reduction effects", *Energy Policy*, vol. 39, no. 6, pp. 3307-3315, 2011.
- [22] TRANSMILENIO S.A., *Anexo técnico del Plan Marco del SITP*, 2019, [online]

- <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/151565/anexo-tecnico-del-plan-marco-del-sitp/>
- [23] TRANSMILENIO S.A. “Transmilenio en cifras: Estadísticas de oferta y demanda del Sistema Integrado de Transporte Público – SITP”, Informe No. 89, Bogotá, diciembre, 2023. [online]
<https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/153977/estadisticas-de-oferta-y-demanda-del-sistema-integrado-de-transporte-publico-sitp-diciembre-2023/>
- [24] R. Montezuma, A. L. Flechas Camacho y N. Rojas Roa, *Vehículos eléctricos: el transporte del futuro*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [25] R. T. Cabezas, “Prospectiva y teoría de la complejidad”, In C. E. M. Castañeda (Ed.), *Derivas de complejidad. Ciencias sociales y tecnologías convergentes*, 1a ed., pp. 167-212, 2013, Ed. Universidad del Rosario. [online] <https://doi.org/10.2307/j.ctvm204pn.7>
- [26] J. Y. Carrillo Pinzón, “Fundamentos técnicos teóricos para la formulación de una política de transporte masivo como servicio público”, tesis de Magister en Ingeniería – Transporte, Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [27] DANE, *Proyecciones de población*, 2023, [online]
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- [28] X. Liu, S. Ma, J. Tian, N. Jia y G. Li, “A system dynamics approach to scenario analysis for urban passenger transport energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing”. En *Energy Policy*, vol. 85, pp. 253-270, 2015.
- [29] S. Y. Pinzón Pérez y B. N. Vivas González, “Análisis comparativo del consumo de combustible entre un bus híbrido y un bus diésel convencional”, proyecto de grado de Administración Logística, Compensar Unipanamericana, 2014.
- [30] W. Hook, C. Kost, U. Navarro, M. Replogle y B. Baranda, “Carbon dioxide reduction benefits of bus rapid transit systems: Learning from Bogotá, Colombia; Mexico City, Mexico; And Jakarta, Indonesia”, En *Transportation Research Record*, vol. 2193, pp. 9-16, 2010
- [31] P. E. Meyer y J. J. Winebrake, “Modeling technology diffusion of complementary goods: The case of hydrogen vehicles and refueling infrastructure”, *Technovation*, vol. 29, no. 2, pp. 77-91, 2009, [online]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166497208000667>

- [32] Ch. Zhang y C. Qin, "Exploration of the Growing Trend of Electric Vehicles in Beijing with Systems Dynamics method and Vensim model", en la 32a Conferencia Internacional de la Sociedad de Dinámica de Sistemas, Delft, Países Bajos, 20 a 24 de julio, 2014; [online] <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3A38ea15bb-7e5e-4464-a00f-28b87e28559e/>
- [33] M. Rueda, "Análisis dinámico de la cadena de suministro de una empresa textil", tesis grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales, Universidad de Cantabria, 2019.
- [34] J. M. García, *Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas*, Tercera ed., vol. 1. Barcelona, España: Autor- editor, 2006.
- [35] W. Ulrich, "Critical heuristics of social systems design", En *European Journal of Operational Research*, vol. 31, no. 3, pp. 276-283, 1987. [online] [https://doi.org/10.1016/03772217\(87\)90036-1](https://doi.org/10.1016/03772217(87)90036-1)
- [36] P. Senge. *La quinta disciplina*. Barcelona: Ediciones Jan Granica, 1992.
- [37] L. Guzmán, J. Arellana y J. P. Camargo, "Un modelo híbrido de elección discreta para comprender el efecto de las políticas públicas en el desaliento de la evasión de tarifas en el sistema de autobuses de tránsito rápido de Bogotá", En *Investigación sobre transporte*, parte A: política y práctica., vol. 151, pp. 140-153, 2021.
- [38] Y. Cuéllar Álvarez, "Análisis de Ciclo de Vida para diferentes fuentes energéticas usadas en los vehículos de transporte de pasajeros de la ciudad de Bogotá", tesis de Magíster en ingeniería ambiental, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá., 2016.
- [39] Y. Cuéllar Álvarez, "Desarrollo de una nueva metodología de evaluación integrada para diseñar y seleccionar las mejores estrategias de reducción de las emisiones del transporte urbano de pasajeros", tesis de doctorado en Ingeniería - Ingeniería química, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2023.
- [40] Departamento Nacional de Planeación, "Conpes, Documento 3700, Estrategia institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia", 2011, [online] <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/5.-Conpes-3700-de-2011.pdf>
- [41] Congreso de Colombia, "Ley 1964 de 11 de Julio de 2019, por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia y se dictan otras disposiciones", 2019, [online] <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/ley-1964-de-2019/>

- [42] Congreso de Colombia, “Ley 1972 de 18 de Julio de 2019, por medio de la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano estableciendo medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes de fuentes móviles y se dictan otras disposiciones”, 2019, [online] <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/ley-1972-2019.pdf>
- [43] DANE, “Análisis de contexto de los cambios demográficos”, 2007, [online] http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/conciliacenso/2Cambios_demograficos.pdf
- [44] J. P. Bocarejo y L. F. Urrego, “Los impactos de la formalización e integración del transporte público en la equidad social: El caso de Bogotá”, En Investigación en Gestión y Negocios del Transporte, vol. 42, no. 100560, 2022.
- [45] C. E. Vergel-Tovar, S. López, N. Lleras... S. Velásquez y J. Vega, “Resultados de seguridad vial y el entorno construido en Bogotá, Colombia”, En Revista de seguridad vial, vol. 31, no. 3, pp. 33-47, 2020.
- [46] V. Gómez Ortiz, B. Cendales, S. Useche y J. P. Bocarejo, “Relaciones entre condiciones de trabajo, problemas de salud y accidentes vehiculares en conductores de autobuses de tránsito rápido (BRT)”, En Revista Estadounidense de Medicina Industrial, vol. 61, no. 4, pp. 336-343, 2018.
- [47] TRANSMILENIO S.A., “Satisfacción general TRANSMILENIO S.A.”, Bogotá D.C., 2023, [online] <https://www.transmilenio.gov.co/loader.php?IServicio=Tools2&ITipo=descargas&IFuncion=descargar&idFile=53811>
- [48] S. Ávila, M. Nieto, D. Jiménez y J. Osorio, “Análisis del impacto generado en un Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos por el aumento de los residuos asociados al crecimiento de la población a través de Dinámica de Sistemas”, Ponencia del 9° Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, 2011.
- [49] Congreso de la República. Ley 2294 de 2023 Plan Nacional de Desarrollo 2022- 2026. [online] <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=209510>
- [50] Congreso de la República, Ley 2099 de 2021, por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones, [online] <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>

- [51] D. Hidalgo, R. Giessen, J.C. Muñoz. "Bus Rapid Transit: ¿Fin de tendencia en América Latina?", Cambridge University Press: 11 de enero de 2024, [online]
<https://www.cambridge.org/core/journals/data-and-policy/article/bus-rapid-transit-end-of-trend-in-latin-america/A9454E02DC26C5CFD5487E078A95043F>

Anexos

A. Anexo: Cronología del transporte público masivo a nivel mundial

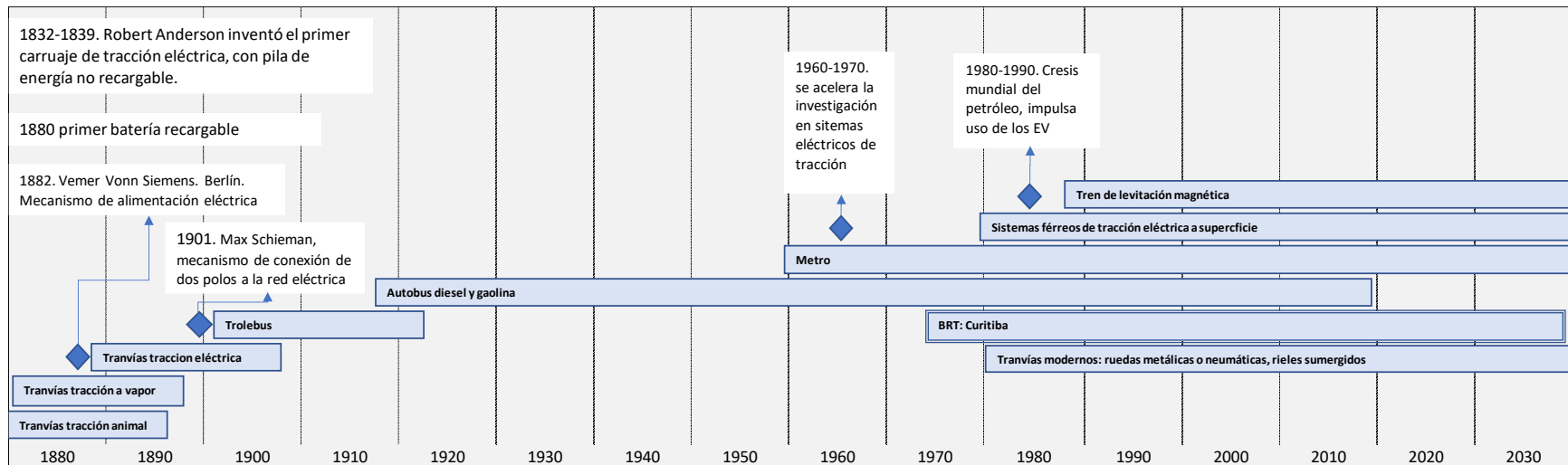


Figura A. Repaso cronológico del transporte público masivo a nivel mundial

Fuente: elaboración propia a partir de [4], [5], [24], [36].

B. Anexo: Cronología del transporte público masivo en Bogotá

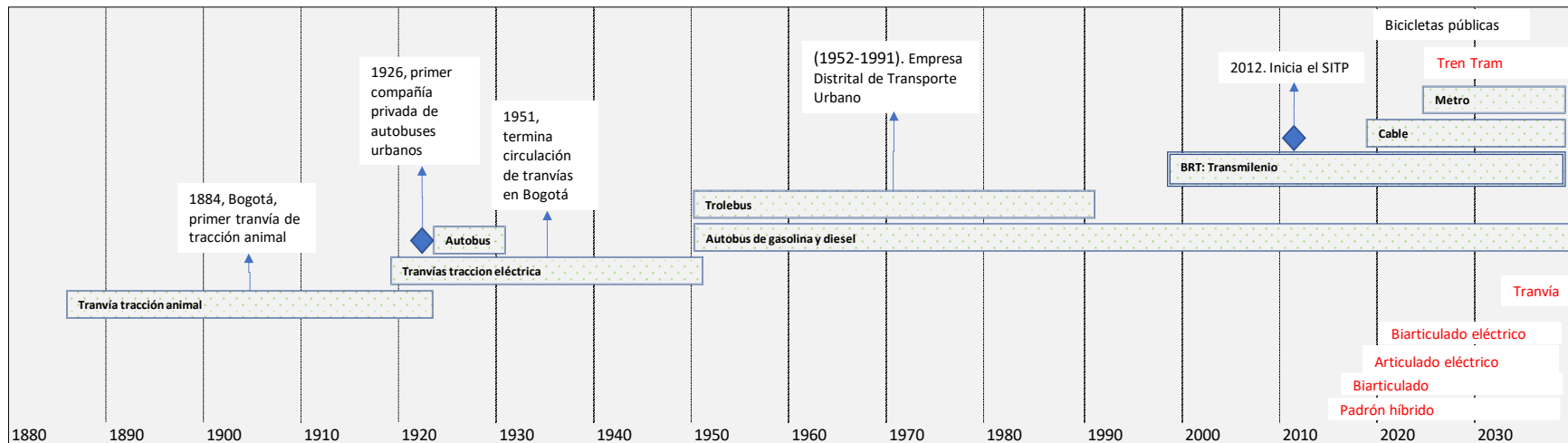


Figura B. Repaso cronológico del transporte público masivo en Bogotá

Fuente: elaboración propia con base en [4], [5], [8], [24]

El uso de tecnología vehicular en el transporte urbano masivo en la ciudad de Bogotá ha estado enmarcado tanto por el relevo tecnológico, como por la decisión gubernamental y el seguimiento de experiencias en otras ciudades del mundo [45].

A continuación, se hace un breve repaso histórico de dicho trasegar a nivel mundial:

1880-1890 El uso de los vehículos eléctricos en el transporte urbano colectivo se remonta a la electrificación de los metros y tranvías a finales del siglo XIX. Los primeros tranvías tenían motores a vapor que ocupaban mucho espacio en el vehículo o eran jalados por caballos o mulas, lo cual tenía altos costos debido al cuidado de los animales. En 1882, el mecanismo de alimentación eléctrica inventado por Werner Von Siemens, fue exhibido en abril para mover un vehículo alimentado de una línea de energía eléctrica

suspendida en Berlín. Esto abrió el camino para varios ensayos a nivel mundial especialmente en Europa y Estados Unidos. Algunos tranvías electrificados en esta época fueron los de Ontario en 1887, Richmond en 1888 y Chicago en 1897 [24].

El 24 de diciembre de 1884 circuló en el primer tranvía privado en Bogotá haciendo la ruta Plaza de Bolívar - San Diego - Carrera 13 - Chapinero. Su desplazamiento se hacía sobre rieles de madera cubiertos con metal y eran tirados por mulas.

1890 – 1920 La introducción del mecanismo de conexión a la red eléctrica de dos polos hecha por Max Schieman en 1901 y que aún hoy en día es utilizada, permitió el inicio formal del trolebús en varias ciudades de Europa. El uso de la tracción eléctrica tuvo gran acogida a inicios del siglo XX debido a su mayor potencia frente a los motores de gasolina y diésel de la época [24].

1920 -1930 Varios tranvías fueron reemplazados por trolebuses, debido principalmente a que eran más cómodos y silenciosos. [24]

En Bogotá, la empresa del tranvía Municipal de Bogotá cambió paulatinamente la tracción animal por tracción eléctrica. En 1926 se fundó la primera compañía privada de autobuses urbanos, pero desapareció rápidamente por el auge del tranvía eléctrico.

1930-1960 Los avances en el desempeño de los motores diésel, la imagen de obsolescencia del trolebús, la poca flexibilidad en recorridos y la presión de la industria del automóvil hicieron casi desaparecer los trolebuses a nivel mundial, siendo reemplazados por autobuses diésel. Un caso atípico se dio en la Europa oriental de la postguerra en donde el trolebús tuvo amplia utilización [24].

En el año de 1951 se terminó la circulación de tranvías en Bogotá y se reemplazaron por autobuses: buses de gasolina y trolebuses. La desaparición del tranvía en Bogotá se debió tanto a la fuerte imagen de obsolescencia acentuada por el Bogotazo, como por la presión internacional de los fabricantes de autobuses.

1960-1980 El transporte público masivo en la mayoría de las grandes ciudades del mundo se caracterizó por la mezcla de metros (en su mayoría subterráneos) y buses de combustible diésel a nivel de superficie con sistemas férreos [24]. Paralelamente, la presión en los sesenta por el uso de energías limpias favoreció el renacer de la investigación y desarrollo tecnológico de vehículos eléctricos. En Bogotá se mantuvo un esquema combinado de Trolebús y buses a gasolina.

1980-2000 A nivel mundial, la tracción eléctrica a nivel de superficie se asocia principalmente a sistemas férreos con rodamiento metálico o neumático y gran variedad de tipos de vehículos sobre riel: metros pesados, metros ligeros, tranvías, metros

regionales y otras opciones como el aerobús (vehículos de transporte autopropulsado que ruedan sobre una vía elevada de aluminio), el tren de alta velocidad y el tren de levitación magnética [24].

En Bogotá, la Empresa Distrital de transporte Urbano operó la porción de transporte público masivo no privado con autobuses diésel y trolebuses entre 1952 y 1991, desapareciendo finalmente, sumida en altas ineficiencias burocráticas. Así también es desmontado el sistema de Trolebus en Bogotá, quedando como única opción los buses de combustible líquido.

En **1998** se inicia en Bogotá la implementación de un **BRT**, que inicia su operación en diciembre del año **2000** bajo el nombre de Transmilenio.

2000-2010 La introducción del “tranvía moderno”, que tuvo en la ciudad de Nantes a uno de sus primeros exponentes a finales de los ochentas, impulsa la introducción de estos sistemas de transporte eléctrico masivo de superficie, dotado tanto con las opciones de ruedas metálicas o ruedas neumáticas. Simultáneamente, el uso de rieles enterrados proporciona mayor flexibilidad al uso de las vías de los tranvías, permitiendo su polifuncionalidad [24].

2010-2017 En Bogotá, la integración de cinco tipos de servicio de transporte público masivo bajo el nombre de Sistema Integrado de Transporte Público (**SITP**), inicia su operación formal en el año **2012**. Los servicios integrados se denominan: Troncal, Alimentador, Urbano, Complementario y Especial. Cada uno de ellos cuenta con función, recorrido y tipología de buses específicos.

Varias iniciativas privadas, se unen a la exploración e implementación de vehículos eléctricos para el transporte de carga dentro de la ciudad de Bogotá, por ejemplo, el Grupo Nutresa, Coca Cola y Ramo. Por su parte, el transporte público masivo tuvo en octubre de **2015** las primeras pruebas de buses eléctricos dentro del SITP. Estos buses, importados por la empresa BYD marcaron el derrotero de pruebas que más tarde, en marzo de 2016, tuvo un hito con la prueba del Ebus Andino 18, 100 % eléctrico que recorrió 410 kilómetros sin recarga, entre Bogotá y Medellín, con un tiempo de viaje de 13 horas autónomas.

A finales de **2015** se matriculan en el SITP los primeros 4 buses padrón a gas.

En febrero de 2016, la empresa operadora del SITP, Este Es Mi Bus SAS, se une al reemplazo de los buses padrones de tecnología Euro IV por buses padrones híbridos marca Volvo de referencia B215RH 4X2, cama baja, equipados con carrocería Busscar, poseen rampas para el acceso de personas con movilidad reducida. Se espera que aporten un ahorro de combustible del 35 % y una disminución considerable del ruido en arranques y frenadas. El 3 de marzo de 2016 iniciaron operación 44 buses híbridos

como alimentadores del Portal 80. En el transcurso de dicho mes se sumarían otros 6 buses híbridos en este servicio para un total de 50. Según reportes de Transmilenio en 2016, [17] los nuevos buses padrón HEVs empleados para el reemplazo de los tradicionales buses padrón ICVs de su flota tienen las siguientes características:

- Buses padrones duales para 80 pasajeros, híbridos diésel – eléctrico Euro V.
- Eficiencia energética promedio esperada (flota operativa): 11,5 km/gal – 13,05 km/gal.
- Ahorros en consumo de combustible esperado: entre 29 % y 32 %.
- Reducción emisiones CO₂ estimadas para 40 buses: 2033 – 2683 ton CO₂ eq/año.

Algunas características de los vehículos eléctricos utilizados en Transmilenio son:

- Buses de 18 metros de largo con capacidad de 160 pasajeros.
- Baterías de hierro y fosfato de 330Kw, tiempo de carga de 150 minutos, vida útil de 12 a 15 años, 6.000 ciclos de carga.
- Puntos de carga en los patios del SITP (dimensiones 60 cm x 40 cm x 170 cm).
- Autonomía: 380 km.

En enero de **2017** se terminan con resultados positivos las pruebas del primer biarticulado a gas Euro VI, de la empresa Scania con el auspicio de Gas Natural Fenosa y Transmilenio, evaluado por la Universidad Nacional de Colombia.

Para mediados de **2017** se pone en prueba en operación el primer articulado totalmente eléctrico.

En el año **2019** la renovación de flota que acoge los lineamientos gubernamentales respecto al uso de “tecnologías limpias” y aumenta la proporción de buses biarticulados cuya capacidad de 250 pasajeros es mayor que los “articulados” de 160 pasajeros. Con esto ese año se marca una mejora en los indicadores generales del sistema.

Según informe público de Transmilenio [18], y en atención al PAT se adelantaron pruebas de los siguientes buses para el BRT:

- Articulado eléctrico a batería de BYD.
- Articulado o biarticulado híbrido con carga por oportunidad de Volvo.
- Articulado o biarticulado híbrido de Higer-Siemens.

2015-2023 Varias ciudades de Colombia han implementan paulatinamente sistemas de transporte masivo integrado, inspiradas por los resultados en Bogotá. Ellas son: Cali, Medellín, Bucaramanga, Cartagena y Barranquilla. Así mismo se crea un programa

nacional para implementar Sistemas Estratégicos de Transporte Público (SETP) en ciudades de 250.000 a 600.000 habitantes, por ejemplo: Montería, Sincelejo, Popayán y Pasto.

En 2018 entra en operación en Bogotá la primera línea de cable en San Cristóbal, integrada al BRT.

En el año **2023** se encuentra en construcción una segunda línea de cable para la localidad de San Cristóbal. Además, está en fase licitatoria una tercera línea de cable para conectar el BRT con Ciudad Bolívar en **2027** y en fase de construcción la primera línea del metro que deberán iniciar operación en **2030**.

C. Anexo: Estimación de población para Bogotá

Año	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Población estimada DANE	4.225.649	4.360.948	4.502.390	4.648.463	4.797.534	4.947.890	5.105.935	5.261.692	5.413.484	5.559.851	5.699.655	5.828.528	5.952.563	6.072.489	6.189.030	6.302.881	6.412.400	6.520.473
Modelo poblacional calculado	4.223.501	4.373.040	4.520.654	4.666.343	4.810.106	4.951.944	5.091.858	5.229.846	5.365.909	5.500.047	5.632.259	5.762.547	5.890.909	6.017.346	6.141.859	6.264.445	6.385.107	6.503.844
Diferencia (%)	-0,1%	0,3%	0,4%	0,4%	0,3%	0,1%	-0,3%	-0,6%	-0,9%	-1,1%	-1,2%	-1,1%	-1,0%	-0,9%	-0,8%	-0,6%	-0,4%	-0,3%
Población estimada DANE	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Modelo poblacional calculado	6.627.568	6.734.041	6.840.116	6.945.216	7.050.228	7.155.052	7.259.597	7.363.782	7.467.804	7.571.345	7.674.366	7.776.845	7.878.783	7.980.001	8.080.734	8.181.047	8.281.030	8.380.801
Diferencia (%)	6.620.656	6.735.542	6.848.503	6.959.539	7.068.650	7.175.836	7.281.097	7.384.432	7.485.843	7.585.328	7.682.888	7.778.523	7.872.233	7.964.018	8.053.878	8.141.812	8.227.821	8.311.905
Diferencia (%)	-0,1%	0,0%	0,1%	0,2%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,2%	0,2%	0,1%	0,0%	-0,1%	-0,2%	-0,3%	-0,5%	-0,6%	-0,8%

Los datos de “Población estimada DANE”, están calibrados con los censos de 1993 y 2005, y se encuentran disponibles públicamente en la página del DANE [26].

Los datos de “Modelo poblacional calculado”, corresponden al modelo desarrollado cuya ecuación es un polinomio de segundo grado:

$$y = -962,57x^2 + 3.971.904,40x - 4.087.264.354,51$$

$$R^2 = 1,00$$

Donde

X: corresponde al año

Y: corresponde a la población total de Bogotá en número de habitantes

D. Anexo: Cronología legislación relacionada con el BRT de Bogotá

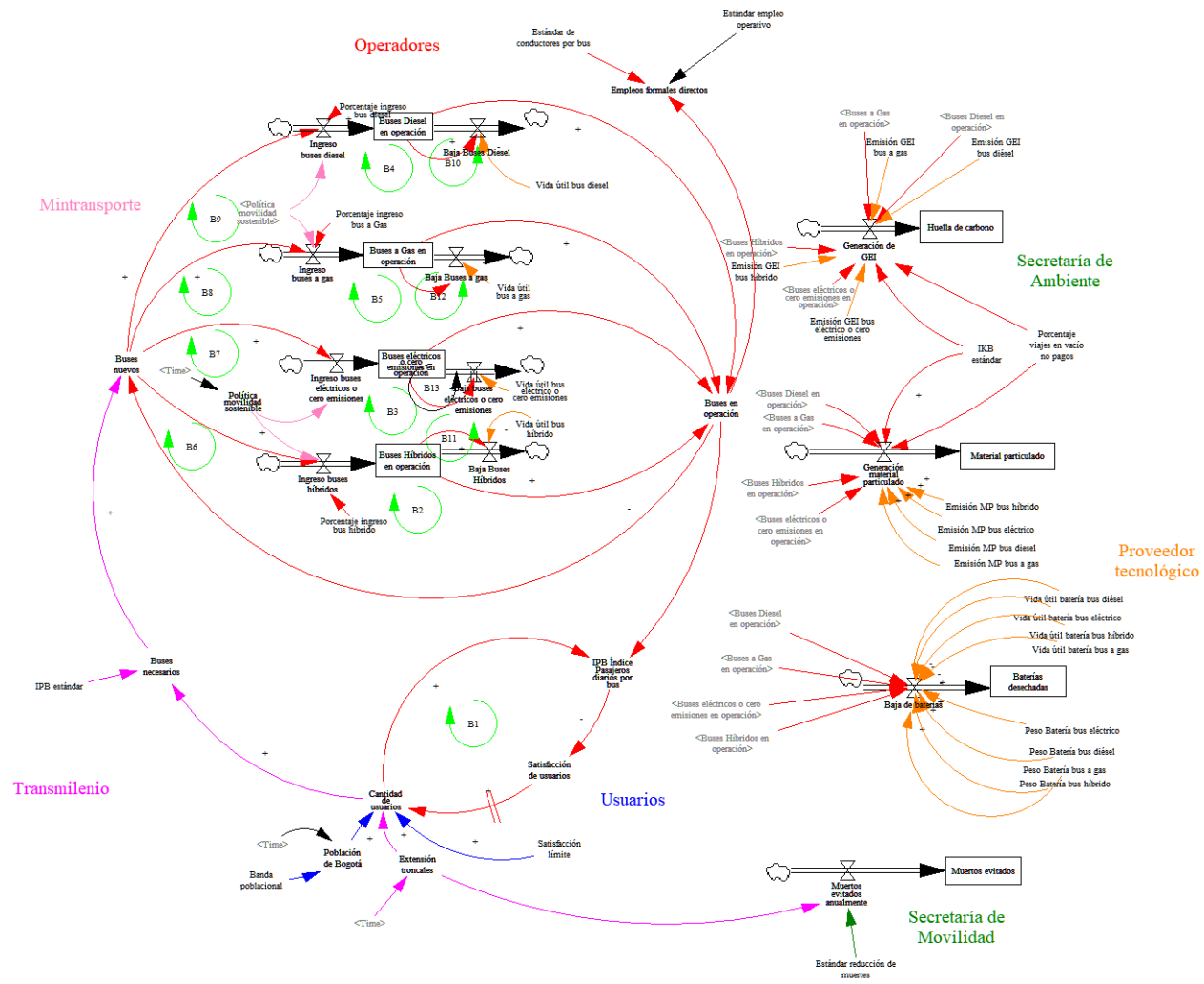
Normatividad de nivel nacional

Entidad	Tipo	Década				
		1980 -1989	1990 - 1999	2000 - 2009	2010 -2019	2020-->
Congreso de la República	Leyes	86 de 1989 reglamenta servicio	105 de 1993 competencias y subsidios 310 de 1996 Reglamenta Tte. Masivo y primera línea de Transmilenio 336 de 1996 Estatuto Nal. de Transporte 388 de 1997 Plan de Ordenamiento Territorial	769 de 2002 Código de Tránsito 1083 de 2006 movilidad sostenible	1383 de 2010 Código de Tránsito 1503 de 2011 PESV Plan Estratégico de Seguridad Vial 1618 de 2013 Inclusión discapacitados 1682 de 2013 creación comisión de regulación de infraestructura de Transporte CRIT. Calidad del servicio 1702 de 2013 ANSV Agencia Nacional de Seguridad Vial - Observatorio Nacional de Seguridad Vial 1753 de 2015 SITR 1811 de 2016 Uso bicicleta 1844 de 2017 Adopción acuerdo de París 1955 de 2019 inversión en movilidad sostenible 1964 de 2019 Promoción de vehículos eléctricos 1972 de 2019 Fechas Euro VI y cero emisiones	
Ministerios y Presidencia	Estrategias y Políticas				PPCCA de 2010 Política de Prevención y control de la contaminación del aire ECDBCv de 2012 Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono PNCC de 2017 Política Nacional de Cambio Climático ENME de 2019 Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica	
	Decretos		2263 de 1995 Tarifas 3109 de 1997 reglamenta Tte. masivo	170 de 2001 Reglamenta Tte. pasajeros 1660 de 2003 Accesabilidad a Tte. masivo 3422 de 2009 SETP Sistemas Estratégicos de Transporte Públicos 4741 de 2005 prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos	1008 de 2015 Servicio de Transporte Público Masivo de Pasajeros por metro ligero, tren ligero, tranvía y tren-tram 1076 de 2015 Compilación ambiental 1079 de 2015 SETP Reglamentario sector transporte res 1297 de 2010 Sistemas de recolección de baterías 2851 de 2013 reglamenta el PESV	
CONPES	Documentos CONPES de Política Pública			3093 de 2000 Sist. Serv. Púb. Urb. Tte. Masivo Bogotá 3167 de 2002 Mejoramiento Transporte Público Urbano de pasajeros 3260 de 2003 PNTU Transporte Urbano y Masivo 3344 de 2005 Prevención y control de contaminación del aire 3368 de 2005 Transporte Urbano Masivo - seguimiento 3547 de 2008 Política Nacional de Logística 3550 de 2008 lineamientos salud ambiental	3677 de 2010 Movilidad integral Bogotá 3681 de 2010 Extensión BRT Soacha 3819 de 2014 SITR y Sistema de ciudades 3882 de 2017 extensión de TransMilenio hacia Soacha, fases II y III. 3896 de 2017 Seguimiento de la Política Nacional de Transporte Urbano y Masivo 3899 de 2017 actualización CONPES 2882 3900 de 2017 Apoyo del Gobierno nacional al sistema de transporte público de Bogotá y declaratoria de importancia estratégica del proyecto Primera Línea de Metro - Tramo 1 3902 de 2017 Regiotram de occidente 3934 de 2018 Crecimiento verde 3943 de 2018 Mejoramiento calidad del aire 3945 de 2018 Troncales av. 68 y Ciudad de Cali 3963 de 2019 Modernización Tte. de carga	3982 de 2020 Política Nacional de Logística 3991 de 2020 Política nacional de movilidad urbana y regional 4034 de 2021 Movilidad región Bogotá- Cundinamarca 2027-2035 4104 de 2022 Extensión troncal CI 13

Normatividad de nivel Distrital

Entidad	Tipo	Década				
		1980 -1989	1990 - 1999	2000 - 2009	2010 -2019	2020-->
Consejo de Bogotá	Acuerdos		4 de 1999 Constitución Transmilenio	239 de 2006 Control social 288 de 2007 Participación accionaria en Transmilenio 334 de 2008 equipos primeros auxilios	444 de 2010 control ciudadano 484 de 2011 subsidio discapacitados 489 de 2012 movilidad humana, integración y energía eléctrica 732 de 2018 A partir del 2025 todos los vehículos nuevos del BRT tiene qe ser de cero emisiones directas	
Alcaldía Mayor de Bogotá	Decretos		542 de 1999 Fondo Cuenta 831 de 1999 condiciones técnicas, operativas, tarifarias y de control 836 de 1999 habilita operadores	252 de 2000 infraestructura 113 de 2003 tarjeta electrónica 115 de 2003 reorganización Tte. público 116 de 2003 control reposición 424 de 2005 Fase III Transmilenio 319 de 2006 Plan Maestro de Movilidad 486 de 2006 Funciones Transmilenio 505 de 2007 Comité Sectorial de Desarrollo Administrativo de Movilidad	309 de 2009 SITP 397 de 2010 Seguridad vial 98 de 2011 Plan Decenal de descontaminación del aire 156 de 2011 implementación SITP 294 de 2011 patios SITP 547 de 2011 Migración a Tte. masivo 86 de 2012 control social 185 de 2012 Seguridad vial 356 de 2012 Tarifa Transmilenio 429 de 2012 Subsidio discapacitados 477 de 2013 Plan de Ascenso Tecnológico 442 de 2014 Tarifa Transmilenio 046 de 2016 Tarifa Transmilenio 130 de 2017 Tarifa Transmilenio 056 de 2018 Tarifa Transmilenio	073 de 2020 Tarifas SITP 005 de 2022 Actualiz. Tarifas SITP

E. Anexo: Diagrama de flujo completo (Aumentar al 200%)

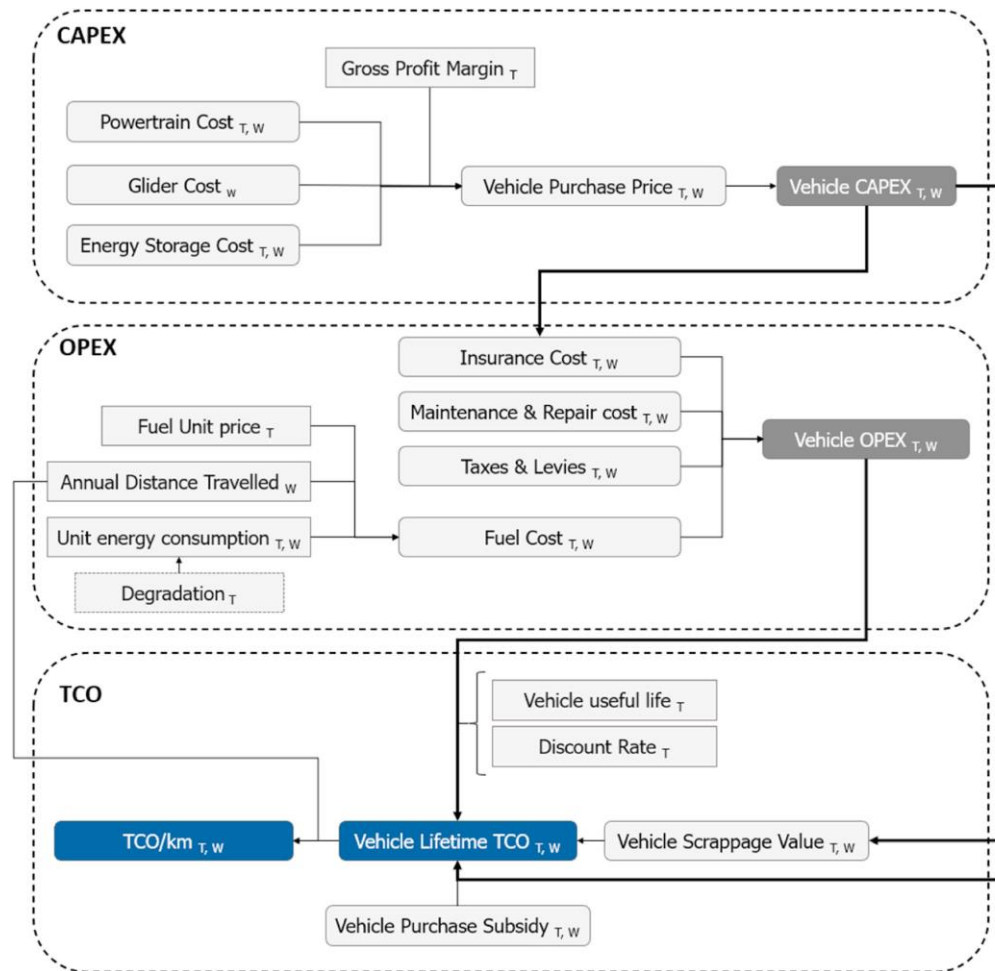


F. Anexo: Listado variables por stakeholder (Document all)

Stakeholder	Nombre variable	Unidad	Ecuación	Mínimo	Máximo	Incremento	
Minitransporte	IKB estándar	km/Bus tipo/día	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Buses nuevos} \leq 0, 0, (\text{Buses nuevos} * (1 - \text{Política movilidad sostenible} / 100) * \text{Porcentaje ingreso bus a Gas} / 100))$	NA	NA	NA	
	Ingreso buses a gas	Bus tipo/Year	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Buses nuevos} \leq 0, 0, (\text{Buses nuevos} * (1 - \text{Política movilidad sostenible} / 100) * \text{Porcentaje ingreso bus diesel} / 100))$	NA	NA	NA	
	Ingreso buses diesel	Bus tipo/Year	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Buses nuevos} \leq 0, 0, (\text{Buses nuevos} * \text{Política movilidad sostenible} / 100))$	NA	NA	NA	
	Ingreso buses eléctricos o cero emisiones	Bus tipo/Year	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Buses nuevos} \leq 0, 0, (\text{Buses nuevos} * (1 - \text{Política movilidad sostenible} / 100) * \text{Porcentaje ingreso bus híbrido} / 100))$	NA	NA	NA	
Operador	Población de Bogotá	personas	$\text{WITH LOOKUP}(\text{Time}, ((2000,0)-(2050,100)),(2000,0),(2024,0),(2025,10),(2026,10),(2027,20),(2028,20),(2029,40),(2031,60),(2032,60),(2033,80),(2034,80),(2035,100),(2050,100))$	0	100	NA	
	Baja Buses a gas	Bus tipo/Year	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Buses a Gas en operación} \leq 0, 0, \text{Buses a Gas en operación} / \text{Vida útil bus a gas})$	NA	NA	NA	
	Baja Buses Diesel	Bus tipo/Year	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Buses Diesel en operación} \leq 0, 0, \text{Buses Diesel en operación} / \text{Vida útil bus diesel})$	NA	NA	NA	
	Baja buses eléctricos o cero emisiones	Bus tipo/Year	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Buses eléctricos o cero emisiones en operación} \leq 0, 0, \text{Buses eléctricos o cero emisiones en operación} / \text{Vida útil bus eléctrico o cero emisiones})$	NA	NA	NA	
	Baja Buses Híbridos	Bus tipo/Year	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Buses Híbridos en operación} \leq 0, 0, \text{Buses Híbridos en operación} / \text{Vida útil bus híbrido})$	NA	NA	NA	
	Baja de baterías	Ton/Year	$(\text{Buses Diesel en operación} / \text{Vida útil batería bus diésel} * \text{Peso Batería bus diésel} + \text{Buses a Gas en operación} / \text{Vida útil batería bus a gas} * \text{Peso Batería bus a gas} + \text{Buses eléctricos o cero emisiones en operación} / \text{Vida útil batería bus eléctrico} * \text{Peso Batería bus eléctrico} + \text{Buses Híbridos en operación} / \text{Vida útil batería bus híbrido} * \text{Peso Batería bus híbrido}) / 1000$	NA	NA	NA	
	Buses a Gas en operación	Bus tipo	$\text{INTEG}(\text{Ingreso buses a gas} - \text{Baja Buses a gas}, 0)$	0	NA	NA	
	Buses Diesel en operación	Bus tipo	$\text{INTEG}(\text{Ingreso buses diesel} - \text{Baja Buses Diesel}, 2324)$	2324	NA	NA	
	Buses eléctricos o cero emisiones en operación	Bus tipo	$\text{INTEG}(\text{Ingreso buses eléctricos o cero emisiones} - \text{Baja buses eléctricos o cero emisiones}, 1)$	1	NA	NA	
	Buses en operación	Bus tipo	$\text{Buses a Gas en operación} + \text{Buses Diesel en operación} + \text{Buses eléctricos o cero emisiones en operación} + \text{Buses Híbridos en operación}$	NA	NA	NA	
	Buses Híbridos en operación	Bus tipo	$\text{INTEG}(\text{Ingreso buses híbridos} - \text{Baja Buses Híbridos}, 258)$	258	NA	NA	
	Empleos formales directos	personas	$\text{ACTIVE INITIAL}(\text{Buses en operación} * \text{Estándar de conductores por bus} * 100 / \text{Estándar empleo operativo}, 5000)$	NA	NA	NA	
	Estándar empleo operativo	porcentaje	70	65	75	1	
	Política movilidad sostenible	porcentaje	30	0	100	5	
	Porcentaje ingreso bus a Gas	porcentaje	60	50	70	5	
	Porcentaje ingreso bus diesel	porcentaje	10	8	12	1	
	Porcentaje ingreso bus híbrido	porcentaje	5	0	10	1	
	Proveedor tecnológico	Muertos evitados anualmente	muertos/año	60	50	100	5
		Peso Batería bus a gas	kg/un	60	50	100	5
		Peso Batería bus diésel	kg/un	4000	3000	6000	100
Peso Batería bus eléctrico		kg/un	200	150	220	5	
Vida útil batería bus a gas		Year	2	2	3	1	
Vida útil batería bus diésel		Year	2	2	3	1	
Vida útil batería bus eléctrico		Year	12	10	20	1	
Vida útil batería bus híbrido		Year	12	10	20	1	
Vida útil bus a gas		Year	15	15	20	1	
Vida útil bus diesel		Year	15	15	20	1	
Vida útil bus eléctrico o cero emisiones		Year	15	15	20	1	
Vida útil bus híbrido		Year	15	15	20	1	
Secretaría de Ambiente		Baterías desechadas	Ton	$\text{ACTIVE INITIAL}(\text{Baja de baterías}, 0)$	0	NA	NA
		Emisión GEI bus a gas	kg CO2 eq / km	2,2	2	2,4	0,1
	Emisión GEI bus diésel	kg CO2 eq / km	4	3,8	4,2	0,1	
	Emisión GEI bus eléctrico o cero emisiones	kg CO2 eq / km	0,59	0,55	0,63	0,1	
	Emisión GEI bus híbrido	kg CO2 eq / km	1,5	1,2	1,8	0,1	
	Emisión MP bus a gas	mg/km	15	10	20	1	
	Emisión MP bus diesel	mg/km	550	500	600	1	
	Emisión MP bus eléctrico	mg/km	50	45	55	1	
	Emisión MP bus híbrido	mg/km	250	200	300	1	
	Generación material particulado	Ton/Year	$\text{INTEG}(\text{Generación de GEI}, 0)$	0	NA	NA	
	Índice Pasajeros diarios por bus	personas/Bus tipo/día	$\text{INTEG}(\text{"Generación PM2.5"}, 0)$	0	NA	NA	

Stakeholder	Nombre variable	Unidad	Ecuación	Mínimo	Máximo	Incremento
Secretaría de movilidad	Estándar reducción de muertes	muertos/km/año	0,11	0	0,2	0,01
	Material particulado	Ton	INTEG (Muertos evitados anualmente, 0)	0	NA	NA
Transmilenio	Muertos evitados	muertos	Extensión troncales*Estándar reducción de muertes	NA	NA	NA
	Buses necesarios	Bus tipo	SIMULTANEOUS[Cantidad de usuarios/IPB estándar*1e+06/365.25,2000]	NA	NA	NA
	Buses nuevos	Bus tipo	IF THEN ELSE((Buses necesarios-Buses en operación)<=0, 0 ,(Buses necesarios -Buses en operación))	NA	NA	NA
	Estándar de conductores por bus	personas/Bus tipo	2,1	1,7	2,5	0,1
	Extensión troncales	km	WITH LOOKUP (Time, (((2000,0)-(2050,210),(2000,28.4),(2001,38.7),(2002,42.3),(2003,55.3),(2004,55.3),(2005,74.6),(2006,87.6),(2007,87.6),(2008,87.6),(2009,87.6),(2010,87.6),(2011,87.6),(2012,99.8),(2013,112.9),(2014,114.9),(2015,114.9),(2016,114.9),(2017,114.9),(2018,26,114.9),(2019,114.9),(2020,114.9),(2021,114.9),(2022,114.9),(2023,114.9),(2024,114.9),(2025,114.9),(2026,139.2),(2027,139.2),(2028,151.2),(2029,151.2),(2030,151.2),(2031,151.2),(2032,151.2),(2033,151.2),(2034,151.2),(2035,185.6),(2036,185.6),(2037,185.6),(2038,185.6),(2039,185.6),(2040,185.6),(2041,185.6),(2042,185.6),(2043,185.6),(2044,185.6),(2045,185.6))((2000,28.4),(2001,38.7),(2002,42.3),(2003,55.3),(2004,55.3),(2005,74.6),(2006,87.6),(2007,87.6),(2008,87.6),(2009,87.6),(2010,87.6),(2011,87.6),(2012,99.8),(2013,110.7),(2014,114.9),(2015,114.9),(2016,114.9),(2017,114.9),(2018,26,114.9),(2019,114.9),(2020,114.9),(2021,114.9),(2022,114.9),(2023,114.9),(2024,114.9),(2025,114.9),(2026,139.2),(2027,150.6),(2028,150.6),(2029,150.6),(2030,162.6),(2031,162.6),(2032,162.6),(2033,162.6),(2034,169),(2035,169),(2036,169),(2037,169),(2038,169),(2039,169),(2040,169),(2041,169),(2042,169),(2043,169),(2044,169),(2045,169),(2045,87,169),(2047,09,169),(2047,55,169),(2048,78,169),(2049,54,169)))	0	197	NA
Huella de carbono	Ton	259	250	300	1	
INITIAL TIME	Year	916	900	1000	50	
IPB estándar	personas/Bus tipo/día	ACTIVE INITIAL (Cantidad de usuarios*1e+06/12/30.4/Buses en operación, 916)	900	1100	NA	
Usuarios	Banda poblacional	porcentaje	50	0	100	10
	Cantidad de usuarios	Mega usuario/año	SIMULTANEOUS((1-RAMP(0.03, 2030, 2035))*DELAY((-368.2+2.01e-18*Población de Bogotá^3+0.000161*Extensión troncales^3) , 2)*(1+DELAY1((Satisfacción de usuarios-Satisfacción límite)/(Satisfacción de usuarios+Satisfacción límite) , 2))),1000)	NA	NA	NA
	Peso Batería bus híbrido	kg/un	ACTIVE INITIAL (IF THEN ELSE(Time<2020, 6.11901e+06+163212*(Time-2000)^1-9118.01*(Time-2000)^2+230.94*(Time-2000) ^3, Banda poblacional/100*(640813000000 +56548.1*(Time-2000)^1 +881.14*(Time-2000)^2 -17.19*(Time-2000)^3) + (1-Banda poblacional/100)*(5552000000 +204500*(Time-2000)^1 -5455*(Time-2000)^2 +41.69*(Time-2000)^3)) , 7.96571e+06)	NA	NA	NA
Porcentaje viajes en vacío no pagos	porcentaje	WITH LOOKUP (IPB Índice Pasajeros diarios por bus, (((0,0),(1889,100)),(0,100),(291.132,97.3684),(464.832,96.9298),(633.333,96.0526),(755.352,94.7368),(871.56,89.9123),(970.336,80.7018),(1034.04,74.5614),(1172.68,72.3684),(1282.44,71.9298),(1357.54,71.9298),(1426.86,70.614),(1501.96,69.7368),(1574.62,69.7368),(1634.82,68.8596),(1715.7,67.9825),(1808.13 ,66.2281),(1848.56,65.7895),(1889,64.9123)))	NA	NA	NA	
Modelador	Satisfacción de usuarios	porcentaje	75	70	80	2
	Ingreso buses híbridos	Bus tipo/Year	2023	NA	NA	NA
	Satisfacción límite	porcentaje	TIME STEP	NA	NA	NA
Time	Year	1	NA	NA	NA	

G. Anexo: Estructura de costos propuesta por Wang en 2024 [13]



Fuente tomado de Wang et al 204 [13]

H. Anexo: Análisis estructural

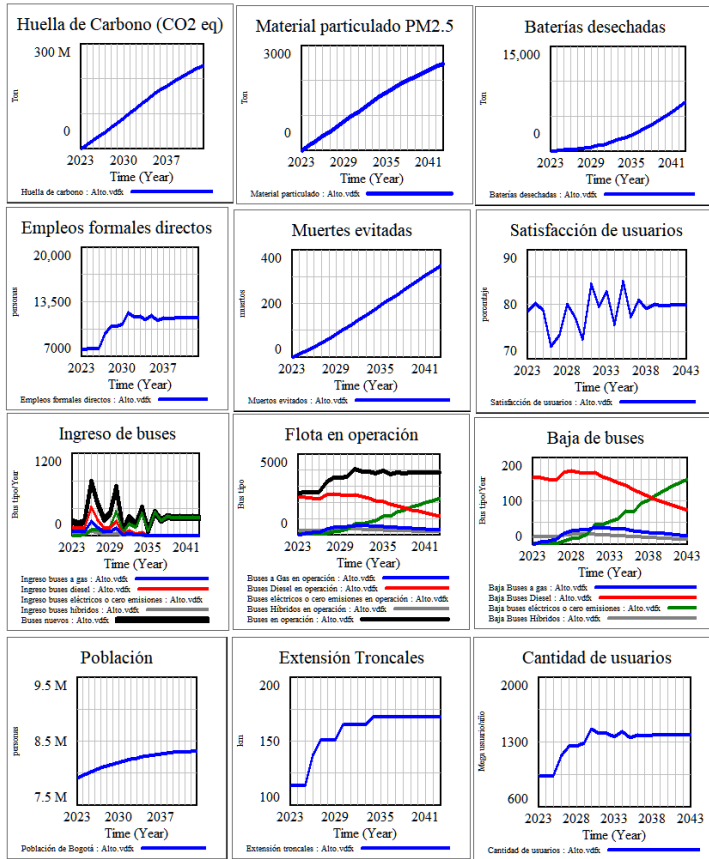
		Perspectiva del modelador		
		Desempeño	Conexión	Parametrización
Perspectiva externa	Impacto	Baterías desechadas Empleos formales directos Huella de carbono Material particulado Muertos evitados Satisfacción de usuarios	Muertos evitados anualmente Generación de GEI Generación material particulado	Emisión GEI bus a gas Emisión GEI bus diésel Emisión GEI bus eléctrico o cero emisiones Emisión GEI bus híbrido Emisión MP bus a gas Emisión MP bus diesel Emisión MP bus eléctrico Emisión MP bus híbrido Estándar empleo operativo Estándar reducción de muertes Peso Batería bus a gas Peso Batería bus diésel Peso Batería bus eléctrico Peso Batería bus híbrido Vida útil batería bus a gas Vida útil batería bus diésel Vida útil batería bus eléctrico Vida útil batería bus híbrido
	Oferta	Buses a Gas en operación Buses Diesel en operación Buses eléctricos o cero emisiones en operación Buses Híbridos en operación IPB Índice Pasajeros diarios por bus Política movilidad sostenible	Baja Buses a gas Baja Buses Diesel Baja buses eléctricos o cero emisiones Baja Buses Híbridos Baja de baterías Buses en operación Buses necesarios Buses nuevos Ingreso buses a gas Ingreso buses diesel Ingreso buses eléctricos o cero emisiones Ingreso buses híbridos	Estándar de conductores por bus IKB estándar IPB estándar Porcentaje ingreso bus a Gas Porcentaje ingreso bus diesel Porcentaje ingreso bus híbrido Porcentaje viajes en vacío no pagos Vida útil bus a gas Vida útil bus diesel Vida útil bus eléctrico o cero emisiones Vida útil bus híbrido
	Demanda	Extensión troncales Población de Bogotá	Cantidad de usuarios	Banda poblacional Satisfacción límite

Impacto

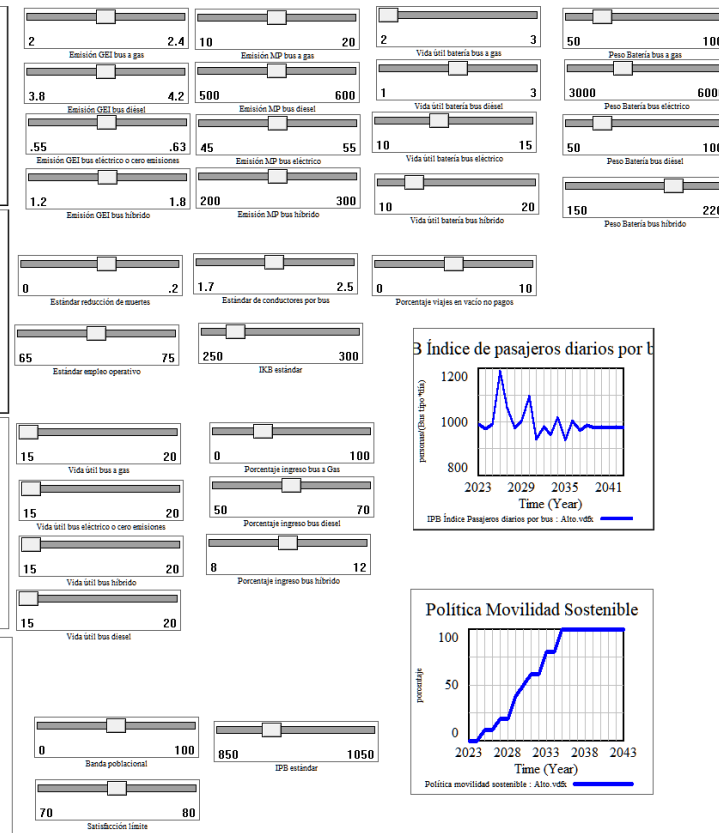
Oferta

Demanda

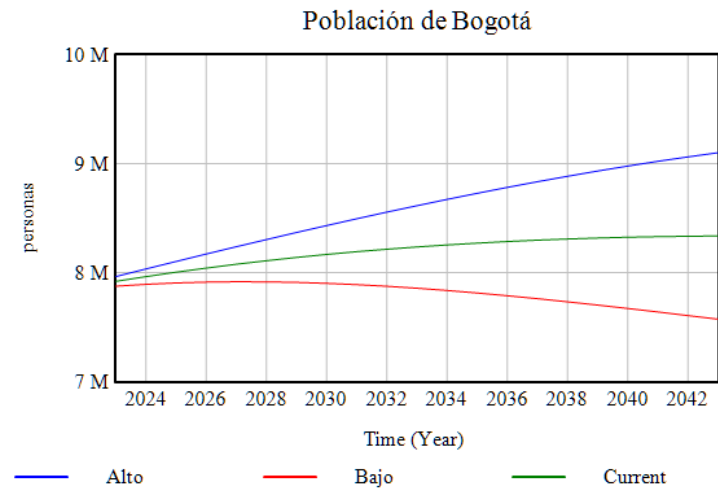
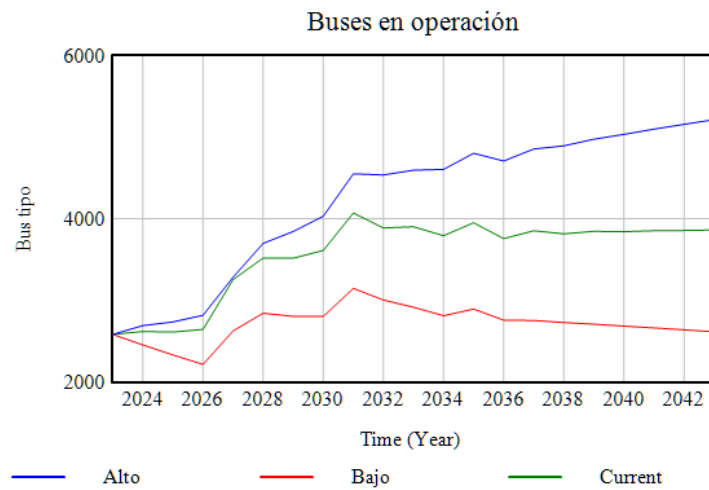
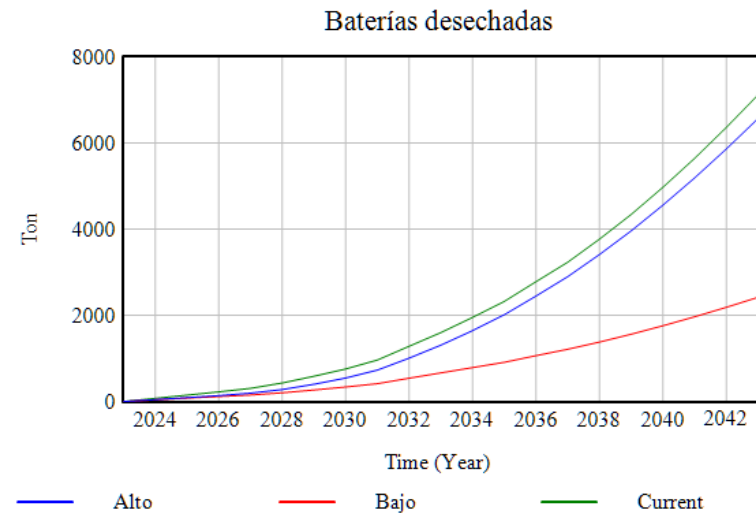
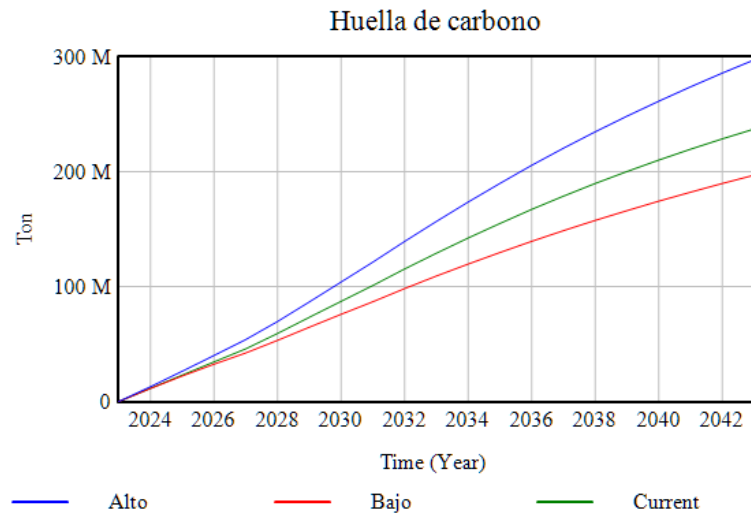
Desempeño



Parametrización



I. Anexo: Análisis de robustez



Variables de Parametrización	Valores extremos			Variación		
	Bajo	Current	Alto	Bajo	Current	Alto
Banda poblacional	0	50	100	-100%	0%	100%
Emisión GEI bus a gas	2	2	2	-9%	0%	9%
Emisión GEI bus diésel	4	4	4	-5%	0%	5%
Emisión GEI bus eléctrico o cero emisiones	1	1	1	-7%	0%	7%
Emisión GEI bus híbrido	1	2	2	-20%	0%	20%
Emisión MP bus a gas	10	15	20	-33%	0%	33%
Emisión MP bus diesel	500	550	600	-9%	0%	9%
Emisión MP bus eléctrico	45	50	55	-10%	0%	10%
Emisión MP bus híbrido	200	250	300	-20%	0%	20%
Estándar de conductores por bus	2	2	3	-19%	0%	19%
Estándar empleo operativo	75	70	65	7%	0%	-7%
Estándar reducción de muertes	0	0	0	-100%	0%	82%
IKB estándar	250	259	300	-3%	0%	16%
INITIAL TIME	2.023	2.023	2.023	0%	0%	0%
IPB estándar	1.050	916	850	15%	0%	-7%
Peso Batería bus a gas	50	60	100	-17%	0%	67%
Peso Batería bus diésel	50	60	100	-17%	0%	67%
Peso Batería bus eléctrico	3.000	4.000	6.000	-25%	0%	50%
Peso Batería bus híbrido	150	200	220	-25%	0%	10%
Política movilidad sostenible	63	63	63	0%	0%	0%
Porcentaje ingreso bus a Gas	100	30	0	233%	0%	-100%
Porcentaje ingreso bus diesel	50	60	70	-17%	0%	17%
Porcentaje ingreso bus híbrido	8	10	12	-20%	0%	20%
Porcentaje viajes en vacío no pagos	0	5	10	-100%	0%	100%
Satisfacción de usuarios	74	79	84	-6%	0%	7%
Satisfacción límite	80	75	70	7%	0%	-7%
Vida útil batería bus a gas	3	2	2	50%	0%	0%
Vida útil batería bus diésel	3	2	1	50%	0%	-50%
Vida útil batería bus eléctrico	15	12	10	25%	0%	-17%
Vida útil batería bus híbrido	20	12	10	67%	0%	-17%
Vida útil bus a gas	15	15	20	0%	0%	33%
Vida útil bus diesel	15	15	20	0%	0%	33%
Vida útil bus eléctrico o cero emisiones	15	15	20	0%	0%	33%
Vida útil bus híbrido	15	15	20	0%	0%	33%

Variables de desempeño	Valores extremos			Variación		
	Bajo	Current	Alto	Bajo	Current	Alto
Baterías desechadas	841	2.330	6.821	-64%	0%	193%
Buses a Gas en operación	519	372	0	39%	0%	-100%
Buses Diesel en operación	1.530	2.015	2.892	-24%	0%	44%
Buses eléctricos o cero emisiones en operación	470	903	1.241	-48%	0%	37%
Buses Híbridos en operación	183	265	408	-31%	0%	54%
Empleos formales directos	6.123	10.666	17.465	-43%	0%	64%
Extensión troncales	156	156	156	0%	0%	0%
Generación de GEI	8.029.983	11.692.075	19.760.690	-31%	0%	69%
Generación material particulado	76	122	232	-38%	0%	91%
Huella de carbono	88.876.005	124.336.705	198.714.452	-29%	0%	60%
IPB Índice Pasajeros diarios por bus	1.103	998	935	11%	0%	-6%
Material particulado	875	1.328	2.361	-34%	0%	78%
Muertos evitados	0	161	293	-100%	0%	82%
Población de Bogotá	7.809.536	8.197.734	8.585.932	-5%	0%	5%

Variables de conexión	Valores extremos			Variación		
	Bajo	Current	Alto	Bajo	Current	Alto
Baja Buses a gas	35	25	0	39%	0%	-100%
Baja Buses Diesel	102	134	145	-24%	0%	8%
Baja buses eléctricos o cero emisiones	31	60	62	-48%	0%	3%
Baja Buses Híbridos	12	18	20	-31%	0%	15%
Baja de baterías	129	377	1.043	-66%	0%	177%
Buses en operación	2.701	3.555	4.541	-24%	0%	28%
Buses necesarios	2.827	3.853	4.943	-27%	0%	28%
Buses nuevos	147	298	402	-51%	0%	35%
Cantidad de usuarios	1.084	1.289	1.535	-16%	0%	19%
Ingreso buses a gas	54	38	0	42%	0%	-100%
Ingreso buses diesel	27	76	128	-64%	0%	70%
Ingreso buses eléctricos o cero emisiones	93	172	219	-46%	0%	27%
Ingreso buses híbridos	4	13	22	-66%	0%	75%
Muertos evitados anualmente	0	17	31	-100%	0%	82%

J. Anexo: Análisis de sensibilidad

Efecto de variación en la proyección poblacional

