

El Transporte Público Colectivo en Bogotá, D.C.: Una Mirada desde la Dinámica de Sistemas

A System Dynamics Model of Public Transportation in Bogota, D.C.

Edgar Leonardo

Duarte Forero

Ingeniero Industrial.
Estudiante Maestría
en Ingeniería Industrial,
Universidad Distrital.
edgarduarte77@yahoo.es

Resumen

El artículo presenta la construcción, prueba y proyección de un modelo basado en dinámica de sistemas para el sistema de transporte público colectivo de Bogotá. Se tienen en cuenta tres ejes principales en el modelo: flujo de recursos financieros, flujo de usuarios y flujo de la flota vehicular.

A partir de este ejercicio se logran simular tres escenarios en los que se evalúan la incidencia de tres políticas públicas en materia de tarifas, parque automotor e incremento de la malla vial. Los resultados permiten concluir que algunos ciclos de causalidad tienen mayor impacto en el tamaño de la flota vehicular, identificándose específicamente los asociados a la edad máxima de los vehículos, tarifas del servicio y malla vial.

El estudio abre las puertas al modelado de otras modalidades de transporte y su posterior integración con el modelo construido.

Palabras clave: Dinámica de sistemas, modelos de transporte, simulación, transporte colectivo.

Abstract

This paper discusses the definition, testing and extrapolation of a model based on System Dynamics for the public collective system of transportation in Bogotá, D.C. Three main topics are studied: flow of financial resources; flow of users and flow of vehicle fleet.

Additionally three scenarios are simulated in order to evaluate the incidence of three public policies which are based on fares, number of vehicles and increase of the road network. The results suggest that some causality cycles have more impact in the size of the vehicle fleet, specifically those related with the life span of the vehicles, user fares and highway network.

This study is intended to serve as a guide for the modeling of some other types of transportation and their later integration with the proposed model.

Key words: System dynamics, transportation models, simulation, collective transportation.



1. Introducción

Bogotá, D.C., capital de Colombia, es una ciudad con más de ocho millones de habitantes, con un gran dinamismo económico y social que ha venido transformándose de manera acelerada desde inicios de este milenio. Durante este periodo la ciudad ha sido objeto de grandes cambios en materia política, económica y social y se ha convertido de lejos en la principal ciudad del país en relación al volumen de inversiones cuando se compara con otras ciudades principales de Colombia (Cali, Medellín y Barranquilla). Fenómenos como el desplazamiento forzado y las migraciones por otras causas fueron conformando una ciudadanía sumamente heterogénea en cuanto a sus factores culturales, económicos y sociales. Este conjunto de cambios también significó alteraciones en la calidad de vida de los habitantes de la ciudad entre las cuales sobresalen: el crecimiento de las diferencias económicas, el deterioro de las condiciones de seguridad y convivencia, cambios en las actividades económicas principales, y quizás el más palpable de todos, la crisis de la movilidad en la ciudad.

Abdulhai y Kattan definen el concepto de movilidad como el logro de realizar un rápido y seguro movimiento de bienes o personas de un lugar a otro [1]. En este sentido, la movilidad involucra la interacción de diversos actores que hacen parte de un sistema que busca el logro señalado: garantizar un transporte en el menor tiempo y con las mejores condiciones posibles de seguridad. Partiendo de lo anterior, conviene señalar que en Bogotá el concepto de movilidad está lejos de ser alcanzado, pues existe una gran cantidad de problemas presentes en el diario acontecer de sus sistemas de transporte que afectan constantemente los tiempos de desplazamiento y la integridad de bienes y personas que utilizan estos sistemas.

Para analizar el problema, resulta apropiado determinar cómo está compuesto el sistema de transporte existente en la ciudad. En síntesis, la ciudad cuenta con cuatro sistemas de transporte, concebidos a partir de sus modalidades: sistema de transporte público colectivo, representado por el transporte en buses, microbuses (llamados colectivos) y busetas; transporte público individual conformado principalmente por la flota de taxis; transporte público masivo, representado por el sistema Transmilenio; y el sistema de transporte particular de vehículos privados. De estos cuatro sistemas, aquel que tiene la mayor importancia para la ciudad, considerando su participación en el número de viajes diarios, es el de transporte público colectivo (STPC) el cual cubría el 42% de los viajes de la ciudad al año 2008 [2]. Reconociendo la importancia de este sistema, este artículo aborda entonces la problemática que se presenta a su interior y su relación con la calidad de vida de los habitantes de la ciudad.

El STPC soporta una serie de complejidades que vienen afectando severamente la calidad de vida de los habitantes de la ciudad. Diversos autores, reseñados a lo largo del artículo, las han abordado; entre ellas sobresalen: sobreoferta de vehículos que hacen parte de la flota, estructura organizacional interna, y el impacto de normas gubernamentales en la sostenibilidad del sistema.

En primera instancia, la problemática de la sobreoferta de vehículos consiste en que la flota vehicular disponible del STPC supera con creces los requerimientos de la demanda de usuarios. De acuerdo con lo mencionado por Ardila [3] en el año 2009 los requerimien-

tos de número de vehículos (buses, busetas y colectivos) para la ciudad era de 12.000 unidades y al mismo tiempo los registros de la Secretaría de Movilidad reportaban un acumulado de 15.655 vehículos en circulación [2]. A esta significativa diferencia se le debe agregar la existencia de unos 7.000 vehículos que según estimaciones, circulan de manera ilegal como prestadores del servicio de transporte colectivo. La sobreoferta trae consigo muchos problemas concernientes a la sobreutilización de la malla vial, congestión vehicular, aumento de niveles de contaminantes, prácticas inapropiadas por satisfacer la poca demanda disponible y en últimas la subutilización de la flota disponible en un 50% [3].

El segundo aspecto mencionado consiste en la estructura organizacional del STPC. Esta consiste en la adjudicación que realiza el gobierno de la ciudad a empresas privadas para el uso de rutas específicas de transporte colectivo de pasajeros. En teoría, estas rutas deberían responder a las necesidades de movilidad de la población. La práctica común de las empresas operadoras ha consistido en que alquilan el uso de las rutas adjudicadas a dueños de vehículos de transporte colectivo, quienes los ponen a funcionar de acuerdo con las directrices de las empresas operadoras y del gobierno distrital. En este sentido, las empresas operadoras, directas responsables del funcionamiento del STPC, bajo la lógica de la rentabilidad de su operación, tienen como principal interés la inclusión de más y más buses que transiten por sus rutas, dejando de lado criterios como la eficiencia del transporte, la seguridad, la frecuencia de servicios y la comodidad de sus usuarios. Esta estructura le ha brindado a las empresas operadoras y a los propietarios de vehículos de transporte colectivo un desmedido poder sobre el STPC, situación que debilita intereses públicos de la ciudadanía.

Este poder es contrarrestado por parte de la Alcaldía Distrital mediante la expedición de decretos y normas¹ que pretenden devolver al gobierno distrital la autoridad sobre la gestión y operación de buses. Las medidas adoptadas se han enfocado en aspectos como controles a la generación de gases en cada vehículo, reducción de la flota a través del modelo de “chatarización”, y con un mayor nivel de impacto el llamado “pico y placa”. Esta última medida fue implementada desde 2001, y consiste en la restricción de la circulación de vehículos durante horas o días de la semana, de acuerdo con el último dígito de su placa. La medida ha sido aplicada tanto a vehículos de transporte privado como público. Lastimosamente, los efectos de mediano y largo plazo de esta medida han fomentado que los ciudadanos compren vehículos adicionales para poder circular por la ciudad sin la restricción, en lugar de utilizar el transporte público [4].

La lógica del STPC conlleva a que sus propietarios busquen ingresar un mayor número de buses a expensas incluso de que la demanda de pasajeros no crezca de la misma manera. Surge entonces la duda acerca de cómo es posible que esta actividad económica resulte tan atractiva para sus propietarios, con los altos niveles de competencia que existe entre los distintos propietarios, las precarias condiciones en que se lleva a cabo la operación y el evidente desorden en que se presta el servicio. Al respecto, Ardila [3] explica que el factor que ha permitido la sostenibilidad económica del STPC consiste en los niveles tarifarios. Las tarifas cuyo crecimiento fue pronunciado hasta mediados de la década pasada, permitieron que el negocio del transporte público colectivo surtiera altas rentabilidades para propietarios y operadores de ruta, principalmente. En este sentido, a pesar de que se

¹ Por ejemplo, Decretos 112 a 116 de 2003.



incluyeran más vehículos al STPC, sus costos fijos y variables eran cubiertos fácilmente por los ingresos que detentaban los vehículos durante sus viajes diarios.

Como se ha descrito, en el funcionamiento del STPC confluyen diversos actores, cada uno con diversos intereses y comportamientos ligados a los mismos. La interacción de los actores del STPC ha hecho que se convierta en un sistema complejo y dinámico, cuyo comportamiento no obedece a variables independientes sino que es producto de estas mismas interacciones.

Para analizar este sistema complejo, el artículo propone el uso de la dinámica de sistemas como metodología de construcción de un modelo de simulación que permitiese estudiar su estructura y comportamiento en el tiempo, en distintos escenarios. La motivación de utilizar la dinámica de sistemas surge de considerar un conjunto de ventajas frente a otras técnicas que incluyen: facilidad de representación del sistema; posibilidad de incluir relaciones determinísticas o estocásticas, según se requiera; amplio marco temporal que se le puede dar a las simulaciones y visión holística que se debe obtener y se puede plasmar en el modelo desarrollado. Lo anterior conlleva a poder incluir variables económicas, sociales, culturales e incluso políticas en el análisis, logrando así una aproximación mucho más acertada y aplicable. Este argumento está basado en el estudio de Abbas acerca de las ventajas de la dinámica de sistemas para el estudio de sistemas de transporte y su impacto en sistemas económicos y sociales [5]. Otros aspectos que subrayan las ventajas de la dinámica de sistemas para el estudio del transporte, mencionados en el mismo estudio, son:

- En otras metodologías, el crecimiento poblacional se comporta de acuerdo a modelos econométricos independientemente de lo que está sucediendo en el sistema y no tienen sensibilidad frente al estado del mismo. En dinámica de sistemas se pueden representar los ciclos de causalidad que afectan al crecimiento poblacional en función del comportamiento del sistema.
- Con el uso de la dinámica de sistemas se ahorran esfuerzos en la obtención de grandes volúmenes de información irrelevante, pues la metodología define previamente qué tipo de datos se deben recolectar.
- La dinámica de sistemas ofrece grandes fortalezas para la difusión de sus resultados en equipos de trabajo especializados, así como en la comunidad en general usuaria de los sistemas de transporte.
- En comparación con las metodologías normalmente utilizadas, los bajos costos, el menor tiempo utilizado, los requerimientos computacionales, la transparencia, transferencia y facilidad de actualización, constituyen ventajas significativas por parte de los modelos desarrollados con dinámica de sistemas.

En atención a estos aspectos, el artículo presenta los resultados de la construcción de un modelo basado en dinámica de sistemas con el cual se puedan estudiar las relaciones sistémicas existentes entre los distintos actores del STPC, analizar las tendencias del comportamiento de las principales variables del sistema en el tiempo, y estudiar el impacto que tendría en el sistema la implementación de medidas alternativas referentes al esquema tarifario y de control del tamaño del parque automotor. El estudio no pretende buscar políticas que optimicen el funcionamiento del sistema ni abarcar un conjunto

mucho más complejo de actores partícipes de la movilidad en Bogotá. Por el contrario, se circunscribe a la representación del sistema, análisis de relaciones causales y estudio de tres escenarios y sus impactos en políticas de movilidad².

En la Sección 2, el artículo aborda el problema en referencia a los principales estudios realizados en materia de movilidad y transporte urbano desde la dinámica de sistemas. La Sección 3 presenta la metodología de dinámica de sistemas utilizada y su relación con las fases de la investigación. En la Sección 4 se presentan los diagramas causales y los diagramas de Forrester, como componentes fundamentales del modelo de dinámica de sistemas construido. Posteriormente, la Sección 5 presenta los escenarios simulados y los resultados de los mismos en las principales variables o niveles de servicio del modelo. Finalmente en la Sección 6 se exponen las principales conclusiones y recomendaciones producto de la investigación.

2. Estudios de transporte urbano basados en dinámica de sistemas

Desde hace más de 20 años, la dinámica de sistemas ha venido siendo utilizada para modelar el comportamiento de los sistemas de transporte en varias ciudades del mundo. Como se mencionó en la introducción, existen varias ventajas para su utilización en cuanto a eficiencia, enfoque holístico, tiempos y costos asociados [5].

Los modelos desarrollados han cubierto varias áreas y variables de estudio. Como referencia inicial se encuentran los modelos propuestos por Khanna [6], en donde se tuvo en cuenta el comportamiento socioeconómico de la población, el transporte de pasajeros y el impacto en el medio ambiente debido al consumo energético en la ciudad de Nueva Delhi. Posteriormente Abbas [5] planteó, desde la dinámica de sistemas, la importancia de los sistemas de transporte como motores generadores y modeladores del desarrollo de una región aplicándolo al caso particular de Egipto.

En Latinoamérica, sobresale el estudio de Membrillo y García [7] quienes en su momento diseñaron un modelo para el transporte en la ciudad de México que integró nuevos elementos como la planeación gubernamental, las técnicas de gestión de demanda del transporte y la capacidad del sistema físico instalado. Los resultados arrojaron que los principales temas para tener en cuenta en la formulación de políticas públicas para el transporte son [8]: actitudes de usuarios de vehículo privado (cultura ciudadana); planeación del gobierno; cultura de transportadores públicos; y factores externos.

Bachels, Peet y Newman [9] introducen nuevos elementos que contribuyen a identificar una nueva visión holística para el problema del transporte. Su investigación tuvo por objeto evaluar el uso de herramientas cualitativas (diagramas causales) para identificar lazos de retroalimentación causal en las políticas de planeación que inciden en los modos de transporte. En este trabajo ampliaron el espectro de variables hasta introducir el uso de la tierra, la infraestructura de vías y la operación y capacidad del sistema de transporte.

Uno de los más importantes modelos de transporte basados en dinámica de sistemas, y que marca una pauta en el alcance de estos modelos, es el de Raux [10]. En su estudio,

² Esta investigación presenta los resultados iniciales de la tesis "Modelo basado en dinámica de sistemas para el sistema de transporte de Bogotá, D.C.", desarrollado en el marco de la Maestría en Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas [8].



este autor propone tres modelos que asocian el análisis de la problemática del transporte de acuerdo con las dinámicas de sus actores. En primera instancia se analiza el problema del transporte público, y se construye un modelo que evalúa su auto-sostenibilidad con base en políticas tarifarias y de operación logística. Luego se presenta un modelo que evalúa los impactos de las decisiones de los usuarios acerca de la modalidad de transporte a utilizar. Esta incertidumbre frente a las decisiones es analizada evaluando los costos que en términos de tiempo, dinero y calidad de vida, implica la selección de unas u otras modalidades de transporte. Para mayor discusión en torno a avances recientes sobre el uso de la dinámica de sistemas para el estudio de sistemas de transporte, se sugiere al lector revisar los estudios de Pfaffenbichler [11], Fiorello [12], Shepher [13], Guzmán [14], Romero y Hernández [15] y Robles [16].

3. Conceptos básicos de Dinámica de Sistemas

La dinámica de sistemas fue presentada en la década de los años 50 por el ingeniero norteamericano Jay Forrester, como una metodología de uso generalizado para modelar y estudiar el comportamiento de cualquier clase de sistemas y su desempeño a través del tiempo contemplando la existencia de retardos y bucles de realimentación [17]. En un principio estuvo orientada hacia asuntos industriales, pero que en décadas posteriores ha venido abarcando aspectos más complejos como las dinámicas urbanas y sociales [18].

La metodología exige, como en cualquier proceso de simulación, unos pasos iterativos que según Javier Aracil [18] “combinan los distintos elementos conceptuales y operativos que suministra la dinámica de sistemas, para alcanzar como resultado final un modelo aceptable del proceso en estudio”. Estos pasos consisten en la definición del problema a trabajar, su conceptualización (a partir de lo cualitativo antes que lo cuantitativo), la formalización del modelo concebido, el estudio del comportamiento del mismo, la evaluación final del modelo y su explotación.

En las etapas de definición y conceptualización, se identifican las variables y relaciones más importantes que existen alrededor de una situación real. Estas variables y sus relaciones son representadas en diagramas causales o ciclos de realimentación, cuyo valor agregado consiste en establecer la naturaleza de proporcionalidad entre los elementos del sistema. En otras palabras, si A y B son dos partes de un sistema, el hecho de que A influya sobre B se representa mediante un flecha de la forma $A \rightarrow B$ e indica que B es una función de A, es decir $B = f(A)$, aunque de desconozca la forma matemática exacta de la función [18].

Ahora bien, la relación entre A y B puede ser directamente proporcional o inversamente proporcional. En este sentido, los diagramas causales o ciclos de alimentación asignan signos a las flechas que relacionan todo par de variables siendo positivo si la relación es directa, y negativo si es inversa. Aracil lo explica con el ejemplo del llenado de un vaso con agua, donde el incremento en la variable flujo de agua implica un correspondiente incremento en la variable nivel del agua [18]. La construcción y notación de diagramas causales es conceptualizada en mayor detalle por otros autores como Méndez [19], Richardson [20], Sterman [21] y Mojtahedzadeh [22]. En la Figura 1 se presenta el diagrama causal correspondiente para este ejemplo.

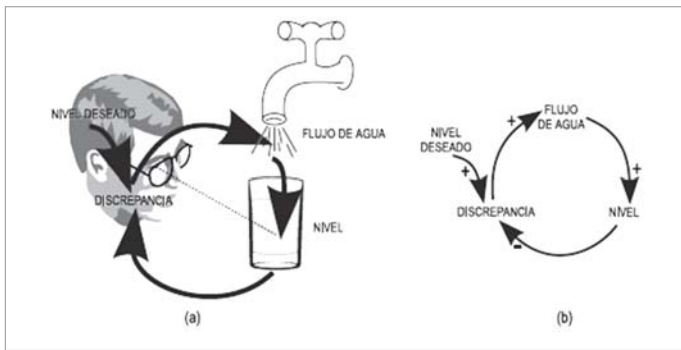


Figura 1. Diagrama causal básico para el llenado de un vaso de agua (Fuente: [18]).

El siguiente paso consiste en la formalización del problema. Para ello se realiza la del modelo plasmado en los diagramas causales a modelos mucho más sólidos que contienen un soporte lógico, computacional y matemático. Estos nuevos modelos se soportan en los diagramas de Forrester [18], notación desarrollada por ese autor en el que se utilizan niveles, tasas, retrasos y otros elementos para representar modelos de dinámica de sistemas. A continuación se describen cada uno de ellos.

Las variables representadas como niveles son aquellas que actúan como acumuladores durante el tiempo en que se estudia el sistema. El crecimiento y decrecimiento de estos niveles es regulado por otras variables denominadas tasas, de manera que actúan de manera muy similar a un sistema hidrodinámico. Los retrasos actúan como aceleradores o represores de la respuesta inmediata de una variable en el tiempo, y finalmente los auxiliares consisten en variables independientes que influyen directa o inversamente en los flujos y retrasos establecidos. La Figura 2 representa gráficamente estos componentes de los diagramas de Forrester.

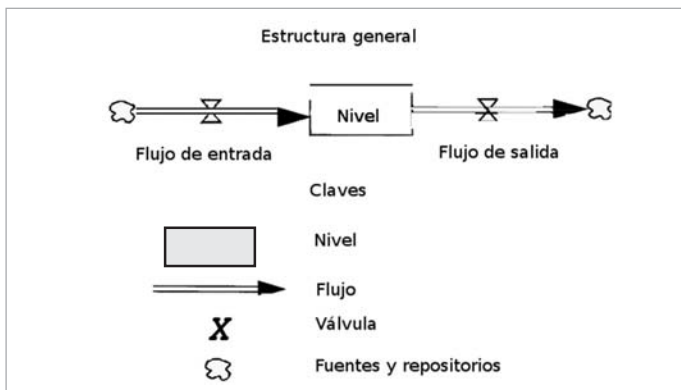


Figura 2. Notación de los diagramas de Forrester en Dinámica de Sistemas (Fuente: [21]).

La construcción de diagramas de Forrester también ha sido estudiada con profundidad por diversos autores y su aplicación como parte de la metodología de dinámica de sistemas, ha cubierto temas sociales, industriales, económicos y medio ambientales, entre otros. Algunas referencias que pueden ampliar información sobre el uso de los diagramas de Forrester puede ser consultada en los textos de Sterman [21], Forrester [23] y Coyle [24].



La dinámica de sistemas, como herramienta de representación de la realidad, busca construir modelos de simulación sobre los cuales se puedan evaluar decisiones acerca de políticas. En este sentido, existen varios aplicativos que apoyan la construcción de estos modelos de simulación. Para esta investigación en particular, se utilizó el aplicativo I-Think [27] y en este proceso se establecieron las variables independientes, dependientes y auxiliares que conformarían posteriormente los niveles, flujos y tasas correspondientes al diagrama de Forrester. Para nutrir los contenidos del modelo de simulación se obtienen datos estadísticos para las variables involucradas en el modelo y se construyen funciones de regresión. Al obtener el modelo y validar su funcionamiento, se plantean escenarios de modelado que representaron posibles futuros entornos que cubrirán al sistema y a partir de sus resultados se formulan las respectivas conclusiones y recomendaciones. En las secciones subsiguientes se presentan los detalles de estos procedimientos aplicados a la investigación objeto de este artículo.

4. Construcción del modelo basado en dinámica de sistemas para el STPC

Partiendo por la conceptualización del problema, la revisión bibliográfica realizada sobre estudios de dinámica de sistemas para el transporte, permitió identificar variables comunes en la formulación de estos modelos (para mayor información se recomienda revisar el reporte de investigación [8]): relaciones entre políticas, medidas de desempeño e impactos en la población; nuevas temáticas relacionadas con el transporte (tarifas, uso del vehículo particular, modalidades, etc.); y avances mucho más recientes sobre movilidad sostenible e inteligente. Posteriormente se realizó otra revisión bibliográfica sobre los principales aspectos relacionados con la movilidad que influyen las dinámicas de la ciudad de Bogotá. Se examinó la evolución de los sistemas de transporte de la ciudad y sus perspectivas a futuro.

Estas dos revisiones permitieron identificar las primeras ideas de variables, actores y escenarios para el modelo. Dando continuidad al proceso se elaboró un diagrama causal para el sistema de transporte público colectivo. El diagrama causal fue desarrollado utilizando matrices y el aplicativo Visual Understanding Environment (VUE) [25], para desarrollo de mapas mentales (ver Figura 3). Si bien el uso del aplicativo VUE cambia la apariencia de los diagramas causales obtenidos, la notación sigue siendo la misma que se utiliza en la literatura [26]. El diagrama causal obtenido contiene variables representadas por nodos y relaciones que son representadas por flechas entre los distintos nodos. Estas relaciones pueden ser positivas o negativas dependiendo del tipo de proporcionalidad que existe al incrementar el valor de la variable desde la cual se origina la flecha.

En este diagrama causal se señalaron siete áreas especiales, caracterizadas por la influencia de sus actores. En ellas se pueden evidenciar las diversas relaciones entre las variables involucradas. El área 1 corresponde a los propietarios del STPC, quienes inciden directamente en la presión por mayores tarifas y por aumento de su flota. En el área 2 se evidencian las relaciones asociadas al crecimiento del número de usuarios del sistema. El accionar del gobierno distrital está caracterizado en las áreas 3 y 4 en donde se presentan las consecuencias de la presión del sector privado en las tarifas, el efecto del crecimiento de la edad del parque automotor (regulada por el gobierno) y la incidencia de la asignación de rutas en el *índice de pasajeros por kilómetro (IPK)*.

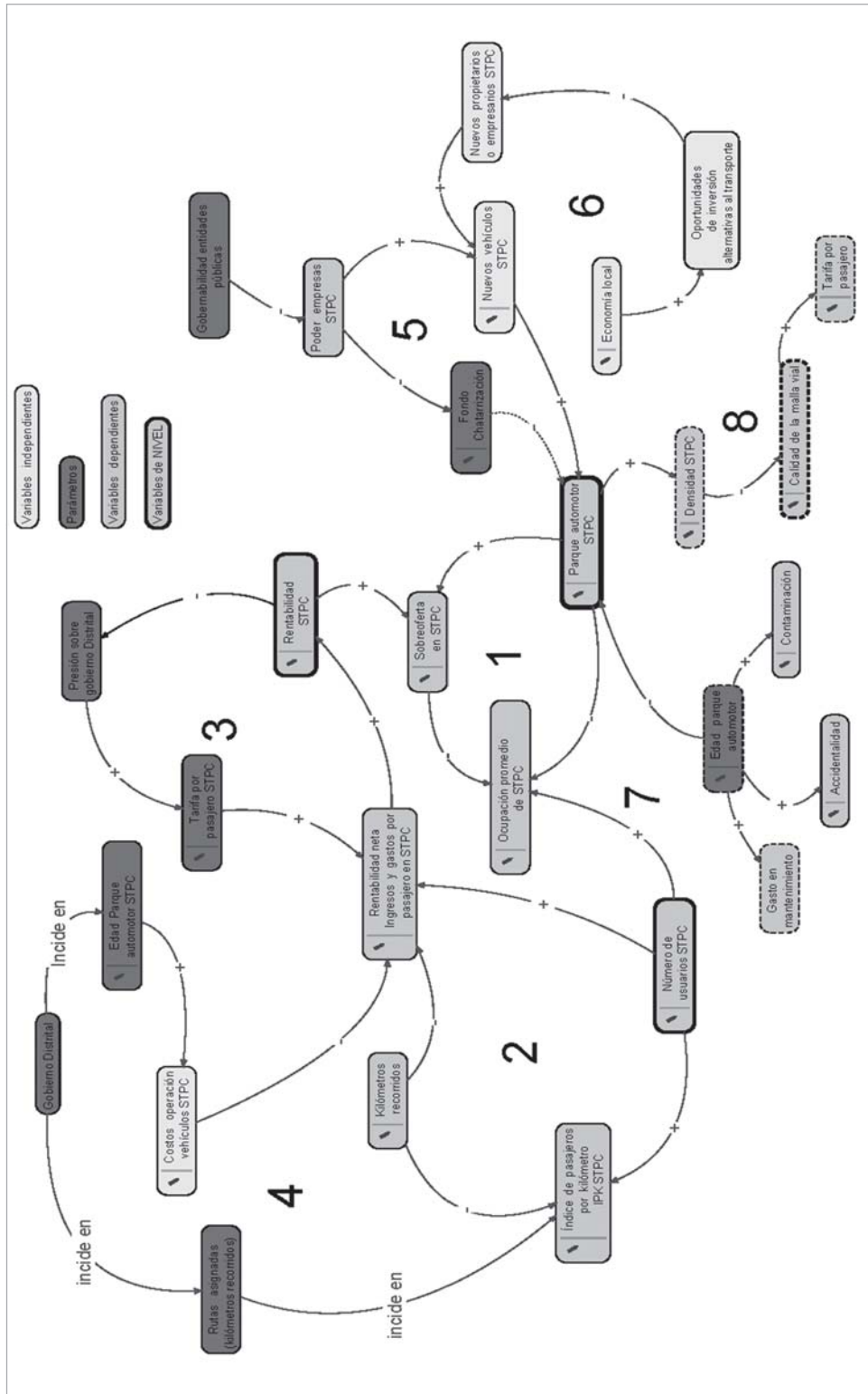


Figura 3. Diagrama causal del Sistema de Transporte Público Colectivo (Fuente: Elaboración propia del autor).



Por su parte el área 5 contiene las relaciones derivadas del crecimiento del parque automotor, de la presión de inversionistas por poner a funcionar nuevos vehículos en el STPC y el efecto del fondo de chatarrización³ en la disminución de su tamaño. Por último las áreas 6 y 7 contienen elementos que ayudan a comprender el efecto del crecimiento del parque automotor en la calidad de vida de los ciudadanos. Se mencionan fundamentalmente, la calidad de la malla vial, la accidentalidad y la contaminación.

El análisis de estas siete áreas permite identificar que entre ellas se conservan tres dimensiones diferentes: vehículos, pasajeros y recursos monetarios. En síntesis, las áreas del diagrama causal se pueden denominar como sigue:

- Área 1: Comportamiento del parque automotor.
- Área 2: Comportamiento de los usuarios del sistema.
- Área 3: Comportamiento de la rentabilidad del sistema.
- Área 4: Incidencia del gobierno en la edad del parque y las rutas asignadas.
- Área 5: Incidencia del gobierno y actores privados en la reducción del tamaño del parque (chatarrización).
- Área 6: Incidencia de la economía local en el aumento del parque automotor.
- Área 7: Impacto de la edad del parque automotor en la calidad de vida de los ciudadanos.

Prosiguiendo con la metodología de dinámica de sistemas, se procedió a la construcción del diagrama de Forrester para el STPC utilizando el aplicativo I-Think. Se partió de la construcción de tres flujos tomando como base las tres primeras áreas del diagrama de causalidad: parque automotor, usuarios y rentabilidad. Las otras cuatro áreas del diagrama causal, fueron incluidas en el diagrama de Forrester con el uso de variables auxiliares de incidencia en las tasas y de medidas de desempeño.

El diagrama de Forrester que se elaboró, se presenta en la Figura 4. Allí, el flujo de vehículos (marcado con el número 1) representa el ingreso y salida de vehículos STPC del parque automotor de la ciudad. Se presenta la interacción de variables de otro tipo de flujos tales como la rentabilidad del STPC, la malla vial, la densidad vehicular y la edad del parque automotor. El principal nivel de esta zona corresponde precisamente al número de vehículos STPC en la ciudad, y ello tiene influencia en dos elementos clave: la sobreoferta vehicular y la ocupación promedio [8]. En cuanto al flujo de usuarios (marcado con el número 2), éste se representa a través de una variable auxiliar cuyo valor es obtenido a partir de regresiones lineales sobre datos históricos. Es importante anotar que en este modelo no se está reflejando la posible influencia que pudiesen tener otros medios de transporte en la demanda de usuarios del STPC. Por último, el flujo de utilidades o recursos financieros (marcado con el número 3) representa los ingresos del sistema y el costo del mismo. Estas dos variables son reguladas por la tarifa por pasajero y los costos de operación. Estos dos elementos, ingresos y gastos, se conjugan para determinar si el sistema es rentable o no a través del nivel de rentabilidad STPC.

Para complementar al anterior, se construyó un modelo que representara la malla vial de la ciudad en términos de su calidad y extensión. Dicho modelo se presenta en la

³ El Fondo de Chatarrización fue creado en 2003 como un mecanismo para que el Distrito Capital tuviera recursos para la reposición de vehículos de transporte público antiguos por otros nuevos y de mejor calidad.

Figura 5. La calidad de la malla vial es clasificada en dos categorías: malla vial en mal estado, y malla vial en buen estado. Se tuvo en cuenta la influencia de la densidad del transporte público colectivo (STPC) e individual (STPI) en el deterioro de la malla vial, y la inclusión de nuevos kilómetros reparados al STPC.

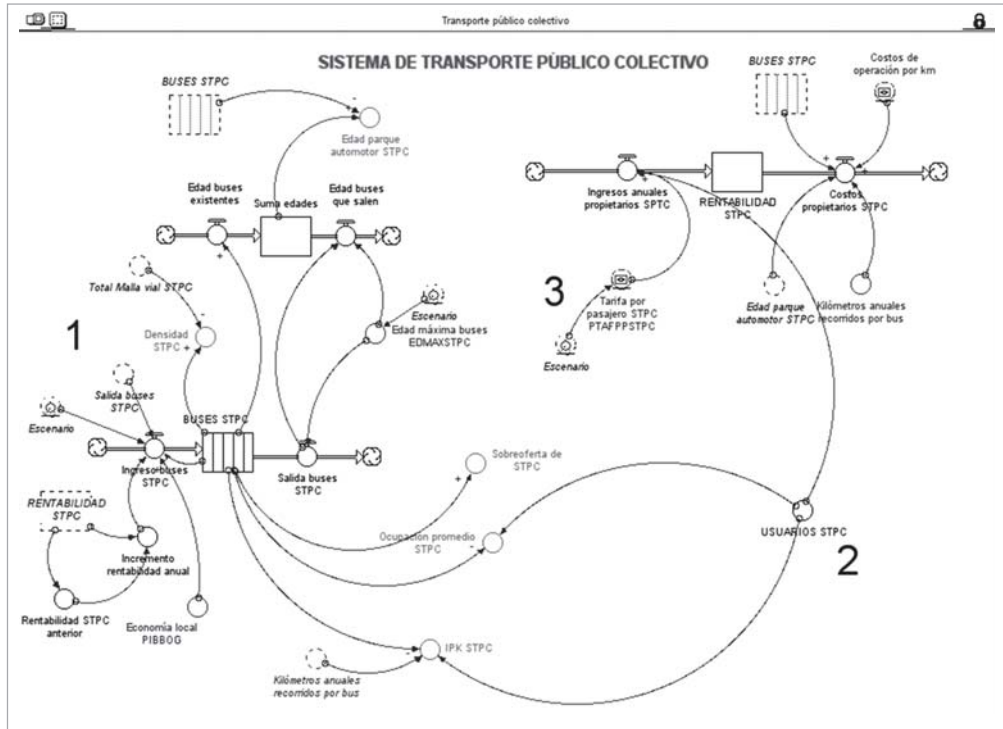


Figura 4. Diagrama de Forrester para el STPC (Fuente: Elaboración propia del autor).

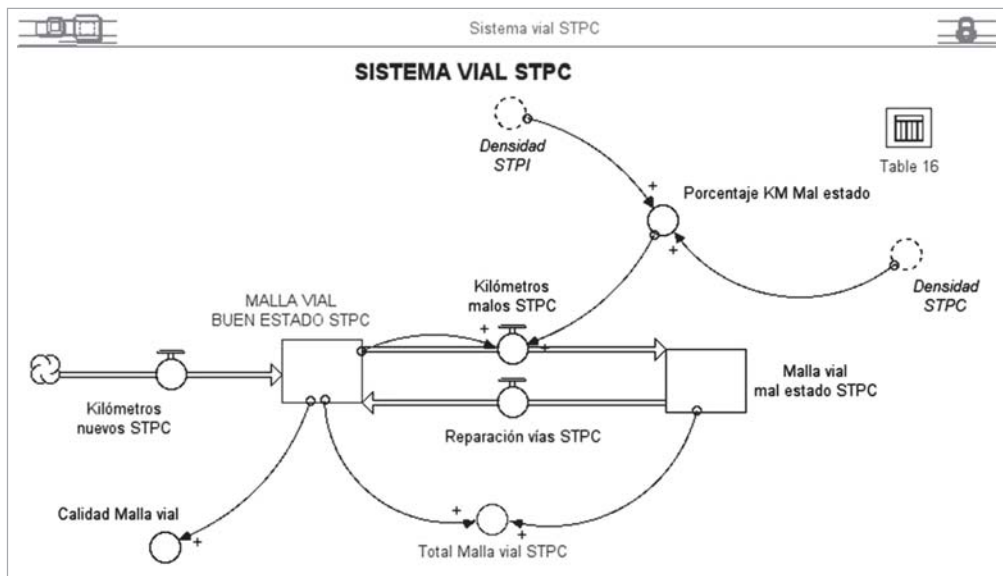


Figura 5. Diagrama de Forrester para la malla vial del STPC (Fuente: Elaboración propia del autor).



Para la construcción del modelo matemático, se realizó una detallada exploración de las distintas fuentes de información cuantitativas. Se obtuvieron datos de fuentes secundarias que van desde el año 1999 hasta el 2009 y se estimaron funciones de regresión para las principales variables independientes del sistema. En la Tabla I se presenta el listado de las principales variables contenidas en el modelo. Para mayor detalle de la construcción de estas variables se recomienda consultar el reporte de investigación preparado por el autor [8].

Parámetros	Variables dependientes	Medidas de desempeño
Edad máxima de buses STPC	Ingreso buses STPC	Edad parque automotor STPC
Economía local	Salida buses STPC	Densidad STPC
Kilómetros anuales recorridos por bus	Rentabilidad anual STPC	Sobreoferta STPC
Kilómetros nuevos STPC	Edad buses existentes	Ocupación promedio STPC
Tarifa por pasajero STPC	Edad buses que salen	Índice de pasajeros por kilómetro STPC
Costos de operación por kilómetro	Usuarios STPC	
	Ingresos anuales de propietarios STPC	
	Costos propietarios STPC	
	Rentabilidad STPC	

5. Escenarios de modelado

Se evaluaron tres escenarios distintos de modelado: mantener la situación de la movilidad con las tendencias actualmente marcadas; favorecer a los transportadores a partir de mejores condiciones de explotación para sus flotas de vehículos y tarifas más altas; y finalmente una política de apoyo a los usuarios del STPC reflejada en la disminución de las tarifas y una reducción de la edad límite de la flota de buses.

Estos escenarios fueron modelados mediante funciones matemáticas con un valor de ajuste para cada caso (la variable k). La configuración de los diferentes escenarios se presenta en la Tabla II. La explicación de los tres escenarios se da a continuación.

Parámetro	Función matemática del modelo en I-Think	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Edad máxima de la flota de buses	RANDOM (15,18,1) * k	1	1,2	0,85
Tarifas por pasajero	(-106829.67+53.76* $AÑO$)* k	1	1,2	0,75
Kilómetros nuevos de malla vial	RANDOM (10,100,10)* k	1	1,2	1,0

La función matemática RANDOM (15,18,1) representa para I-Think la generación de un valor aleatorio entre 15 y 18 con valor semilla de 1. Actualmente los vehículos de la ciudad tienen una edad máxima de 20 años, pero se espera que a través de diversas medidas gubernamentales, este límite se reduzca, conduciendo a edades máximas menores. Para el parámetro Tarifas por pasajero, la función matemática se obtuvo a partir de la regresión lineal de datos históricos de tarifas de la Encuesta de Transporte Urbano de Pasajeros [28]⁴, tomando como variable independiente al año y como variable dependiente al valor de la tarifa. Finalmente, para el parámetro de Kilómetros nuevos de malla vial se adoptó una función de generación de números aleatorios entre 10 y 100, con valor semilla de 10. Los datos históricos obtenidos no permitieron construir una función matemática diferente en función de el tiempo o de otras variables consideradas dentro del este modelo.

⁴ El coeficiente de correlación R obtenido para esta regresión lineal fue de 0,98.

Para evaluar el comportamiento de estos tres escenarios en el modelo, se realizó una simulación de sus principales medidas de desempeño. Los resultados se puede observar en las Figuras 6, 7 y 8. La simulación se realizó para un horizonte que abarca desde el año 1999 hasta el 2020.

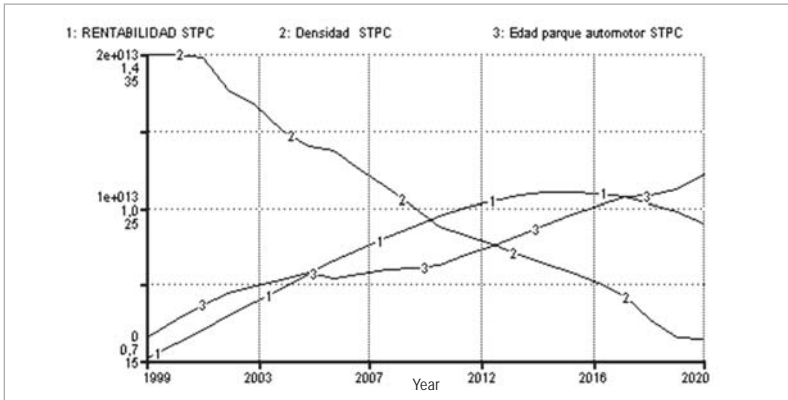


Figura 6. Comportamiento de medidas de desempeño en el escenario 1

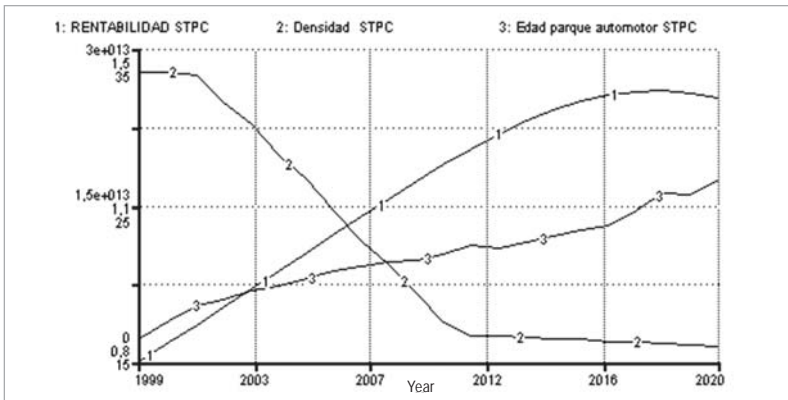


Figura 7. Comportamiento de medidas de desempeño en el escenario 2

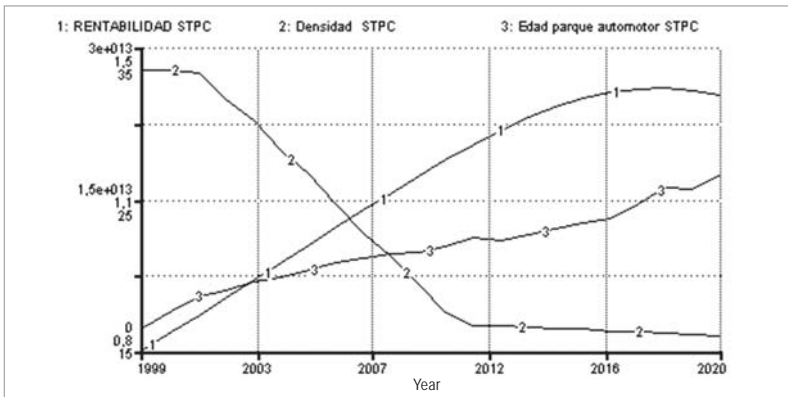


Figura 8. Comportamiento de medidas de desempeño en el escenario 3



Al examinar la Figura 7 correspondiente al escenario 1, se puede observar que la rentabilidad del STPC (curva No. 1) tiene un comportamiento aparentemente parabólico, logrando su máximo en el año 2015. Este comportamiento se debe a que si bien persiste un aumento en las tarifas para los usuarios, se espera que dadas las actuales condiciones, el número de usuarios del STPC disminuyan al encontrar otras modalidades para transportarse más atractivas.

La siguiente variable, densidad del STPC (curva No. 2) tiene un comportamiento descendente producto de la influencia de la edad máxima del parque automotor en la salida de vehículos, y la estabilidad del tamaño de la malla vial. Por último la variable 3, edad del parque automotor, inicia la simulación con un comportamiento ascendente, con un receso a partir del año 2004, retomando la pendiente positiva en el año 2009. Esto se debe a que la velocidad con que disminuye el parque automotor no es suficiente para contrarrestar el efecto de la edad acumulada del parque automotor existente.

Para el escenario 2, en la Figura 7 se observan variaciones en el comportamiento de las tres variables. En primer lugar, la curva de rentabilidad es mucho más pronunciada, producto del aumento en las tarifas del servicio de transporte. De otro lado la densidad STPC mantiene su comportamiento descendente, pero menos pronunciada que en el escenario 1, debido al aumento el número de vehículos al extender el plazo para la edad máxima de los buses. Por su parte, la edad del parque automotor presenta un comportamiento inicialmente ascendente, luego descendente y finalmente vuelve a ser creciente. Esta accidentalidad es producto de la ampliación de la edad del parque automotor, la cual en principio amplía la edad promedio del parque, luego se disminuye severamente la edad al evidenciar la entrada de nuevos vehículos con edad cero. Sin embargo, a largo plazo se evidencia que la edad del parque aumenta considerablemente debido a que existe un mayor plazo para la vida útil del vehículo.

Finalmente en el escenario 3, la Figura 8 muestra que la rentabilidad del sistema no es tan pronunciada, pero continúa siendo positiva. El comportamiento descendente de la densidad STPC vuelve a ser similar al del escenario 1, y la edad del parque automotor sigue siendo ascendente pero con una pendiente menor que en los anteriores escenarios.

Lo anterior da lugar a considerar que el escenario 3 es el que arroja mejores resultados tanto para los usuarios del sistema como para los propietarios de los vehículos. Esto, en razón a que se mantiene un sistema económicamente rentable, con una densidad vehicular más adecuada y con unas condiciones de comodidad y seguridad, representados en la edad del parque automotor, mucho mejor que en los otros dos escenarios.

6. Análisis desde los ciclos de causalidad

Los escenarios planteados fueron diseñados directamente para evaluar el impacto que los ciclos reforzadores del diagrama de causalidad de la Figura 3, en particular en las áreas 7 y 3. El área 7 contiene el ciclo reforzador que gira alrededor del impacto de la edad máxima del parque y de la malla vial en la movilidad de la ciudad. Por su parte, el área 3 se relaciona con el impacto de la tarifa para los usuarios en la sostenibilidad económica del sistema. En este sentido, se logra evidenciar que la limitación a la edad de los vehículos tiene un efecto importante en el tamaño del parque automotor, acompaña-

do de una regulación más eficiente de la tarifa para cada pasajero. Resulta esta una combinación apropiada, más no suficiente, de ajustes de política para optimizar el tamaño del parque automotor pues al tiempo que se regula la entrada de vehículos mejorando la calidad del servicio prestado, se sostiene la rentabilidad del sistema.

7. Conclusiones y trabajo futuro

Sistemas económicos y sociales complejos, como lo es el de transporte público colectivo de la ciudad de Bogotá, pueden ser representados a través de modelos de dinámica de sistemas. Estos modelos permiten comprender de mejor manera el rol de los diversos actores que hacen parte del STPC, y sus respectivos intereses, obteniendo así un interesante laboratorio para evaluar el uso de políticas y decisiones de carácter gubernamental para el beneficio de la población.

En este estudio se logró construir un modelo a través de la dinámica de sistemas para representar el rol de los principales actores del STPC: usuarios, propietarios de vehículos y gobierno distrital. Se construyeron funciones de regresión a partir de datos históricos con el fin de evaluar el comportamiento de las principales variables que hacen parte del sistema. Estas variables estuvieron orientadas a indagar acerca del impacto en la calidad de vida de tres políticas diferentes. Las políticas, explicadas en el artículo como escenarios, plantean distintos enfoques de gestión: el marginamiento de la autoridad gubernamental sobre el STPC; la formulación de normas que benefician a los propietarios del STPC; y finalmente la expedición de normas orientadas a la mejora de las condiciones de los usuarios sobre su uso en el STPC.

La construcción del diagrama de causalidad y la combinación de los tres escenarios de simulación permitió examinar que las áreas 5 y 6 son las que favorecen el crecimiento del parque automotor, y por ende las áreas restantes son oportunidades para regular este comportamiento. Así, aplicando medidas de política en las tarifas, en la malla vial, y en la edad máxima del STPC (todas ellas dentro del abanico de posibilidades del gobierno distrital), se obtuvo producto de la simulación una reducción en el tamaño del parque automotor, con mejores condiciones de comodidad y con una rentabilidad asegurada para los prestadores del servicio.

Es de resaltar que la simulación arrojó resultados muy interesantes acerca de las distintas medidas de desempeño involucradas. En primera instancia se encontró que las medidas de ampliación de la edad límite de vehículos del STPC tiene un efecto en el corto plazo sobre la reducción de la edad promedio de la flota, pero en el largo plazo la tendencia se transforma en un parque automotor mucho más antiguo que en los otros dos escenarios. Por otro lado, un escenario que favorece a los usuarios del STPC trae consigo una disminución leve, pero importante, de la densidad vehicular STPC, implicando así un mejor uso de la flota disponible por parte de los usuarios.

Lo anterior conduce a considerar la importancia que tiene cada uno de los ciclos de causalidad en el marco del sistema. Se evidenció que de las siete áreas mencionadas como componentes del diagrama causal, las áreas 3 (comportamiento de la rentabilidad del sistema) y 7 (impacto del sistema en la calidad de vida de los ciudadanos), son las que mayor incidencia pueden tener en el tamaño del parque automotor STPC cuando se



busca reducir la sobreoferta de vehículos. De estas dos áreas, la que mejor resultado arrojó fue la 7 en tanto a que los ajustes a la edad máxima del parque automotor obligó a que los propietarios fuesen reduciendo su flota vehicular.

El modelo aquí plateado evidencia varias limitantes que pueden ser objeto de investigaciones posteriores. Una de ellas consiste en que el STPC actúa, en términos reales, de manera articulada con el transporte particular, el transporte masivo y el transporte público individual en la ciudad. Ello se debe a que comparten la misma población que demanda el servicio de transporte, y que ésta, por unas razones u otras, toma decisiones diariamente de preferencia de modalidad con base en criterios económicos, de eficiencia y de tiempo. Surge entonces la necesidad de integrar más modalidades de transporte y otros elementos característicos de la movilidad en Bogotá para poder ofrecer un modelo más holístico sobre el cual se puedan simular políticas mucho más complejas y elaboradas.

De esta forma, la investigación aquí presentada abre caminos hacia la construcción de nuevos modelos, esta vez aplicados al sistema de transporte público individual, público masivo y particular, que se puedan integrar al modelo aquí expuesto. Algunos de estos modelos ya están siendo construidos por el autor y los resultados de su integración serán presentados próximamente. Es importante recalcar que al contemplar un único modelo integral, dinámico y modificable, se podrían combinar los distintos aspectos de las modalidades del transporte y reflejar sus impactos en las condiciones de vida de los habitantes en cuanto a contaminación ambiental, tiempos de viaje, accidentalidad, entre otros.

Bibliografía

- [1] B. Abdulhai y L. Kattan, "Traffic engineering analysis", en Handbook of Transportation Engineering, McGraw Hill, 2004.
- [2] Cámara de Comercio de Bogotá, "Indicadores de Movilidad 2010". 27-oct-2010.
- [3] A. Ardila Gómez, "La olla a presión del transporte público en Bogotá", Revista de Ingeniería, no. 21, pp. 56–67, 2005.
- [4] M. Cabrera y J. Guerrero, "Evaluación de la efectividad de la medida del pico y placa en Bogotá, D.C.", Tesis de grado de la carrera de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D.C., 2005.
- [5] K. Abbas, "The use of system dynamics in modelling transportation systems with respect to new cities in Egypt", presentado en: 8th International Conference of the System Dynamics Society, Chestnut Hill, Massachusetts, Estados Unidos, 1990.
- [6] I. Khanna, N. Singh, y P. Vrat, "System dynamics in urban transportation planning and policy analysis", en: Proceedings, Keystone, CO USA, 1985, pp. 453–462.
- [7] A. Membrillo Jiménez y C. García Madrid, "Vehicular Congestion in Mexico City: A Systems Perspective and Future Scenarios", en Proceedings, Estambul, Turquía, 1997.
- [8] E. Duarte Forero, "Modelo para el sistema de transporte público de Bogotá, D.C., basado en dinámica de sistemas", Tesis de Maestría en Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C., 2011.
- [9] M. Bachelis, J. Peet, y P. Newman, "Using a Systems Approach to Unravel Feedback Mechanisms Affecting Urban Transport Choices", en Proceedings, Wellington, New Zealand, 1999, p. 12.
- [10] C. Raux, "A systems dynamics model for the urban travel system", Hal, 2003.
- [11] P. Pfaffenbichler, G. Emberger, y S. Shepherd, "A system dynamics approach to land use transport interaction modelling: the strategic model MARS and its application", System Dynamics Review, vol. 26, no. 3, pp. 262–282, 2010.
- [12] D. Fiorello, F. Fermi, y D. Bielanska, "The ASTRA model for strategic assessment of transport policies", System Dynamics Review, vol. 26, no. 3, pp. 283–290, 2010.
- [13] S. Shepher, A. Koh, N. Balijepalli, y P. Pfaffenbichler, "Use of modelling tools to deliver a sustainable transport system", presentado en: 12th World Conference on Transport Research, Lisboa, Portugal, 2010.
- [14] L. Á. Guzmán-García, "Optimización dinámica de estrategias de movilidad sostenible en áreas metropolitanas". 2011.
- [15] W. Romero y J. Hernández, "Plataforma de simulación y visualización para el apoyo al análisis y toma de decisiones en proyectos de movilidad urbana", Revista de Ingeniería, no. 29, pp. 52–58, 2009.
- [16] D. Robles, P. Ñañez, y N. Quijano, "Control y simulación de tráfico urbano en Colombia: Estado del arte", Revista de Ingeniería, no. 29, pp. 59–69, 2009.

- [17] S. Martínez y A. Requena, Simulación dinámica por ordenador. Madrid: Alianza, 1988.
- [18] J. Aracil, Dinámica de sistemas. Madrid: Isefe, 1995.
- [19] G. Méndez Giraldo, "Curso de dinámica de sistemas", Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2009.
- [20] G. Richardson P., "Problemas con los diagramas de ciclos causales". .
- [21] J. D. Sterman, Business Dynamics: Systems thinking and modelling for a complex world. Mc Graw Hill, 2000.
- [22] M. Mojtahedzadeh, "Consistency in explaining model behavior based on its feedback structure", System Dynamics Review, vol. 27, no. 4, pp. 358–373, 2011.
- [23] J. Forrester, Industrial Dynamics. Cambridge, MA: Productivity Press, 1961.
- [24] R. G. Coyle, System Dynamics Modelling: A practical approach. Londres: Chapman and Hall, 1996.
- [25] Tufts University, Visual Understanding Environment - VUE. Tufts University, 2012.
- [26] J. Aracil y F. Gordillo, Dinámica de sistemas. Madrid: Alianza, 1997.
- [27] isee systems, "I-Think, systems thinking for business". [Online]. Disponible en: <http://www.iseesystems.com/software/Business/IthinkSoftware.aspx> [Consultado en: Octubre 2011].
- [28] Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, "Encuesta de Transporte urbano automotor de pasajeros", Sistema de consulta de la Encuesta de transporte urbano automotor de pasajeros, 2011. [Online]. Disponible en: http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=106&Itemid=55. [Consultado en: 30-sep-2011].
- [29] S. Young e I. Santoso, "A System Dynamics approach to the car ownership trend in Taiwan Urban Areas", en Proceedings, La Jolla, CA USA, 1988, pp. 522–534.
- [30] K. Kuroda y M. Tsaur, "Urban growth modeling under the limitation of transportation facilities - Case of Bangkok", en Proceedings, Chestnut Hill, Massachusetts USA, 1990, pp. 620–634.
- [31] J. Peschon, L. Isaksen, y L. Hajdu, "Public decision making for land-use and transportation planning", en Proceedings, Québec City, Canadá, 1998, p. 19 p.
- [32] W. Schade, A. Martino, y M. Roda, "ASTRA: Assessment of Transport Strategies", en Proceedings, Wellington, New Zealand, 1999, p. 12.
- [33] G. Emberger, "Causal Loop Model to Describe Transport System's Effects on Socio-Economic Systems", en Proceedings, Bergen, Norway, 2000, p. 8.
- [34] N. H. Choi, S. K. Kim, y M. K. Hong, "Feedback approach for the dynamic interactions between urban transportation and air pollution", presentado en: 2001 System dynamics conference, Atlanta, GE., 2001, p. 17.
- [35] C. HEIMGARTNER, "System dynamic modelling transport and land use - A first model draft", presentado en 1st Swiss Transport Research Conference, Monte Verità, Ascona, Suiza, 2001.
- [36] V. Koltchanov, M. Karsky, y P. Casanova, "The Individual Daily Mobility Simulation Model "MobiSim"", en Proceedings, Palermo, Italy, 2002, p. 4.
- [37] J. J. González y G. Winch, "Coming To Terms With Traffic Congestion", en Proceedings, Nijmegen, Holanda, 2006, p. 19.
- [38] K. Vakili, M. Isaai, y A. J. Barsari, "Strategic assessment of Transportation Demand Management policies: Tehran case study", presentado en: 2008 Systems Dynamics conference, Atenas, Grecia, 2008, p. 18.

Edgar Duarte Forero

Nació en Zapatoca (Santander), Colombia. Es Ingeniero Industrial de la Universidad del Norte de Barranquilla, Colombia. Está cursando estudios de Maestría en Ingeniería Industrial en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá, Colombia. Se ha desempeñado en áreas de investigación y administrativas en la Fundación Foro Nacional por Colombia, durante 9 años. Actualmente es Coordinador Administrativo y Financiero y profesional asistente de investigaciones. También se ha desempeñado como docente de Ingeniería Industrial en la Escuela Colombiana de Carreras Industriales (ECCI) de Bogotá, Colombia. Pertenece al grupo Sistemas Expertos y Simulación, específicamente en el área de Dinámica de Sistemas, desde donde realiza estudios sobre problemáticas urbanas y sociales tales como: transporte urbano, industria extractiva, acceso al conocimiento, y software libre (entre otros).