

ESTRUCTURA MULTICAUSAL CONSTRUIDA CON DINÁMICA DE SISTEMAS
PARA MODELAR LA DEMANDA INDUCIDA DE TRANSPORTE Y FACILITAR EL
DISEÑO DE POLÍTICAS DE MITIGACIÓN DE LA CONGESTIÓN VIAL

JUAN SEBASTIÁN ANGARITA ZAPATA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA

2016

ESTRUCTURA MULTICAUSAL CONSTRUIDA CON DINÁMICA DE SISTEMAS
PARA MODELAR LA DEMANDA INDUCIDA DE TRANSPORTE Y FACILITAR EL
DISEÑO DE POLÍTICAS DE MITIGACIÓN DE LA CONGESTIÓN VIAL

JUAN SEBASTIÁN ANGARITA ZAPATA

Trabajo de grado para optar el título de Magister en Ingeniería de Sistemas

Director

HUGO HERNANDO ANDRADE SOSA

Magister en ingeniería de sistemas e informática

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

A mi familia, siempre un apoyo incondicional bajo cualquier circunstancia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los integrantes del grupo SIMON de investigación por apoyarme durante dos años de trabajo y siempre participar en la mejora de este documento.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. CONTEXTO DE INVESTIGACIÓN	15
1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Objetivo general	18
1.3 Objetivos específicos	18
2. METODOLOGÍA	19
3.1 Conceptos y definiciones	28
3.2 Estudios empíricos y verificación de la teoría	31
4. REPRESENTACIÓN DINÁMICO-SISTÉMICA DE LA DIT - Prototipo I	35
5. PARADIGMAS DE TRANSPORTE Y ESTRATEGIAS DE GESTIÓN DE LA DEMANDA DE TRANSPORTE - Revisión bibliográfica No. 2	52
5.1 Paradigmas de transporte	56
5.2 Liberación inteligente de la congestión	58
5.3 Medios alternativos de transporte y reformas tarifarias	61
5.3.1 Sistema de buses de transporte rápido	62
5.3.2 Cobro por congestión	64
6. POLÍTICAS PARA INTERVENIR LA DEMANDA INDUCIDA DE TRANSPORTE - Prototipo II	66
7. INTERFAZ SOFTWARE	84
7.1 Actor	85
7.2 Diagrama de casos de uso	86
7.3 Diagramas de secuencia	87
7.4 Interfaz desarrollada	90
8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	92
9. CONCLUSIONES	103
10. TRABAJO FUTURO	106
11. DIVULGACIÓN	109

BIBLIOGRAFÍA.....111

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Metodología general	19
Figura 2. Metodología de los cinco lenguajes	20
Figura 3. Metodología de desarrollo evolutivo	22
Figura 4. Estructura multicausal de la DIT	37
Figura 5. Arquetipo de comportamiento de la DIT	42
Figura 6. Modo referencia para la estructura realimentada de DIT propuesta en la Figura 4.....	43
Figura 7. Diagrama de flujos y niveles prototipo I	45
Figura 8. Modo de referencia y demanda inducida a mediano plazo – prototipo I.	49
Figura 9. Formato tabla de revisión bibliográfica No. 2.....	56
Figura 10. Efecto “Push-Pull” para desincentivar el vehículo privado y fortalecer medios alternativos de transporte	68
Figura 11. Estructura realimentada del prototipo II	72
Figura 12. Diagrama de flujos y niveles prototipo II	74
Figura 13. Cuotas de mercado de transporte público y transporte informal.....	82
Figura 14. Descripción interacción usuario – interfaz software – modelo	85
Figura 15. Diagrama de casos de uso	86
Figura 16. Diagrama de secuencia para la actividad: seleccionar valores iniciales para parámetros de simulación.....	88
Figura 17. Diagrama de secuencia para la actividad: seleccionar tiempo de simulación	89
Figura 18. Diagrama de secuencia para la actividad: ejecutar simulación y graficar resultados	89
Figura 19. Pantalla de inicio de interfaz software desarrollada	90
Figura 20. Interfaz software desarrollada.....	91

LISTA DE GRÁFICAS

pág.

Gráfica 1. Referencias bibliográficas clasificadas por tipo de documento – Revisión No. 1	25
Gráfica 2. Referencias bibliográficas clasificadas por enfoque utilizado para abordar la DIT - Revisión No. 1	26
Gráfica 3. Referencias bibliográficas clasificadas por país de publicación - Revisión No. 1	27
Gráfica 4. Formato tabla de revisión bibliográfica No. 1	28
Gráfica 5. Índice de congestión vial – prototipo I	48
Gráfica 6. Kilómetros recorridos por demanda inducida directa o a corto plazo	51
Gráfica 7. Referencias bibliográficas clasificadas por tipo de documento – Revisión No. 2	54
Gráfica 8. Referencias bibliográficas clasificadas por lugar de publicación - Revisión No. 2.....	55
Gráfica 9. Kilómetros recorridos por vehículos privados - prototipo II.....	80
Gráfica 10. Cuota de mercado para vehículo privado	81
Gráfica 11. Congestión vial – prototipo II	83

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Expresiones de lenguaje de consulta para la revisión bibliográfica No. 124	
Tabla 2. Manifestaciones de la demanda inducida de transporte por construcción vial	29
Tabla 3. Estimaciones de elasticidades reportadas en la literatura para cuantificar la DIT	31
Tabla 4. Modelos y técnicas utilizadas para medir y cuantificar la DIT	32
Tabla 6. Ecuaciones diagrama de flujos y niveles prototipo I	45
Tabla 7. Expresiones de lenguaje de consulta para la revisión bibliográfica No. 253	
Tabla 8. Paradigmas de transporte.....	56
Tabla 9. Estrategias de reducción de la congestión vial asociadas a los paradigmas de planificación del transporte.....	58
Tabla 10. Métodos y técnicas para analizar y estimar el impacto de políticas de mitigación de la congestión vial.	59
Tabla 11. Presencia de sistemas de buses de transporte rápido (BRT) por continentes.....	62
Tabla 12. Atributos de calidad de un sistema de buses de transporte rápido (BRT).	63
Tabla 13. Tipos de reformas tarifarias para desincentivar el uso del vehículo privado.	64
Tabla 14. Ecuaciones diagrama de flujos y niveles prototipo II	75
Tabla 15. Escenarios de simulación considerados para el prototipo II	78

RESUMEN

TÍTULO:

ESTRUCTURA MULTICAUSAL CONSTRUIDA CON DINÁMICA DE SISTEMAS PARA MODELAR LA DEMANDA INDUCIDA DE TRANSPORTE Y FACILITAR EL DISEÑO DE POLÍTICAS DE MITIGACIÓN DE LA CONGESTIÓN VIAL*

AUTOR:

JUAN SEBASTIÁN ANGARITA ZAPATA **

PALABRAS CLAVE:

DEMANDA INDUCIDA DE TRANSPORTE, CONSTRUCCION VIAL, DINAMICA DE SISTEMAS, CONGESTION VIAL.

DESCRIPCIÓN:

La demanda inducida de transporte (DIT) es un fenómeno en el cual la construcción vial, utilizada para mitigar la congestión, incrementa el número de kilómetros recorridos por la población. Este fenómeno ha sido abordado econométricamente mediante elasticidades para estimar qué tanta demanda de transporte puede ser inducida por nuevas vías. Sin embargo, hay un vacío de modelos descriptivos con hipótesis causales que expliquen la complejidad estructural subyacente a este fenómeno. En este trabajo de investigación proponemos un modelo construido con dinámica de sistemas para simular y explicar la DIT. Los resultados de simulación muestran cómo nuevas vías a corto plazo inducen incrementos en el número de kilómetros recorridos por vehículos normalmente en uso; mientras que a mediano plazo más vehículos, que previamente a la construcción de vías no circulaban debido a la congestión percibida, hacen uso de la nueva infraestructura vial. Más vehículos en las vías generan nueva congestión vehicular, y en consecuencia las altas velocidades proveídas por esta política son absorbidas por la DIT. De esta forma, se concluye que al abordar sistémicamente la DIT es posible identificar puntos de apalancamiento claves en la problemática que conduzcan al diseño y formulación de políticas integrales para lidiar con este fenómeno. En este sentido, el modelo propuesto representa un útil tecnológico que puede apoyar la toma de decisiones en contextos urbanos donde hoy día aún es necesaria la construcción vial para garantizar conectividad.

* Trabajo de investigación

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Hugo Hernando Andrade Sosa, Magister en informática.

ABSTRACT

TITLE:

MULTICAUSAL STRUCTURE BUILT WITH SYSTEM DYNAMICS TO MODEL INDUCED TRAVEL DEMAND AND FACILITATE POLICY-MAKING TO MITIGATE TRAFFIC CONGESTION*

AUTHORS:

JUAN SEBASTIÁN ANGARITA ZAPATA **

KEYWORDS:

INDUCED TRAVEL DEMAND, ROAD CONSTRUCTION, SYSTEM DYNAMICS, TRAFFIC CONGESTION.

DESCRIPTION:

Induced travel demand (ITD) is a phenomenon where road construction, used as a policy to reduce traffic congestion, increases vehicles' kilometers traveled. It has been approached econometrically through elasticities to estimate how much travel demand can be induced by new roads. However, there is a lack of "white-box" models with causal hypotheses that explain the structural complexity underlying this phenomenon. We propose a system dynamics model based on a feedback structure to explain and simulate ITD. The simulation results show how new roads in the short term induce more kilometers traveled by vehicles already in use; meanwhile, in the medium-term, new traffic is generated. These new car drivers appear when better flow conditions coming from new roads increase attractiveness of car use. More cars added to vehicles already in use produce new traffic congestion, and high travel speeds provided by roads built are absorbed by ITD effects. We concluded that approaching ITD with a systemic perspective allows for identifying leverage points that contribute to design comprehensive policies aimed to cope with ITD. In this sense, the model supports decision-making processes in urban contexts wherein it is still necessary for road construction to guarantee connectivity, such as the case of developing countries.

* Master's degree research work.

** Department of Physical-mechanical Engineering. School of Systems Engineering and Computer Science. Advisor:Hugo Hernando Andrade Sosa, M.Sc. in Computer Science.

INTRODUCCIÓN

La congestión vial es un fenómeno caracterizado por sus implicaciones económicas, sociales y ambientales en distintas ciudades del mundo. Una movilidad congestionada afecta la productividad económica debido a incrementos en costos por consumo de combustible y costos de flete, entre otros. Además, elevados tiempos de viaje afectan negativamente la calidad de vida de la población al dificultar la búsqueda y consecución de oportunidades de desarrollo como trabajo, salud y educación.

En consecuencia, es necesario explorar y definir estrategias para mitigar la congestión vial junto con sus implicaciones adversas. Sin embargo, antes de ello, es conveniente reflexionar acerca de la problemática de fondo que muy probablemente no radica únicamente en la congestión percibida cuando a diario observamos las vías saturadas por grandes cantidades de vehículos. En lugar de ello, se debe discutir la concepción de transporte rápido que depende de vehículos privados para satisfacer las necesidades de desplazamiento; la cual, constantemente requiere más y más vías para suplir la capacidad vial necesaria que aloje un parque automotor creciente.

De esta forma, proponer una estructura multicausal construida con Dinámica de Sistemas (DS) para modelar y explicar la demanda inducida de transporte, es un enfoque pertinente en pro de brindar productos ingenieriles que faciliten discutir cómo el uso intensivo del vehículo privado, evita que la construcción de vías sea una política suficiente para lidiar con la congestión vial. En primer lugar, el paradigma dinámico sistémico ayuda a complementar la comprensión estructural de la demanda inducida de transporte y sus implicaciones en la saturación de la movilidad, lo cual, aporta a mejores decisiones en el terreno de la planeación estratégica urbana en general, ya que a medida que mejor se comprende un fenómeno, es más fácil intervenirlo. Por otra parte, el modelo construido con DS constituye un instrumento de experimentación simulada que apoya la toma de decisiones con el propósito de discutir formas y medios de transporte sostenibles, para formular e implementar una nueva concepción de transporte que favorezca tanto el medio ambiente, la calidad de vida de la población, como el desarrollo económica en contextos urbanos.

1. CONTEXTO DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Actualmente países desarrollados en Europa, Asia, Norte América y Oceanía, han adoptado un nuevo paradigma de planificación del transporte para lidiar con la congestión vial, el cual es llamado liberación inteligente de la congestión –*smart congestion relief* (Litman, 2015a). En tales países la construcción vial ya no es una política predominante para disminuir la congestión debido a evidencia encontrado de cómo nuevas vías fortalecen el uso del vehículo privado, generando así, nueva congestión vehicular. Diferentes trabajos econométricos han corroborado cómo nuevas vías, expresadas en kilómetros lineales, inducen incrementos en el número de kilómetros recorridos por la población (Noland and Lem, 2002). Este fenómeno llamado demanda inducida de transporte (DIT) (Noland, 2000) refuta la efectividad de la construcción vial como política única y suficiente para lidiar con la congestión vehicular (Ladd, 2012).

En Latinoamérica pocos países, con la excepción de Brasil y Chile, han ejecutado estrategias integrales con fuerte financiamiento público para adoptar el nuevo paradigma de transporte anteriormente mencionado (Ortuzar, 2015; Rivasplata, 2013). El antiguo paradigma de transporte, en el cual mediante construcción vial se busca mejorar la movilidad maximizando las velocidades de viaje, ha prevalecido como enfoque predominante en demás países latinoamericanos. Ello puede justificarse debido a que la rápida expansión urbana, el crecimiento poblacional, las elevadas tasas de motorización y la creciente congestión vial, han promovido una necesidad percibida de más vías entre los tomadores de decisiones. Y aunque la evidencia existente acerca de los efectos de la DIT en países desarrollados es abundante (Litman, 2015b; Noland y Lem, 2002; Graham et al., 2014; Hansen, 1995), la política pública actual sigue destinando recursos

económicos para proveer nuevas y mejores vías que descongestionen la movilidad.

La escasa o a veces inexistente literatura académico-técnica que discuta las implicaciones potenciales de la DIT en contextos urbanos de Latinoamérica, sugiere que no ha habido una apropiación a nivel continental del conocimiento alcanzado internacionalmente acerca de este fenómeno (Ver sección

3. DEMANDA INDUCIDA DE TRANSPORTE - Revisión bibliográfica No. 1). Por lo tanto, iniciar procesos investigativos donde se utilicen los modelos econométricos reportados en la literatura pueden ser iniciativas pertinentes para cuantificar la DIT y así, tener en cuenta este fenómeno dentro de la toma de decisiones en transporte. Sin embargo, antes de medir la DIT, es necesario entender cuáles son las causas subyacentes que generan que a partir de un estado de congestión vial, la construcción de nuevas vías induce una nueva saturación de la movilidad; de esta forma, un entendimiento causal de tal fenómeno puede facilitar el diseño de políticas integrales que van más allá de la construcción vial para descongestionar la movilidad.

Lograr tal entendimiento causal-estructural requiere abordar la DIT con una perspectiva sistémica que permita dimensionarla, colocarla en un contexto lo suficientemente amplio, y pensar en ella como un sistema de la misma forma que todo fenómeno social debe ser estudiado (Bunge, 2014). Ello implica reconocer y definir los elementos que interactúan entre la construcción de vías y la demanda motorizada de transporte, como elementos que están fuertemente vinculados y se influyen mutuamente en un sistema complejo y realimentado cuyas interacciones determinan el comportamiento de la DIT. Evitando así un pensamiento reduccionista en el que la relación lineal entre kilómetros construidos de vías y kilómetros recorridos, planteada por trabajos econométricos, es

estudiada aisladamente sin representar la complejidad estructural subyacente del fenómeno.

Con dinámica de sistemas, enfoque que permite plantear modelos “causales-descriptivos”, es posible formular un modelo matemático de simulación que permita comprender cómo la DIT emerge a través del tiempo a partir de una estructura causal realimentada (Sterman, 2000). Tal mecanismo realimentado puede generar un comportamiento similar al de la DIT y posteriormente, ser concebido como una hipótesis dinámica de este fenómeno basándose en una premisa fundamental del paradigma dinámico-sistémico: a estructuras causales similares corresponden comportamientos similares (Andrade et al, 2001; Forrester, 1971).

De esta forma, tomando como punto de partida resultados previos alcanzados con trabajos econométricos, construir una hipótesis multicausal realimentada desde un enfoque sistémico es un aporte pertinente para representar estructuralmente y mejorar la comprensión de la demanda inducida de transporte por construcción vial. Ya que tal estructura multicausal integrada a un modelo matemático de simulación construido con dinámica de sistemas permite la experimentación simulada; a partir de la cual, es posible apoyar el diseño y ejecución de políticas integrales dirigidas a mejorar la movilidad.

Para lograr el cometido anteriormente descrito, la pregunta de investigación que motiva el presente trabajo de maestría es: ¿Qué estructura multicausal realimentada puede explicar la dinámica de porqué a partir de un estado de congestión vial, la construcción de vías conduce a corto y mediano plazo, a una nueva saturación de la movilidad; y además, cuál es fenómeno que emerge del sistema realimentado que corresponde a la estructura descrita?, para lo cual

nuestra hipótesis es que a partir de la estructura multicausal construida el fenómeno que emerge de ella es la demanda inducida de transporte; por lo tanto, es posible construir un sistema realimentado que describa la dinámica de comportamiento de este fenómeno corroborado econométricamente.

1.2 Objetivo general

Representar en una estructura multicausal la demanda inducida de transporte para un contexto urbano con alta dependencia de vehículos privados, utilizando un modelo construido con dinámica de sistemas.

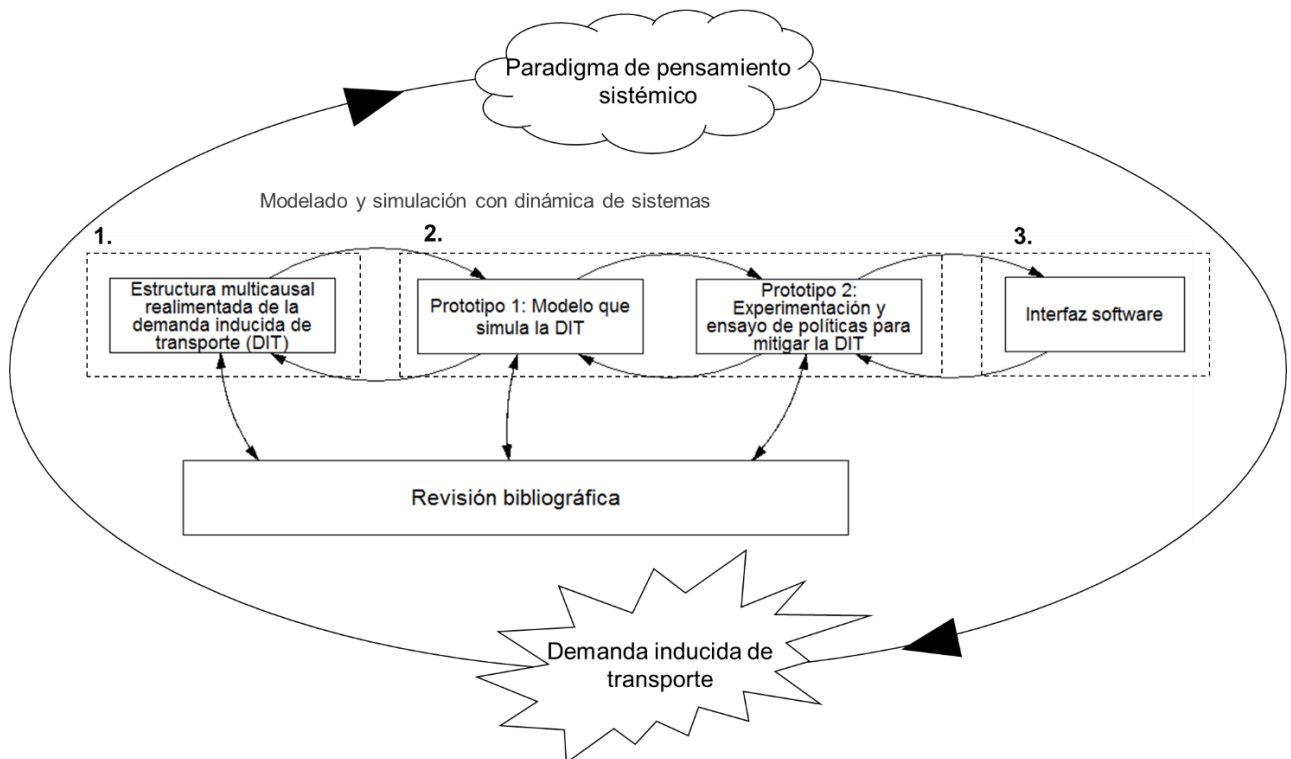
1.3 Objetivos específicos

- Construir una estructura multicausal realimentada bajo un enfoque sistémico que explique la demanda inducida de transporte por construcción vial.
- Proponer un modelo de simulación utilizando dinámica de sistemas que permita observar, analizar e intervenir la demanda inducida de transporte en escenarios con estrategias dirigidas a desincentivar el uso del vehículo privado.
- Desarrollar una interfaz software de usuario que opere el modelo construido y facilite la experimentación simulada de la demanda inducida de transporte.

2. METODOLOGÍA

La metodología que orienta el desarrollo del presente trabajo de maestría se observa en la Figura 1. El cíclico cerrado más externo representa la comprensión sistémica que el investigador en todo momento hace de su objeto de estudio: la demanda inducida de transporte (DIT). Internamente en este ciclo hay tres etapas identificadas por los rectángulos de línea punteada con un número en la esquina superior izquierda. El desarrollo de estas etapas deja como resultado tres productos que dan cumplimiento a cada uno de los objetivos específicos planteados, y que en conjunto permiten la consecución del objetivo general.

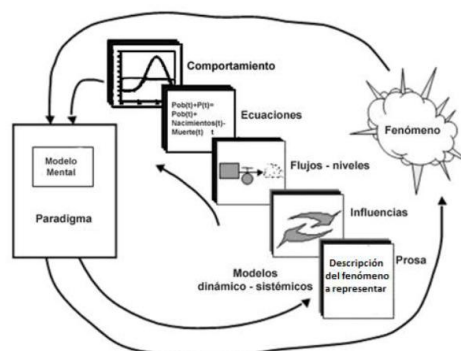
Figura 1. Metodología general



Las tres etapas están conectadas consecutivamente de forma bidireccional para permitir desplazamientos desde una etapa hacia otra etapa posterior o anterior. Esto tiene como propósito dejar abierta la posibilidad de realizar reformulaciones, bien sean mejoras o correcciones, del producto de cada etapa y así, alcanzar un desarrollo homogéneo en cada uno de los objetivos específicos.

La ejecución de las etapas “1” y “2” requiere utilizar modelado con dinámica de sistemas para construir un modelo que simule la DIT y permita su intervención. Tal modelo está constituido por una estructura multicausal que explica este fenómeno y un modelo matemático, constituido por dos prototipos, que permite la simulación por computador. La construcción del modelo dinámico-sistémico en su conjunto, tanto estructura multicausal como modelo matemático, está orientada por la metodología de los cinco lenguajes planteada por el grupo SIMON de investigación (Andrade et al., 2001). Esta metodología permite desarrollar prototipos de complejidad creciente a través de un conjunto de lenguajes donde cada uno de ellos representa una vista particular del modelo construido (**¡Error! o se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 2. Metodología de los cinco lenguajes.



Fuente: Andrade, Hugo y Otros. Pensamiento Sistémico: Diversidad en búsqueda de Unidad Bucaramanga. 2001

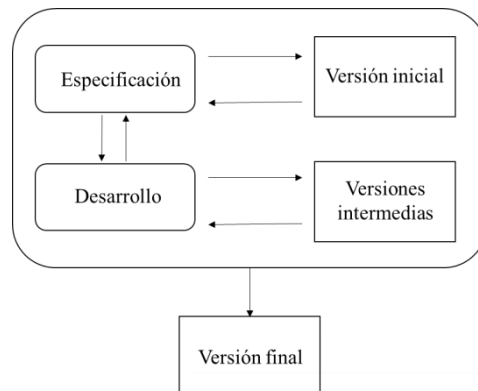
El desarrollo de la etapa “1” (Figura 1) requiere realizar una primera revisión bibliográfica con el propósito de identificar y seleccionar variables necesarias para la construcción de la estructura multicausal que explique la DIT. De esta forma, es posible concebir una hipótesis realimentada donde la relación lineal entre kilómetros de vías y kilómetros recorridos, planteada por enfoques econométricos, sea incluida en ciclos de influencia circular cuya interacción generan el comportamiento de la DIT.

Posteriormente se procede a la etapa “2” donde a partir de la estructura realimentada, producto de la etapa “1”, se formula el diagrama de flujos-niveles y las ecuaciones matemáticas que permiten la simulación por computador, tal como lo indica la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Como resultado se obtiene un prototipo I del modelo dinámico-sistémico cuyas simulaciones deben reproducir los comportamientos básicos de la DIT reportados en la literatura e identificados en la primera revisión bibliográfica. Si esto ocurre, el producto de la etapa “1” fue desarrollado correctamente y se puede dar por terminado; de lo contrario, es necesario retornar a la primera etapa para reformular la estructura multicausal.

Teniendo un prototipo I que simula la DIT, se procede a construir un prototipo II cuyo propósito es la formulación de políticas que permitan intervenir la DIT en escenarios con estrategias dirigidas a desincentivar el uso del vehículo privado. Esto requiere una nueva revisión bibliográfica para identificar políticas de transporte que puedan ser implementadas en el prototipo II para lidiar con la DIT. Además, como muestra la Figura 1 los prototipos I y II están conectados bidireccionalmente; esto significa que si durante la identificación de políticas se requiere hacer ajustes al prototipo inicial para facilitar la implementación de ellas, tal labor pueda realizarse sin inconveniente alguno.

Habiendo concluido la etapa “2” de la metodología se abre paso a la etapa final donde se materializa una interfaz software que opere el prototipo II del modelo dinámico-sistémico. Esto tiene como objetivo facilitar la experimentación simulada de la DIT por parte de usuarios cuyo campo de experticia no es el del modelado y la simulación con dinámica de sistemas. Así, la interfaz integrada al modelo de simulación representa un producto tecnológico donde dinámica de sistemas se integra con el desarrollo software para generar un útil que apoye la toma de decisiones frente a fenómenos complejos de movilidad, como es el caso de la demanda inducida de transporte.

Figura 2. Metodología de desarrollo evolutivo.



La ejecución de la etapa “3” está orientada por una metodología de desarrollo evolutiva para la construcción de la interfaz (ver Figura 2). Inicialmente, se especifican cuáles son las variables dependientes e independientes que deben ser incluidas en la interfaz a partir del producto de la etapa “2” (prototipo II); de esta forma, se procede a desarrollar una versión inicial de la interfaz. Posteriormente, se contempla el diseño y el refinamiento de la versión inicial durante un determinado número de ciclos hasta obtener un producto adecuado a las necesidades del usuario; obteniendo el producto final de este trabajo de maestría asociado al tercer objetivo específico planteado.

3. DEMANDA INDUCIDA DE TRANSPORTE - Revisión bibliográfica No. 1

Esta primera revisión bibliográfica tuvo como propósito identificar el estado del arte existente acerca de demanda inducida de transporte (DIT), y a partir de él construir una estructura multicausal de este fenómeno. Para ello se identificó y consultó bibliografía que aborde la DIT tanto desde un enfoque econométrico como sistémico. Lo anterior debido a que trabajos realizados bajo un enfoque econométrico permiten conocer el fundamento teórico de DIT y qué modelos han sido utilizados para corroborar su existencia; mientras que la revisión de trabajos con enfoques sistémicos permite identificar que aportes se han realizado desde el paradigma del pensamiento sistémico en la comprensión estructural de DIT.

Las palabras clave seleccionadas para esta revisión bibliográfica fueron: demanda inducida de transporte, econometría, dinámica de sistemas, congestión vial y toma de decisiones públicas; mientras que los recursos electrónicos usados para la consulta de material bibliográfico son: ISI Web of Science, ScienceDirect, Springer, Google Academic, Sci-Hub y la base de datos aplicada del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). Los criterios de búsqueda a partir de los cuales se decidió leer o no material bibliográfico recopilado fueron:

a) Afinidad con el objeto de estudio de este trabajo de investigación: demanda inducida de transporte.

b) Año de publicación. Para este criterio de búsqueda se definieron dos intervalos de tiempo:

- Material bibliográfico publicado entre 1990 y 2005: los trabajos recopilados en este lapso de tiempo son pertinentes para la conceptualización y entendimiento por parte del investigador a cerca de DIT; ya que es en este

periodo de tiempo cuando la comunidad académica formalmente realiza esfuerzos por cuantificar y corroborar mediante modelos econométricos la existencia de DIT (Ladd, 2012).

- Material bibliográfico publicado entre 2006 y 2015: producción académica seleccionada para este intervalo de tiempo permite discutir los aportes contemporáneos en la temática bajo estudio.

Definidas las palabras claves, los recursos electrónicos a utilizar y los periodos de tiempo para delimitar la revisión, las expresiones de lenguaje de consulta o “queries” utilizadas en la búsqueda de material bibliográfico fueron:

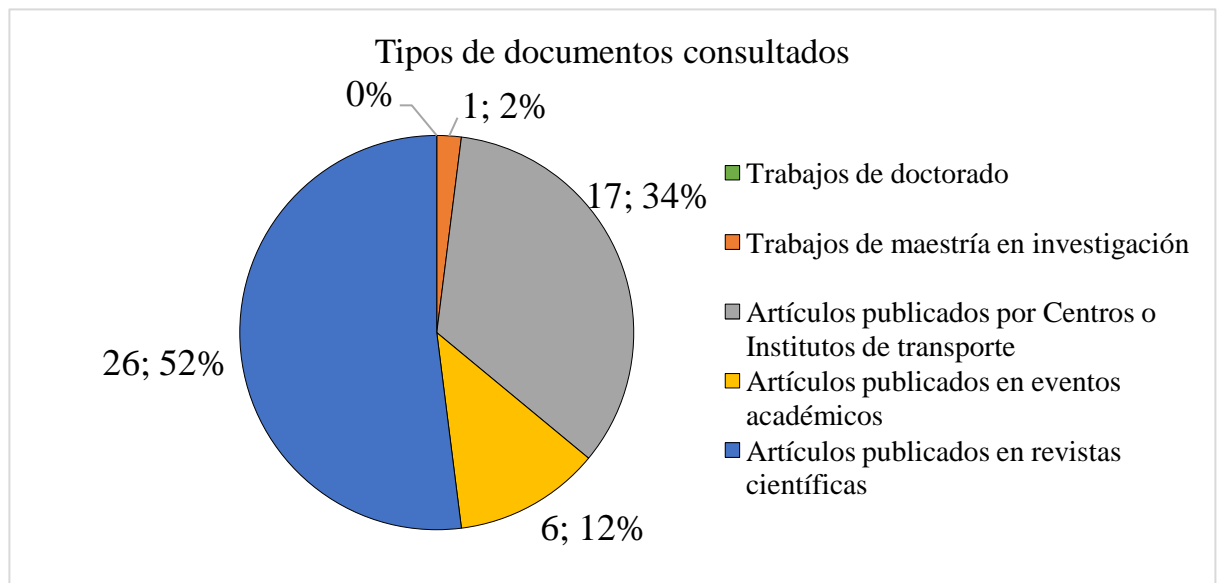
Tabla 1. Expresiones de lenguaje de consulta para la revisión bibliográfica No. 1

<i>Consulta en español</i>	<i>Consulta en ingles</i>
Demanda inducida de transporte	Induced travel demand
Demanda inducida de transporte Y Econometría	Induced travel demand AND Econometrics
Demanda Inducida de transporte Y Dinámica de sistemas	Induced travel demand AND System dynamics
Demanda Inducida de transporte Y Congestión vial	Induced travel demand AND Traffic congestion
Demanda Inducida de transporte Y Toma de decisiones públicas	Induced travel demand AND Public making-decision process
Demanda Inducida de transporte Y (Econometría O Dinámica de Sistemas)	Induced travel demand AND (Econometrics OR System dynamics)
Demanda Inducida de transporte Y (Congestión vial O Toma de decisiones públicas)	Induced travel demand AND (Traffic congestion OR Public making-decision process)

Utilizando las expresiones lógicas de la Tabla 1 junto con los criterios de búsqueda para la selección de material bibliográfico, se identificaron y consultaron 50 referencias bibliográficas entre 1992 y 2015 caracterizadas en la Gráfica 1 por tipo de documento. Esta gráfica muestra que tan solo se encontró un trabajo de

maestría, correspondiente al 2% de las 50 referencias consultadas, que aborda la DIT (Twitchett, 2013). En tal trabajo el autor se centra en cuantificar la DIT, utilizando modelos econométricos, dentro de 45 corredores viales en Dinamarca para estimar sus efectos potenciales sobre el tráfico; sin embargo, no se encontraron trabajos a nivel doctoral donde el objeto de estudio la DIT. Acorde a la Gráfica 1 el 52% de los documentos consultados, 26 referencias bibliográficas, corresponden a artículos publicados en revistas académico-científicas; mientras que el 34% son artículos publicados por centros o institutos de transporte. Finalmente, el 12% de las referencias son trabajos divulgados en eventos académicos.

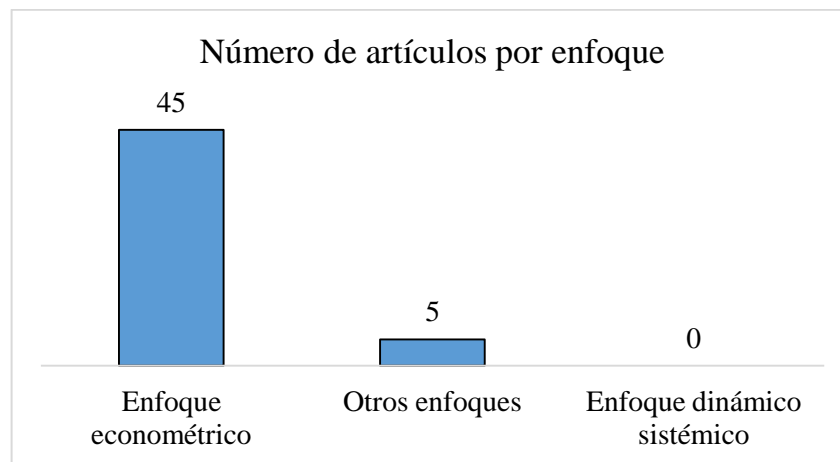
Gráfica 1. Referencias bibliográficas clasificadas por tipo de documento – Revisión No. 1



La Gráfica 2 muestra las 50 referencias bibliográficas clasificadas por enfoque bajo el cual fueron desarrolladas, teniendo en cuenta que por enfoque hacemos alusión al cuerpo de conocimiento pre-existente o marco de referencia utilizado para abordar un problema de investigación. 45 de los documentos consultados

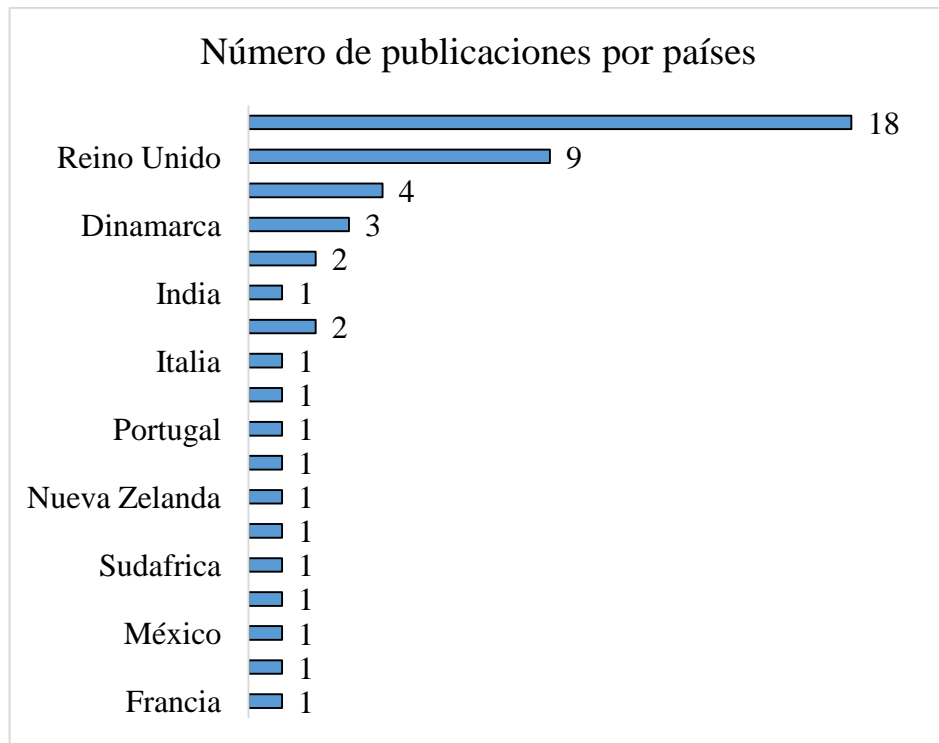
abordaron la DIT utilizando un enfoque econométrico, mientras que las cinco referencias restantes fueron elaboradas utilizando métodos cualitativos y de matemática aplicada. Es importante resaltar que al momento de realizar esta revisión bibliográfica no se encontró ningún trabajo que utilizara dinámica de sistemas (DS) para representar, explicar estructuralmente y simular la DIT. Con lo cual, plantear una estructura multicausal realimentada y un modelo de simulación con DS para abordar este fenómeno, es un aporte pertinente para mejorar su comprensión tomando como punto de partida resultados previos alcanzados por trabajos econométricos.

Gráfica 2. Referencias bibliográficas clasificadas por enfoque utilizado para abordar la DIT - Revisión No. 1



Seguidamente la Gráfica 3 clasifica las 50 referencias bibliográficas según su país de publicación. En esta gráfica se observa que los lugares con mayor número de publicaciones en la temática de DIT son países desarrollados. De igual forma, se observa que tal solo un trabajo en México discute este fenómeno; con lo cual, se puede inferir que a la fecha no ha habido una apropiación a nivel latinoamericano ni nacional del conocimiento alcanzado internacionalmente acerca de DIT.

Gráfica 3. Referencias bibliográficas clasificadas por país de publicación - Revisión No. 1



Finalmente, para cada una de las 50 referencias consultadas se realizó una ficha informativa con el formato que se observa en la Gráfica 4. Esto con el propósito de extraer los detalles más relevantes de cada documento y además, identificar los aportes que cada uno de ellos hace al presente trabajo de maestría. El detalle de esta tabla de revisión bibliográfica con las 50 referencias bibliográficas consultadas puede ser consultado en: https://dl.dropboxusercontent.com/u/85829023/FichaInformativa_Revision_No_1.pdf

Gráfica 4. Formato tabla de revisión bibliográfica No. 1

Tabla de revisión bibliográfica No. 1: 50 documentos consultados entre 1992 y 2015				
Referencia	Enfoque	Método	Demanda inducida de transporte abordada de forma implícita o explícita	Aporte a este trabajo de maestría.

Habiendo caracterizado los resultados de la revisión bibliográfica No. 1, a continuación se presenta una síntesis teórica de ellos que sirve como base conceptual para la construcción de la estructura multicausal que explique la DIT tal como lo menciona la etapa “1” de la metodología planteada en la sección **2. METODOLOGÍA.**

3.1 Conceptos y definiciones

La mayoría de debates acerca de demanda inducida de transporte (DIT) y sus implicaciones en la congestión vial han sido promovidos debido a desacuerdos en cómo se define este fenómeno. Gorchman (2009) plantea una definición básica: la DIT es un fenómeno natural que ocurre cuando la población que se desplaza en vehículos privados responde a beneficios provenientes de nuevas vías, tales como mayores velocidades de desplazamiento y menores tiempos de viaje. Esto indica entonces que la DIT es cualquier incremento en la cantidad de viaje debido a mejoras en las condiciones de desplazamiento. Sin embargo, la definición de interés para este trabajo de maestría es la proporcionada por Noland (2000): cambios en la infraestructura vial disponible medida como kilómetros lineales construidos resulta en incrementos a corto y mediano plazo, en el número de kilómetros recorridos por la población. Lo anterior se justifica debido a que ha sido

la relación entre kilómetros de vías y kilómetros recorridos la que ha orientado el desarrollo de trabajos econométricos para abordar la DIT.

Las manifestaciones de la DIT son diversas y cambian a través del tiempo. A corto plazo, reducir los tiempos de viaje a partir de nuevas vías modifica las horas de desplazamiento de la población que tiende a movilizarse nuevamente en las horas pico, y además, hay cambios de modos de transporte alternativo hacia el vehículo privado. Efectos a mediano plazo corresponden a cambios en la duración de los desplazamientos, modificaciones en los destinos de viaje, aumento en las frecuencias de viaje e incrementos del parque automotor. A largo plazo los efectos incluyen modificaciones en la elección de vivienda y las actividades de trabajo de la población debido a mejoras en la accesibilidad proveídas por nuevas vías. Litman (2015b) hace un resumen de estas manifestaciones clasificándolas según el lapso de tiempo necesario para que ellas ocurran; además, menciona sus impactos en la cantidad de transporte demandado. Una adaptación de dicha recopilación puede ser observada en la Tabla 2.

Tabla 2. Manifestaciones de la demanda inducida de transporte por construcción vial

Efectos de la demanda inducida de transporte	Lapso de tiempo para su manifestación	Impacto en la cantidad de viaje
Más viajes realizados por la población.	A corto plazo	Incremento
Aumento en el parque automotor de vehículos privados como medio de transporte predominante.	A largo plazo	Incremento
Destinos de viaje más lejos.	A medio y largo plazo	Incremento
Modificaciones en las horas de viaje.	A corto plazo	Incremento
Cambio de medios alternativos de transporte hacia vehículos privados	A corto plazo	Incremento

Complementando la organización de las manifestaciones en la Tabla 2, Gorchman (2009) plantea una clasificación en efectos directos e indirectos de la demanda inducida de transporte:

- Demanda inducida directa: esta categoría hace alusión a decisiones conscientes por parte de los conductores para tomar partida de los beneficios reales o percibidos a causa de nuevas vías. De esta forma, la cantidad general de viajes incrementa.
- Demanda inducida indirecta: esta categoría hace alusión a incrementos en las actividades de transporte que no podrían ocurrir si la construcción de nuevas vías no se realizara. Sin embargo, tales incrementos no son el resultado de decisiones conscientes realizadas por conductores en respuesta a mejoras reales o percibidas a causa de construcción vial. Los incrementos mencionados por Gorchman corresponden a incrementos en la posesión de vehículos privados (incrementos del crecimiento normal del parque automotor) y cambios en la ubicación residencial de las personas.

En consecuencia, manifestaciones instantáneas a corto, mediano y largo plazo de la DIT conducen a que se genere mayor uso del vehículo privado como medio predominante para movilizarse. Esto a su vez influencia que más kilómetros sean recorridos a medida que haya mayor infraestructura vial disponible; y así, es evidente que la política de construcción vial para lidiar con la congestión conduce a mayores flujos vehiculares que generan un nuevo estado de congestión vial. De esta forma, los beneficios en velocidades de desplazamiento y tiempos de viaje, alcanzados inicialmente con nuevas vías, se pierden progresivamente a medida que la DIT se manifiesta.

3.2 Estudios empíricos y verificación de la teoría

Una cantidad considerable de investigaciones han surgido durante las dos últimas décadas enfocadas a verificar la existencia de la DIT y cuantificar la magnitud de la misma. Tales desarrollos se han realizado mediante modelos econométricos que a partir de datos empíricos, tales como series de tiempo y datos transversales, cuantifican la influencia que construir nuevas vías tiene sobre los kilómetros recorridos por la población mediante la medida de elasticidad (Rodier, 2004).

Acorde a la literatura consultada los resultados de dichas elasticidades varían dependiendo del contexto en donde se han desarrollado los estudios (Handy, 2014). Esto posiblemente se debe a que las condiciones de movilidad varían de un contexto urbano a otro, con lo cual la magnitud de la demanda inducida pueden variar en función de la población, la red vial disponible, el parque automotor, entre otros factores. La Tabla 3 resume algunos resultados alcanzados en trabajos que han cuantificado la DIT en los últimos años; y adicionalmente, la

Tabla 4 muestra modelos y métodos usados para cuantificar este fenómeno.

Tabla 3. Estimaciones de elasticidades reportadas en la literatura para cuantificar la DIT

Referencia	Ubicación estudio	Resultados	
		$Elasticidad = \frac{Kilómetros\ recorridos}{Kilómetros\ construidos}$	Periodo de tiempo
(He y Zhao, 2014)	China	(0.026-0.274) y (0.367-0.773)	Corto y largo plazo
(Concas, 2013)	EE.UU	0.041 y 0.237	Corto y largo plazo
(Shengchuan, 2012)	China	0.185 y 0.436	Corto y largo plazo
(Duranton y Turner, 2011)	EE.UU	1.3	Largo plazo (10 años)
(Özuysal y Tanyel, 2008)	Turquía	(0.05-0.15) y (0.2 y 0.4)	Corto y largo plazo
(Cervero, 2003)	EE.UU	0.10 y 0.39	Corto y largo plazo

(Cervero y Hansen, 2002)	EE.UU	0.59 y 0.79	Corto y mediano plazo
(Noland, 2001)	EE.UU	(0.30-0.60) y (0.70-1.00)	Corto y largo plazo
(Noland y Cowart, 2000)	EE.UU	0.28 y 0.90	Corto y largo plazo

Tabla 4. Modelos y técnicas utilizadas para medir y cuantificar la DIT

Modelo	Referencias	Descripción modelo
Modelo basado en elasticidades (Elasticity-based model)	(Ponnu et al., 2014), (He y Zhao, 2014), (Concas, 2013), (Litman, 2012), (Næss et al., 2012), (Shengchuan, 2012), (Duranton y Turner, 2011), (Özuysal y Tanyel, 2008), (Rodier, 2004), (Cervero, 2002), (Pickerel, 2001), (Goodwin, 1992)	Modelo que calcula elasticidades a partir de series de tiempo o datos transversales para pronosticar valores futuros basados en la permanencia de condiciones pasadas reportadas
Modelo "Distributed lag"	(He y Zhao, 2014), (Hansen, 1995)	Modelo para datos de series de tiempo donde una ecuación de regresión lineal es utilizada para predecir valores actuales de variables dependientes basándose en valores actuales y pasados de la variable independiente.
Modelo de efectos fijos (Fixed-effect model)	(He y Zhao, 2014)	Modelo estadístico que representa las cantidades observadas en las variables explicativas como cantidades no-aleatorias para predecir valores futuros a partir de ecuaciones de regresión lineal.
Regresión por mínimos cuadrados en dos fases	(Fulton et al. 2000), (Noland y Cowart, 2000)	Modelo de regresión lineal que utiliza variables instrumentales que no estén correlacionadas con los términos de error para calcular los valores estimados de los predictores problemáticos (en la primera fase). Posteriormente, utiliza dichos valores calculados para estimar un modelo de regresión lineal para la variable dependiente (la segunda fase).
Regresión por mínimos cuadrados en tres fases	(He y Zhao, 2014), (Hymel et al., 2010)	Modelo que consiste en estimar cada una de las ecuaciones del método de mínimos cuadrados de dos etapas. Posteriormente, calcular los residuos para estimar la matriz de varianzas y covarianzas. Finalmente, se aplica mínimos cuadrados generalizados al modelo completo.
Regresión lineal	(Concas, 2013), (Góngora, 2012), (Litman, 2012), (Pagliara y Preston, 2012), (Su, 2011),	Modelo para pronósticos que permite hallar el valor esperado de una variable dependiente cuando una

	(Duranton y Turner, 2011), (Hymel et al., 2010), (Viegas y Martins, 2010), (Özuysal y Tanyel, 2008), (Cervero, 2002), (Noland, 2001), (Strathman et al., 2000), (Cervero y Hansen, 2000)	variable independiente toma un valor específico. La aplicación de este método implica un supuesto de linealidad cuando la demanda presenta un comportamiento creciente o decreciente, por tal razón, se hace indispensable que previo a la selección de este método exista un análisis que determine la intensidad de las relaciones entre las variables que componen el modelo.
Análisis de corredores por conteo manual de vehículos	(Twitchett, 2013)	Modelo de conteo manual donde se seleccionan tramos de vías a partir de los cuales se cuantifican flujos vehiculares. Estos datos se comparan con conteos realizados previamente a la expansión vial para inferir que tanto tráfico ha sido inducido.
Modelo de Vectores Auto-Regresivos (VAR)	(Melo et a., 2012)	Los modelos VAR son modelos que relacionan entre sí varias variables (n variables), y en los que el valor que toma cada una de ellas en un período de tiempo se relaciona con los valores que toma esa misma variable y todas las demás variables en períodos anteriores.
Método de los momentos generalizados (Generalized method of moments)	(Gonzales y Marrero, 2011)	Modelo para la estimación de parámetros de una ecuación de regresión desarrollada como una extensión del método de momentos. Su aplicación es recomendada cuando hay sospechosa de problemas de endogeneidad entre las variables explicativas del modelo.
Modelo de ecuaciones simultáneas	(Cervero y Hansen, 2002)	Modelo estadístico caracterizado por un conjunto de ecuaciones lineales, utilizado para encontrar valores de parámetros que se encuentran correlacionados y que suceden paralelamente, por ejemplo, en las estimaciones de la oferta y la demanda.
Análisis de camino (Path analysis)	(Cervero, 2003), (Cervero y Hansen, 2002), (Cervero, 2001)	Modelo que consiste en un análisis de regresión múltiple utilizado para inferir estadísticamente dependencias causales o prioridades entre variables.
Regresión hedónica	(Boarnet y Chalermpong, 2002)	Método para discernir la mejor opción posible sobre la base del comportamiento del consumidor. Se basa en la descomposición de un bien económico en sus características más importantes y en el análisis de la contribución al valor agregado de cada una de tales características.

Modelos VisSIM	(Stathopoulos y Noland, 2002)	Modelos desarrollados con la herramienta software VisSIM para la simulación microscópica y multimodal.
----------------	-------------------------------	--

Con los modelos y técnicas econométricas revisados hasta el momento se observa una ausencia de modelos descriptivos que expliquen la complejidad estructural subyacente al fenómeno de la DIT. Aunque el aspecto de la causalidad ha sido tratado mediante el uso de variables instrumentales en regresiones lineales múltiples y mínimos cuadrados de dos y tres etapas (Hymel et al., 2010; Fulton et al., 2000; Noland y Cowart, 2000), junto con test de causalidad de Granger (Melto et al., 2012; Özuysal y Tanyel, 2008; Cervero y Hansen, 2002; Cervero y Hansen, 2000), estas estrategias no logran representar la no linealidad, realimentación y presencia de retardos como características de los fenómenos sociales de movilidad dentro de los cuales se encuentra la DIT.

4. REPRESENTACIÓN DINÁMICO-SISTÉMICA DE LA DIT - Prototipo I

Habiendo realizado la revisión bibliográfica acerca de demanda inducida de transporte (DIT), en esta sección se expone el primer prototipo del modelo dinámico-sistémico cuyo propósito es proveer una explicación dinámica y realimentada de la DIT como fenómeno emergente entre construcción de vías y demanda motorizada de transporte. Este prototipo es presentado en cada uno de los cinco lenguajes especificados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de la sección 2; además, en la verbalización del sistema se expone un contexto urbano con características de movilidad particulares utilizadas para calibrar los parámetros del modelo que permitan la simulación matemática, y se especifican los límites del prototipo.

Verbalización del sistema

El Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) localizada en el departamento de Santander, Colombia, tiene una población estimada de 1,113,522 personas, y está compuesta por cuatro ciudades: Bucaramanga, Floridablanca, San Juan de Girón y Piedecuesta. Estas ciudades están conectadas geográfica y comercialmente, por lo cual el transporte es elemento fundamental que influencia la forma cómo las personas realizan sus actividades diarias a lo largo del AMB.

El parque automotor del AMB está constituido principalmente de vehículos privados que representan el 38% del total de la flota automotor. Además, se reporta una tasa de motorización de 442 vehículos por cada 1,000 personas (Observatorio Metropolitano de Bucaramanga, 2014), mientras que la oferta vial está constituida aproximadamente de 1,300 kilómetros de vías disponibles (Secretaría de Infraestructura de Bucaramanga, 2011). Actualmente, varias obras

viales se encuentran en marcha en el AMB como política que busca mejorar la movilidad, la cual en función del parque automotor existente y la capacidad vial instalada, se puede considerar congestionada.

Teniendo en cuenta que el prototipo I se centra exclusivamente en proveer una representación sistémica de porqué la construcción vial induce demanda de transporte motorizada que genera nueva congestión, sus límites son:

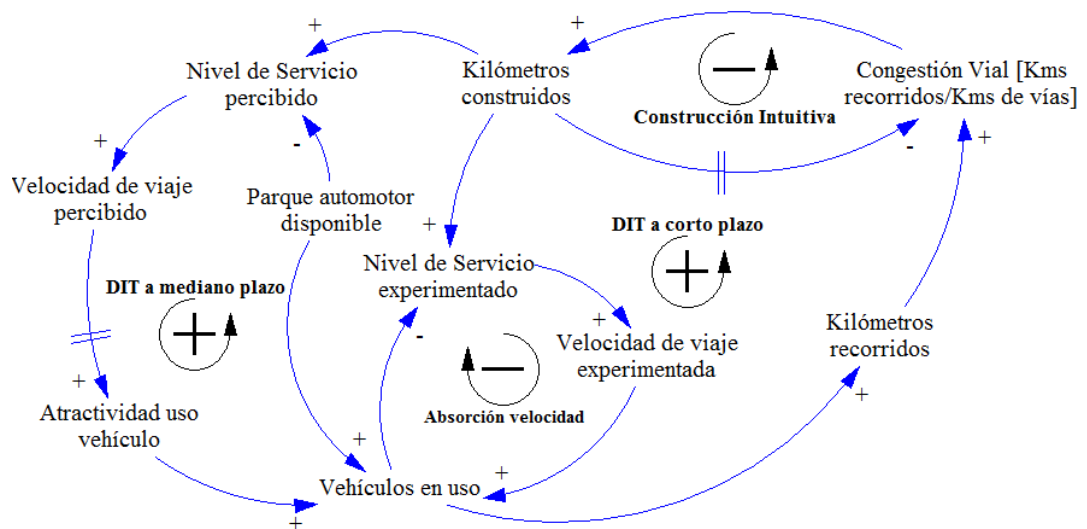
- No se tienen en cuenta medios alternativos de transporte ni transporte informal.
- El beneficio proveído por nuevas vías que induce más demanda motorizada es la velocidad de viaje.
- La totalidad de infraestructura vial se asume como vías de dos carriles que soportan un flujo promedio de 3,200 vehículos por hora viajando a una velocidad de servicio promedio de 60 kilómetros/hora.
- La escala de tiempo de las simulaciones es anual; por lo tanto, la congestión observada en cada año corresponde a un promedio característico de dicho horario. Además, no se consideran variaciones de tráfico características de la escala temporal diaria donde se observan horas valle y horas pico.
- Se asume una distribución uniforme de los vehículos en la infraestructura vial.
- No se considera la restricción de pico y placa
- El incremento del parque automotor está determinado por la tasa de motorización y no se consideran factores socio-económicos que puede influenciar incrementos del parque automotor.

Diagrama de influencias general

A partir de la revisión bibliográfica No. 1 la estructura multicausal que este trabajo de investigación propone como explicación dinámico-sistémica de la DIT, producto de la etapa “1” de la metodología, puede ser observada en la Figura 3 junto con una breve descripción para cada una de sus variables.

Acorde a la Figura 3 hay dos tipos de condiciones de viaje en las vías: condiciones percibidas y condiciones experimentadas. Las condiciones percibidas se calculan a partir de la capacidad vial en condiciones de flujo vehicular promedio y el parque automotor disponible, el cual incluye tanto vehículos en uso como vehículos que no están siendo usados debido a la congestión vial. Por otra parte, las condiciones experimentadas corresponden al nivel de servicio real en las vías que se determina a partir de la capacidad vehicular ofrecida por la malla vial y los vehículos que únicamente están en uso.

Figura 3. Estructura multicausal de la DIT



Cada una de las variables en la Figura 4 es descrita a continuación:

- Kilómetros construidos: esta variable corresponde a la infraestructura vial disponible expresada en kilómetros lineales.
- Congestión: variable que representa el estado de la movilidad en las vías mediante un índice entre los kilómetros recorridos por los vehículos en uso y los kilómetros de vías disponibles. Este índice puede tomar valores entre 0 y 1. Valores cerca de 0 representan una movilidad descongestionada; mientras que valores aproximados a 1 representan congestión vial.
- Parque automotor disponible: representa un promedio del número de vehículos existente. El incremento de este parque automotor en el tiempo está determinado por una tasa de motorización de 442 vehículos por cada 1,000 personas. Sin embargo, es importante resaltar que este crecimiento no está influenciado por condiciones económicas ni sociales que también pueden influenciar incrementos en el número de vehículos.
- Nivel de servicio percibido: esta variable representa las condiciones potenciales de movilidad en las vías que cambian en función de un índice adimensional entre el parque automotor disponible y el número de vehículos que las vías disponibles pueden mantener a un flujo promedio de 3,200 vehículos por hora con una velocidad de servicio promedio de 60 kilómetros/hora. La escala de este índice adimensional tiene seis valores discretos que varían desde A hasta F tal lo muestra la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, y que están asociados a un rango de velocidades.
- Velocidad de viaje percibida: corresponde a la velocidad de viaje potencial a la cual los vehículos podrían desplazarse dependiendo del nivel de servicio percibido.
- Atractividad uso vehículo: esta variable representa la satisfacción de las personas con respecto a las condiciones de viaje percibidas que aumentan o disminuyen el número de vehículos en uso.

- Vehículos en uso: variable que representa el número de vehículos que del parque automotor disponible está viajando en la infraestructura vial disponible.
- Nivel de servicio experimentado: nivel de servicio utilizado para evaluar las condiciones de flujo vehicular reales en la infraestructura vial. Tales condiciones varían a partir de un índice adimensional entre los vehículos en uso y los vehículos que las vías disponibles pueden mantener a un flujo promedio de 3,200 vehículos por hora con una velocidad de servicio promedio de 60 kilómetros/hora. La escala de este índice adimensional tiene seis valores discretos que pueden ser observados en la **¡Error! No se encuentra el origen e la referencia..**
- Velocidad de viaje experimentada: velocidad de viaje a la cual los vehículos en uso están viajando en la infraestructura vial disponible.
- Kilómetros recorridos: variable que representa el total de kilómetros recorridos por los vehículos en uso.

Tabla 5. Velocidades de viaje para los niveles de servicio percibido y experimentado.

Nivel de servicio	Condiciones de operación	Factor de carga	Velocidad de viaje promedio
A	Usuarios individuales no están afectados por el flujo vehicular. Hay elevada libertad para elegir la velocidad de viaje.	0.00 to 0.60	70 km/h > 50 km/h
B	Flujo vehicular estable, pero el elevado número de vehículos empieza a ser considerable.	0.61 to 0.70	49 km/h > 40 km/h
C	Flujo vehicular estable, pero la libertad de elegir la velocidad de viaje comienza a ser difícil.	0.71 to 0.80	39 km/h > 36 km/h
D	Flujo vehicular altamente denso	0.81 to 0.90	<

	pero estable. Velocidades de viaje restringidas.		
E	Velocidades de viaje reducidas.	0.91 to 1.00	29 km/h > 26 km/h
F	Flujo vehicular interrumpido.	Mayor que 1.00	25 km/h

Fuente: Cerquera, Capacidad y niveles de servicio de la infraestructura vial. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2007

En la Figura 3 se observan cuatro ciclos de realimentación. Dos de ellos son ciclos de refuerzo, mientras que los otros dos son ciclos de balance. Cada uno de ellos es descrito a continuación:

- Ciclo “Construcción intuitiva”: este ciclo de realimentación negativa o de balance representa la toma de decisiones intuitiva en la cual más vías son construidas para reducir la congestión vial. Cuando la congestión incrementa, la política pública destina recursos económicos para construir más kilómetros de vías, y así, la congestión vehicular disminuye nuevamente.
- Ciclo “Absorción velocidad”: este ciclo de realimentación negativa o de balance muestra como las altas velocidades de viaje, beneficio inmediato de construir nuevas vías, son absorbidas por el uso intensivo del vehículo A medida que hay más vehículos en las vías, las condiciones de viaje disminuyen, lo cual resulta en bajas de velocidades de viaje. Bajas velocidades desincentivan el uso del vehículo privado hasta que nuevas vías son construidas para descongestionar la movilidad. Cuando nueva construcción vial es ejecutada, las altas velocidades de viaje aparecen nuevamente y el uso del vehículo privado incrementa una vez más.
- Ciclo “Demanda inducida a mediano plazo”: este ciclo de realimentación positiva o de refuerzo explica a través de influencias circulares el efecto de la demanda inducida de transporte a mediano plazo descrito en la sección **3.2 Estudios empíricos y verificación de la teoría**. Si más vías son construidas,

entonces el nivel de servicio percibido en las vías aumenta. Lo anterior conduce a que las velocidades de viaje percibidas también incrementen, lo cual aumenta la atractividad del vehículo privado como medio de transporte. En consecuencia, más vehículos del parque automotor disponible salen a las vías a circular, generando nuevo tráfico vehicular. Por lo tanto, la congestión incrementa debido a que ahora hay más vehículos en las vías, a lo cual la toma intuitiva de decisiones responde con nueva construcción vial.

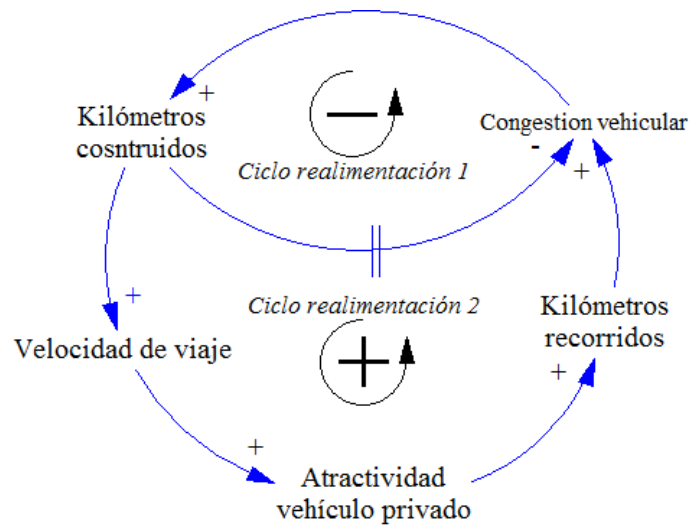
- Ciclo “Demanda inducida a corto plazo”: este ciclo de realimentación positiva explica a través de influencias cíclicas el efecto de la demanda inducida de transporte a corto plazo descrito en la sección **3.2 Estudios empíricos y verificación de la teoría**. En este ciclo cuando más kilómetros son construidos, se incrementa el nivel de servicio experimentado en las vías, lo cual se traduce en mayores velocidades de viaje; lo cual significa que las condiciones de flujo vehicular en las vías, para los vehículos circulando en ellas, mejoran. Mejores condiciones de viaje llevan a que los vehículos conduzcan distancias más largas y permanezcan más tiempo en las vías. Como resultado más kilómetros son recorridos, y la congestión vial vuelve a incrementar nuevamente. En consecuencia, nuevas vías son construidas para mitigar la nueva congestión vial.

Arquetipo de comportamiento

La hipótesis dinámica de la DIT descrita en la Figura 3 genera una estructura fundamental de comportamiento o arquetipo que se observa en la Figura 4. En ella se aprecia como la congestión vial es un “síntoma” de una problemática mayor de fondo que corresponde a la alta dependencia del vehículo privado como medio de transporte. El ciclo de realimentación negativa 1 muestra la solución a corto plazo de tal síntoma mediante construcción continua de vías. En este ciclo nuevas vías incrementan la velocidad de viaje y la movilidad es descongestionada. Sin embargo, a través del ciclo de realimentación positiva 2, el cual sintetiza los dos

ciclos de refuerzo de la Figura 4 que corresponden a los efectos a corto y mediano plazo de la DIT, mayores velocidades de desplazamiento incrementan la atraktividad del vehículo privado. Esto induce más kilómetros recorridos y así, la congestión vial aparece nuevamente.

Figura 4. Arquetipo de comportamiento de la DIT

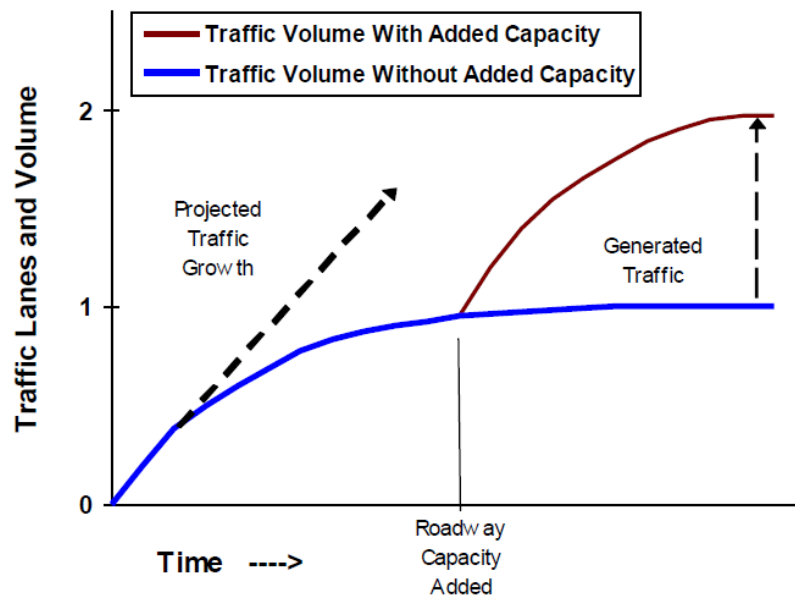


Modo de referencia

La estructura multicausal propuesta en la Figura 3 permite realizar un análisis cualitativo de las interacciones entre los cuatro ciclos de realimentación que la componen; a partir de ello, es posible discutir el comportamiento dinámico esperado de tal estructura expresada en el diagrama de flujos y niveles. Este patrón de referencia, conocido como modo de referencia (MR), permite validar el proceso el proceso de modelado y simulación hacia corroborando si los resultados cuantitativos alcanzados corresponden con el modo de referencia planteado (Ford, 1999).

El MR para la estructura multicausal de la DIT puede ser observado en la Figura 5. Este MR es propuesto por Litman (2015b), y representa la demanda inducida indirecta o a mediano plazo generada por la construcción de nuevas vías. Acorde al MR, el tráfico crece cuando la movilidad no está congestionada (línea de crecimiento del tráfico proyectado), pero tal crecimiento declina cuando la congestión aparece, tal como lo muestra la línea de tendencia azul. Esto significa que algunos vehículos del parque automotor disponible han dejado de recorrer la infraestructura vial disponible.

Figura 5. Modo referencia para la estructura realimentada de DIT propuesta en la Figura 4.



Fuente: Litman, Congestion evaluation best practices. 2015b

Si más vías fueran construidas, las condiciones percibidas mejorarían y en consecuencia, la atractividad del vehículo privado aumentaría. Por lo tanto, nuevos vehículos saldrían a las vías, y se generaría un tráfico mayor al visto previamente.

Este tráfico adicional es lo que Litman llama “tráfico generado” y puede observarse en la línea de tendencia roja en la Figura 5.

Diagrama de Flujos-Niveles y Ecuaciones matemáticas

La estructura multicausal de DIT ofrece una representación cualitativa útil para describir el comportamiento de este fenómeno en términos de su estructura. Sin embargo, la toma de decisiones requiere formular y probar políticas en el modelo para pensar acerca de sus efectos potenciales sobre la DIT. El diagrama de flujos y niveles es la representación matemática de la estructura multicausal usando un lenguaje gráfico de acumuladores y válvulas, el cual permite la simulación asistida por computador. El diagrama de flujos y niveles puede ser observado en la Figura 6, mientras que el tipo, unidades y fórmulas de este diagrama pueden ser consultadas en la

Tabla 5.

Figura 6. Diagrama de flujos y niveles prototipo I

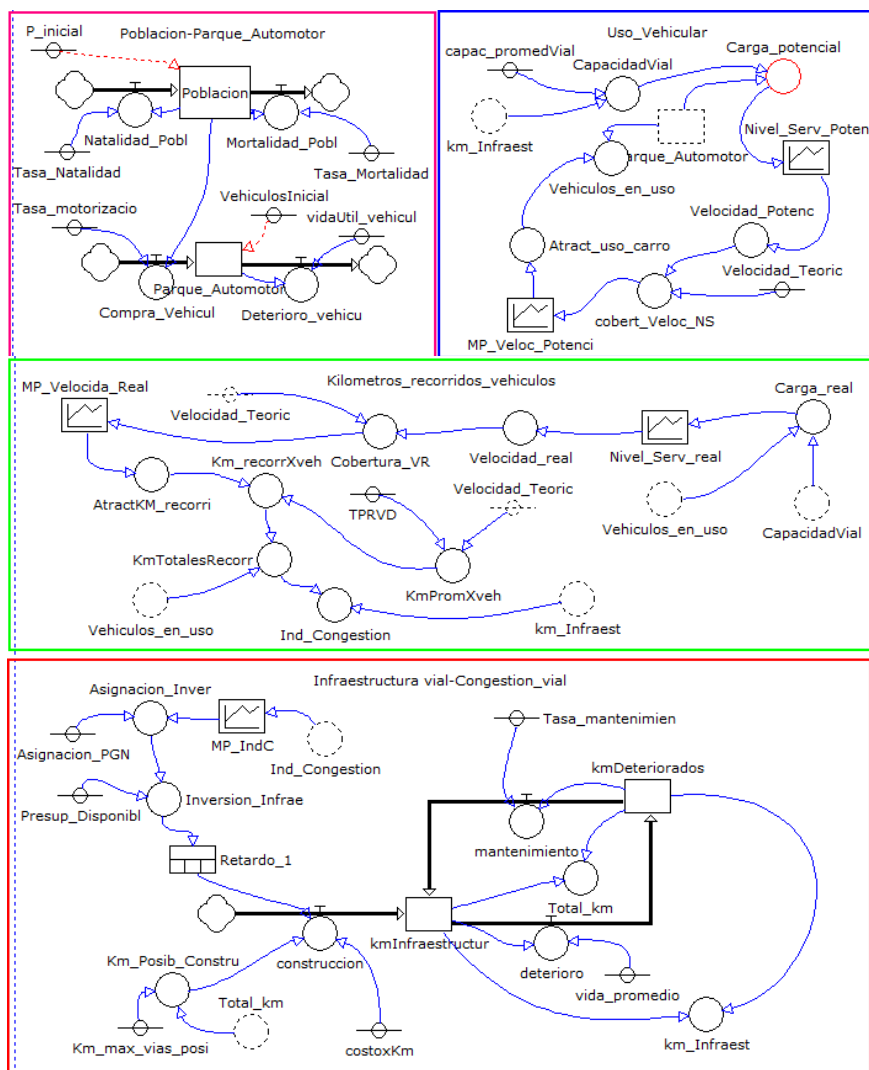


Tabla 5. Ecuaciones diagrama de flujos y niveles prototipo I

Tipo	Nombre variable	Unidades	Ecuación/Valor inicial
Niveles	Poblacion	Personas	P_inicial
	Vehiculos	Vehículos	VehiculosInicial
	kmDeteriorados	Kilómetros	0
	kmInfraestructur	Kilómetros	1319
Flujos	Compra_Vehicul	Vehículos/año	$Poblacion * Tasa_motorizacio$
	Deterioro_vehicu	Vehículos/año	$Vehiculos / vidaUtil_vehicul$
	Mortalidad_Pobl	Personas/año	$Poblacion * (Tasa_Mortalidad)$
	Natalidad_Pobl	Personas/año	$Tasa_Natalidad * Poblacion$

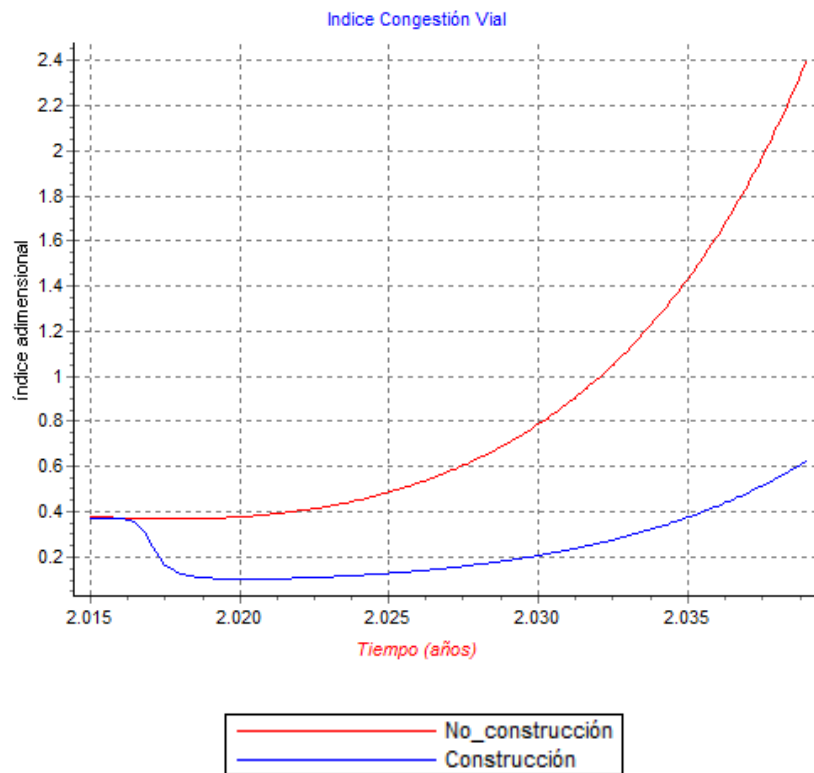
	PerdidaOXDensid	Kilometers/year	OxigenoDisuelto*EfectoDensidad
	construccion	Kilómetros/año	MIN(Km_Posib_Constru, (Retardo_1/costoxKm))
	deterioro	Kilómetros/año	kmInfraestructur/vida_promedio
	mantenimiento	Kilómetros/año	kmDeteriorados/Tasa_mantenimien
Parámetros	Asignacion_PGN	Fracción porcentual	1
	P_inicial	Personas	1113522
	Presup_Disponibl	US dollars	510638297
	TPRVD	Horas	0.53
	Tasa_Mortalidad	Adimensional/año	0.0556
	Tasa_Natalidad	Adimensional/año	0.1911
	Tasa_mantenimien	Años	0.023
	Tasa_motorizacio	Vehículos/persona	0.023
	VehiculosInicial	Vehículos	492299
	Velocidad_Teoric	Kilómetros/hora	60
	capac_promedVial	Vehículos/kilómetro	53
	costoxKm	US dollars	1200
	vidaUtil_vehicul	1/año	12
	vida_promedio	Años	15
Variables Auxiliares	Asignacion_Inver	Fracción porcentual	MP_IndC*Asignacion_PGN
	AtractKM_recorri	Adimensional	MP_Velocida_Real
	Atract_uso_carro	Adimensional	MP_Veloc_Potenci
	CapacidadVial	Vehículos	(km_Infraest*capac_promedVial)
	Carga_potencial	Adimensional	Vehiculos/CapacidadVial
	Carga_real	Adimensional	Vehiculos_en_uso/CapacidadVial
	Cobertura_VR	Adimensional	Velocidad_real/Velocidad_Teoric
	Ind_Congestion	Adimensional	KmTotalesRecorr/km_Infraest)/5000
	Inversion_Infrae	US dollars	Presup_Disponibl*Asignacion_Inver
	KARV	Kilómetros	(TPRVD*Velocidad_Teoric)*356
	KDRV	Kilómetros/vehículo	KARV*AtractKM_recorri)/365
	KmTotalesRecorr	Kilómetros	(Vehiculos_en_uso*KDRV)
	Km_Posib_Constru	Kilómetros	IF(Km_max_vias_posi-Total_km<=0,0,Km_max_vias_posi-Total_km)
	Total_km	Kilómetros	kmDeteriorados+kmInfraestructur
	Vehiculos_en_uso	Vehículos	Parque_Automotor*Atract_uso_carro
	Velocidad_Potenc	Kilómetros/hora	Nivel_Serv_Poten
	Velocidad_real	Kilómetros/hora	Nivel_Serv_real
	km_Infraest	Kilómetros	(kmInfraestructur+(0.5*kmDeteriorados))
cobert_Veloc_NS	Adimensional	Velocidad_Potenc/Velocidad_Teoric	
Relaciones no lineales	MP_IndC	Adimensional	INTSPLINE(2,0,0.01,1,1,1,1,1,1,1,1,1.15,1.2,1.3,1.330416,1.483599,1.5,1.5,1.5)
	MP_Veloc_Potenci	Adimensional	INTLINEAL(2,0,0.1,1,1,0.9707317,0.9219512,0.7853659,0.595122,0.297561,0.1463415,0.06341463,0.02926829,0)
	MP_Velocida_Real	Adimensional	INTSPLINE(2,0,0.05,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.7,0.7,0.8,0.85,0.9,0.9,0.9,0.95,1,1.2,1.2,1.25,1.25,1.3,1.3,1.3,1.3,1.3,1.3)
	Nivel_Serv_Poten	Adimensional	INTSPLINE(2,0,0.01,70,70,67,60,57,55,50,48,36,30,25,25,25,25)
	Nivel_Serv_real	Adimensional	INTSPLINE(2,0,0.01,70,70,67,60,57,55,50,48,36,30,25,25,25,25)
Retardos	Retardo_1	Años	RETARDO(Inversion_Infrae,10,5,0)

Simulaciones

Habiendo formulado la estructura multicausal de la demanda inducida de transporte (DIT) con su respectivo diagrama de flujos y niveles, esta sección presenta los resultados de simulación sobre un horizonte de 25 años. Dichos resultados emergen de las relaciones dinámicas entre los cuatro ciclos de realimentación que conforman la estructura realimentada propuesta en la Figura 3.

Antes de llevar a cabo las simulaciones se asumió una movilidad congestionada a lo cual la política pública responde con nuevas vías; a partir de esta condición, se evaluaron dos escenarios: un escenario con construcción vial llamado “Construcción” para analizar como nuevas vías inducen mayor demanda de transporte motorizada, y un escenario sin construcción vial denominado “No_construcción” para mostrar el crecimiento normal de la demanda de transporte sin los efectos de la DIT. Estos escenarios hipotéticos son necesarios porque la DIT no puede ser evaluada simplemente observando cómo las condiciones actuales de tráfico evolucionan en el tiempo; en lugar de ello, la demanda de transporte se considera inducida si se logra mostrar que hay más demanda motorizada cuando nuevas vías son construidas (Gorham, 2009). Además, es importante aclarar que los escenarios de simulación no buscan alcanzar nivel de precisión alguno; por el contrario, intentan corroborar la forma en que la estructura realimentada genera los comportamientos o modos de referencia de DIT reportados en la literatura.

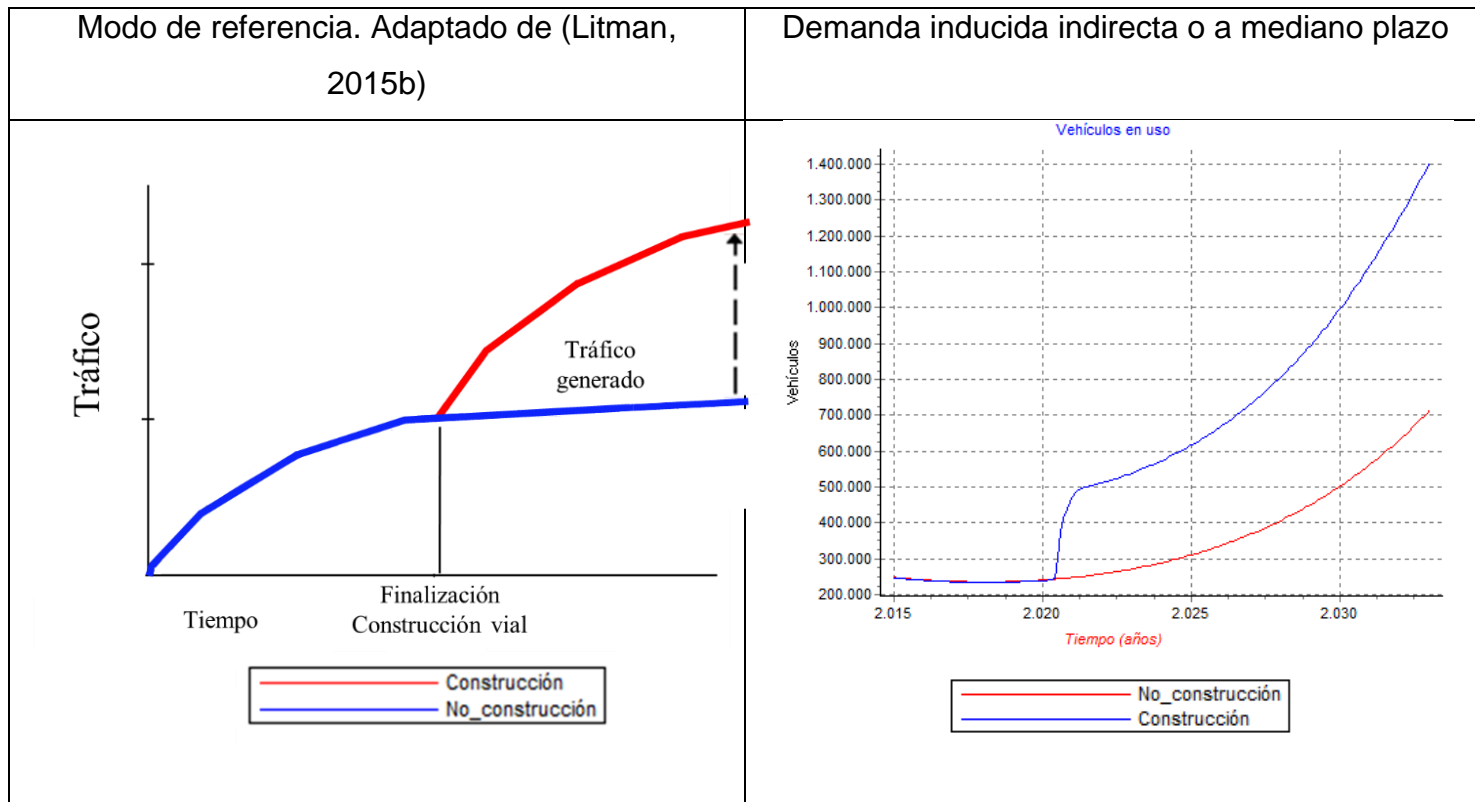
Gráfica 5. Índice de congestión vial – prototipo I



El índice de congestión vial (ICV) puede ser observado en la Gráfica 5. El eje Y es el cociente entre los kilómetros recorridos por vehículos en uso y kilómetros de vías. El escenario “Construcción” al inicio del horizonte de tiempo tiene valores elevados, cercanos a 0.4, para el ICV debido al tiempo de retardo necesario para finalizar la construcción de nuevas vías. Una vez finalizada la construcción vial los valores del ICV decrecen hasta valores cercanos de 0.1, y los resultados esperados de esta política se mantienen aproximadamente entre el año 2018 y 2025. Sin embargo, las consecuencias no deseadas de nuevas vías aparecen después de ese intervalo de tiempo. A corto y mediano plazo mayores velocidades de viaje aumentan la atraktividad del vehículo privado y en consecuencia, la movilidad se satura nuevamente, generando una congestión superior a la reportada inicialmente, tal como se observa sobre el final del horizonte de tiempo

del escenario “Construcción”. Para el caso del escenario “No_construcción”, los valores del ICV siempre tienden a incrementar durante los años de simulación debido a que la capacidad vial instalada inicial no es ampliada; y por lo tanto, no hay suficiente espacio vial para suplir el crecimiento del parque automotor.

Figura 7. Modo de referencia y demanda inducida a mediano plazo – prototipo I

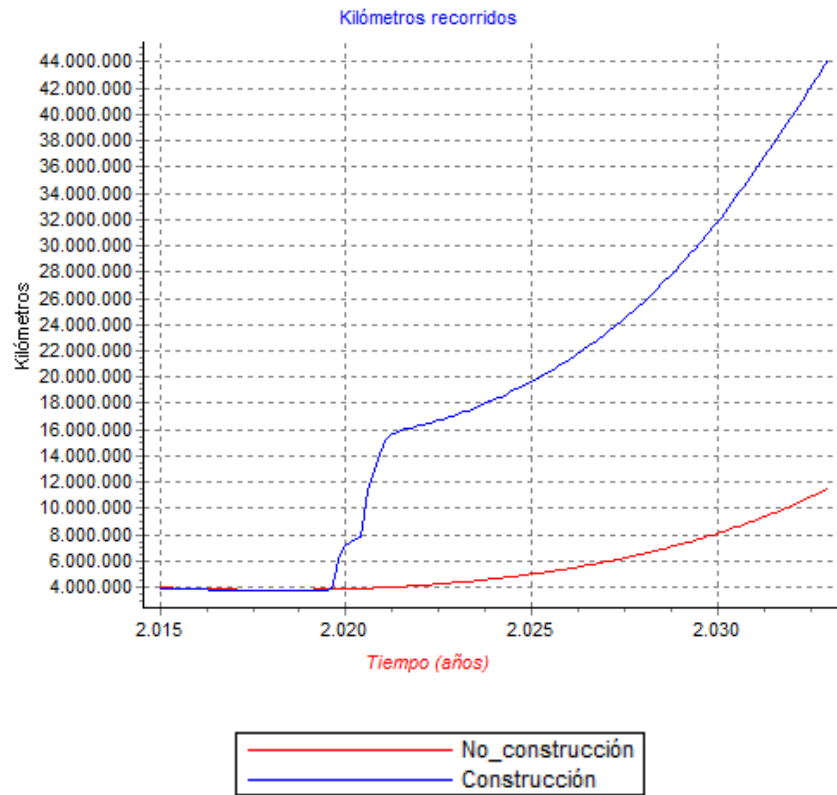


La nueva congestión de la movilidad observada en el escenario “Construcción” de la Gráfica 5 se debe a los dos efectos de la demanda inducida de transporte (DIT). A mediano plazo los vehículos del parque automotor que no se usaban debido a la congestión inicial, entre los años 2015 y 2020, son influenciados positivamente por mejores condiciones percibidas en las vías; de esta forma, la atractividad de

conducir vehículo privado aumenta, y dichos automóviles salen a desplazarse en las nuevas vías generando así tráfico adicional tal como lo muestra la línea de tendencia azul en la gráfica derecha de la Figura 7. Caso opuesto es el escenario “No_construcción” en esta misma gráfica donde la atraktividad del vehículo privado no es influenciada por altas velocidades provenientes de nuevas vías, y por lo tanto, el número de vehículos en uso es menor con respecto al escenario “Construcción”. Como se observa en la Figura 7 los resultados de simulación del prototipo I, que opera a partir de la estructura multicausal propuesta para la DIT, reproduce el modo de referencia observado en la parte izquierda de esta figura.

Más vehículos en las vías implica más kilómetros recorridos tal como se muestra en la Gráfica 6 para el escenario “Construcción”. Sin embargo, tal aumento ocurre previamente al año 2020 antes que se manifieste el efecto a mediano plazo de la DIT. Esto es debido a que nuevas vías mejoran las velocidades de viaje experimentadas, y por lo tanto los vehículos que desde un inicio del horizonte de tiempo están circulando en la infraestructura vial disponible son influenciados positivamente por dichas velocidades, lo cual genera el efecto a corto plazo de la DIT donde más kilómetros son recorridos por el parque automotor en uso. Para el caso del escenario “No_construcción” la tendencia al aumento de los kilómetros recorridos únicamente está influenciada por el crecimiento normal del parque automotor determinado por la tasa de motorización; ya que en este caso, no hay nueva infraestructura vial que induzca más demanda de transporte.

Gráfica 6. Kilómetros recorridos por demanda inducida directa o a corto plazo



5. PARADIGMAS DE TRANSPORTE Y ESTRATEGIAS DE GESTIÓN DE LA DEMANDA DE TRANSPORTE - Revisión bibliográfica No. 2

Como lo indica la etapa “1” de la metodología planteada, a partir de la revisión bibliográfica No. 1 los autores propusieron una estructura multicausal que explica de forma realimentada la demanda inducida de transporte (DIT). Esta estructura posteriormente fue expresada en un diagrama de flujos y niveles para realizar la simulación matemática de este fenómeno. Tanto la estructura mencionada como el diagrama de flujos y niveles constituyen el prototipo I del modelo dinámico-sistémico mencionado en la primera fase de la etapa “2” de la metodología.

El siguiente paso fue entonces construir un segundo prototipo que permita lidiar tanto con la DIT como con sus repercusiones sobre la congestión vial. Por lo tanto, la revisión bibliográfica No. 2 tuvo como propósito conocer los paradigmas de planificación en transporte que hoy en día son utilizados para alcanzar una movilidad descongestionada dentro de contextos urbanos. Así, fue posible identificar estrategias y políticas potenciales que incentiven medios alternativos de transporte y disminuyan el uso del vehículo privado para lidiar con la DIT.

Las palabras clave seleccionadas para esta segunda revisión bibliográfica fueron: demanda inducida de transporte, paradigmas de transporte, congestión vial, gestión de la demanda de transporte, transporte público y uso del vehículo privado. Los recursos electrónicos utilizados para la consulta de material bibliográfico son: ISI Web of Science, EBSCO HOST, Springer, ScienceDirect, Google Academic, Sci-Hub, IEEE Xplore Digital Library, EBSCO Discovery Service y ProQuest. Los criterios de búsqueda a partir de los cuales se decidió leer o no material bibliográfico fueron:

- a) Afinidad con el propósito establecido para la revisión bibliográfica No. 2
- b) Año de publicación: Material bibliográfico publicado entre 2002 y 2016 para identificar estrategias contemporáneas de mitigación de la DIT y la congestión vial.

Definidas las palabras claves, los recursos electrónicos a utilizar y los periodos de tiempo para delimitar la revisión, las expresiones de lenguaje de consulta o “queries” utilizadas en la búsqueda de material bibliográfico fueron:

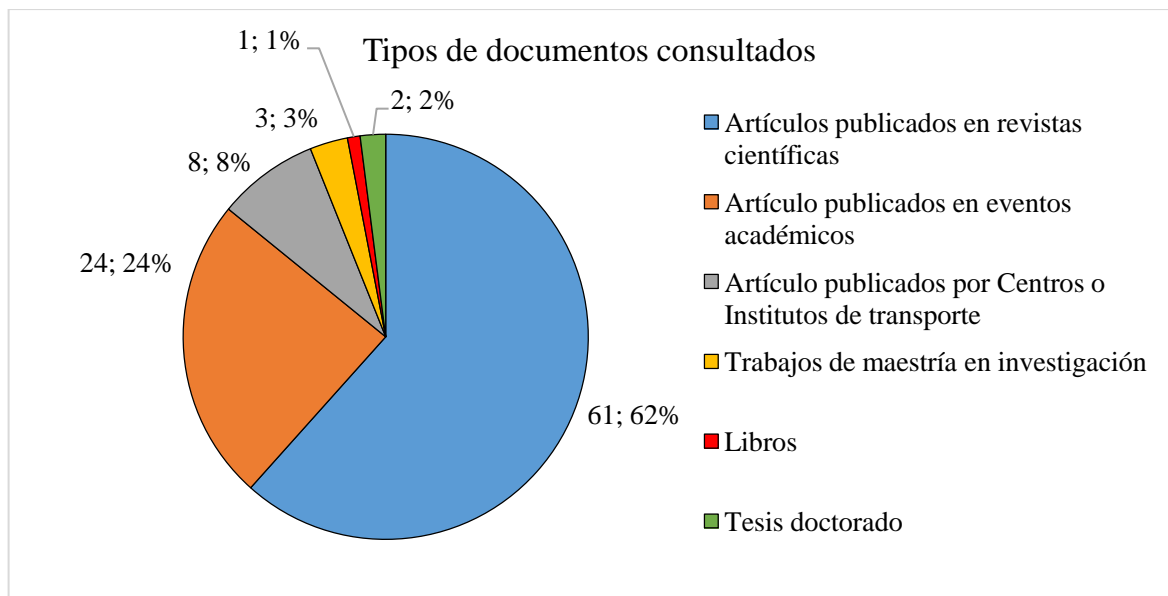
Tabla 6. Expresiones de lenguaje de consulta para la revisión bibliográfica No. 2

<i>Consulta en español</i>	<i>Consulta en ingles</i>
Demanda inducida de transporte Y Paradigmas de transporte	Induced travel demand AND Transportation planning paradigms
Congestión vial Y Paradigmas de transporte	Traffic congestion AND Transportation planning paradigms
(Demanda Inducida de transporte O Congestión vial) Y Paradigmas de transporte	(Induced travel demand OR Traffic congestion) AND Transportation planning paradigms
(Transporte público O Uso vehículo privado) Y (Congestión vial O Demanda inducida de transporte)	(Public transport OR Car use) AND (Traffic congestion OR Induced travel demand)
Demanda inducida de transporte Y gestión de la demanda de transporte	Induced travel demand AND Travel demand management
Congestión vial Y gestión de la demanda de transporte	Traffic congestion AND Travel demand management

Utilizando las expresiones lógicas de la Tabla 6 junto con los criterios de búsqueda para la selección de material bibliográfico, se identificaron y consultaron 99 referencias bibliográficas entre 2002 y 2016 caracterizadas en la Gráfica 7 por tipo de documento. Esta Gráfica muestra tres trabajos de maestría, 3% de las 99 referencias consultadas, donde dos de ellos utilizan dinámica de sistemas para evaluar políticas enfocadas a descongestionar la movilidad (Shiran, 2014; Wang, 2015). Sin embargo, estos trabajos no abordan la DIT ni sus implicaciones en la

congestión vial. Por otra parte, la mayoría de referencias consultadas, 61 trabajos que equivalen al 62%, son artículos publicados en revistas científico-académicas; mientras que el 24% son trabajos presentados en eventos académicos. Finalmente, el 8% corresponde a trabajos publicados por Centros o Institutos de transporte, 2% son tesis doctorales y el 1% libros.

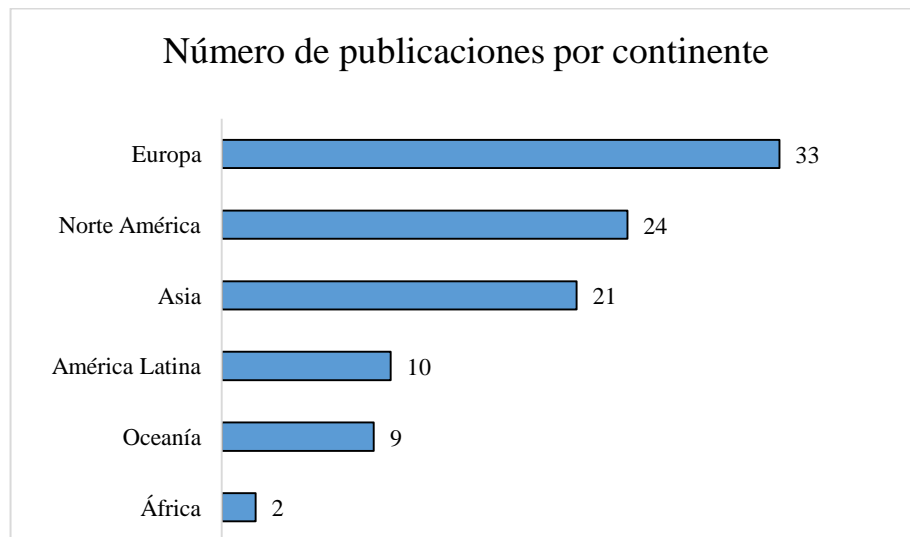
Gráfica 7. Referencias bibliográficas clasificadas por tipo de documento – Revisión No. 2



La Gráfica 8 muestra las 99 referencias bibliográficas por lugar de publicación. Para ello se realizó una clasificación por continentes donde se observa que la producción científico-académica en América Latina, de estrategias dirigidas a mitigar la DIT y la congestión vial, es significativamente baja con respecto a los demás continentes. La mayoría de referencias bibliográficas fueron publicadas en continente con países desarrollados; lo cual concuerda con los resultados

mostrados en la Gráfica 3 donde se observó que la temática de DIT ha sido desarrollada en su mayoría por países desarrollados.

Gráfica 8. Referencias bibliográficas clasificadas por lugar de publicación -
Revisión No. 2



Finalmente, para las referencias consultadas se realizó una ficha informativa con el formato que se observa en la Figura 8. Esto con el propósito de extraer los detalles más relevantes de cada documento e identificar los aportes que cada uno de ellos hace al presente trabajo de maestría. El detalle de esta tabla de revisión bibliográfica puede ser consultado en: https://dl.dropboxusercontent.com/u/85829023/FichaInformativa_Revision_No_2.pdf

Figura 8. Formato tabla de revisión bibliográfica No. 2

Tabla de revisión bibliográfica No. 2: 99 documentos consultados entre 2002 y 2016			
Referencia	Ideas principales	Método	Aportes

A continuación se presenta una síntesis teórica de los resultados de esta segunda revisión bibliográfica, a partir de la cual se construyó el prototipo II del modelo dinámico-sistémico.

5.1 Paradigmas de transporte

Actualmente países desarrollados en Europa, Asia, Norte América y Oceanía han adoptado un nuevo paradigma de planificación del transporte para lidiar con la congestión vial, el cual es llamado liberación inteligente de la congestión –*smart congestion relief* (Litman, 2015a). El antiguo paradigma de transporte en el cual mediante construcción vial se buscaba mejorar la movilidad maximizando las velocidades de viaje, ya no es un enfoque predominante en tales países debido a la evidencia encontrada de cómo nuevas vías fortalecen el uso del vehículo privado, generando así, nueva congestión vehicular.

Tabla 7. Paradigmas de transporte.

	Antiguo paradigma	Paradigma Contemporáneo
<i>Definición de movilidad</i>	Desplazamiento de personas y bienes, particularmente utilizando automóvil.	Accesibilidad de la población para realizar las actividades que desean realizar.

<i>Objetivos</i>	Maximizar velocidades de viaje para vehículos privados.	Mejora accesibilidad general y eficiencia de los sistemas de transporte
<i>Medios de transporte considerados</i>	Vehículo privado	Medios alternativos de transporte

Fuente: Litman, Smart congestion Relief – Comprehensive evaluation of traffic congestion costs and congestion reduction strategies. 2015a.

El paradigma contemporáneo de transporte ha redefinido la forma como la movilidad se evalúa y los tipos de políticas utilizadas para disminuir la congestión. En lugar de hablar de desplazamientos de vehículos a altas velocidades, este paradigma evalúa la movilidad mediante el concepto de accesibilidad, es decir, brindar la oportunidad a la población de acceder a los servicios y actividades que desean realizar de forma eficiente. Por lo tanto, sus políticas se centran en mejorar modos alternativos de transporte en lugar de formular políticas dirigidas a maximizar las velocidades de viaje que tan solo favorecen el vehículo privado como medio de transporte no sostenible.

En Latinoamérica pocos países han ejecutado estrategias integrales con fuerte financiamiento público para adoptar el nuevo paradigma de transporte anteriormente mencionado (Ortuzar, 2015). Ello puede justificarse debido a que la rápida expansión urbana, el crecimiento poblacional y las elevadas tasas de motorización han promovido una necesidad percibida de más vías entre los tomadores de decisiones. Esto se evidencia en los resultados de la revisión bibliográfica No. 2 mostrados en la Gráfica 8; en ella se observa que la producción científico-técnica en materia de estrategias para disminución de la congestión es relativamente baja con respecto a resultados alcanzados en países desarrollados.

5.2 Liberación inteligente de la congestión

Las estrategias de reducción de la congestión del nuevo paradigma de transporte son diversas y van más allá de la construcción de vías para mejorar la movilidad. Una síntesis de ellas puede observarse en la Tabla 8 a continuación.

Tabla 8. Estrategias de reducción de la congestión vial asociadas a los paradigmas de planificación del transporte.

	Antiguo paradigma de transporte	Nuevo paradigma de transporte			
	<i>Construcción vial</i>	<i>Medios alternativos de transporte</i>	<i>Reformas tarifarias</i>	<i>Crecimiento inteligente</i>	<i>Gestión activa de la demanda de transporte</i>
Descripción	Mejoramiento de la malla vial existente y construcción de más infraestructura vial.	Implementación y mejora de medios alternativos de transporte tales como metro, sistema de buses rápidos, bicicletas, etc.	Mecanismos de cobro que buscan desincentivar el uso del vehículo privado al hacer más costoso viajar en este medio de transporte. Peajes, cobros por congestión, impuestos a combustibles, etc.	Asociar la infraestructura vial y los medios alternativos de transporte con la forma como del desarrollo urbano de una ciudad va ocurriendo.	Utilizar tecnologías de la información para monitorear el tráfico en tiempo real, y en función de ellos tomar decisiones.
Impacto sobre la congestión	Reduce la congestión a corto plazo. Sin embargo, la congestión progresa progresivamente	Reduce la congestión al atraer conductores discretivos ¹ , pero no la elimina	Reduce significativamente la congestión vial.	Puede incrementar la congestión a nivel local, pero mejora la movilidad entre	Puede reducir los retardos a causa del tráfico vehicular

¹ Aquellas personas que tienen la posibilidad tanto de manejar un vehículo privado como de utilizar medios alternativos de transporte.

	reaparece debido a la demanda inducida de transporte.	por completo.		centros urbanos.	
Costos y beneficios	Altos costos de construcción, generación de mayor demanda motorizada, escaso ahorro energético, elevadas emisiones contaminantes.	Costos entre moderado y alto, seguridad y sostenibilidad ambiental, mejora de accesibilidad, ahorro de energía y de emisiones contaminantes.	Bajo costo de implementación, generación de ingresos para reinversión en medios alternativos de transporte, reducción de emisiones contaminantes.	Bajos costos de implementación.	Moderados y elevados costos de implementación debido a las tecnologías de la información requeridas para su funcionamiento.

Fuente: Litman. Smart congestion Relief – Comprehensive evaluation of traffic congestion costs and congestion reduction strategies. 2015a.

Además, diferentes métodos y técnicas han sido utilizados para modelar y simular el desempeño que dichas estrategias, asociadas tanto al antiguo como al nuevo paradigma de transporte, pueden tener en la realidad; un resumen de ello puede ser observado en la Tabla 9.

Tabla 9. Métodos y técnicas para analizar y estimar el impacto de políticas de mitigación de la congestión vial.

Método/Técnicas	Referencias
Dinámica de Sistemas	(Cao y Menendez, 2015), (Ruutu et al., 2015), (Haghshenas, 2015), (Franco et al., 2015), (Mupfumira y Wirjodirdjo, 2015), (Liu et al., 2015), (Yang et al., 2014), (Shiran et al., 2014), (Wirjodirdjo et al., 2014), (Chao y Zishan, 2013), (Callejas et al., 2013), (Alwi y Rahmat,

	2013), (Macmillan, 2013), (Bernardino y Var der Hoofd, 2013), (Habibian y Ostadi, 2013), (Orozco y Arenas, 2013), (Li et al., 2013), (Alasad et al., 2013), (Rodrigues et al., 2012), (Wu et al., 2015), (Raux, 2003), (Liu, 2007), (Vakili et al., 2008), (Liu et al., 2010), (Fiorello et al., 2010) (Duarte, 2011), (Moscoso et al., 2011), (Schaffernicht, 2012), (Macmillan, 2012)
Dinámica de sistemas – Análisis Delphi	(Rees et al., 2016)
Dinámica de sistemas – Modelado basado en agentes y reglas	(Lewe et al., 2014), (Lewe et al., 2012)
Dinámica de Sistemas - Lógica Difusa	(Sabounchi et al., 2014)
Dinámica de Sistemas - Correlaciones lineales	(Bachels et al., 1990)
Dinámica de Sistemas – Gestión del rendimiento	(Bianchi y Tomaselli, 2015; Bereciartua y Noto, 2015)
Modelado basado en agentes	(Wang, 2015).
Análisis multi-criterio junto y análisis costo-beneficio	(Yong Le Loo et al., 2015), (Beria et al., 2014), (Cascajo & Monzon, 2014)
Modelos “four-step”	(Wang, Li et al., 2015), (Ambarwati et al., 2014), (Solecka y Žak, 2014).
Modelos analíticos	(Bar-Yosef et al., 2013)
Encuestas y estadística descriptiva	(Tørnblad et al., 2014), (Schuppan et al., 2014), (Loukopoulos et al., 2004), (Bamberg et al., 2007), (Eriksson et al., 2010), (Jao-Hong et al., 2010).
Modelos de regresión lineal	(Martin y Shaheen, 2014), (Litman, 2014), (Holden et al., 2013), (Buehler, 2011), (Anderson, 2013), (Habibian & Kermanshah, 2011), (Aftabuzzaman et al. ,2011)
Modelos de lógica difusa	(Eze et al., 2014). (Shankar et al., 2012)
Técnicas de con-integración y corrección de error	(Milioti y Karlaftis, 2014).
Sistemas expertos	(Solecka & Zak, 2014), (Zhao et al. 2010).
Correlaciones estadísticas	(Jaskiewicz & Besta, 2014), (Haghshenas & Vaziri, 2012)
Modelos de demanda de transporte basados	(Malayathm & Verma, 2013)

en actividades.	
Modelos de series de datos	(Chen et al., 2011)
Modelos estocásticos-dinámicos	(Cats & Jenelius, 2011)
Análisis Path	(Nordlund & Garvill, 2003), (Bamberg et al., 2011)

5.3 Medios alternativos de transporte y reformas tarifarias

Acorde a los resultados obtenidos con la segunda revisión bibliográfica, no se identificaron trabajos que explícitamente abordarán o definieran políticas para la mitigación de la demanda inducida de transporte (DIT). Sin embargo, si se encontraron números resultados enfocados a estrategias para la reducción de la congestión vehicular.

La DIT es un fenómeno fuertemente ligado a la dependencia del vehículo privado, y es este medio de transporte uno de los principales promotores de la congestión vial. Por lo tanto, en función del propósito del prototipo II del modelo dinámico-sistémico, formular e implementar políticas para mitigar la DIT y sus efectos sobre la congestión, se decide que medios alternativos de transporte y reformas tarifarias, de la Tabla 8, son estrategias plausibles para lidiar con la DIT debido a que sus propósitos se enfocan a desincentivar el uso del vehículo privado.

Para el caso de la estrategia de medios alternativos de transporte seleccionamos la política de mejoramiento de la calidad de un sistema de buses de transporte rápido (BRT), y para la estrategia de reformas tarifarias elegimos la política de cobros por congestión. Tal elección se debe en primer lugar a que los sistemas BRT es un medio de transporte alternativo ampliamente implementado en Latino América (Bonicelli, 2015); algunos ejemplos son ciudades en Brasil, Chile,

Colombia y Venezuela. Por lo tanto, en el reto de formular políticas para lidiar con la DIT, una estrategia factible sería utilizar y mejorar tanto la infraestructura como la calidad del servicio de los sistemas BRT. Por otra parte, aunque los cobros por congestión no es una política que se ha puesto en marcha en Latino América, diferentes tomadores de decisiones y académicos han venido discutiendo las implicaciones que traería consigo la implementación de esta política tomando como punto de referencia algunos casos de éxito a nivel mundial, tales como Estocolmo y Londres (Rivasplata, 2013; Mahendra, 2008).

5.3.1 Sistema de buses de transporte rápido

Actualmente, América Latina es el continente con mayor número de sistemas de buses de transporte rápido (BRT) a nivel mundial, tal como lo muestra la Tabla 10.

Tabla 10. Presencia de sistemas de buses de transporte rápido (BRT) por continentes.

Continentes	Presencia de sistemas BRT	
	Ciudades	Países
<i>América Latina</i>	61	12
<i>Europa</i>	56	14
<i>Asia</i>	38	10
<i>Norte América</i>	26	2
<i>Oceanía</i>	6	2
<i>África</i>	3	2

Fuente: Bonicelli, Social sustainability and mobility in Curitiba: bus rapid transit in the “green city” of Brazil. 2015.

La implementación de los sistemas BRT es tan solo el primer paso en la adopción del nuevo paradigma de planificación del transporte. El gran reto radica en la administración organizacional de este medio de transporte que permita garantizar su calidad y servicio eficiente (Vakili et al., 2008). Aunque hoy día los sistemas BRT hacen gran presencia a nivel latino americano, la fragmentación institucional y la falta de financiamiento público han generado que estos sistemas de transporte sean de baja calidad. En consecuencia, en contextos económicos con condiciones económicas favorables la ineficiencia de este medio de transporte conduce a que más personas prefieran hacer uso del vehículo privado y finalmente, la demanda de los sistemas BRT decrece progresivamente en el tiempo ahondando aún más sus insostenibilidad económica.

Por lo tanto, la inclusión de un sistema BRT en el prototipo II del modelo dinámico-sistémico se enfoca al mejoramiento de su calidad de tal forma que sea capaz de atraer la mayor cantidad posible de conductores de vehículo privado. La Tabla 11 presenta una síntesis de los atributos de calidad de un sistema BRT. De dichos atributos, se seleccionó un atributo de calidad física y un atributo de calidad percibida para ser incluidos en el prototipo II; ellos son: frecuencia y confort.

Tabla 11. Atributos de calidad de un sistema de buses de transporte rápido (BRT).

Tipo de calidad	Atributo	Definición
Física	Confiabilidad	Que tanto el servicio es capaz de cumplir con los horarios de sus rutas
	Frecuencia	Que tan a menudo el servicio opera durante un determinado periodo de tiempo
	Velocidad	Tiempo gastado viajando entre dos puntos específicos
	Accesibilidad	El grado en el cual el transporte público es accesible para la población
	Precio	El costo monetario de viajar
	Provisión de	Que tanta información es proveída a la población acerca de rutas y

	información	frecuencias
	Estado físico	Hace alusión al estado físico de la infraestructura y la flota de vehículos
Percibida	Confort	Que tan cómodo el viaje es en relación a ruido, asientos disponibles, etc.
	Seguridad	Que tan seguro los pasajeros están de sufrir algún accidente o inconveniente
	Conveniencia	Que tan sencillo es utilizar el sistema de transporte público

Fuente: Redman y Otros. Quality attributes of public transport that attract car users: A research review. 2013.

5.3.2 Cobro por congestión

El cobro tarifario es una política particular de las reformas tarifarias, tal como lo muestra la Tabla 12, que hoy día existen para desincentivar el uso del vehículo privado. Estas políticas se caracterizan por su bajo costo de implementación y alto impacto sobre la mitigación de la congestión vial. Sin embargo, es importante resaltar que su puesta en marcha debe ir acompañada del fortalecimiento de medios alternativos de transporte, los cuales atraerán aquellos conductores que dejen de usar el vehículo privado.

Tabla 12. Tipos de reformas tarifarias para desincentivar el uso del vehículo privado.

Reformas tarifarias	
<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>
Cobro por congestión	Definición de áreas en las cuales un vehículo privado debe pagar si desea circular en ellas durante horas pico.
Peajes	Peajes que cobran el uso de vías de altas velocidades o vías que conducen a lugares congestionados.
Precios de aparcamiento	Cobros de aparcamiento elevados en zonas donde la demanda de estacionamiento es elevada.
Aumento de impuestos de	Incrementar el precio del combustible para desincentivar el uso

combustible	del vehículo privado.
Precios por distancia recorrida	Registro de kilometraje del parque automotor para realizar cobros en función de distancias recorridas.

Fuente: Litman, Smart congestion Relief – Comprehensive evaluation of traffic congestion costs and congestion reduction strategies. 2015a.

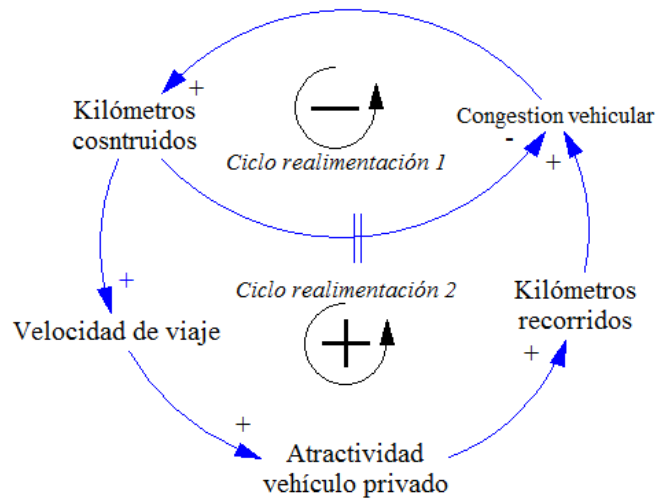
6. POLÍTICAS PARA INTERVENIR LA DEMANDA INDUCIDA DE TRANSPORTE - Prototipo II

Habiendo culminado la revisión bibliográfica No. 2, en esta sección se presenta el prototipo II del modelo dinámico-sistémico. Tal como lo indica la metodología, esta labor toma como punto de partida el prototipo I cuya estructura realimentada reproduce de forma dinámica la demanda inducida de transporte (DIT); y a partir de él, se propuso un segundo prototipo donde se implementan políticas para hacer frente a este fenómeno.

Verbalización del sistema

Tal como lo muestra el arquetipo de comportamiento de la DIT en la Figura 4, el centro de esta estructura realimentada radica en vehículos. Para este segundo prototipo es necesario mover el centro de dicha estructura de vehículos hacia personas ya que dentro de sus límites actuales la construcción vial aparece como la única opción para lidiar con la DIT. De esta forma, es posible hablar de accesibilidad de la población a diferentes medios de transporte, en lugar de vehículos desplazándose a altas velocidades de viaje. Esto permite entonces que la construcción del prototipo II esté orientada por el nuevo paradigma de transporte mencionado en la sección **5.1 Paradigmas de transporte**.

Figura 5. Arquetipo de comportamiento de la DIT.

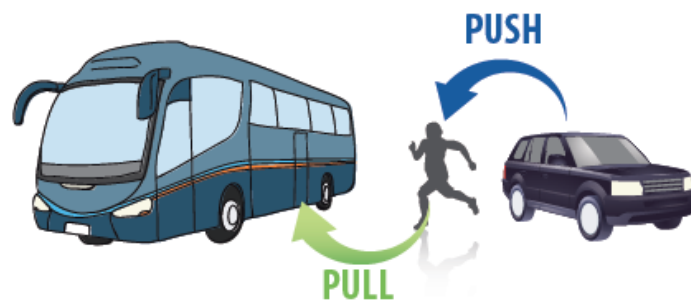


En el prototipo II la construcción vial ya no se utiliza como una política para mejorar la movilidad; sin embargo, se construyen nuevas vías para garantizar conectividad tal como ocurre en contextos urbanos de latino américa donde el desarrollo urbano y el crecimiento poblacional requieren más capacidad vial instalada, que facilite los desplazamientos de las personas mediante diferentes medios de transporte. Por lo tanto, el propósito del prototipo II es evaluar cómo en conjunto la calidad sostenida de un sistema BRT y una política de cobros por congestión logran mitigar la DIT cuando nuevas vías se construyen para garantizar conectividad, y así, evitar que este fenómeno genere congestión en dichas vías construidas.

Una vez construidas las vías para conectividad, el cobro por congestión hace más costoso viajar en vehículo privado. Como resultado una proporción de conductores, aquellos que están dispuestos a utilizar medios alternativos de transporte, dejan el vehículo privado y son atraídos por la calidad del sistema de transporte público; la cual se fortalece con la reinversión de los recursos

económicos recaudados a través de los cobros por congestión. Esto es definido en la literatura como el efecto “Push – Pull” observado en la Figura 9, donde la acción “Push” busca desincentivar el uso del vehículo privado y la acción “Pull” se enfoca en aumentar la atraktividad de medios alternativos de transporte.

Figura 9. Efecto “Push-Pull” para desincentivar el vehículo privado y fortalecer medios alternativos de transporte.



Fuente: Saliara. Public Transport Integration: the Case Study of Thessaloniki, Greece. 2014

Es importante resaltar que la implementación de dichas políticas dentro del prototipo II se limita a representaciones conceptuales que permiten comprender qué influencia tendrían sobre la DIT, a un nivel de abstracción que permite la simulación por computador. Para el caso del cobro por congestión su implementación en el prototipo II se limita a la cantidad de dinero que cada vehículo en uso debe pagar por circular sobre las vías construidas, mientras que la calidad del sistema BRT se define por dos atributos seleccionados de la Tabla 11: en primer lugar la frecuencia como representación de la calidad física, y confort asociado a la calidad percibida. De esta forma, estos dos atributos de calidad influyen la demanda de transporte para determinar si hacen uso o no del sistema BRT.

Además, este prototipo II propone una representación de un fenómeno característico de la movilidad en el Área Metropolitana de Bucaramanga: el transporte informal. Aunque este tipo de transporte no fue considerado en la revisión bibliográfica, su inclusión en la segunda versión del modelo busca evaluar cómo la existencia per se del transporte público no garantiza que la demanda de transporte haga uso de él. Por el contrario, solo cuando la calidad del transporte público es elevada, el uso de este medio de transporte se afianza en la población. Cuando ello no ocurre, el transporte informal toma fuerza dentro de las preferencias de las personas y substraе usuarios del sistema de transporte público.

Con respecto a los límites del prototipo II, ellos son mencionados a continuación:

- Se asume que el sistema BRT cuenta con carriles exclusivos para funcionamiento; con lo cual, este medio de transporte no influencia la variable kilómetros recorridos dentro del modelo.
- El transporte informal corresponde a motocicletas.
- El beneficio proveído por nuevas vías que induce más demanda de vehículos privados es la velocidad de viaje.
- La totalidad de infraestructura vial se asume como vías de dos carriles que soportan un flujo promedio de 3,200 vehículos por hora viajando a una velocidad de servicio promedio de 60 kilómetros/hora.
- Se asume una distribución uniforme en la infraestructura vial tanto de los vehículos privados como del transporte informal.
- No se considera la restricción de pico y placa.
- La demanda de transporte total es constante y la cuota de mercado de cada medio de transporte esta expresado en el número de personas que hacen uso de ellos.

- Las personas que usan vehículo privado corresponden a conductores instrumentales, los cuales eligen viajar en determinado medio de transporte basándose en variables como velocidad, frecuencia, confort. No se tienen en cuenta conductores simbólicos-afectivos para los cuales el vehículo representa estatus social.
- No hay un modelado espacial de la cobertura y accesibilidad del sistema BRT.
- El horizonte de simulación está definido en días.

Diagrama de influencias

La estructura realimentada del prototipo II puede ser observada en la Figura 10. La parte derecha de la estructura, ciclos realimentados en color azul, es el arquetipo básico de la DIT. Mientras que la parte izquierda contiene una representación realimentada el efecto “Push-Pull” mencionado en la Figura 9; donde la política de alta calidad en un sistema BRT es la política “Pull”, y el cobro por congestión representa la política “Push”. Además, los ciclos realimentados naranjas son la representación del transporte informal.

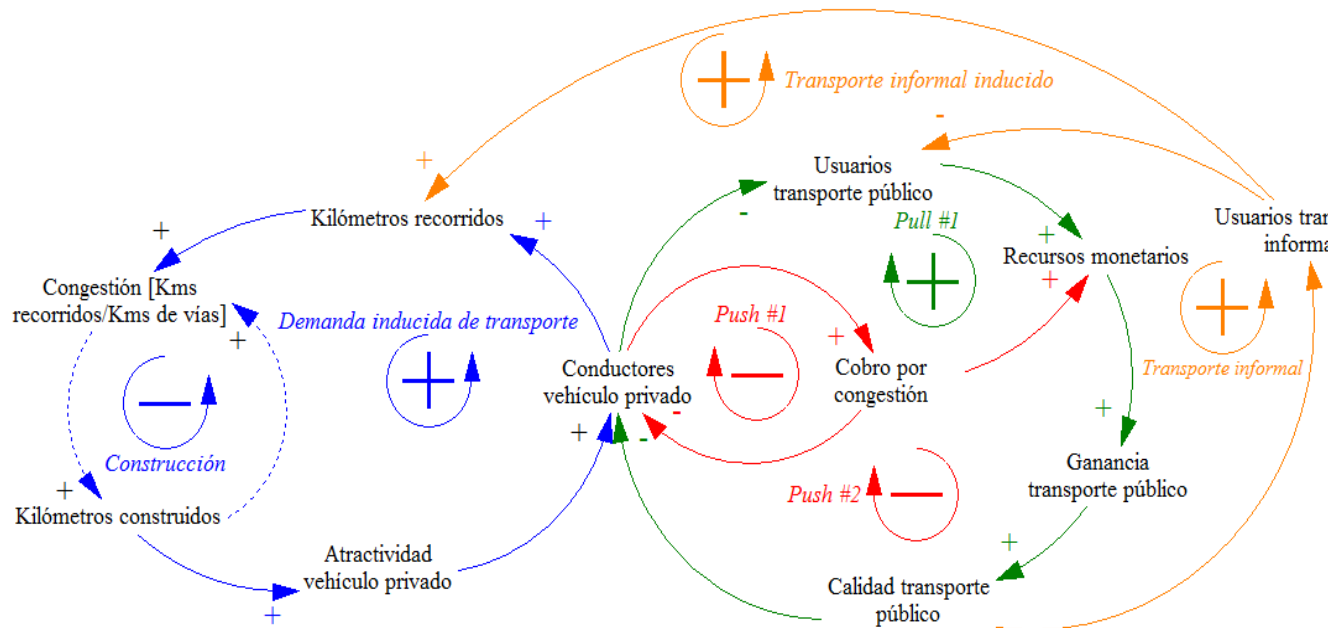
La estructura de la Figura 10 está compuesta por siete ciclos de realimentación descritos a continuación:

- Ciclo “Construcción”: este ciclo de realimentación negativa representa la toma de decisiones tradicional donde la construcción vial busca mitigar la congestión generada en las vías construidas para garantizar conectividad.
- Ciclo “Demanda inducida de transporte”: ciclo positivo de realimentación que muestra cómo elevadas velocidades de desplazamiento, proveídas por nuevas vías, incrementan la atraktividad del vehículo privado. Cuando esto ocurre, se induce mayor demanda motorizada de transporte que genera nueva congestión vial en las vías previamente construidas.

- Ciclos “Push #1” y “Push #2”: ciclos negativos de realimentación que muestran cómo la política de cobros por congestión reduce el número de personas que utilizan el vehículo privado. Más conductores de vehículo privado circulando en la infraestructura vial disponible implica mayor número de vehículos sujetos al cobro por congestión. Más vehículos que pagan dicho cobro generan más recursos económicos que son invertidos en el sistema de transporte público BRT para aumentar su calidad; y en consecuencia, mayor calidad del transporte público atrae más conductores de vehículo privado desincentivados a dejar este medio de transporte a causa del cobro por congestión.
- Ciclo “Pull”: ciclo positivo de realimentación que muestra cómo puede mejorarse la calidad del transporte con el apoyo de la política de cobro por congestión. Más usuarios del sistema BRT generan más ganancias que se reinvierten en este medio de transporte para mejorar su calidad. Finalmente, más calidad del transporte público atrae más usuarios a este medio de transporte provenientes del vehículo privado.
- Ciclo “Transporte informal”: ciclo de realimentación positiva que muestra la interacción entre el transporte público y el transporte informal. Mayor calidad del sistema BRT disminuye el número de usuarios que utilizan el transporte informal. Menos usuarios en este medio de transporte significa que más personas están haciendo uso del sistema BRT. Mayor demanda de transporte público genera más ingresos económicos para el sistema BRT que son reinvertidos para mejorar su calidad y finalmente, seguir disminuyendo tanto el número de usuarios que vehículo privado como de transporte informal.
- Ciclo “Transporte informal inducido”: ciclo de realimentación positiva que muestra la influencia del transporte informal sobre la congestión. Baja calidad del transporte público induce mayor transporte informal. Más transporte informal significa mayor número de kilómetros recorridos que se traducen en más congestión. Más congestión incentiva más construcción de vías que fortalecen el uso del vehículo privado; lo cual disminuye el número de usuarios

del transporte público, generando así menor calidad de este medio de transporte que incentiva mayor uso del transporte informal.

Figura 10. Estructura realimentada del prototipo II



De igual forma, cada una de las variables en la Figura 10 es descrita a continuación:

- **Congestión:** variable que representa el estado de la movilidad en las vías mediante un índice entre los kilómetros recorridos por los vehículos en uso y los kilómetros de vías disponibles. Este índice puede tomar valores entre 0 y 1. Valores cerca de 0 representan una movilidad descongestionada; mientras que valores aproximados a 1 representan congestión vial.
- **Kilómetros construidos:** variable que corresponde a la infraestructura vial disponible expresada en kilómetros lineales.
- **Atractividad vehículo privado:** variable que representa que tan atractivo es para la población el vehículo privado como medio de transporte. Esta

variable está influenciada por las condiciones de flujo vehículos existentes en la infraestructura vial disponible.

- Conductores vehículo privado: número de personas que hacen uso del vehículo privado como medio de transporte.
- Kilómetros recorridos: kilómetros totales recorridos por las personas que utilizan el vehículo privado y el transporte informal.
- Cobro por congestión: política que busca desincentivar el uso del vehículo privado mediante un cobro de dinero a las personas que hacen uso de este medio de transporte.
- Usuarios transporte público: número de personas que hacen uso del sistema público de buses de transporte rápido.
- Calidad transporte público: variable que representa la calidad física y percibida del transporte público mediante las variables de frecuencia y confort respectivamente.
- Ganancia transporte público: cantidad de dinero disponible para reinvertir en el mejoramiento de la calidad del transporte público. Tal dinero es producto de los recursos recaudados a través del cobro por congestión y el dinero proveniente de los usuarios que hacen uso del transporte público, menos los costos operativos de este medio de transporte.
- Recursos monetarios: dinero producto de los recursos recaudados mediante la política de cobro por congestión más el dinero proveniente del uso del transporte público por parte de la población.
- Usuarios transporte informal: número de personas que hacen de transporte informal. En este caso se habla de motocicletas.

Diagrama de Flujos-Niveles y Ecuaciones matemáticas

En esta sección se presenta el diagrama de flujos y niveles de la estructura realimentada propuesta en la Figura 10. El diagrama de flujos-niveles puede ser

observado en la Figura 11, mientras que sus ecuaciones matemáticas pueden ser consultadas en la Tabla 13.

Figura 11. Diagrama de flujos y niveles prototipo II

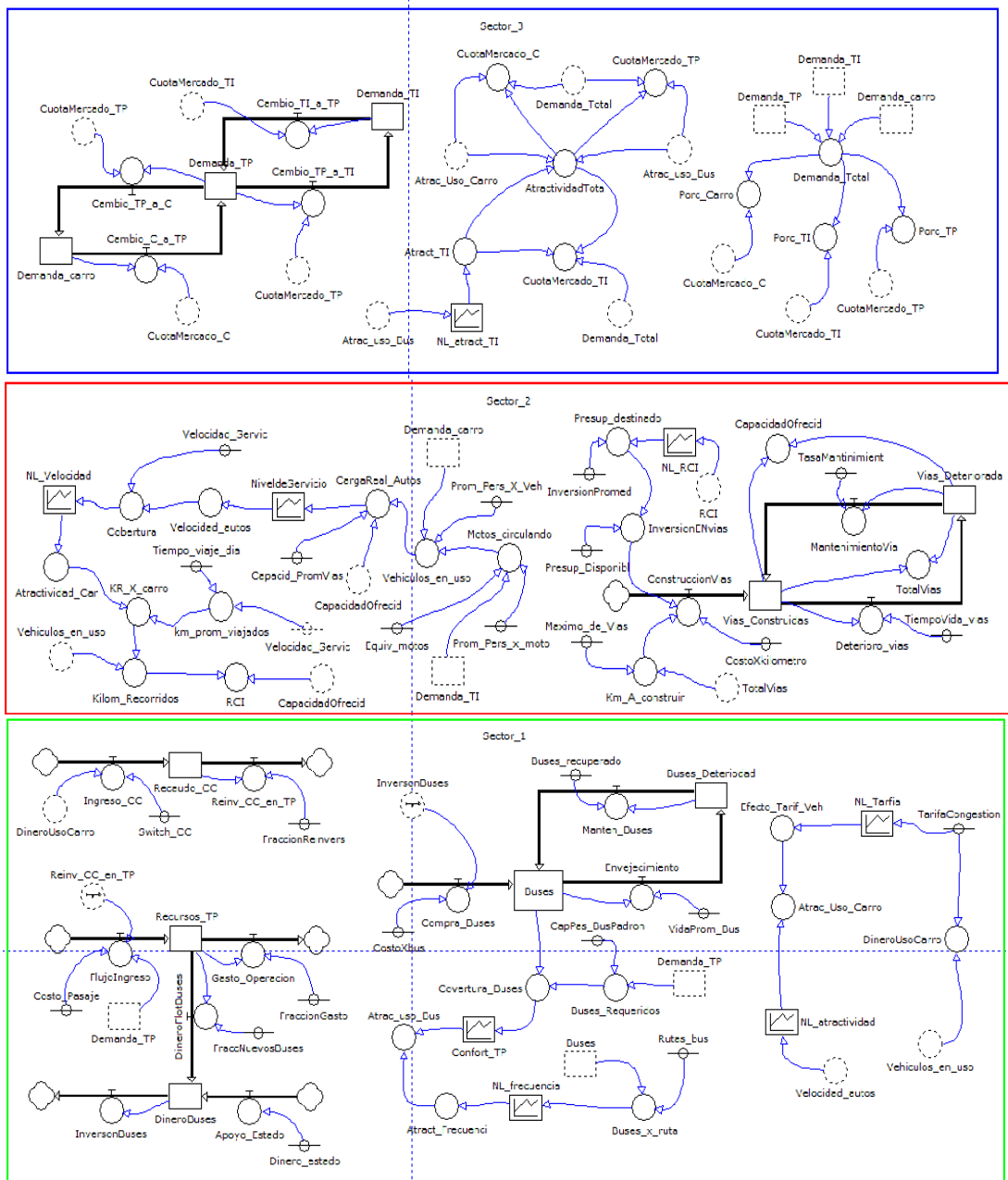


Tabla 13. Ecuaciones diagrama de flujos y niveles prototipo II

Tipo	Nombre variable	Unidades	Ecuación/Valor inicial
Niveles	Buses	Buses	200
	Buses_Deterioridad	Buses	20
	Demanda_TI	Personas	1000
	Demanda_TP	Personas	INT(50000)
	Demanda_carro	Personas	INT(90000)
	Dinero Buses	Pesos colombianos	0
	Recaudo_CC	Pesos colombianos	0
	Recursos_TP	Pesos colombianos	0
	Vias_Construidas	Kilómetros	2000
	Vias_Deteriorada	Kilómetros	100
Flujos	Reinv_CC_en_TP	Pesos colombianos/año	FraccionReinvers*Recaudo_CC
	Apoyo_Estado	Pesos colombianos/año	Dinero_estado
	Cambio_C_a_TP	Personas/año	INT(IF(Demanda_carro>CuotaMercado_C,Demanda_carro-CuotaMercado_C,0))
	Cambio_TI_a_TP	Personas/año	INT(IF(Demanda_TI>CuotaMercado_TI,Demanda_TI-CuotaMercado_TI,0))
	Cambio_TP_a_C	Personas/año	INT(IF(Demanda_TP>CuotaMercado_TP,Demanda_TP-CuotaMercado_TP,0))
	Cambio_TP_a_TI	Personas/año	INT(IF(Demanda_TP>CuotaMercado_TP,Demanda_TP-CuotaMercado_TP,0))
	Compra_Buses	Buses/año	ABS(InversionBuses/CostoXbus)
	ConstruccionVias	Kilómetros/año	MIN(Km_A_construir,(InversionENvias/CostoXkilometro))
	Deterioro_vias	Kilómetros/año	Vias_Construidas/TiempoVida_vias
	DineroFlotBuses	Pesos colombianos/año	FraccNuevosBuses*Recursos_TP
	Envejecimiento	Buses/año	Buses/VidaProm_Bus
	FlujoIngreso	Pesos colombianos/año	(Costo_Pasaje*Demanda_TP)+Reinv_CC_en_TP
	Gasto_Operacion	Pesos colombianos/año	Recursos_TP*FraccionGasto
	Ingreso_CC	Pesos colombianos/año	Ingreso_CC
	InversionBuses	Pesos colombianos/año	DineroBuses
	Manten_Buses	Buses/año	Buses_Deterioridad/Buses_recuperado
MantenimientoVia	Kilómetros/año	Vias_Deteriorada/TasaMantiniem	
Parámetros	Maximo_de_Vias	Kilómetros	3500
	Presup_Disponibl	Dólares	50000000
	Prom_Pers_X_Veh	Personas*vehículo	1.3
	Prom_Pers_X_Veh	Personas*vehículo	2
	Rutas_bus	Rutas	80
	Rutas_bus	Adimensional	1
	TarifaCongestion	Pesos colombianos	35000
	TasaMantiniem	Kilómetros/año	1.1
	TiempoVida_vias	Kilómetros	10
	Tiempo_viaje_dia	Horas	0.53
	Velocidad_Servic	Kilómetros/hora	60
	VidaProm_Bus	Años	10
	Buses_recuperado	Buses/año	20
	CapPas_BusPadron	Personas*bus	90
	CapPas_BusPadron	Vehículos/kilómetro	53
	CostoXbus	Pesos colombianos	450000000
	CostoXkilometro	Dólares	1200
	Costo_Pasaje	Pesos colombianos	2100









			3,0.2463061,0.2595864,0.2816468,0.2993035,0.321371,0.3478528,0.3655072,0.3875752,0.422884,0.4493656,0.4714336,0.4846745,0.5067425,0.5199833,0.5420513,0.5552921,0.5773601,0.5861873,0.6038417,0.612669,0.6303234,0.6523914,0.6744594,0.7053546,0.7274226,0.7450771,0.7671451,0.7803859,0.7847995,0.8068675,0.8245219,0.8421763,0.8730715,0.8907261,0.9083796,0.926038,0.9480937,0.9702026,0.978908,0.9876161,0.99,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)
	NL_frecuencia	Adimensional	INTSPLINE(2,1,1,0.3,0.3,0.25,0.2,0.15,0.1)
	NiveldeServicio	Adimensional	INTSPLINE(2,0,0.1,70,70,69.78011,69.15294,65.14715,55.43.76162,36.23386,31.84257,28.7261,26.34724,24.80476,25,25,25)

Simulación

La presente sección expone los resultados de simulación del prototipo II en un horizonte de tiempo de 150 días. Nuevamente es pertinente aclarar que el propósito de las simulaciones de este segundo prototipo no se centra en alcanzar nivel alguno de precisión. Por el contrario, su propósito radica en explicar y comprender cómo los comportamientos dinámicos observados en la gráficas emergen a partir de las interacciones entre los ciclos de realimentación que constituyen la estructura realimentada propuesta en la Figura 10.

Cada una las variables de interés en las gráficas a continuación fueron evaluadas bajo los dos escenarios observados en la Tabla 14. En cada escenario durante el inicio del horizonte de simulación se realiza construcción de vías para garantizar conectividad. Posteriormente cuando estas nuevas vías inducen más demanda de transporte, las políticas que cada escenario utiliza para mitigar los efectos de la DIT son diferentes. En el escenario sin políticas únicamente se utiliza nueva construcción vial para disminuir la demanda inducida y aunque hay presencia de transporte público, su sostenibilidad financiera no es apoyada por la reinversión del dinero recaudado a través de la política “Push”. Para el caso del escenario con políticas, se utilizan las políticas de alta calidad en el transporte público y cobros por congestión para reducir la DIT sin recurrir a construcción adicional.

Tabla 14. Escenarios de simulación considerados para el prototipo II

Escenarios		Políticas públicas			
		Construcción de vías	Transporte público	Alta calidad de transporte público	Cobro por congestión
Escenario políticas	sin				
Escenario políticas	con				

Para analizar en qué medida los escenarios descritos logran mitigar la demanda inducida, es pertinente graficar los kilómetros recorridos por los vehículos en uso. Incrementos o disminuciones en el total de kilómetros recorridos implican variaciones en el número de personas que hacen uso del vehículo privado. Por lo tanto, también se gráfica la variable cuota de mercado de tal medio de transporte junto las cuotas de mercado del transporte público y el transporte informal, y así analizar la migración de pasajeros entre los tres medios de transporte bajo los dos escenarios propuestos en la Tabla 14.

La cuota de mercado de un medio de transporte representa la fracción porcentual del total de la demanda de transporte que dicho medio posee con respecto a los demás medios de transporte. En el prototipo II las cuotas de mercado del vehículo privado (CM_{carro}), transporte público (CM_{TP}) y transporte informal (CM_{TI}) son calculadas utilizando la ecuación (1), la cual se basa en el enfoque propuesto por Sterman (2000, p. 392) donde la demanda total (DT) es igual a la suma de cada una de las tres CM como se observa en la ecuación (2).

$$(1) \text{ Cuota de mercado medio de transporte } i = \text{Demanda Total} \times \frac{\text{Atractividad medio de transporte } i}{\sum_{j=1}^3 \text{Atractividad medio de transporte } j}$$

$$(2) \text{ Demanda Total} = CM_{\text{carro}} + CM_{\text{TP}} + CM_{\text{TI}}$$

En el prototipo II en conjunto las demandas de vehículo privado, transporte público y transporte informal, constituyen la demanda total de transporte en el modelo, la cual tiene un valor constante y no cambia en el horizonte de simulación. Esto tiene como propósito reducir la complejidad asociada a variaciones de la demanda de transporte por factores no considerados dentro del prototipo II tales como inmigración, turismo, empleo, entre otros. De esta forma, la demanda total de transporte es igual a la suma de las cuotas de mercado de vehículo privado (CM_{carro}), transporte público (CM_{TP}) y transporte informal (CM_{TI}). Con base en la ecuación (1) las cuotas de mercado para cada uno de estos medios de transporte son definidas a continuación.

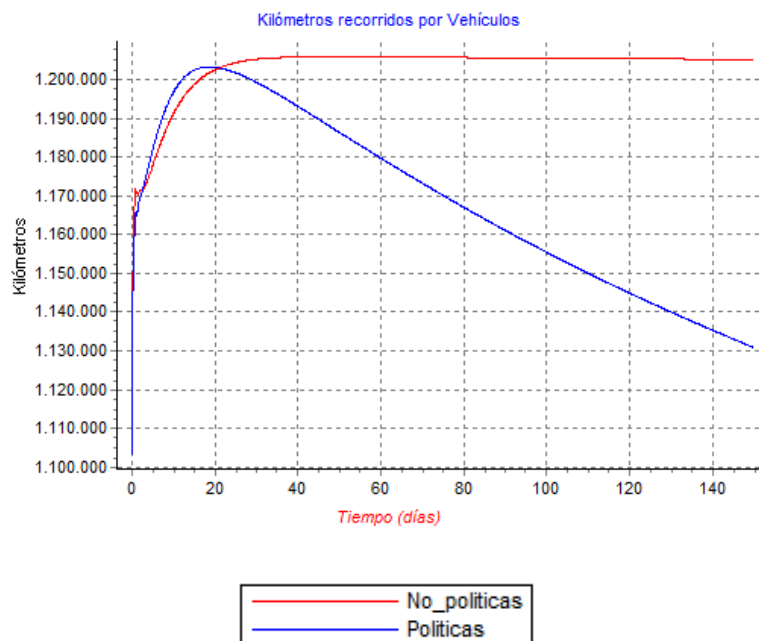
$$CM_{\text{carro}} = \text{Atractividad}_{\text{Carro}} * \left(\frac{CM_{\text{Carro}} + CM_{\text{TP}} + CM_{\text{TI}}}{\text{Atractividad}_{\text{Carro}} + \text{Atractividad}_{\text{TP}} + \text{Atractividad}_{\text{TI}}} \right)$$

$$CM_{\text{TP}} = \text{Atractividad}_{\text{TP}} * \left(\frac{CM_{\text{Carro}} + CM_{\text{TP}} + CM_{\text{TI}}}{\text{Atractividad}_{\text{Carro}} + \text{Atractividad}_{\text{TP}} + \text{Atractividad}_{\text{TI}}} \right)$$

$$CM_{\text{TI}} = \text{Atractividad}_{\text{TI}} * \left(\frac{CM_{\text{Carro}} + CM_{\text{TP}} + CM_{\text{TI}}}{\text{Atractividad}_{\text{Carro}} + \text{Atractividad}_{\text{TP}} + \text{Atractividad}_{\text{TI}}} \right)$$

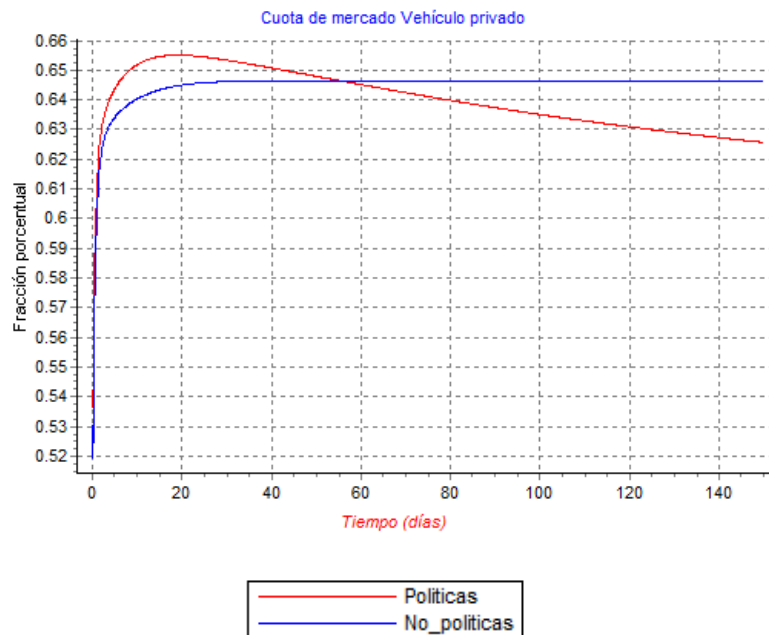
La Gráfica 9 muestra el total de kilómetros recorridos por vehículos privados bajo los dos escenarios de la Tabla 14. En el escenario sin políticas, línea de tendencia roja, se observa como tras la construcción inicial de vías para conectividad la política de construcción permanente para reducir la demanda inducida sigue generando mayor demanda de vehículo privado. En consecuencia, los kilómetros recorridos tienden a aumentar hasta alcanzar un estado de equilibrio el cual representa que la mayoría de la demanda de transporte está haciendo uso del vehículo privado como medio de transporte. Tal punto de equilibrio se debe a que la demanda total dentro del modelo es constante. En el caso del escenario con políticas, la política de cobros por congestión incrementa el costo de usar el vehículo privado. Como resultado, se desincentiva el uso de este medio de transporte y ello se refleja en la reducción de kilómetros recorridos tal como lo muestra la línea de tendencia azul de la Gráfica 9.

Gráfica 9. Kilómetros recorridos por vehículos privados - prototipo II



Menos kilómetros recorridos significa menor uso del vehículo privado. Esto se evidencia en la disminución de la cuota de mercado de este medio de transporte como se aprecia en la Gráfica 9. En el escenario con políticas una vez los cobros por congestión desincentivan el uso del vehículo, la alta calidad del transporte pública atrae todos aquellos conductores que han decidido cambiar su medio de transporte. Caso contrario ocurre con el escenario sin políticas donde la construcción constante para mitigar la DIT sigue afianzando el vehículo privado como medio de transporte predominante.

Gráfica 10. Cuota de mercado para vehículo privado

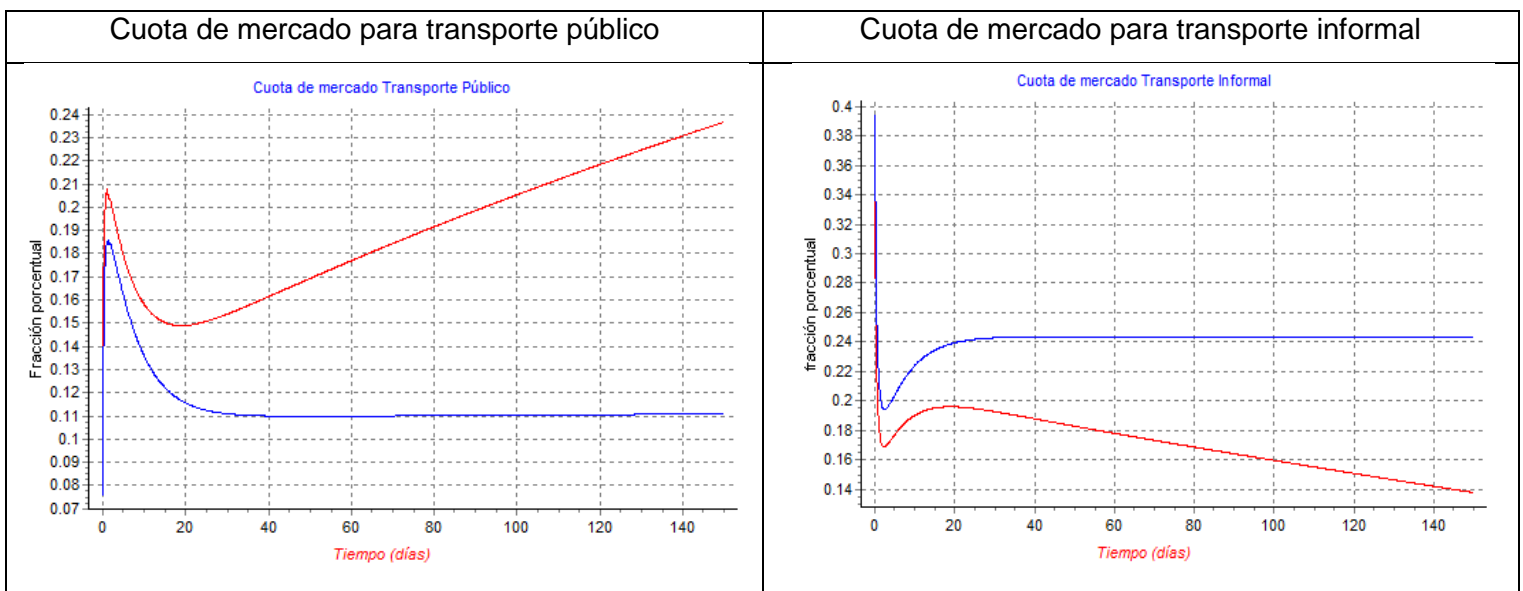


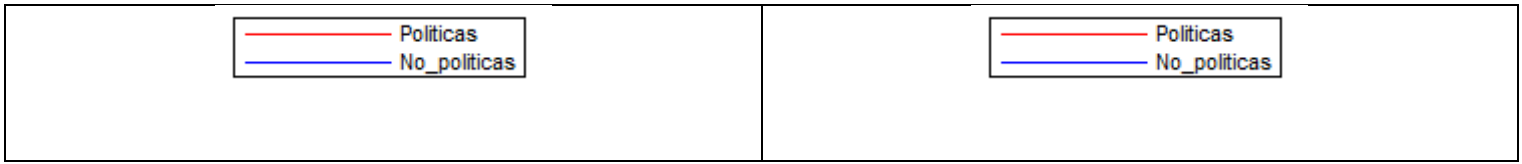
Aplicar la política de cobros por congestión no solo trae como resultado una reducción en el uso del vehículo privado; además, genera recursos económicos que pueden ser reinvertidos para mejorar la calidad y servicio del transporte público. Asumiendo que esta decisión se toma, dichos recursos sumados al dinero generado por las personas que hacen uso del transporte público, permiten realizar

más reinversiones en este medio de transporte para atraer tanto conductores de vehículos como personas que hacen uso del transporte informal.

Mayor calidad en el transporte público genera que su atractividad aumente y en consecuencia, más personas hagan uso de él. Esto se refleja en el aumento de su cuota de mercado tal como se observa en el escenario con políticas, línea de tendencia roja, de la gráfica izquierda en la Figura 12. Sin embargo en el escenario sin políticas donde la calidad del transporte público no se mejora, el transporte informal toma fuerza y aumenta su demanda como lo muestra el escenario sin políticas en la gráfica derecha de la Figura 12. Por lo tanto, cuando se mejora la calidad del transporte público no solo se atraen conductores de vehículos privados, sino que además se logra mitigar el transporte informal; el cual en el escenario sin políticas aumenta su cuota de mercado generando que más personas dejen de usar el transporte público.

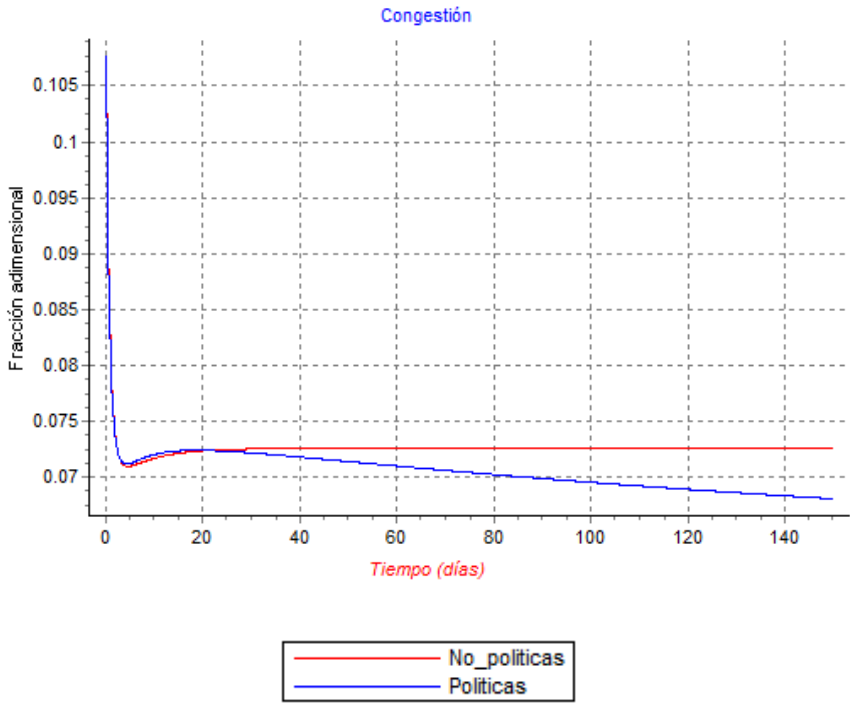
Figura 12. Cuotas de mercado de transporte público y transporte informal





Acorde a los resultados de simulación observados en las gráficas anteriores, es evidente que el escenario con políticas trae mejores resultados en la mitigación de la demanda inducida de transporte. Mitigar la DIT implica evitar la congestión de las vías construidas para garantizar conectividad, lo cual se observa en la Gráfica 11. Para el caso del escenario con políticas, línea de tendencia azul, se observa como el índice de congestión es menor con respecto al escenario donde solo se utiliza más construcción vial para mitigar los efectos de la DIT.

Gráfica 11. Congestión vial – prototipo II

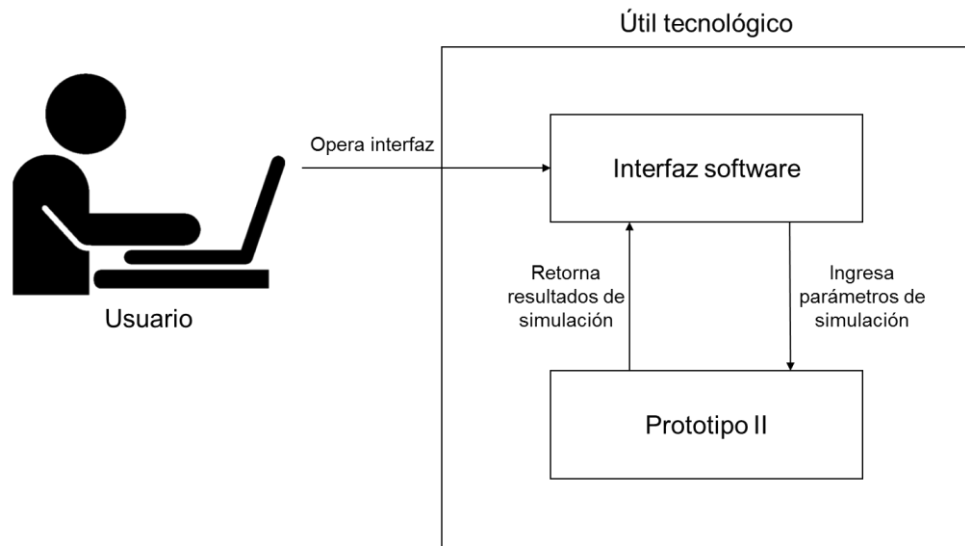


7. INTERFAZ SOFTWARE

En la sección anterior se presentó en detalle el segundo producto, denominado prototipo II del modelo dinámico-sistémico, asociado a la etapa “2” de la metodología propuesta. Este prototipo puede ser concebido como un elemento de apoyo en la toma de decisiones y generación de políticas públicas debido a que su principal contribución radica en representar estructuralmente, a un nivel de abstracción tal que permite la simulación por computador, las influencias que el transporte público y los cobros por congestión tienen sobre la demanda inducida de transporte (DIT); en contextos urbanos donde nuevas vías son necesarias para garantizar conectividad.

Sin embargo, las áreas de conocimiento y experticia de los colectivos de personas donde se genera política pública pueden no estar relacionadas con el modelado y la simulación utilizando dinámica de sistemas. Por lo tanto, la etapa “3” de la metodología se enfocó a desarrollar una interfaz software que opere el prototipo II del modelo tal como lo muestra la Figura 13. Estos dos elementos en conjunto son un útil tecnológico que permite realizar experimentación simulada y en consecuencia, facilita la apropiación del modelo matemático en grupos de tomadores de decisiones.

Figura 13. Descripción interacción usuario – interfaz software – modelo



A continuación se presentan algunas consideraciones básicas de diseño software para el desarrollo de la interfaz anteriormente mencionada.

7.1 Actor

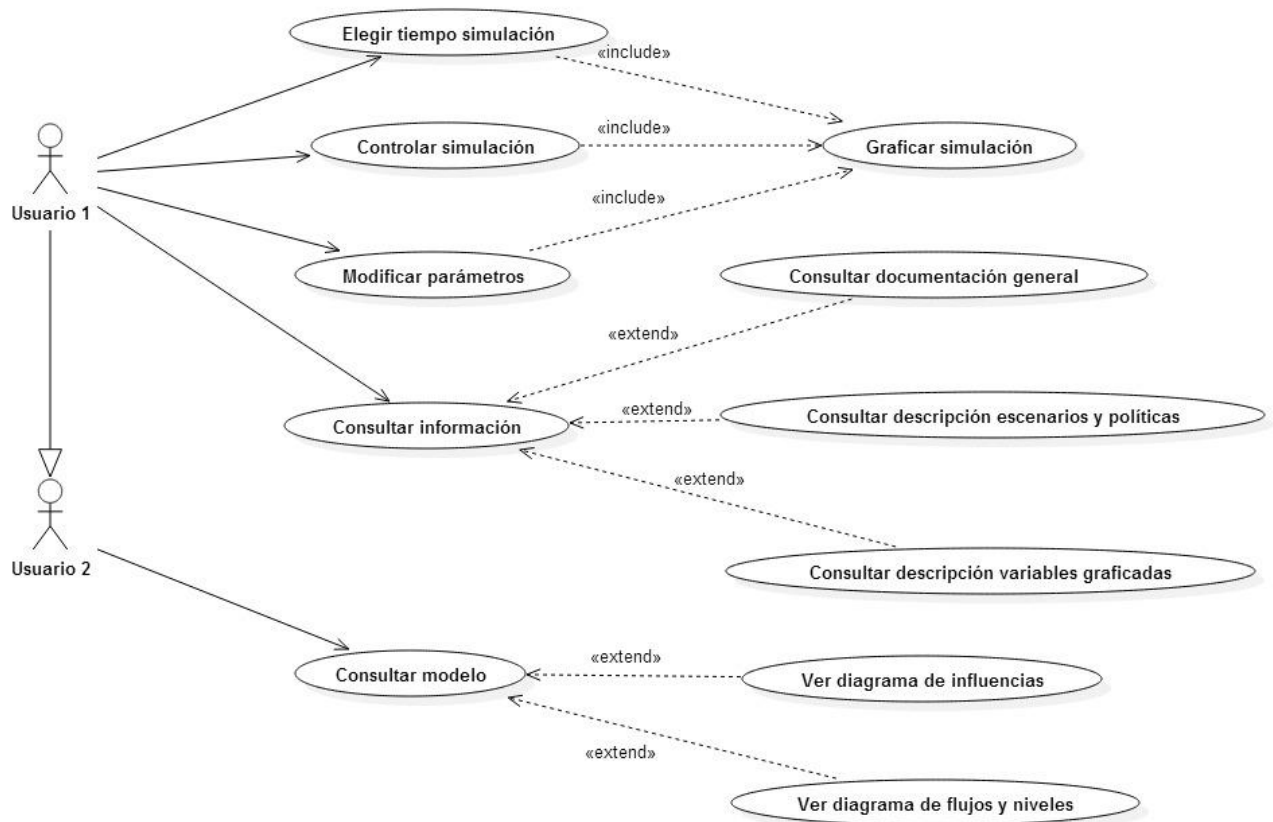
Un actor es una idealización de una persona externa o proceso que caracteriza las interacciones que los usuarios pueden tener con un sistema y sus respectivas funcionalidades (Rumbaugh, 2000). En este caso la definición de usuarios (actores) que podrán interactuar con la interfaz software, se realizó con base en lo propuesto en el libro “Modelado y simulación en la escuela” (Andrade et al., 2014). Allí se especifican tipos de usuarios que pueden hacer uso de un modelo dinámico-sistémico mediante una interfaz software.

Los tipos de usuarios seleccionados para operar la interfaz software propuesta son aquellos que tienen un conocimiento mínimo acerca de dinámica de sistemas; ellos son descritos a continuación:

- Usuario solo consciente de la presencia del modelo dinámico-sistémico en los simuladores (Usuario 1): usuario no conocedor de dinámica de sistemas que solo experimenta guiado por la interfaz al modificar parámetros y observar gráficos que representan los comportamientos de las variables de interés.
- Usuario consciente del modelo (Usuario 2): usuario capaz de leer los diagramas de influencias y flujos-niveles (puede leer estos diagramas pero no modificarlos). Esto le permite experimentar con la interfaz teniendo conocimiento del modelo que subyace en ella.

7.2 Diagrama de casos de uso

Figura 14. Diagrama de casos de uso



Las interacciones que el actor tiene con el sistema pueden ser representadas a través de casos de uso los cuales son interpretados como unidades coherentes de funcionalidad (Rumbaugh, 2000). El propósito de un caso de uso es definir una pieza de comportamiento coherente, sin revelar la estructura interna del sistema. De esta manera, la ejecución de cada caso de uso es independiente de los demás, aunque una implementación de múltiples casos de uso puede llegar a crear dependencias implícitas entre ellos. En la Figura 14 se observa el diagrama de casos de uso donde se incluyen los dos tipos de usuarios descritos en la sección anterior. Además, en este enlace web puede descargarse el anexo que contiene la especificación de cada caso de uso: https://dl.dropboxusercontent.com/u/85829023/Especificaci%C3%B3n_Casos_de_Uso.pdf

7.3 Diagramas de secuencia

El objetivo principal de la interfaz software es permitir al usuario realizar experimentación simulada con políticas dirigidas a desincentivar el uso del vehículo privado y fortalecer el transporte público. Esto requiere graficar resultados de simulación, asociados a variables de interés, a partir del ajuste de parámetros que permita evaluar diferentes escenarios; todo ello, sin necesidad que el usuario deba interactuar directamente con el modelo creado con el software evolución. Sin embargo, para que el usuario sea consciente de las decisiones que toma y del porqué de los resultados que observa, debe al menos conocer la estructura dinámico-sistémica, diagrama de influencias del prototipo II, que la interacción entre la DIT y la estrategia “Push-Pull”, es decir conocer la explicación que funda el simulador

Realizar tal experimentación simulada con la interfaz software requiere entonces tres actividades básicas: definir el tiempo de simulación, seleccionar valores

iniciales para los parámetros que pueden ser ajustados, y dar inicio a la simulación mediante los botones de control. Posteriormente, el modelo matemático ejecuta la simulación con los valores definidos por el usuario, tanto tiempo de simulación como valores de parámetros, y obtiene unos resultados que son retornados a la interfaz software para ser mostrados al usuario gráficamente.

Las figuras a continuación ilustran las secuencias de actividades que el usuario realiza a través de la interfaz para obtener los resultados de simulación del modelo.

Figura 15. Diagrama de secuencia para la actividad: seleccionar valores iniciales para parámetros de simulación

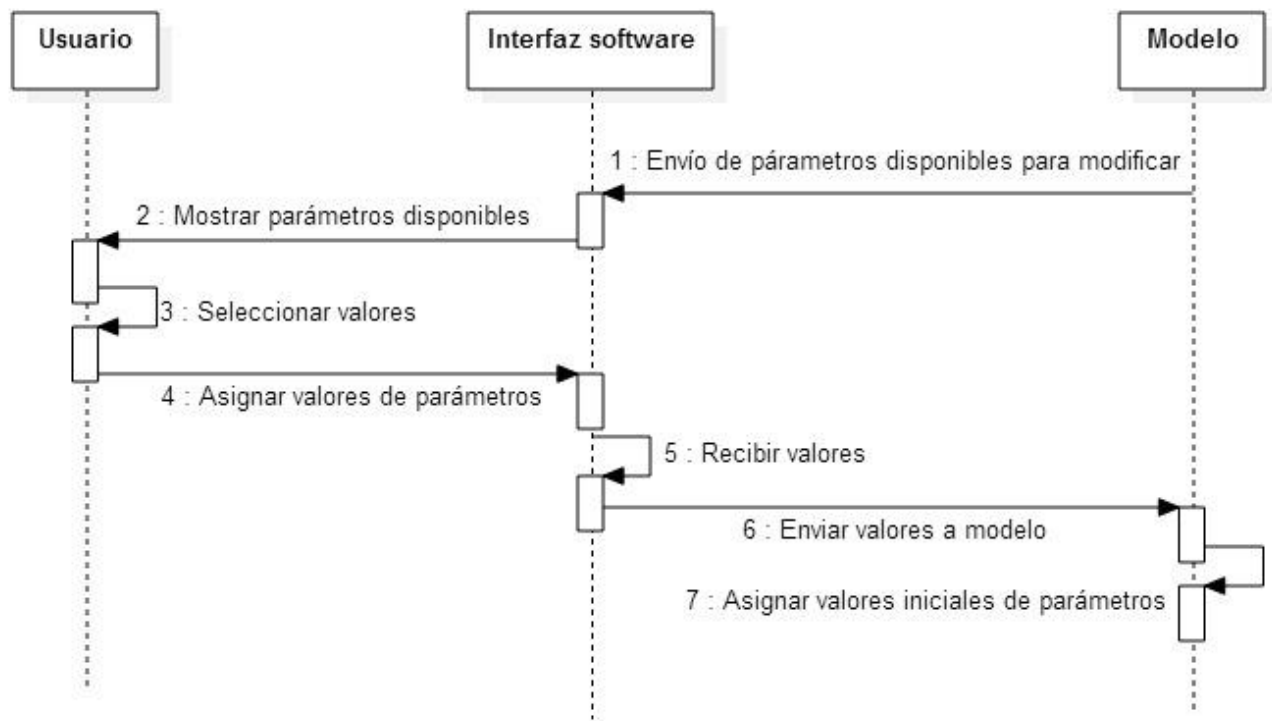


Figura 16. Diagrama de secuencia para la actividad: seleccionar tiempo de simulación

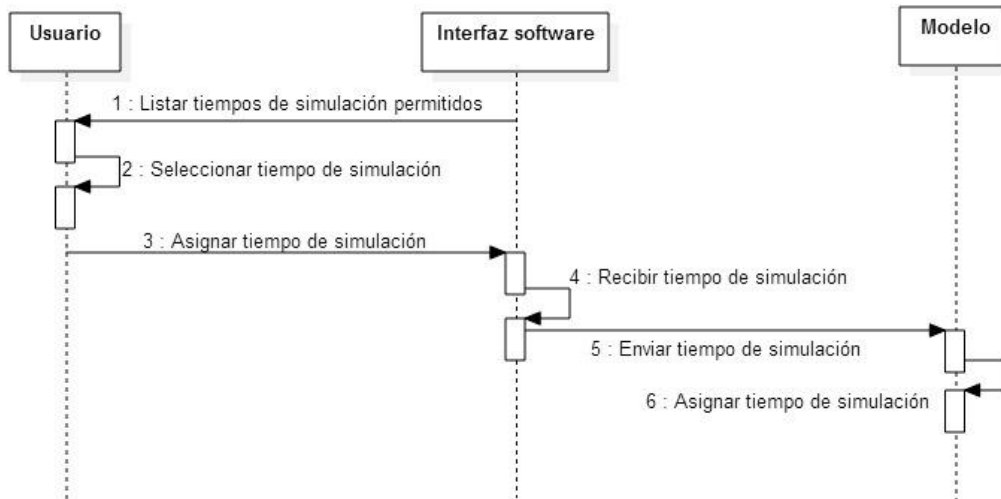
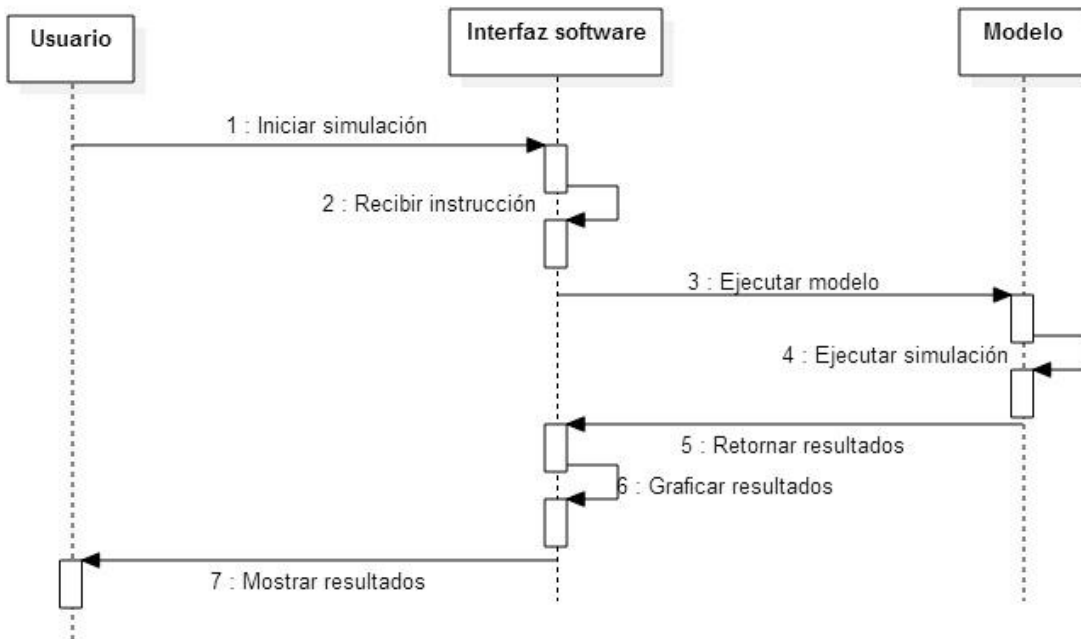


Figura 17. Diagrama de secuencia para la actividad: ejecutar simulación y graficar resultados



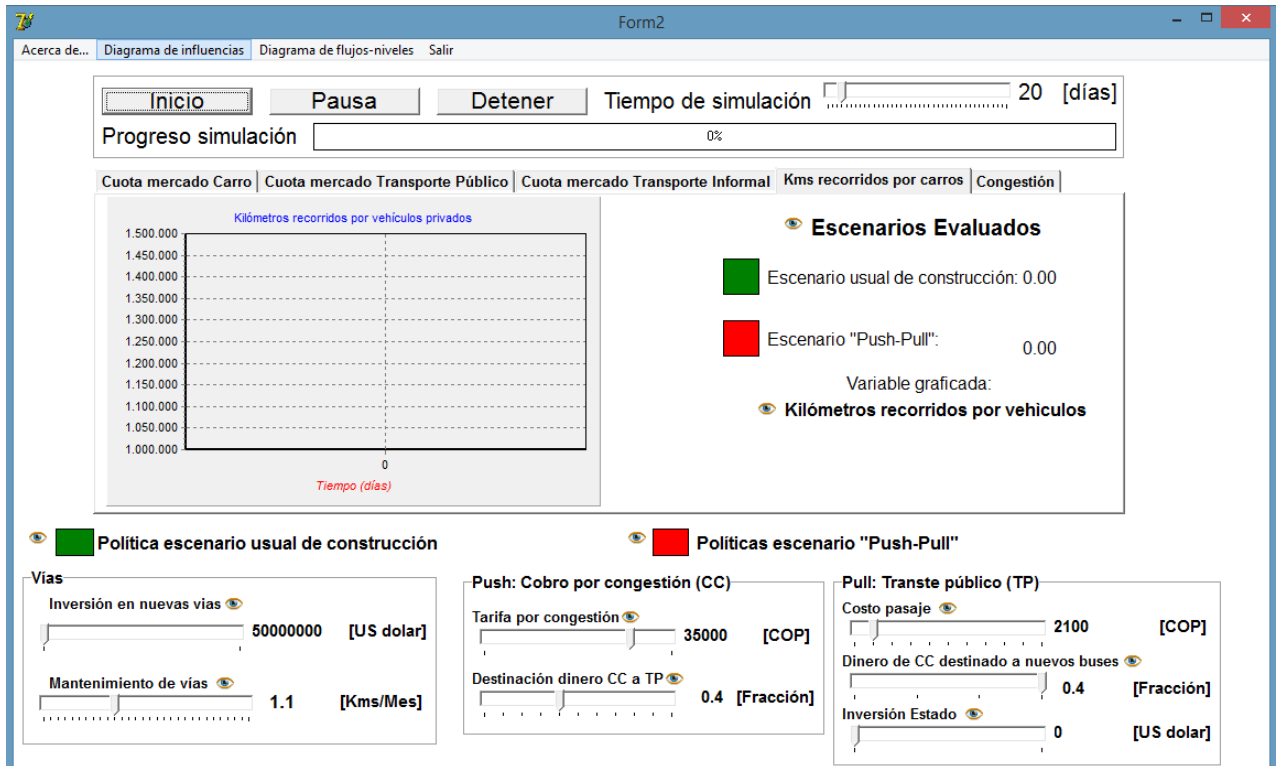
7.4 Interfaz desarrollada

El resultado final de la interfaz software desarrollada se observa en las imágenes continuación. Además, en este enlace web puede descargarse un archivo .rar que contiene la interfaz: <https://www.dropbox.com/s/oylgsjyfzhtbo6d/Interfaz.rar?dl=0>. Una vez descargado y descomprimido el archivo .rar se debe ingresar a la carpeta “Interfaz”; estando allí, se debe ejecutar el archivo llamado “Project1.exe”. Posteriormente, se observará la pantalla de inicio de la interfaz observada en la Figura 18 a partir de la cual se puede ingresar al simulador observado en la Figura 19.

Figura 18. Pantalla de inicio de interfaz software desarrollada



Figura 19. Interfaz software desarrollada



8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Prototipo I

Comprender por qué a partir de un estado de congestión, la construcción vial induce demanda de transporte que genera nueva congestión vehicular, es un aporte pertinente para apoyar la planificación del transporte en su objetivo de alcanzar una movilidad sostenible no fundamentalmente dependiente del vehículo privado. Con la revisión bibliográfica realizada se evidencia que, aunque el estudio de la demanda inducida de transporte (DIT) ha sido ampliamente desarrollado a nivel internacional mediante enfoques econométricos, a nivel latinoamericano escasamente ha habido una apropiación de dicho conocimiento. En este contexto, investigaciones donde se utilicen modelos econométricos reportados en la literatura pueden ser iniciativas pertinentes para cuantificar la DIT y tenerla en cuenta dentro de la toma de decisiones en transporte. Sin embargo, antes de medir este fenómeno, es necesario entender cuáles son las causas subyacentes que lo generan y así apoyar el diseño de políticas integrales que vayan más allá de la construcción vial intensiva para descongestionar la movilidad.

Con el propósito de mejorar el entendimiento causal acerca de la DIT propusimos una estructura realimentada como explicación conceptual de este fenómeno desde una perspectiva sistémica. Sin embargo, ¿Cómo sabemos que tal estructura en efecto si es una explicación conceptual de la DIT? Para ello fue necesario integrar la estructura realimentada a un modelo de simulación construido con dinámica de sistemas, prototipo I, que permitió simular cómo este fenómeno emerge a través del tiempo a partir de las interacciones entre los ciclos de realimentación de la estructura propuesta, Figura 3 de la sección 4. Habiendo obtenido dichos resultados de simulación, se consultó nuevamente la literatura de DIT para

identificar modos de referencia de este fenómeno, y se comprobó que el prototipo I sí reproduce dinámicamente los comportamientos característicos de la DIT.

A corto plazo, una vez finalizada la construcción vial las condiciones de flujo vehicular en las vías mejoran rápidamente, lo cual se traduce en mayores velocidades de viaje. Este beneficio induce que los vehículos ya en uso modifiquen su comportamiento de viaje y tiendan a permanecer más tiempo en las vías, lo que en consecuencia genera que más kilómetros sean recorridos por el parque automotor, tal como se observa en la Gráfica 6 de la sección 4. Algunos autores clasifican este efecto de la DIT como demanda inducida directa (Gorham, 2009), y normalmente se utiliza el concepto de elasticidad para estimar dichos incrementos en el número de kilómetros recorridos (Concas, 2013; Handy, 2014; He and Zhao, 2014; Litman, 2015; Shengchuan; 2012).

A mediano plazo los resultados de simulación, Figura 7 de la sección 4, muestran el segundo comportamiento característico de la DIT. Duranton y Turner (2011), en su trabajo denominado “la ley de la congestión vial”, argumentan que la construcción de nuevas vías genera más tráfico a causa de la “creación” de nuevos conductores de vehículo privado. En el prototipo I este tráfico adicional corresponde a los vehículos que previamente no hacían uso de las vías debido a la congestión inicial; posteriormente tras la ampliación de la malla vial, las condiciones de viaje percibidas por estos vehículos mejoran y la atraktividad de este medio de transporte aumenta. En consecuencia, dichos vehículos salen a las vías y se suman a los que ya previamente estaban circulando para reforzar aún más el incremento de kilómetros recorridos. Gorhman (2009) clasifica este efecto de la DIT como demanda inducida indirecta, e igualmente su estudio se ha limitado a cuantificar su impacto en la congestión vial mediante elasticidades

(Cervero and Hansen, 2002; Duranton and Turner, 2011; He and Zhao, 2014; Noland, 2001; Noland and Cowart, 2000).

El aporte significativo de la econometría en el estudio de la DIT ha sido corroborar la hipótesis que más kilómetros de vías inducen aumentos en el número de kilómetros recorridos por la población. Tales estimaciones basadas en el concepto de elasticidad permiten corroborar la existencia de este fenómeno a un nivel microeconómico. En este sentido, el prototipo I aporta a la literatura existente acerca de DIT utilizando un enfoque sistémico (Andrade et al., 2001), ya que su estructura realimentada genera que los comportamientos característicos del fenómeno emerjan a un nivel agregado, en el cual la relación lineal entre kilómetros recorridos y kilómetros de vías es representada dentro de un sistema de influencias circulares. Esto ofrece una representación global del fenómeno que en primer lugar, complementa la visión reduccionista de los modelos econométricos cuyo propósito es cuantificar incrementos discretos en la cantidad de viaje, y además facilita el diseño de políticas de intervención para modificar el comportamiento problema del sistema representado.

Prototipo II

Tomando como punto de partida la primera versión del modelo, se planteó un segundo prototipo con el propósito de formular políticas para intervenir la situación problema: demanda inducida de transporte (DIT). Dentro de los límites de la estructura realimentada del prototipo I las dos estrategias posibles de intervención podían ser: construcción intensiva para lidiar con este fenómeno, o definir políticas del lado de la demanda de transporte (DT), fortalecimiento medios alternativos y desincentivando el uso del vehículo privado, que eviten la congestión de la infraestructura vial existente a causa de la DIT. En este contexto, la estrategia de intervención seleccionada fue la de políticas del lado de la DT dando paso al

transporte público de alta calidad, sistema de buses de transporte rápido (BRT), y cobros por congestión como estrategia integral para mitigar la DIT.

La inclusión de dichas políticas generó una nueva estructura realimentada que integrada a un modelo de simulación construido con dinámica de sistemas deja como resultado el prototipo II del modelo. En este prototipo la construcción vial ejecutada se enmarca en un único rol de política utilizada para garantizar conectividad en contextos urbanos donde el desarrollo urbano y el crecimiento poblacional requieren más vías que permitan a la población desplazarse. Por lo tanto, el propósito del segundo prototipo es comprender y explicar de forma realimentada cómo en conjunto un sistema de transporte público y los cobros por congestión logran lidiar la DIT en dichas vías construidas, sin pretender nivel de exactitud alguno en los resultados de simulación del modelo.

La elección de la política de mejoramiento de la calidad de un sistema (BRT), como estrategia “Pull” para atraer conductores de vehículo privado, se justifica en primer lugar debido a que este medio de transporte ha sido ampliamente implementado en Latino América (Bonicelli, 2015), y además, es el modo de transporte alternativo existente dentro del contexto del Área Metropolitana de Bucaramanga cuyos datos de movilidad disponibles orientan la calibración de parámetros en los prototipos I y II del modelo. Por otra parte, aunque los cobros por congestión, como estrategia “Push” para desincentivar el uso del vehículo privado, no es una política que ya se ha puesto en marcha en Latino América, diferentes tomadores de decisiones y académicos han venido discutiendo las implicaciones que traería consigo la implementación de esta política tomando como punto de referencia algunos casos de éxito a nivel mundial, tales como Estocolmo y Londres (Rivasplata, 2013; Mahendra, 2008).

Acorde a los resultados de la segunda revisión bibliográfica, no se encontraron trabajos donde una vez estimada la DIT se planteará un análisis de políticas para mitigar este fenómeno. Sin embargo, sí se encontraron trabajos que discuten diferentes paradigmas de pensamiento que orientan el diseño y ejecución de políticas para lidiar con la congestión vial (Litman, 2015a; Næss et al., 2014), y trabajos que mediante diferentes métodos y técnicas de modelado matemático evalúan el impacto de estrategias para descongestionar la movilidad, sin considerar explícitamente la DIT como generador de congestión. Dentro de estos últimos trabajos, dinámica de sistemas es un enfoque ampliamente utilizado en la evaluación de políticas para reducir la congestión; y aunque no se encontró trabajo alguno que considerara simultáneamente las políticas de transporte público y cobros por congestión, sí se identificaron trabajos donde dichas políticas eran evaluadas de forma independiente o en combinación con otras estrategias no consideradas dentro del prototipo II.

Valiky et al. (2008), en su trabajo titulado *Strategic Assessment of Transportation Demand Management Policies: Tehran Case Study*, discute la influencia que el transporte público (TP) tiene sobre el uso del vehículo privado (VP). Sus resultados muestran que el TP logra a corto y mediano plazo disminuir la cuota de mercado de VP; sin embargo, a largo plazo tal valor tiende nuevamente a aumentar y el uso del TP a decrecer. Esta dinámica se observa en los resultados de simulación de la gráfica izquierda en la Figura 12 (sección 6) donde la cuota de mercado de TP, en el escenario donde solo se prioriza la construcción vial, disminuye en el largo plazo. Esto quiere decir que la existencia per se de este medio de transporte no garantiza una disminución en el uso de VP de forma sostenida, y solo cuando hay apoyo económico externo, que en este caso corresponde al dinero recaudado a través de los cobros por congestión, se garantiza una calidad de servicio sostenida en el tiempo que atrae conductores de

VP desincentivados por la política “Push”, tal como lo muestra el escenario con políticas en la misma gráfica de la Figura 12.

Dado caso que la política “Pull” este implementada pero no se fortalezca con la reinversión de recursos económicos provenientes de la política de cobros por congestión, la calidad del sistema de TP disminuye progresivamente generando pérdida de usuarios. Esto en un contexto como el del Área Metropolitana de Bucaramanga induce una mayor demanda de transporte informal (TI), tal como se observa en la cuota de mercado de TI para el escenario sin políticas en la gráfica derecha de la Figura 12 (sección 6). En consecuencia, el TI inducido incrementa el número total de kilómetros recorridos por la población, lo cual se traduce en más congestión vial. Esta dinámica se observa en el trabajo de Sabounchi et al. (2014), donde utilizando un modelo dinámico-sistémico se evalúa el impacto que reinvertir los recursos de un esquema de cobros por congestión tiene el en aumento y/o disminución de la demanda de transporte de metro. Sin embargo, en este caso no se considera un sistema de metro sino un sistema BRT y además, se incluye un tercer modo de transporte característico de países desarrollados como lo es el transporte informal.

Con la discusión de los resultados de simulación asociados al prototipo II, es evidente que el aporte de este prototipo radica en proveer una representación realimentada de la complejidad estructural subyacente a las interacciones dinámicas entre las políticas de transporte mencionadas y la DIT. Sin embargo, somos conscientes que tal representación se mantiene en un plano conceptual y hacen falta futuros esfuerzos de modelado matemático que permitan representar toda la complejidad asociada al diseño y puesta marcha de dichas políticas. Además, sería necesario incluir diferentes factores socio-económicos que representen la respuesta de la población ante el funcionamiento de políticas que a

la fecha no han sido introducidas en América Latina, como lo es el caso de los cobros por congestión.

Interfaz software

El componente fundamental de los sistemas sociales es la realimentación (Schaffernicht, 2012). Todo sistema social es inherentemente dinámico y complejo; por tal motivo, utilizar dinámica de sistemas es un enfoque pertinente para abordar el estudio de la demanda inducida de transporte (DIT) y para explorar políticas de intervención de este fenómeno. Tal intervención requiere necesariamente de un “laboratorio de pruebas” donde se pueda realizar experimentación simulada, y a partir de la cual se discuta cómo diferentes decisiones adoptadas para influir el sistema, generan un conjunto de futuros posibles (Schaffernicht, 2012).

Dicho “laboratorio de pruebas” aporta en la exploración de políticas en colectivos de personas donde se toman decisiones asociadas a la planificación del transporte. Sin embargo, el campo de experticia de los tomadores de decisiones no necesariamente incluye conocimiento de dinámica de sistemas. Por lo tanto, se requiere un útil tecnológico que opere el prototipo II, construido para intervenir la DIT, a un nivel de abstracción tal que libere al usuario de interactuar de manera directa con la complejidad matemática del modelo mismo.

En el contexto anteriormente descrito, se propuso integrar el prototipo II del modelo a una interfaz software que en su conjunto constituyen un útil tecnológico que facilita realizar experimentación simulada. En este “laboratorio virtual de pruebas” las variables independientes son las políticas de transporte público y cobros por congestión junto con la reinversión de dinero entre ellas. Dichas

políticas pueden ser evaluadas en diferentes escenarios gracias a controles gráficos que le permiten al usuario ajustar valores de parámetros, asociadas a dichas políticas, sin inspeccionar directamente el modelo. Una vez configurados los valores iniciales de las variables independientes, los resultados de simulación o variables dependientes pueden ser observados gráficamente por el usuario. Finalmente, la estructura realimentada del prototipo II puede ser consultada para que dichos resultados sean explicados y entendidos como comportamientos dinámicos que emergen a partir de ella.

A través del útil tecnológico desarrollado es posible mejorar el entendimiento causal de la DIT; y a pesar que las políticas incluidas en el prototipo II para intervenir este fenómeno tienen una connotación conceptual, la interfaz software es un medio para adquirir conocimiento de la complejidad estructural subyacente a la interacción entre las políticas de transporte implementadas y la DIT. Tal comprensión sistémica conduce a identificar elementos clave que deben ser priorizados en la puesta en marcha de políticas discutidas actualmente en Colombia acerca de soluciones de transporte inteligente; las cuales a nivel internacional han tenido éxito pero que a nivel nacional debido a las condiciones socio-económicas particulares de los contextos urbanos difícilmente alcanzarán los mismos resultados si previamente no hay un entendimiento estructural de ellas.

Validación

El presente apartado se enfoca en discutir la validez del prototipo I como explicación conceptual de la demanda inducida de transporte (DIT). Oral y Kettani (1993) consideran que el objetivo de una validación adecuada es generar información que ayude a los usuarios potenciales a aceptar o rechazar un modelo. Por lo tanto, teniendo en cuenta que los propósitos de los modelos varían según

sus usuarios, no se puede utilizar exactamente el mismo enfoque de validación para todos los modelos. Dependiendo de la escuela filosófica, se pueden distinguir tres concepciones sobre la validez de un modelo (Barlas, 1996; Déry et al., 1993):

- **Lógica positivista:** visión epistemológica que no vincula la validación del modelo al propósito del mismo; en lugar de ello, considera que el modelo es validado, sólo si proviene de observaciones basadas en hechos, de los cuales el modelo es un reflejo objetivo.
- **Teoría del falsacionismo:** visión que considera que la validación de los modelos debe adoptar la forma de un proceso de falsación dirigido a comprobar las teorías y los modelos a través de las hipótesis. Sin embargo, teniendo en cuenta que los modelos se derivan de las teorías, las cuales se sustentan en conjeturas, nunca se podría asegurar que un modelo es completamente válido; en lugar de ello, si dicho modelo no ha sido todavía rechazado aún, se considera un modelo validable.
- **Filosofía holista:** visión en la cual se afirma que el modelo debe ser una totalidad con sentido que es útil para el propósito que ha sido creado; en este sentido se considera que el conocimiento adquirido a partir del modelo es válido, sólo si guía a acciones efectivas; es decir, si es un instrumento útil. Por tanto, el proceso de validación del modelo no radica en preguntarse si es verdadero o no, sino si es útil para el propósito que ha sido creado.

Teniendo en cuenta las concepciones de validez anteriormente descritas, en el proceso de validación del prototipo I deben excluirse los tests estadísticos comúnmente utilizados por la econometría bajo la lógica positivista. Estos tests asumen que las variables del modelo no están auto-correlacionadas y no presentan multi-colinealidad; sin embargo, el prototipo I opera a partir de una estructura realimentada la cual genera que los resultados de simulación estén auto-correlacionados y con correlación cruzada debido a las influencias circulares

entre las variables que conforman la estructura. Además, el prototipo I no tiene una única variable de interés en la cual centrar dichos tests; en lugar de ello cuenta con múltiples variables de interés asociadas a los efectos de la DIT. Por lo tanto, si el proceso de validación del modelo utilizara tests estadísticos, surgiría el problema de estimar el nivel de significación de las múltiples hipótesis circulares dentro de la estructura realimentada.

En el contexto del presente trabajo de maestría, el prototipo I es una explicación conceptual no experimental en la que el modelo representa una teoría acerca del funcionamiento de la DIT; centrándose en la comprensión estructural y aprendizaje de este fenómeno para tenerlo en cuenta dentro de la toma de decisiones. En este sentido, la validación del prototipo se aborda desde la visión holística e instrumental donde la concepción de validez se construye mediante la solidez y la utilidad del modelo. Por lo tanto, el modelo debe comportarse de forma plausible y generar los modos de comportamiento observados en el sistema real. A partir de esto, el proceso de validación comienza a extenderse hasta posiblemente involucrar a personas no participes de la construcción del modelo (Álvarez & Pérez-Bustamante, 2004).

Bajo la visión holista el prototipo I se considera una explicación conceptual válida de la DIT, ya que sus resultados de simulación reproducen los modos de referencia definidos por observaciones econométricas para este fenómeno, sin ahondar en cuantificar la exactitud entre datos reales y los resultados de simulación obtenidos. En segundo lugar, con el apoyo de la ingeniería Claudia Baez, investigadora en el área de transporte adscrita al grupo de investigación GEOMÁTICA de la escuela de ingeniería civil-UIS, se validó que los resultados de simulación del prototipo I se ajustaban a la teoría existente acerca de DIT; y además, se procuró que dicho prototipo cumpliera con las pruebas básicas de

evaluación de la estructura de un modelo dinámica-sistémico, tal como el análisis de consistencia dimensional (Sterman, 2000). En este contexto, la estructura realimentada representa una explicación de la DIT, y puede ser concebida como una hipótesis dinámica de este fenómeno basándose en una premisa fundamental del paradigma dinámico-sistémico: a estructuras causales similares corresponden comportamientos similares (Andrade et al, 2001; Forrester, 1971).

9. CONCLUSIONES

- El prototipo I es una explicación conceptual acerca del funcionamiento de la demanda inducida de transporte (DIT). Este aporte es pertinente para mejorar la comprensión de la complejidad estructural subyacente a este fenómeno y aunque el concepto más general de demanda inducida aplica para el sector transporte en general, la demanda de transporte motorizado suplida con nuevas vías requiere especial atención debido a las implicaciones sociales, económicas y ambientales tanto de la construcción vial como del uso del vehículo privado. Algunos tomadores de decisiones en países en vías de desarrollo con crecientes tasas de motorización podrían argumentar que la construcción vial es una política que al menos puede mantenerse a la cabeza de la congestión vial. Sin embargo, acorde a los resultados de simulación del prototipo I es posible afirmar que una concepción de transporte que depende principalmente del vehículo privado está condenada a estar atrapada en la congestión. No importa que tanta capacidad vial sea construida, las altas velocidades de viaje proveídas por esta política son absorbidas por los efectos de la DIT. En este contexto, escapar de tal concepción de transporte requiere crear un nuevo paradigma de transporte en el cual la construcción de vías no sea una política predominante para mejorar la movilidad. En este sentido, el prototipo I es además un medio útil para apoyar la transición del antiguo paradigma de transporte hacia el paradigma contemporáneo, donde se fortalezcan medios sostenibles de transporte y se promueva su adopción por parte de la población.
- El prototipo II conduce a un mejor entendimiento causal de cómo la política pública puede fortalecer el transporte público para lidiar con los efectos de la DIT, al atraer a este medio de transporte conductores instrumentales que dejan

el vehículo privado debido a los cobros por congestión. Dichos conductores corresponden a las personas que toman la decisión de usar bien sea el transporte público o el vehículo privado basándose en factores instrumentales tales como velocidad, confort, frecuencia, entre otros. Sin embargo, es necesario reconocer que existen conductores simbólicos-afectivos para los cuales el vehículo privado representa estatus social, y por lo tanto no están dispuestos a dejar este medio de transporte sin importar cuáles son las condiciones de la movilidad y que tan atractivo es el transporte público. Por lo tanto, es necesario explorar más estrategias tanto para mantener los conductores instrumentales en el transporte público como para atraer a conductores simbólicos-afectivos a que usen medios sostenibles de transporte, y así lograr el objetivo de una movilidad no fundamentalmente dependiente del vehículo privado.

- Actualmente la rápida expansión urbana, el crecimiento poblacional, las elevadas tasas de motorización (número de vehículos privados por habitantes) y la creciente congestión vial, han promovido una necesidad percibida de más vías entre los tomadores de decisiones en algunas ciudades colombianas. Sin embargo, la evidencia existente acerca de DIT ha conducido a que diferentes entidades estatales reconozcan que nuevas vías solo atraerán más vehículos, y por lo tanto, se han preocupado por promover la adopción de soluciones de transporte inteligente, desarrolladas a nivel internacional, donde la tecnología juega un rol importante al monitorear condiciones de movilidad en tiempo real que permita tomar decisiones respecto a la planificación del transporte. Aunque dichas iniciativas son soluciones plausibles, el éxito que han tenido a nivel internacional no es garantía para que suceda lo mismo a nivel nacional ya que las condiciones socio-económicas particulares de los contextos urbanos en Colombia divergen significativamente de las urbes donde esas iniciativas han sido implementadas; por lo tanto, difícilmente alcanzarán los mismos

resultados si previamente no hay un entendimiento estructural-causal de la movilidad en Colombia, asumiendo el contexto cultural, económico y de medios de transporte existentes.

En el contexto anteriormente descrito, la interfaz software, desarrollada desde una perspectiva sistémica, es un útil tecnológico que puede apoyar procesos de aprendizaje en colectivos de planificación del transporte para mejorar el entendimiento causal de fenómenos complejos de movilidad como lo es la DIT. Tal comprensión sistémica puede conducir a identificar elementos claves que deben ser priorizados en la puesta en marcha de las soluciones de transporte inteligente. En este sentido, a medida que mejor se comprende la problemática de movilidad, es posible saber con mayor exactitud qué elementos deben ser monitoreados; lo cual quiere decir, que más acertadas serán las decisiones que se toman para intervenir la situación problema.

10. TRABAJO FUTURO

El presente trabajo de maestría facilita la comprensión de la demanda inducida de transporte (DIT) con la ayuda de un modelo descriptivo-explicativo y un apoyo informático que libera a los usuarios potenciales de interactuar con la complejidad matemática del modelo mismo. Este esfuerzo investigativo deja como resultado un útil tecnológico que puede apoyar a: (1) tomadores de decisiones en la formulación de políticas para desincentivar el uso del vehículo privado, (2) académicos y especialistas en el campo de la ingeniería civil y de transporte ofreciendo un enfoque dinámico-sistémico que complementa análisis econométricos realizados de DIT, y (3) población en general para comprender y concientizar acerca de las implicaciones socio-económicas y ambientales que trae consigo el uso intensivo del vehículo privado. Sin embargo, lograr una mayor difusión y apropiación del útil tecnológico por parte de los tres sectores mencionados requiere trabajo futuro en el cual se mejore tanto el modelo dinámico-sistémico como la interfaz software.

Para el caso del modelo, dinámica de sistemas ofrece una visión holista de la DIT en la cual se asume que toda la demanda de transporte toma decisiones, respecto a usar vehículo privado o transporte público, de forma homogénea. En ese sentido, es necesario vincular otras técnicas de modelado matemático que complementen el estudio de la problemática aun nivel micro, como lo es el caso del modelado basado en agentes y reglas, para caracterizar cómo diferentes agentes, que de forma agregada constituyen la demanda de transporte, toman decisiones frente a las medios de transporte disponible; además, es necesario vincular lógica difusa para lidiar con la complejidad asociada a dichos procesos de toma de decisiones donde diferentes factores socio-económicos de la complejidad social entran en juego.

El uso de otras técnicas de modelado matemático no implica la construcción de modelos aislados que ofrezcan representaciones fragmentadas de la realidad. En lugar de ello, es necesario realizar labores investigativas enfocadas a estudiar lineamientos metodológicos para la integración de dinámica de sistemas, modelado basado en agentes y lógica difusa, que faciliten la construcción de modelos, con descripciones macros y micros, para el estudio de la complejidad estructural asociada a fenómenos sociales de movilidad.

En cuanto a la interfaz software es necesario realizar validación de su diseño para que tomadores de decisiones, académicos y especialistas encuentren en ella un herramienta informática que oriente la planificación del transporte. Ello implica profundizar en el estudio de diseño y análisis de software de ambientes virtuales, conocidos como micromundos fundados en el pensamiento sistémico (Andrade et al., 2014), que pueden aportar al aprendizaje en la planificación del transporte; sin olvidar que hoy día ya existen softwares para el modelado macro y micro de fenómenos de transporte, cuyo enfoque econométrico puede ser complementado con la perspectiva sistémica mencionada.

Tomando en cuenta las mejoras que pueden ser realizadas al útil tecnológico desarrollado en este trabajo de maestría, los campos de aplicación potencial para dicho trabajo futuro se ubican en:

- Transformaciones a nivel interno de las organizaciones de planificación pública en la forma como se toman decisiones, para que ellas sean apoyadas en útiles tecnológicos que representen y permitan intervenir situaciones problemas de movilidad con un enfoque sistémico que tenga en

cuenta la complejidad estructural asociada a la dinámica social; y así, evitar políticas enfocadas a tener resultados temporales a corto plazo.

- Propuestas de estructuras realimentadas para modelos econométricos que permitan identificar variables claves de la complejidad social de la movilidad que deben ser intervenidas en el contexto de políticas de transporte inteligente.

11. DIVULGACIÓN

Con los resultados alcanzados en el prototipo I del modelo se logró una publicación en la revista *Organization - Journal of Management, Information Systems and Human Resources*, adscrita a la Facultad de ciencias organizacionales en la National University Library Ljubljana, en Eslovenia. La revista es homologada por COLCIENCIAS en categoría B.

- Angarita-Zapata, J. S., Andrade-Sosa, H. H., Parra-Valencia, J. A. (2016). Understanding the structural complexity of induced travel demand in decision-making: a system dynamics approach. *Organization - Journal of Management, Information Systems and Human Resources*, Volume 49 (3). DOI: 10.1515/orga-2016-0013.

Además, el prototipo I se socializó con la comunidad nacional y latinoamericana de dinámica de sistemas. Allí el modelado matemático fue presentado en la modalidad de ponencia en un evento llevado a cabo en Cartagena (Colombia) el pasado octubre de 2015.

- Angarita-Zapata, J. S., Andrade-Sosa, H. H., Parra-Valencia, J. A. (2015). Construcción de vías y congestión vial: una relación que genera efectos contra-intuitivos. Trabajo presentado como ponencia en el XIII Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas y XIII Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas. Cartagena de Indias - Colombia, Octubre 21, 22 y 23. ISBN 978-958-46-8355-7.

En cuanto al prototipo II del modelo, este fue divulgado en la comunidad internacional y nacional de dinámica de sistemas en 2016.

- Angarita-Zapata, J. S., Andrade-Sosa, H. H. (2016). Structural policies to address induced travel demand by road construction. Trabajo presentado como poster en 34th International Conference of the System Dynamics Society. Delft – Holanda, Julio 18, 19, 20 y 21. ISBN: memorias en elaboración por parte del comité organizador del evento.
- Angarita-Zapata, J. S., Andrade-Sosa, H. H. (2016). Public transport and congestion pricing: structural policies to address induced travel demand by road construction. Trabajo presentado como ponencia en el XIV Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas. Medellín – Colombia, Septiembre 7, 8 y 9. ISBN: memorias en elaboración por parte del comité organizador del evento.
- Angarita-Zapata, J. S., Andrade-Sosa, H. H. (2016). Can high quality of public transport and congestion pricing discourage car use in some Latin American urban contexts? Trabajo aceptado como ponencia para ser presentado en el XIV Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. Sao Pablo – Brasil, Octubre 19, 20 y 21. ISBN: evento por realizar.

BIBLIOGRAFÍA

Achachlouei, M. A., Hilty L, (2014). Modelling rebound effects in system dynamics. Proceedings of the 28th EnviroInfo 2014 Conference, Oldenburg, Germany. ISBN: 978-3-8142-2317-9

Acheampong, R. (2015). Land use–transport interaction modeling: A review of the literature and future research directions. *The Journal of Transport and Land Use*, Volume 8, No. 3, pp. 1-28. DOI: [dx.doi.org/10.5198/jtlu.2015.806](https://doi.org/10.5198/jtlu.2015.806).

Aftabuzzaman, A., Currie, G., Sarvi, M. (2010). Evaluating the Congestion Relief Impacts of Public Transport in Monetary Terms. *Journal of Public Transportation*, Vol. 13, No. 1. ISSN: 1077-291X.

Aftabuzzaman, Md., Currie, G., Sarvi, M. (2011). Exploring the underlying dimensions of elements affecting traffic congestion relief impact of transit. *Cities*, issue 28, pp. 36–44. DOI: [10.1016/j.cities.2010.08.002](https://doi.org/10.1016/j.cities.2010.08.002).

Alasad, R., Motawa, I., Ogunlana, S. (2013). A System Dynamics-Based Model For Demand Forecasting In PPP Infrastructure Projects – A Case Of Toll Roads. *Organization, Technology and Management in Construction* 6(2). DOI: [10.5592/otmcj.2013.2.4](https://doi.org/10.5592/otmcj.2013.2.4).

Álvarez, Y., Pérez-Bustamante, G. (2004). La validación de los modelos de dinámica de sistemas. Trabajo presentado en el II Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas, Chile, Talca.

Ambarwati, L., Verhaeghe, R., Pel, A., Van Arem, B. (2014). Development of Public Transport System Strategies to Control Urban Sprawl. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 6. DOI: [10.7763/IJET.2014.V6.739](https://doi.org/10.7763/IJET.2014.V6.739).

Anderson, M. L. (2013). Subways, strikes, and slowdowns: the impacts of public transit on traffic congestion. National bureau of economic research, Cambridge. Disponible en: http://are.berkeley.edu/~mlanderson/pdf/Anderson_transit.pdf].

Andrade, H. H., Dyer, I., Espinosa, A., López, H., Sotaquirá, R. (2001). Pensamiento Sistémico: Diversidad en búsqueda de Unidad. Bucaramanga, Colombia: Ediciones Universidad Industrial de Santander.

Andrade, H. H., Parra, J. A., Pineda, E. (2004). Dinámica de sistemas y econometría: en la búsqueda de Posibilidades o imposibilidades de reconocimiento a partir de la Reflexión de una experiencia en economía. Trabajo presentado como ponencia en el II Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistema. Talca, Chile, 2004.

Andrade, H. H., Navas, X. M., Maestre, G. P., López, G. (2014). El modelado y simulación en la escuela. Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander.

Andrade, H. H., Dyer, I., Espinosa, A., López, H., Sotaquirá, R. (2001). Pensamiento Sistémico: Diversidad en búsqueda de Unidad. Páginas 23, 24, 235. Ediciones Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Armah, F. A., Yawson, D. O., Pappoe, A. (2010). A systems dynamics approach to explore traffic congestion and air pollution link in the city of Accra, Ghana. Sustainability, vol. 2, no. 1, pp. 252-265. DOI: 10.3390/su2010252.

Bamberg, S., Fujii, S., Friman, M., Garling, T. (2011). Behavior theory and soft transport policy measures. Transport Policy, issue 18, pp. 228–235. DOI: 10.1016/j.tranpol.2010.08.006.

Bamberg, S., Hunecke, M., Blobaum, A. (2007). Social context, personal norms and the use of public transportation: Two field studies. Journal of Environmental Psychology, issue 27, pp. 190–203. DOI: 10.1016/j.jenvp.2007.04.001.

Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. System Dynamics Review, Vol 12 No 3, pp 183-210.

Barlas, Y., Carpenter, S. (1990). Philosophical roots of model validation: Two paradigms. System Dynamics Review, Vol 6 No 2, pp 148-166.

Bar-Yosef, A., Martens, K., Benenson, I. (2013). A model of the vicious cycle of a bus line. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 54, issue C, pp. 37-50. 10.1016/j.trb.2013.03.010.

Bereciartua, P., Noto, G. (2015). A new transportation planning approach for improving urban areas attractiveness: a case study for Buenos Aires City. Academia Nacional de Ingeniería de la República Argentina, Instituto de Transporte.

Beria, P., Maltese, I., Mariotti, I. (2014). Multicriteria versus Cost Benefit Analysis: a comparative perspective in the assessment of sustainable mobility. *Eur. Transp. Res. Rev.*, issue 4, pp.137–152. DOI 10.1007/s12544-012-0074-9.

Bernardino, J. P. R., Van der Hoofd, M. (2013). Parking Policy and Urban Mobility Level of Service – System Dynamics as a Modelling Tool for Decision Making. *EJTIR*, Issue 13(3), pp. 239-258. ISSN: 1567-7141.

Bianchi, C., Tomaselli, S. (2015). A dynamic performance management approach to support local strategic planning. *International Review of Public Administration*, Vol. 20, No. 4, pp. 370–385. DOI: dx.doi.org/10.1080/12294659.2015.1088687.

Boarnet, M. G., Chalermpong, S. T., (2002). New Highways, Induced Travel, and Urban Growth Patterns: A “Before and After” Test. A final report submitted to The University of California Transportation Center and The Environmental Protection Agency. Disponible en: www.escholarship.org/uc/item/7426232j

Bonicelli, E. (2015). Social sustainability and mobility in Curitiba: bus rapid transit in the “green city” of Brazil. Thesis Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Arts in Latin American Studies in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015. Disponible en: www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/78519/BONICELLI-THESIS-2015.pdf?sequence=1].

Buehler, R., Pucher, J. (2011). Making public transport financially sustainable. *Transport Policy*, issue 18, pp. 126–138. DOI: 10.1016/j.tranpol.2010.07.002.

Bunge, M. (2014). Big questions come in bundles, hence they should be tackled systemically. *Systema: connecting matter, life, culture and technology* 2(2) 2014. Retrieved October 1, 2015, from www.systema-journal.org/article/view/346.

Callejas, M., Valero, H. A., Alarcón, A. C. (2013). Simulation based on system dynamics for evaluating the quality of transport service in a complex social system. *Revista DYNA*, No. 180, pp. 33-40. ISSN 0012-7353.

Cao, J., Menendez, M. (2015). System dynamics of urban traffic based on its parking-related-states. 21st International Symposium on Transportation and Traffic Theory. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.018](https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.018).

Cascajo, R., Monzon, A. (2014). Assessment of innovative measures implemented in European bus systems using key performance indicators. *Public Transport*. DOI 10.1007/s12469-014-0085-0.

Cats, O., Jenelius, E. (2011). Vulnerability analysis of public transport networks: a dynamic approach and case study for Stockholm. The 5th International Symposium on Transportation Network Reliability. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/264721532_Vulnerability_Analysis_of_Public_Transport_Networks_A_Dynamic_Approach_and_Case_Study_for_Stockholm.

Cerquera, F. (2007). *Capacidad y niveles de servicio de la infraestructura vial*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela Ingeniería de Transporte y Vías, Colombia. Disponible en: <http://virtual.uptc.edu.co/drupal/files/48.pdf>

Cervero, R. Hansen, M., (2000). Road supply-Demand relationships: Sorting out causal linkages. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. Disponible en: <http://www.uctc.net/research/papers/444.pdf>.

Cervero, R. y Hansen, M., (2002). Induced travel demand and induced road investment - a simultaneous equation Analysis. *Journal of Transport Economics and Policy*, vol. 36, pp. 469-490.

Cervero, R. (2001). Road Expansion, Urban Growth, and Induced Travel: A Path Analysis. *Journal of The American Planning Association*, vol. 69, pp. 145-163. DOI: 10.1080/01944360308976303.

Cervero, R., (2002). Induced Travel Demand: Research Design, Empirical Evidence, and Normative Policies. *Journal of Planning Literature*, Vol. 17, No. 1. DOI: 10.1177/088122017001001.

Cervero, R., (2003). Are induced travel studies inducing bad investments? *ACCESS Magazine*, vol. 22, pp. 22-27. Disponible en: [www.americandreamcoalition-org.adcblog.org/highways/induced.pdf](http://www.americandreamcoalition.org.adcblog.org/highways/induced.pdf).

Chao, Y., Zishan, M. (2013). System Dynamics Model of Shanghai Passenger Transportation Structure Evolution. 13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP 2013). DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.08.127.

Chen, C., Varley, D., Chen, j. (2011). What Affects Transit Ridership? A Dynamic Analysis involving Multiple Factors, Lags and Asymmetric Behaviour. *Urban Studies*, issue 48(9), pp. 1893-1908. DOI: 10.1177/0042098010379280.

Concas, S., (2013). Highway capital expenditures and induced vehicle travel. Transportation Research Board 92nd Annual Meeting, Washington D.C., January 13-17. Disponible en: www.papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2062599.

Currie. G., Delbosc A., (2010). Literature review of induced travel. Institute of transport and logistics studies. Working paper. Disponible en: www.sydney.edu.au/business/data/assets/pdf_file/0004/75181/itls-wp-10-16.pdf.

Dachis, B. (2013). Cars, Congestion and Costs: A new approach to evaluating government infrastructure investment. Institut C.D. HOME Institute, Canada. Disponible en: https://www.cdhowe.org/pdf/Commentary_385.pdf].

De Palma, A., Lindsey, R. (2011). Traffic congestion pricing methodologies and technologies. *Transportation Research Part C*, issue 19, pp. 1377–1399. DOI: 10.1016/j.trc.2011.02.010.

DeCorla-Souza, P., Cohen, H., (1998). Accounting for induced travel in evaluation of urban highway expansion. Sixth national conference on transportation planning for small and medium sized communities, september 16-18, Washington. Disponible en: www.ntl.bts.gov/lib/000/700/700/00780098.pdf.

Denant-Boemont, L, Hammiche, L., (2012). Downs-Thomson paradox and public transit capacity choice in the laboratory. Institute of Transport and Logistics Studies, The Australian Key Centre in Transport and Logistics Management, The University of Sydney. Working paper. Disponible en: www.sydney.edu.au/business/data/assets/pdf_file/0011/134003/ITLS-WP-12-10-paper.pdf.

Déry, R., Landry, M., Banville, C. (1993). Revisiting the issue of model validation in OR: An epistemological view. *European Journals of Operational Research*, No 66, pp. 168-183.

Duarte, E. L. (2011). El Transporte Público Colectivo en Bogotá, D.C.: Una Mirada desde la Dinámica de Sistemas. *Ingeniería*, Vol. 16, No. 2, pág. 18 - 34. ISSN 0121-750X.

Duranton, G., Turner, M. A., (2011). The fundamental law of road congestion: Evidence from US Cities. *American Economic Review* 101, 2616–2652. DOI: 10.1257/aer.101.6.2616.

Elias, A. A., (2006) Environmental conflicts, stakeholders and a shared mental model. The 24th International Conference of the System Dynamics Society. ISBN 978-0-9745329-5-0, July 23-27, Nijmegen, The Netherlands.

Eriksseon, L., Nordlund, A., M., Garvill, J. (2010). Expected car use reduction in response to structural travel demand management measures. *Transportation Research Part F*, issue 13, pp. 329–342. DOI: 10.1016/j.trf.2010.06.001.

European Commission, Directorate-General for the Environment. Reclaiming city streets for people, chaos or quality of life? Disponible en: www.ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/streets_people.pdf.

Eze, U., Emmanuel, I., Stephen, E. Fuzzy Logic Model for Traffic Congestion. *IOSR Journal of Mobile Computing & Application (IOSR-JMCA)*, Volume 1, Issue 1, pp. 15-20. e-ISSN: 2394-0050.

Fiorello, D., Fermi, F., Maffii, S., Martino, A. (2010). Mobility rights for urban road pricing: A modelling analysis with a system dynamics approach. *World Conference on Transport Research*, Lisboa, Portugal. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228456995_MOBILITY_RIGHTS_FOR_URBAN_

ROAD_PRICING_A_MODELLING_ANALYSIS_WITH_A_SYSTEM_DYNAMICS_APPROACH.

Ford, A. (1999). Modelling the environment. An Introduction to system dynamics. Models of environmental systems. Washington DC, USA: Island Press. ISBN: 1-55963-601-7.

Forrester, J. W. (1971). Counterintuitive behavior of social systems. *Theory and Decision* 2(2), 109-140. DOI:10.1007/BF00148991.

Franco, C., Méndez, G., Espitia, J. (2015). Evaluación de escenarios de descongestión vehicular en Bogotá D.C. mediante Dinámica de Sistemas. *Revista Ingeniería*, Vol. 20, No. 2, pp. 209–231. DOI: [dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.1.a03](https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.1.a03).

Fulton, L. A., Noland, R. B., Meszler, D. J., Thomas, J. V., (2000). A Statistical Analysis of Induced. *Journal of transportation and statistics*. Disponible en: www.lgc.org/wordpress/docs/freepub/community_design/focus/induced_travel_effects.pdf.

Garling, T., Eek, D., Luokopoulos, P., Fujii, S., Johansson-Stenman, O., Kitamura, R., Pendyala, R., Vilhelmson, B. (2002). A conceptual framework analysis of the impact of travel demand management on private car use. *Transport Policy*, issue 9, pp. 59-70. DOI: 10.1016/S0967-070X(01)00035-X.

Gärling, T., Ettema, D., Friman, M. (2015). Are citizens not accurately informed about long-term societal costs of unsustainable travel or do they not care? *Travel Behaviour and Society* 2, pp. 26–31. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.tbs.2014.07.003](https://doi.org/10.1016/j.tbs.2014.07.003).

Gershenson, C., Helbing, D. (2015). When slower is faster. *Complexity*, Volume 21, Issue 2, pp 9–15. DOI: 10.1002/cplx.21736.

Góngora, J. P., (2012). Indicador Kilómetros-Vehículo Recorridos (KVR): Métodos de cálculo en diferentes países. Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo México. Disponible en: www.acervoyucatan.com/contenidos/MedicionKVR.pdf.

Gonzales, R. M., Marrero, G. A., (2011). Induced travel demand in Spanish regions: a dynamic panel data model. Instituto Universitario de Desarrollo Regional, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de La Laguna, working paper. Disponible en: www.uv.es/~estevev/DT-E-2011-10.pdf.

Goodwin, P. P., (1992). A review of new demand elasticities with special reference to short and long run. *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 26, No. 2, pp. 155-169. Disponible en: [/www.bath.ac.uk/e-journals/jtep/pdf/Volume_XXV1_No_2_155-169.pdf](http://www.bath.ac.uk/e-journals/jtep/pdf/Volume_XXV1_No_2_155-169.pdf).

Gorham, R., (2009). Demystifying induced travel demand. Sustainable Transportation Technical Document, Sustainable Urban Transportation Project (www.sutp.org). Disponible en: www.sutp.org/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=1461.

Goulden, M., Ryley, T., Dingwall, R. (2014). Beyond 'predict and provide': UK transport, the growth paradigm and climate change. *Transport Policy*, issue 32, pp. 139–147 DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.01.006](https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.01.006).

Govinda R. T., Hari B. D., (2008). Fiscal policy instruments for reducing congestion and atmospheric emissions in the transport sector: A review. The World Bank Development Research Group. Sustainable Rural and Urban Development Team. Disponible en: www.openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/6872/wps4652.pdf?sequence=1

Graham, D. J., McCoy, E. J., Stephens, D. A., (2014). Quantifying causal effects of road network capacity expansions on traffic volume and density via a mixed model propensity score estimator. *Journal of the American Statistical Association*, vol. 109, no. 508, pp. 1440-1449. DOI: [10.1080/01621459.2014.956871](https://doi.org/10.1080/01621459.2014.956871).

Graham-Rowe, E., Skippon, S., Gardner, B., Abraham, C. (2011). Can we reduce car use and, if so, how? A review of available evidence. *Transportation Research Part A*, issue 45, pp. 401–418. DOI: [10.1016/j.tra.2011.02.001](https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.02.001).

Guo, J., Sun, M., Wanga, T., Lu, L. (2015). Transportation development and congestion mitigation measures of Beijing, China. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Volume 20, Issue 5, pp 651-663. DOI: [10.1007/s11027-014-9617-9](https://doi.org/10.1007/s11027-014-9617-9).

Habibian, M., Kermanshah, M. (2011). Exploring the role of transportation demand management policies' interactions. *Scientia Iranica A*, issue 18 (5), pp. 1037–1044. DOI: [10.1016/j.scient.2011.09.005](https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.09.005).

Habibian, M., Ostadi, M. (2013). Assessing The Role of Transportation Demand Management Policies on Urban Air Pollution: A Case Study of Mashhad, Iran. *U.S.-Iran*

Symposium on Air Pollution in Megacities, 3-5th Sep 2013. Disponible en: http://www.aaas.org/sites/default/files/Habibian_Assessing%20the%20Role%20of%20Transportation%20Demand%20Management%20Policies.pdf.

Haghshenas, H., Vaziri, M. (2012). Urban sustainable transportation indicators for global comparison. *Ecological Indicators*, issue 15, pp. 115–121. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.09.010.

Haghshenas, H., Vaziri, M., Gholamialam, A. (2015). Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan. *Cities*, Volume 45, pp. 104–115. DOI: 10.1016/j.cities.2014.11.003.

Han X., Naeher L. P., (2006). A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world. *Environment International* 32, 106 – 120. DOI: 10.1016/j.envint.2005.05.020.

Handy, S., (2014). Impact of Highway Capacity and Induced Travel on Passenger Vehicle Use and Greenhouse Gas Emissions. California Environmental Protection Agency, Air Resources Board, September 30. Disponible en: www.arb.ca.gov/cc/sb375/policies/hwycapacity/highway_capacity_brief.pdf

Hansen M., Huang Y., (1997). Road supply and traffic in California urban areas. *Transportation Research A* 31, 205-218. DOI: 10.1016/S0965-8564(96)00019-5.

Hansen, M., (1995). Do new highways generate traffic?. *ACCESS Magazine*, vol. 7, pp. 16 - 23, 1995. Disponible en: www.escholarship.org/uc/item/3rj612zh.

He, N., Zhao, S., (2014). Induced Traffic in China: Elasticity Models with Panel Data. *J. Urban Plann. Dev.* , 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000265.

Hensher, D. A., (2008). *Handbook of Transport Modelling Masters* [Online], 2nd Edition, London, Emerald, Inc., chapter 2, History of demand modelling. Disponible en: www.app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHTME000B/handbook-transport-modelling/handbook-transport-modelling.

Hills, P., (1996). What is induced traffic? *Transportation*, vol. 23, no. 1, pp. 5-16. DOI: 10.1007/BF00166216.

Holden, E., Linnerud, K., Banister, D. (2013). Sustainable passenger transport: Back to Brundtland. *Transportation Research Part A*, issue 54, pp. 67–77. DOI: /dx.doi.org/10.1016/j.tra.2013.07.012.

Hüging, H., Glensor, K., Lah, O. (2014). Need for a holistic assessment of urban mobility measures – Review of existing methods and design of a simplified approach. *Mobil. TUM 2014 “Sustainable Mobility in Metropolitan Regions”*. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.11.001.

Hymel, K. M., Small, K. A., Van Dender, K., (2010) Induced demand and rebound effects in road transport. *Transportation Research Part B* 44, 1220–1241. DOI: 10.1016/j.trb.2010.02.007.

Jao-Hong, C., Chien Yuan, L., Huei-Ping, C., Chun-Liang, O. (2010). The Service Quality Analysis of Public Transportation System using PZB Model- Dynamic Bus Information System. 2010 40th International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE-40). ISBN: 978-1-4244-7295-6.

Jaskiewicz, M. Besta, T. (2014). Heart and mind in public transport: Analysis of motives, satisfaction and psychological correlates of public transportation usage in the Gdansk–Sopot–Gdynia Tricity Agglomeration in Poland. *Transportation Research Part F*, issue 26, 92–101. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.trf.2014.06.012.

Kane, L., Behrens, R., (2000). The traffic impacts of road capacity change: a review of recent evidence and policy debates. *South African Transport Conference ‘Action in Transport for the New Millennium’*, South Africa, 17 – 20. Disponible en: www.repository.up.ac.za/handle/2263/8260.

Kitamura, R., (2010). The effects of added transportation capacity on travel: a review of theoretical and empirical results. *Transportation*, 36:745–762. DOI: 10.1007/s11116-009-9245-5.

Ladd, B., (2012). You can't build your way out of congestion. – Or can you?, *disP - The Planning Review*, 48:3, 16-23, DOI: 10.1080/02513625.2012.759342.

Larson, R. C., Sasanuma, K. (2010). Urban Vehicle Congestion Pricing: A Review. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 3, No. 4, pp 227-242.

Law, A.M. y Kelton, W.D. (1991). *Simulation Modeling and Analysis*. 2^a Ed. McGraw–Hill, New York.

Lewe, J. H., Hivin, L. F., Lu, L. W., Mavris, D. N. (2012). Multimodal Transportation Demand Forecast using System Dynamics and Agent Based Models. 12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and 14th AIAA/ISSM. DOI: 10.2514/6.2012-5505.

Lewe, J. H., Hivin, L. F., Mavris, D. N. (2014). A multi-paradigm approach to system dynamics modeling of intercity transportation. *Transportation Research Part E* 71, pp. 188–202. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.tre.2014.09.011.

Li, K., Zhou, S., Yang, X. (2013). A system dynamics approach for evaluating policies on prioritizing public transportation. *Applied Mechanics and Materials*, Vol 391, pp. 628-632. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.391.628.

Litman, T. (2013). The new transportation planning paradigm. Institute of Transportation Engineers. *ITE Journal* 83.6. . Disponible en: <http://www.vtpi.org/paradigm.pdf>.

Litman, T. (2014a). Critique of “Transit Utilization and Traffic Congestion: Is There a Connection? Transit Utilization and Traffic Congestion: Is There a Connection?”. Victoria Transport Policy Institute. Disponible en: http://www.vtpi.org/R&M_critique.pdf.

Litman, T. (2014b). Congestion evaluation best practices [Online]. Victoria Transport Policy Institute. Disponible en: http://www.vtpi.org/ITED_congestion.pdf.

Litman, T. (2015a). Smart congestion Relief – Comprehensive evaluation of traffic congestion costs and congestion reduction strategies. Victoria Transport Policy Institute, Canada. Disponible en: http://www.vtpi.org/cong_relief.pdf.

Litman, T. (2015b). Evaluating Public Transit Benefits and Costs-Best Practices Guidebook. Victoria Transport Policy Institute, Canada. Disponible en: <http://www.vtpi.org/tranben.pdf>.

Litman, T., (2012). Changing Vehicle Travel Price Sensitivities - The Rebounding Rebound Effect. Victoria Transport Policy Institute. Disponible en: www.vtppi.org/VMT_Elasticities.pdf.

Liu, S. (2007). Three Essays on Travel Demand Management Strategies for Traffic Congestion Mitigation. Dissertation Submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Industrial & Systems Engineering.

Liu, S., Triantis, K. P., Sarangi, S. (2010). A framework for evaluating the dynamic impacts of a congestion pricing policy for a transportation socioeconomic system. *Transportation Research Part A*, issue 44, pp. 596–608. DOI: 10.1016/j.tra.2010.04.001.

Liu, X., Ma, S., Tian, J., Jia, N., Li, G. (2015). A system dynamics approach to scenario analysis for urban passenger transport energy consumption and CO2 emissions: A case study of Beijing. *Journal of Energy Policy*, 85, pp. 253–270. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.06.007](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.06.007).

Lois, D., López-Sáez, M. (2009). The relationship between instrumental, symbolic and affective factors as predictors of car use: A structural equation modeling approach. *Transportation Research Part A*, issue 43, pp. 790–799. DOI: 10.1016/j.tra.2009.07.008.

Lopez-Lambas, M. E., Cascajo, R. (2015). Smart and sustainable public transport systems through improving level and quality of service. *Ingegneria Ferroviaria*, issue 70(4), pp. 359-375. ISSN: 0020-0956.

Loukopoulos, P., Jakobsson, C, Garling, T., Schneider, C. M., Fujii, S. (2004). Car-user responses to travel demand management measures: goal setting and choice of adaptation alternatives. *Transportation Research Part D*, issue 9, pp. 263–280. DOI: 10.1016/j.trd.2004.02.003.

LRT System to Cater Increasing Demand. *International Proceedings of Economics Development & Research*, Vol. 63. DOI: 10.7763/IPEDR.

Macmillan, A. (2013). Participatory system dynamics modelling to support integrated transport decisions Critical reflections and lessons. School of Population Health, University

of Auckland. Disponible en: <http://modellingonthemove.org/wp-content/uploads/2013/10/MoM5-Macmillan1.pdf>.

Macmillan, A. K. (2012). Intervening in the trip to work: A system dynamics approach to commuting and public health. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Community Health, The University of Auckland. Disponible en: <https://researchspace.auckland.ac.nz/handle/2292/19500>.

Mahendra, A. (2008). Vehicle Restrictions in Four Latin American Cities: Is Congestion Pricing Possible? *Transport Reviews*, Vol. 28, No. 1, pp. 105–133. DOI: 10.1080/01441640701458265.

Malayathm M., Verma, A. (2013). Activity based travel demand models as a tool for evaluating sustainable transportation policies. *Research in Transportation Economics*, issue 38, pp. 45-66. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2012.05.010](https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.05.010).

Martin, E., Shaheen, S. (2014). Evaluating public transit modal shift dynamics in response to bikesharing: a tale of two U.S. cities. *Journal of Transport Geography* 41, pp. 315–324, DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.06.026](https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.06.026).

McClintock, M. (1925). *Street Traffic Control*. New York: McGraw-Hill.

Melo, P. C., Graham, D. J., Canavan, S., (2012). The Effects of Road Investments on Economic Output and Induced Travel Demand: Evidence for Urbanized Areas in the US. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp 163–171. DOI: 10.3141/2297-20

Milioti, C., Karlaftis, C. (2014). Estimating multimodal public transport mode shares in Athens, Greece. *Journal of Transport Geography* 34, pp. 88–95. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.11.005](https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.11.005).

Miranda, H., Rodrigues da Silva, A. N. (2012). Benchmarking sustainable urban mobility: The case of Curitiba, Brazil. *Transport Policy*, issue 21, pp. 141–151. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.03.009](https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.03.009).

Morichi, S., Acharya, S. R. (2013). Transport Development in Asian Megacities – A new perspective. Series Title: Transportation Research, Economics and Policy. Publisher: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Edición 2013, Capítulos 4, 5 y 6. DOI: 10.1007/978-3-642-29743-4.

Moscoso, G. J., Perdomo, L. J., Perdomo, M., Mayorga, O. (2011). Modelado de sistemas de transporte masivo empleando dinámica de sistemas: caso Transmilenio S.A. 9° Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario, Bogotá, Colombia. ISSN: 2027-7709.

Mupfumira, P., Wirjodirdjo, B. (2015). An Economically Sustainable Urban Public Transport Framework: System Dynamics Modelling Approach to Reduce Public Transport Liberalisation Impact in Harare City. International Journal of Science, Technology and Society, Vol. 3(2-2), pp. 11-21. DOI: 10.11648/j.ijsts.s.2015030202.13.

Næss, P., Nicolaisen, M. S., Strand, A., (2012). Traffic Forecasts Ignoring Induced Demand: a Shaky Fundament for Cost-Benefit Analyses. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 12(3), pp. 291-309. Disponible en: www.ejtir.tudelft.nl/issues/2012_03/pdf/2012_03_02.pdf.

Næss, P., Nicolaisen, M. S., Strand, A., (2014). Transport modelling in the context of the 'predict and provide' paradigm. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 14(2), pp.102-121. Disponible en: www.ejtir.tudelft.nl/issues/2014_02/pdf/2014_02_01.pdf.

Noland, R. B., (2001). Relationships between highway capacity and induced vehicle travel. Transportation Research Part A, 47-72. DOI: 10.1016/S0965-8564(99)00047-6.

Noland, R. B., (2004), Transport Policy and Assessment Procedures in the United Kingdom: Lessons for the Federal District of Mexico City. Draft: June 15. Disponible en: www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/12.-Mex-White-Paper_UK.pdf.

Noland, R. B., (2007). Transport Planning and Environmental Assessment: Implications of Induced Travel Effects. International Journal of Sustainable Transportation, 1:1, 1-28, DOI: 10.1080/15568310601095131.

Noland, R. B., Cowart, W. A., (2000). Analysis of Metropolitan Highway Capacity and the Growth in Vehicle Miles of Travel. Transportation Research Board, 79th Annual Meeting, January 9-13, Washington, DC. DOI: 10.1023/A:1005288826997.

Noland, R. B., Lem, L. L., (2002). A review of the evidence for induced travel and changes in transportation and environmental policy in the US and the UK. Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 7, no. 1, pp. 1-26. DOI: [10.1016/S1361-9209\(01\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(01)00009-8).

Nordlund, A. M., Garvill, J. (2003). Effects of values, problem awareness, and personal norm on willingness to reduce personal car use. Journal of Environmental Psychology, issue 23, pp. 339–347. DOI: 10.1016/S0272-4944(03)00037-9.

Norton, P. D. (2008). Fighting Traffic: The Dawn of the Motor Age in the American City. Cambridge, MA: MIT Press.

Observatorio Metropolitano de Bucaramanga. (2014). *Sustentabilidad Ambiental Urbana, Movilidad Sustentable*. Bucaramanga, Colombia. Disponible en: www.amb.gov.co/observatorio2/indicadores/indicadores/sau/Infograf%C3%ADa%208%20-%20Movilidad%20sustentable.pdf

Oral, M., Kettani, O. (1993). The facets of the modeling and validation process in operations research. European Journals of Operational Research, No 66, pp 216-234.

Orozco, J. S., Arenas, F. A. (2013). Aproximación al desarrollo de un sistema de transporte masivo a través de la dinámica de sistemas. Revista S&T, 11(24), pp. 91-106. ISSN: 1692-5238.

Ortuzar, J. D. (2015). Modelos de demanda de transporte. Second Edition, Ediciones Universidad Católica de Chile, Bogotá, Colombia. ISBN: 978-958-778-021-5.

Ortuzar, J. D., Willumsen, L., (2011). Modelling Transport, 4th Edition, John Wiley & Sons, Ltd, chapter 1, Transport planning and modeling. Disponible en: www.onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9781119993308.

Özuysal, M., Tanyel, S., (2008). Induced Travel Demand in Developing Countries: Study on State Highways in Turkey. *Journal of urban planning and development*, 134:78-87. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9488(2008)134:2(78).

Pagliara, F., Preston, J., (2013). An Induced Demand Model for High Speed 1 in UK. *Journal of Transportation Technologies*, 3, 44-51. DOI: 10.4236/jtts.2013.31005.

Pfaffenbichler, P., (2011). Modelling with systems dynamics as a method to bridge the gap between politics, planning and science? lessons learnt from the development of the land use and transport model MARS. *Transport Reviews*, vol. 31, no. 2, pp. 267-289. DOI: 10.1080/01441647.2010.534570.

Pickerell, D., (2001). Induced demand: its definition, measurement and significance. Draft prepared for Transportation Foundation Policy Forum, February 22-23, Washington, D.C. Disponible en: www.ntl.bts.gov/lib/51000/51100/51199/InducedDemand.pdf.

Ponnu, Bi., Reddy, R., Mishra, D., Arkatkar, S.S., Sarkar, A., (2014). Effect of Induced Traffic on Feasibility of Highway Projects using Economic Analysis: A Case Study in India. *Transport Policy*. DOI:[10.1016/j.cstp.2014.04.005](https://doi.org/10.1016/j.cstp.2014.04.005).

Rahman, S. M., Al-Ahmandi, H. M. (2010). Evaluation of Transportation Demand Management (TDM) Strategies and Its Prospect in Saudi Arabia. *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volume 4, No. 2. ISSN 1993-0461.

Raux, C. (2003). A systems dynamics model for the urban travel system. *European Transport Conference*, Strasbourg, France. ISSN 2313-1853.

Redman, L., Friman, M., Garling, T., Harting, T. (2013). Quality attributes of public transport that attract car users: A research review. *Transport Policy*, issue 25, pp. 119–127. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.11.005](https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.11.005).

Rees, D., Stephenson, J., Hopkins, D. (2016). Exploring stability and change in transport systems: combining Delphi and system dynamics approaches. *Transportation*. DOI: 10.1007/s11116-016-9677-7.

Regions Using System Dynamics Model. Mobil. TUM 2014 “Sustainable Mobility in Metropolitan Regions”. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.11.040.

Rivasplata, C. R. (2013). Congestion pricing for Latin America: Prospects and constraints. *Research in Transportation Economics* 40, pp. 56-65. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2012.06.037](https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.06.037).

Rodier, C. J., (2004). A Review of the Representation of Induced Highway Travel in Current Travel and Land Use Models. Transportation Research Board (TRB), July. Disponible en: www.escholarship.org/uc/item/8d90r30k.

Rodrigues, L. L., Gupta, K., Motlagh, F. G. (2012). Vehicle Fuel Consumption Modelling: A System Dynamics Approach. Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III WCE 2012, July 4 - 6, London, U.K. ISSN: 2078-0966 (Online). ISBN: 978-988-19252-2-0.

RUMBAUGH, James. El lenguaje unificado del modelado. Manual de Referencia. Ediciones Addison Wesley, PEARSON EDUCACIÓN S.A., Madrid, 2000.

Ruutu, S., Auvinen, H., Tuominen, A., Ahlqvist, T., Oksanen, J. (2015). Simulation of Transitions Towards Emission-Free Urban Transport. The 31st International Conference of the System Dynamics Society Cambridge, Massachusetts, USA.

Sabounchi, N., Triantis, K., Sarangi, S., Liu, S. (2014). Dynamic simulation modeling and policy analysis of an area-based congestion pricing scheme for a transportation socioeconomic system. *Transportation Research Part A* 59, pp. 357–383. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.tra.2013.11.007](https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.11.007).

Saliara, K. (2014). Public Transport Integration: the Case Study of Thessaloniki, Greece. Mobil. TUM 2014 “Sustainable Mobility in Metropolitan Regions”. DOI: [10.1016/j.trpro.2014.11.041](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.11.041).

Schaffernicht, M. (2012). Aplicación del análisis de sistemas a las ciudades y al transporte público urbano [Online]. Documento elaborado en el marco del proyecto “Innovación ambiental de servicios urbanos y de infraestructura: Hacia una economía baja en carbono” (AEC/09/004) y financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). [Revisado: 15 de mayo del 2016 y disponible en:

<http://www.cepal.org/es/publicaciones/3952-aplicacion-analisis-sistemas-ciudades-al-transporte-publico-urbano>].

Schuppan, J., Kettner, S., Delatte, A., Schwedes, O. (2014). Urban multimodal travel behaviour: towards mobility without a private car. Mobil.TUM 2014 "Sustainable Mobility in Metropolitan Regions". DOI: 10.1016/j.trpro.2014.11.042.

Secretaría de Infraestructura de Bucaramanga. (2011). *Mesa de sostenibilidad urbana*. Bucaramanga, Colombia. Disponible en: www.findeter.gov.co/descargar.php?idFile=210392

Shankar, H., Raju, P. L. N., Mohan Rao, K. R. (2012). Multi Model Criteria for the Estimation of Road Traffic Congestion from Traffic Flow Information Based on Fuzzy Logic. *Journal of Transportation Technologies*, 2, pp. 50-62. DOI: dx.doi.org/10.4236/jtts.2012.21006.

Shengchuan, Z., Nan, H., Ning, L., (2012). An Analysis of Induced Traffic Effects in China. *The Planning Review*, 48:3, 54-63. DOI: 10.1080/02513625.2012.759350.

Shiran, S. J. (2014). A System Dynamics Analysis of Policies to Relieve an Urban Traffic Congestion Problem. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science, School of Mathematical and Geospatial Sciences, College of Science Engineering and Health at RMIT University, December 2014. Disponible en: <https://researchbank.rmit.edu.au/eserv/rmit:161240/JahedShiran.pdf>.

Solecka, K., Žak, J. (2014). Integration of the urban public transportation system with the application of traffic simulation. 17th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, EWGT2014, 2-4 July 2014, Sevilla, Spain. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.10.005.

Sommerville, I., (2005). *Ingeniería del Software (Séptima Edición)*. Pearson Education, S.A., Madrid.

Stathopoulos, F. G., Noland, R. B., (2002). Induced Travel and Emissions from Traffic Flow Improvement Projects. Transportation Research Record 1842, Paper No. 03-2092. DOI: 10.3141/1842-07.

Sterman, J. (2000). Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. USA: Irwin McGraw-Hill.

Strathman, J. G., Dueker, K. J., Sanchez, T., Zhang, J., Riis, A., (2000). Analysis of induced travel in the 1995 NPTS. Center of Urban Studies, Collegue of Urban and Public Affair, Portland State University. Disponible en: www.citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.555.370.

Su, Q., (2011). Induced motor vehicle travel from improved fuel efficiency and road expansion. Energy Policy Journal, 39, 7257–7264. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.08.047.

Sweet M., (2011). Does traffic congestion slow the economy? Journal of Planning Literature. Vol 26, 2011. DOI: 10.1177/0885412211409754.

Talebian, A., Haghseenas, H., Gholamialam, A. (2014). Sustainable Transportation Policies Identification for a Certain City, Using Experiences of Other Similar Cities around the World Case study: Isfahan. TRB 2014 Annual Meeting.

Technical Report FHWA-JPO-13-020, Capítulo 1. Disponible en: <http://ntl.bts.gov/lib/48000/48300/48328/21BB40FD.pdf>.

Tørnblad, S., Kallbekken, S., Korneliussen, K., Mideksa, T. (2014). Using mobility management to reduce private car use: Results from a natural field experiment in Norway. Transport Policy 32, pp. 9–15. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.12.005.

Triantis, K., Sarangi, S., Teodorovic, D., Razzolini, E. (2011). Traffic congestion mitigation: combining engineering and economic perspectives. Transportation Planning and Technology, issue 34:7, pp. 637-645. DOI: dx.doi.org/10.1080/03081060.2011.602845.

Twitchett, J. C., (2013) Ignoring Induced Traffic – An Empirical Study of Induced Traffic. Master Thesis, Urban Planning and Management, Aalborg University. Disponible en: [www.projekter.aau.dk/projekter/files/72418567/Twitchett C. 2013 Ignoring Induced Traffic.pdf](http://www.projekter.aau.dk/projekter/files/72418567/Twitchett_C._2013_Ignoring_Induced_Traffic.pdf).

Vakili, K., Isaai, M. T., Barsaei, A. J. (2008). Strategic Assessment of Transportation Demand Management Policies: Tehran Case Study. The 26th International Conference of the System Dynamics Society, Athens, Greece. ISBN 978-1-935056-01-0.

Viegas, J. M., Martins, N. M., (2010). System dynamics – Long term forecasting of road traffic volumes. 12th World Conference on Transport Research, Lisbon, Portugal, July 11-15. Disponible en: www.wctrs-society.com/wp/wp-content/uploads/abstracts/lisbon/selected/02255.pdf.

Wang, S. (2015). Modeling the Effect of Road Pricing on Traffic Congestion Using Dynamic Travel Demand. A thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University at Buffalo, State University of New York in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. ProQuest Number: 1600841.

Wang, Y., Li, L., Zhu, X., Wu, B., Li, L. (2015). Evaluation of urban redevelopment impact on non-motorized traffic. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2 (3), pp. 187-197. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.jtte.2015.03.007](https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.03.007).

Wirjodirdjo, B., Amelia, P., Fanani, A. A. (2014). A system dynamic model of train revitalization toward sustainable urban transportation system in Surabaya – Indonesia. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Volume 9, No. 4. ISSN 1819-6608.

Wu, C., Pei, Y., Gao, J. (2015). Model for Estimation Urban Transportation Supply-Demand Ratio. *Hindawi - Mathematical Problems in Engineering*. Volume 2015, Article ID 502739, 12 pages. DOI: [dx.doi.org/10.1155/2015/502739](https://doi.org/10.1155/2015/502739).

Yang, Y, Zhang, P., Ni, S. (2014). Assessment of the Impacts of Urban Rail Transit on Metropolitan Regions Using System Dynamics Model. *Transportation Research Procedia*, Volumen 4, pp. 521-534. DOI: [10.1016/j.trpro.2014.11.040](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.11.040).

Yelchuru, B., Singuluri, S., Rajiwade, S., Hamilton, B. A. (2013). Active Transportation and Demand Management (ATDM) Foundational Research: Analysis, Modeling, and Simulation (AMS) Analysis.

Yong Le Loo, L., Corcoran, J., Mateo-Babiano, D., Zahnow, R. (2015). Transport mode choice in South East Asia: Investigating the relationship between transport users'

perception and travel behaviour in Johor Bahru, Malaysia. *Journal of Transport Geography*, Volume 46, pp 99–111. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.06.011](https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.06.011).

Zhao, Y., Triantis, K., Teodorovic, D., Edara, P. (2010). A travel demand management strategy: The downtown space reservation system. *European Journal of Operational Research* 205, pp. 584–594. DOI: [10.1016/j.ejor.2010.01.026](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.01.026).