

Ciudades Inclusivas, Sostenibles e Inteligentes (CISI)

Herramientas para el modelamiento y la simulación de tendencias futuras en el área de la movilidad urbana

Juan Sebastián Angarita
Carlos Sandoval



NACIONES UNIDAS

CEPAL



cooperación
alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

 www.cepal.org/es/publications

 www.cepal.org/apps

Herramientas para el modelamiento y la simulación de tendencias futuras en el área de la movilidad urbana

Juan Sebastián Angarita
Carlos Sandoval



NACIONES UNIDAS



cooperación
alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Este documento fue preparado por Juan Sebastián Angarita, Consultor, y Carlos Sandoval, Asistente de Investigación Superior del Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES) de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en el marco del proyecto "Ciudades inclusivas, sostenibles e inteligentes en el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe", clúster 1, ejecutado por la CEPAL en conjunto con la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) y financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania. El proyecto forma parte del programa de cooperación CEPAL/BMZ-GIZ.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización o las de los países que representa.

Publicación de las Naciones Unidas
LC/TS.2022/94
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2022
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.22-00547

Esta publicación debe citarse como: J. S. Angarita y C. Sandoval, "Herramientas para el modelamiento y la simulación de tendencias futuras en el área de la movilidad urbana", *Documentos de Proyectos* (LC/TS.2022/94), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2022.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Introducción	5
I. Bases conceptuales del modelo	7
A. Población, uso de la tierra y dinámica económica.....	7
B. Emisiones y transporte.....	8
C. Modos de transporte, congestión y movilidad.....	9
D. Emisiones, transporte, economía, población.....	10
E. Conclusiones de la revisión del estado del arte.....	11
II. Descripción general del modelo y diagramas de flujos	13
III. Escenarios de simulación	19
IV. Instrucciones de uso del modelo	23
V. Conclusiones	31
Bibliografía	33
Cuadro	
Cuadro 1 Tipología y variables del modelo.....	18
Diagramas	
Diagrama 1 Sectores principales del modelo	14
Diagrama 2 Vista general del modelo	15
Diagrama 3 Sector 1, transporte público y el cobro por congestión a vehículos privados	16
Diagrama 4 Sector 2 relacionado con infraestructura vial y con kilómetros recorridos por el transporte privado e informal	16
Diagrama 5 Sector 3, número de usuarios que usan los medios de transporte disponibles.....	17
Diagrama 6 Sector 4 relacionado con población, emisiones y electromovilidad.....	17

Diagrama 7	Escenarios de simulación	20
Diagrama 8	Porcentaje de penetración de electromovilidad en el parque automotor de vehículos privados durante el horizonte de tiempo de la simulación	20
Diagrama 9	Emisiones CO ₂ bajo los tres escenarios de simulación definidos	21
Diagrama 10	Congestión vial en el corto plazo bajo los tres escenarios de simulación definidos	22
Diagrama 11	Congestión vial en el largo plazo bajo los tres escenarios de simulación definidos	22
Diagrama 12	Descripción interacción usuario – interfaz – modelo	23
Diagrama 13	Vista principal de la interfaz <i>software</i> que opera la simulación del modelo de flujos y niveles desarrollado	24
Diagrama 14	Componentes de la pantalla principal	25
Diagrama 15	Diagramas de flujos y niveles	25
Diagrama 16	Simulación.....	26
Diagrama 17	Resultado para la simulación variable “Dinero Buses”	26
Diagrama 18	Simulación usando Synthe Sim.....	27
Diagrama 19	Creación de nuevos escenarios	27
Diagrama 20	Guardar nuevos escenarios.....	28
Diagrama 21	Visualización de múltiples escenarios	28
Diagrama 22	Selección de conjuntos de datos para la visualización de múltiples escenarios	28
Diagrama 23	Selección de variables para la visualización de múltiples escenarios	29

Introducción

La siguiente metodología presenta un conjunto de técnicas que permiten el análisis de la movilidad urbana en el marco de ejercicios de prospectiva y planificación. Esta propuesta, forma parte de un conjunto de tres herramientas compuestas por este manual, un video instruccional y el modelo propiamente tal.

Este documento describe principalmente el diseño e implementación de un modelo de simulación conceptual, construido con dinámica de sistemas, para analizar la movilidad urbana. En concreto, se busca que dicho modelo permita analizar escenarios futuros y tendencias de movilidad urbana que soporte la toma de decisiones en el marco de ejercicios de prospectiva de la movilidad sostenible.

Este modelo puede ser usado de manera individual para orientar la discusión y la discusión y diseño de escenarios futuros en relación con la movilidad sostenible y también puede ser parte de las actividades vinculadas a la aplicación de una metodología con enfoque prospectivo.

El modelo utiliza el lenguaje de programación Vensim, pero las características de esta permiten que pueda ser traducido a cualquier otro tipo de lenguajes e implementado en diferentes plataformas.

El presente informe se estructura de la siguiente manera. El capítulo I presenta las bases conceptuales para el diseño del modelo. El capítulo II describe las principales componentes o temas que incluye el modelo, en el capítulo III se presenta el modelo en su vista de flujos, niveles y ecuaciones matemáticas. Posteriormente, el capítulo IV resume los resultados de simulación obtenidos a través de diferentes escenarios de simulación definidos. Seguidamente el capítulo V presenta la interfaz *software* que opera el modelo de flujos y niveles junto con un manual de usuario para interactuar con ella. Finalmente, el capítulo VI resume las principales conclusiones de esta consultoría y posibles líneas de trabajo futuro derivadas de los resultados obtenidos.

I. Bases conceptuales del modelo

El objetivo de esta primera parte del documento guarda relación con la necesidad de presentar una síntesis del estado del arte en torno al modelo de dinámica de sistemas aplicada a la movilidad. Para lograr tal objetivo se realizó una búsqueda de literatura científica y oficial en el periodo de tiempo comprendido entre 2005 y 2021. Dicha búsqueda de literatura se hizo mediante los recursos web como SCOPUS, Google Scholar y Base. Además, se utilizó una serie de palabras clave para orientar la búsqueda de literatura que a su vez estaba relacionada con las características del modelo a desarrollar. En concreto las palabras clave usadas fueron: congestión en ciudades, modos de transporte, dinámica de sistemas, uso del suelo, combustibles alternativos, emisiones, movilidad, transporte y congestión.

Los trabajos relevantes identificados se agruparon a continuación de acuerdo con las temáticas que hacen referencia.

A. Población, uso de la tierra y dinámica económica

El documento que inicia esta revisión se sitúa en 2006, el trabajo titulado “Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis” introdujo un modelo de dinámica de sistemas para ilustrar la relación entre desarrollo de actividades económicas y de vivienda. En concreto, los autores discutieron cómo la interacción entre dichos componentes puede llegar a generar grandes migraciones internas y externas, en especial a causa de cambios en el uso de la tierra inducidos por la explotación de materias primas.

En esta temática se destaca el trabajo realizado en año 2009 donde Shen et al. desarrollaron el trabajo “A system dynamics model for the sustainable land use planning and development”. Haciendo uso de diagramas de influencia y diagramas de flujos y niveles, los autores desarrollaron un modelo de la evaluación del uso sostenible del suelo y el desarrollo urbano en Hong Kong, China. El modelo constaba de cinco subsistemas que incluyen población, economía, vivienda, transporte y suelo urbano. Como propósito general, los autores evaluaron dos escenarios de simulación que consideraban esquemas de desarrollo urbano distintos en relación con la densidad de población urbana. El horizonte de tiempo para dichos escenarios fue de 40 a 300 años.

Un año después, en 2010, Pfaffenbichler et al. construyeron un modelo de dinámica de sistemas para evaluar la interacción entre el uso de la tierra y el transporte. Dicho modelo tomó como base el ya conocido modelo MARS de planeación. El modelo desarrollado por Pfaffenbichler et al. consta de diagramas de influencia, diagramas de flujos-niveles y una interfaz *software* que permite operar el modelo por usuarios no expertos en dinámica de sistemas. El propósito central de los autores fue desarrollar un útil tecnológico para apoyar la toma de decisiones en la planeación urbana. A su vez, pretendían alcanzar un modelo que fuera transferible entre ciudades.

Luego, en 2012, Purnomo et al., introdujo un modelo con dinámica de sistemas en el trabajo denominado "Systems Dynamics Approach to Reducing Carbon Emissions from Deforestation and Forest Degradation at Provincial Level". En este artículo se analizó la alteración del paisaje en zonas de bosque a raíz de los cambios en el uso del suelo con el fin tomar acciones para reducir las emisiones y la deforestación. El modelo permitió simular principalmente respecto al uso de la tierra y la dinámica del carbón, así como el impacto que surten las políticas y las dinámicas de la población.

Más recientemente, en 2021, Don et al publicaron el trabajo titulado "Land Use Multi-Suitability, Land Resource Scarcity and Diversity of Human Needs: A New Framework for Land Use Conflict Identification". Este trabajo propone un modelo de dinámica de sistemas como marco para la identificación de conflictos de uso del suelo. Teniendo en cuenta la polivalencia del uso del suelo, la escasez de recursos del suelo y la diversidad de las necesidades humanas, el modelo pretende introducir un sistema de índices de evaluación del uso de la tierra para apoyar la toma de decisiones en torno a la resolución de conflictos de uso del suelo.

B. Emisiones y transporte

En la intersección entre las áreas de conocimiento de emisiones de dióxido de carbono y transporte se han identificado diferentes trabajos que se presentan con más detalle a continuación. En 2010, se publicó el trabajo titulado "A system dynamics energy model for a sustainable transportation system". Esta investigación pretendió introducir un modelo de dinámica de sistemas del sector de la automoción para promover el desarrollo de políticas eficaces para lograr una movilidad sostenible. Además, desde la perspectiva de las empresas energéticas, el modelo construido buscaba apoyar el diseño de estrategias de adaptación óptimas para un mercado altamente volátil y que siempre está al borde de iniciar una nueva transición importante en términos tecnológicos.

Dos años después, en 2013, Chen y Zhang publicaron el trabajo titulado "System dynamics modeling for urban energy consumption and emissions: A case study of Beijing, China". En concreto, mediante diagramas de influencias y de flujos-niveles, se modelaron las tendencias de consumo energético y de emisiones de para la ciudad de Pekín (China) durante el periodo 2005-2030. Los resultados del modelo mostraron que el sector de los servicios sustituirá gradualmente el estatus dominante de la industria en el consumo de energía como el mayor sector consumidor de energía, seguido del sector industrial y del transporte.

Un año después, en 2014, se publicó el trabajo "System Dynamics Simulation Modeling of Transport, Energy and Emissions Interactions". Dado que se carece de trabajos interdisciplinarios sobre la interacción de los sectores del transporte, la energía y las emisiones bajo un enfoque sistémico, este trabajo se centró en estudiar en profundidad dichas áreas basándose en los principios de la dinámica de sistemas. El objetivo principal del trabajo fue estudiar y apreciar la demanda y la oferta de transporte existentes en la ciudad de Chennai (China) para determinar las necesidades energéticas y los niveles de emisión del sector del transporte en el año 2026. Dentro de los resultados del modelo se destaca un escenario que demuestra como el aumento del transporte público y la restricción simultánea del crecimiento de los vehículos personalizados permite una reducción del 65%, en el consumo de energía, y del 50% en los niveles de emisión por parte del sector transporte.

En la misma línea de investigación propuesta por Azhaginiyal y Umadevi, en 2015 Shafiei et al. presentó el trabajo titulado "Simulation of Alternative Fuel Markets using Integrated System Dynamics Model of Energy System". Mediante el uso de diagramas de influencias y de flujos-niveles los autores exploraron el proceso de transición hacia los mercados de combustibles alternativos. El modelo desarrollado tuvo en cuenta sectores importantes del área energética, tales como los sectores de suministro, los precios de la energía, la infraestructura y la demanda de combustible. El modelo se aplicó al sistema energético de base renovable de Islandia como caso de estudio para simular la trayectoria de transición hacia el mercado de combustibles alternativos, durante el horizonte temporal 2015-2050. Además, se investigaron las vías de transición hacia el hidrógeno y los biocombustibles.

Posteriormente, en 2016, Ercan et al. publicaron el trabajo "Investigating carbon footprint reduction potential of public transportation in United States: A system dynamics approach". Específicamente, se usó dinámica de sistemas para modelar y simular los escenarios de mitigación de CO₂ más realistas y prácticos para las ciudades estadounidenses mediante la adopción de políticas de transporte público para los años futuros. Basándose en datos históricos, el modelo evaluó la elección del modo de transporte por parte de los viajeros estadounidenses y el potencial del transporte público para mitigar las emisiones de cara al 2050.

Finalmente, en 2019, Bonelá et al. presentaron el trabajo con nombre "The Brazilian Urban Mobility Policy: The Impact In São Paulo Transport System Using System Dynamics". El objetivo fue analizar mediante dinámica de sistemas la movilidad urbana en las ciudades brasileñas bajo la influencia de diferentes políticas. En particular, se estudió como la Política Brasileña de Movilidad Urbana (BUMP) permitía integrar la planificación urbana, el transporte y el tráfico, teniendo en cuenta que la BUMP considera los principios de inclusión social y sostenibilidad ambiental. Se realizó un estudio de caso en la Región Metropolitana de São Paulo.

C. Modos de transporte, congestión y movilidad

Diferentes autores han estudiado durante las últimas décadas las necesidades de alcanzar una movilidad sostenible y a su vez, han discutido los retos que dicha tarea trae consigo. Ejemplo de ello son los trabajos de "Transforming urban mobility: key findings and recommendations" (2019), "Usos de los medios de transporte y accesibilidad urbana. Un estudio de caso en el área metropolitana de Guadalajara, México" (2016), "Movilidad urbana: en camino a sistemas de transporte colectivo integrado" (2009) y "Movilidad urbana sostenible: un reto para las ciudades del siglo XXI" (2006).

En línea con los retos por cumplir en torno a la movilidad sostenible discutida en los trabajos anteriormente mencionados, diferentes avances se han logrado mediante el desarrollo de modelos de dinámica de sistemas. En 2016, Angarita-Zapata et al. publicaron el trabajo titulado "Understanding the structural complexity of induced travel demand in decision-making: a system dynamics approach". En particular, los autores desarrollaron un modelo de dinámica de sistemas para comprender como la construcción vial no es una política efectiva para lidiar con la congestión vial. En el corto plazo, la construcción de nuevas vías si logra los resultados esperados. Sin embargo, en el mediano y largo plazo, la construcción genera nueva congestión vial. Este fenómeno se conoce como demanda inducida de transporte y los autores desarrollaron un modelo para comprender, estudiar y simular este fenómeno característico en ciudades de América Latina donde la construcción de vías suele ser una política común para lidiar con la congestión.

Seguidamente, en 2018, Jarv et al. desarrollaron el trabajo "Dynamic cities: Location-based accessibility modelling as a function of time". Los autores presentaron un marco conceptual de modelización dinámica de la accesibilidad basada en la localización que capta la temporalidad dinámica de los tres componentes de la accesibilidad: personas, transporte y lugares de actividad social. Los autores se enfocaron en estudiar el impacto de los aspectos temporales en la modelización de la accesibilidad con dos ejemplos: investigando la accesibilidad alimentaria y su equidad espacial.

Dos años después, en 2020, Suryani et al. publicaron el artículo "System Dynamics Simulation Model for Urban Transportation Planning: a Case Study". Este trabajo estudió la planificación del transporte urbano mediante el uso de un modelo de simulación de dinámica de sistemas. Tal planificación incluyó la mitigación de la congestión mediante la gestión de la demanda y la capacidad, la mejora del sector del transporte público y la mejora de la movilidad urbana. Los resultados de la simulación mostraron que la movilidad depende del tiempo de viaje, la relación de cumplimiento de la oferta y la demanda de transporte público, la eficacia de la distancia y el tiempo de traslado del transporte público. En este mismo año, Angarita-Zapata et al. publicaron el trabajo titulado "White-box flight simulator built with system dynamics to support urban transportation decisionmaking and address induced travel demand". Este artículo presentó un simulador de vuelo de caja blanca basado en dinámica de sistemas para apoyar la toma de decisiones en materia de transporte urbano y abordar la demanda inducida de transporte. Como características relevantes, el modelado construido tuvo en cuenta políticas de transporte público y el cobro por congestión, así como la influencia del transporte informal lo cual es característico de ciudades en América Latina.

Luego, en 2021, Nagy et al., en el trabajo "Improving traffic prediction using congestion propagation patterns in smart cities", manifiestan la importancia de mejorar las estrategias en la gestión del tráfico. Los autores se centraron en métodos de minería de datos para variables que muchas veces no se tienen en cuenta, pero que afectan de manera directa o indirecta la movilidad en las ciudades. Esto conllevó a identificar el incremento en el consumo de combustible como factor clave en la sostenibilidad de la movilidad. Además, tal consumo de combustible influenciaba el aumento de las emisiones, lo cual terminaba afectando la salud de las personas.

Finalmente, Albalade et al. en 2021, en el artículo titulado "On the relationship between congestion and road safety in cities" abordaron el problema de la desmesurada congestión en las ciudades y su relación con la seguridad en las mismas, específicamente en cuanto a la mortalidad por accidentes en ciudades pertenecientes a la Unión Europea. Se planteó la necesidad de implementar políticas que proporcionen modelos de movilidad más sostenibles y eficientes; políticas que permitan conocer las causas y efectos que genera la congestión en los sistemas de transporte para entender cómo se puede mitigar su impacto.

D. Emisiones, transporte, economía, población

Respecto al modelado y simulación con dinámica de sistemas de problemas complejos, Pfaffenbichler et al. (2011) publicaron el trabajo titulado "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". Los autores expusieron las razones de la importancia del modelado con dinámica de sistemas, en particular con el uso de diagramas causales para la comprensión de problemas, particularmente con modelos de transporte. Además, discutieron cómo la búsqueda de consensos en equipos interdisciplinarios aporta en la construcción de los modelos.

Finalmente, se destaca el trabajo "A system dynamics approach to scenario analysis for urban passenger transport energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing", elaborado en 2015 por Ma et al. Este trabajo integró conceptos de todos los trabajos presentados en las secciones previas. En concreto consideró emisiones, transporte, economía y población y los modeló usando diagramas de influencias y diagramas de flujos y niveles. Los autores construyeron un modelo de dinámica de sistemas para estudiar las emisiones de carbono del transporte urbano de pasajeros de Pekín. Este modelo incluyó un subsistema de economía, un subsistema de población, un subsistema de transporte y un subsistema de consumo de energía y emisiones. El análisis del modelo demostró que la prioridad al desarrollo del transporte público podría aumentar significativamente la proporción del transporte público a nivel local y sería útil para perseguir el ahorro de energía y la reducción de

emisiones también. De igual forma, el modelo desarrollado por Ma et al. (2015) permitió observar como la gestión de la demanda de viajes tiene un efecto distintivo en el ahorro de energía y la reducción de emisiones a corto plazo; mientras que el progreso técnico es más propicio para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones.

E. Conclusiones de la revisión del estado del arte

Como se evidencia en los referentes consultados, se tienen valiosas y diversas posturas para comprender las causas y los problemas alrededor de la movilidad urbana dentro de ciudades de diferentes tamaños. Dentro de los factores que influyen la movilidad y la congestión se destaca el aumento de los vehículos particulares en circulación, la ineficiente gestión del tráfico en algunos casos, la concentración de servicios básicos en algunos sectores dentro de las ciudades (centros médicos, de educación, sitios de trabajo como oficinas), los largos y congestionados desplazamientos, entre otros. Se destaca además la preocupación por mejorar en la disminución de emisiones de gases causadas por una movilidad congestionada. Dichas emisiones suelen ser producto, por una parte, del uso de vehículos de combustión interna, especialmente por la poca eficiencia en el uso de automóviles particulares y; por otro lado, por el aumento en los tiempos de desplazamiento debido a la expansión inevitable de las ciudades.

Sumado a lo anterior, algunos de los trabajos analizan el crecimiento demográfico y como este puede incidir en el aumento de la congestión dentro de las ciudades. A esto se suman las nuevas y crecientes dinámicas económicas, que demandan servicios y materias primas, como el uso de biocombustibles que modifican el uso del suelo en diversas latitudes. Por ejemplo, se destaca como el establecimiento de monocultivos en regiones apartadas provoca la deforestación y subsecuentemente el déficit de bosques que regulan el clima, lo cuales son los encargados del almacenamiento de carbono extraído de la atmósfera.

Es así como en el presente trabajo se abordará el problema de la movilidad urbana y la congestión con una mirada sistémica de dicho fenómeno. Eso permitirá facilitar su comprensión en principio mediante un diagrama causal y luego en un modelo de flujos y niveles, los cuales permitirán analizar variables relevantes como son el uso intensivo del vehículo privado, su relación con el transporte público y las emisiones generadas por estos medios, entre otros factores relevantes.

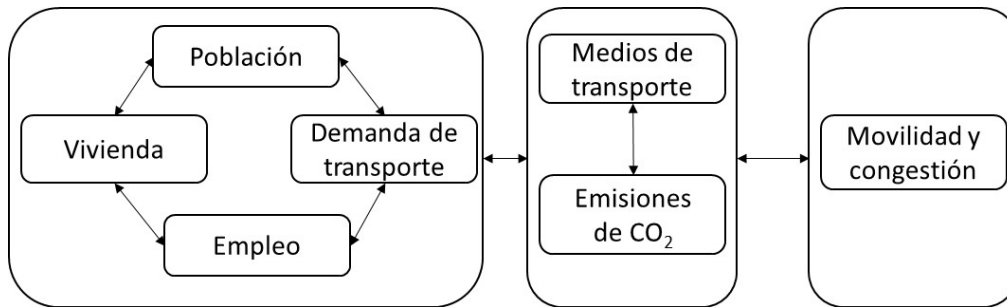
II. Descripción general del modelo y diagramas de flujos

El objetivo central del modelo desarrollado es representar de forma sistémica el comportamiento de la movilidad urbana. Tal representación permite la evaluación de escenarios futuros de dicha movilidad mediante la variación de parámetros de políticas estructurales incluidas en el modelo (Cobro por congestión a vehículos privados, transporte público, calidad del transporte público para disminuir transporte informal, construcción de vías para ofrecer conectividad y/o intentar disminuir la congestión, efecto de la electromovilidad en vehículos privados).

La estructura general del modelo desarrollado presenta una vista sistémica de 3 sectores relacionados entre sí de forma realimentada. Estos sectores son grupos de variables de interés que representan de forma dinámico-sistémica el comportamiento de la movilidad urbana y las emisiones de dióxido de carbono. Los sectores definidos de forma general para el modelo se observan en el diagrama 1 y se describen a continuación.

- Población y uso de la tierra como representación de una dinámica económica global. Este sector representa la demanda de trabajo y vivienda derivada por una población específica. Además, este sector representa el fenómeno de adquisición de vivienda y el área urbana construida.
- Población y uso de la tierra como representación de una dinámica económica global. Este sector representa la demanda de trabajo y vivienda derivada por una población específica. Además, este sector representa el fenómeno de adquisición de vivienda y el área urbana construida.
- Modos de transporte y emisiones derivados de estos. A partir de la demanda de trabajo y vivienda, este sector representa la demanda de transporte dividida en tres medios (vehículos privados, transporte público y transporte informal). Estos tres medios de transporte interactúan entre sí mediante y a su vez son generadores de emisiones.
- Movilidad y congestión vial. La interacción entre vehículos privados, transporte público y transporte informal determina el estado de la movilidad en las vías. En particular, los vehículos privados y el transporte informal contribuyen directamente a la congestión de la movilidad. Por otra parte, el transporte público no contribuye en la congestión vehicular, al considerarse un sistema de buses de transporte rápido (BRT) con vías exclusivas para su funcionamiento.

Diagrama 1
Sectores principales del modelo



Fuente: Elaboración propia.

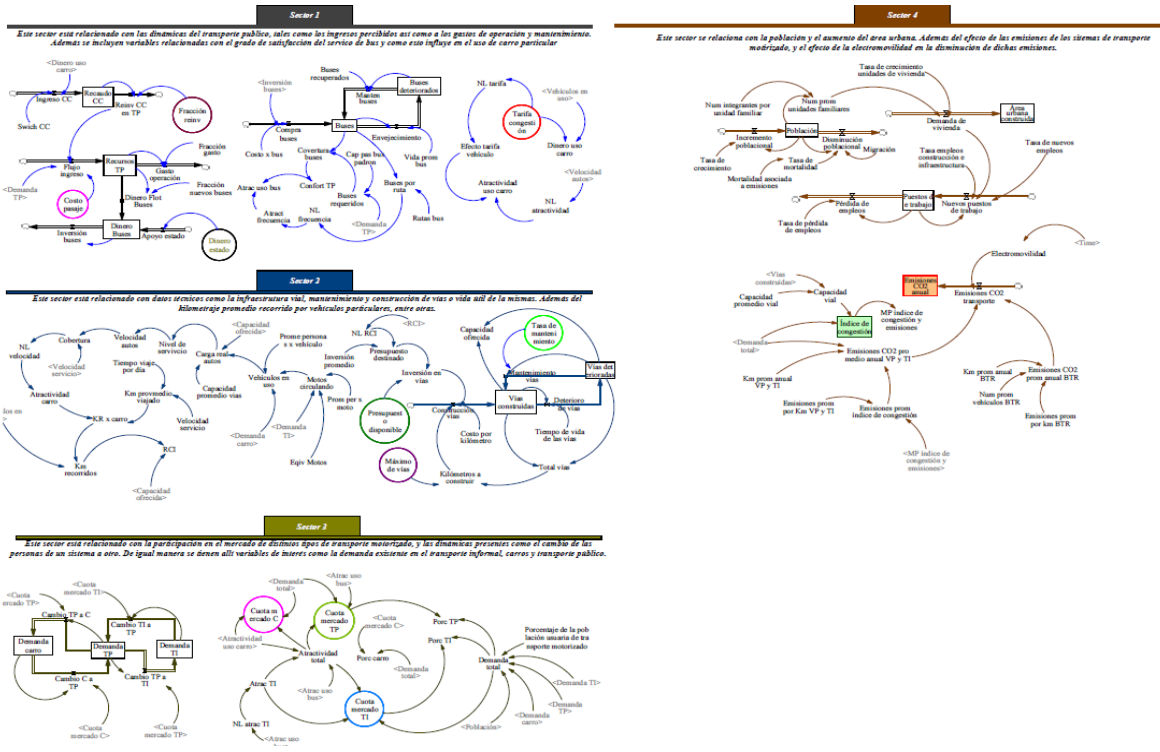
Tomando como referencia la revisión de literatura realizada, el modelo (diagrama de influencias y diagrama de flujos y niveles) considerará una serie de sectores que constituyen grupos de variables de interés, las cuales influenciarán en el comportamiento de la movilidad urbana.

Sumado al objetivo y sectores característicos del modelo mencionados anteriormente, dentro de las principales características y limitaciones del prototipo del modelo a desarrollar (diagrama de influencias y diagrama de flujos y niveles) se destacan:

- Todas las cantidades consideradas en el modelo serían cantidades agregadas (no se considerarán representaciones de carácter mesoscópico o microscópico). De igual forma, el modelo no considerará modelado espacial de eventos sociales, económicos o de transporte.
- Como medios de transporte se tendrían en cuenta vehículos privados (basados en combustibles fósiles y eléctricos), sistemas de transporte público masivo tipo BRT (Bus Rapid Transit) y transporte informal (motocicletas).
- El aumento de vehículos privados estará determinado preferiblemente por tasas de motorización promedio que suelen estar intrínsecamente influenciadas por la baja en los precios de este medio de transporte y el aumento del poder adquisitivo de las personas.
- Las personas que usan los medios de transporte mencionados 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, por ejemplo, el vehículo representa estatus social.
- No hay un modelado espacial de la cobertura y accesibilidad del sistema BRT.
- Se consideraría la construcción de vías como estrategia de movilidad y conectividad. Además, el beneficio proveído por nuevas vías sería la velocidad de viaje. Además, sería posible destinar diferentes cantidades de dinero para aumentar o no la construcción vial.
- Las vías construidas corresponderían a 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 congestión vehicular sería estimada como indicador adimensional con valores entre 0 y 1. Valores cercanos a 0 representarían un ambiente transitable, mientras que valores alrededor de 1 representarían congestión vial.
- La escala de tiempo de las simulaciones podría ser anual o diaria. Por tanto, la congestión observada en cada año corresponde a un promedio característico de dichas escalas temporales. Además, no se consideran variaciones de tráfico características de la escala temporal diaria donde se observan horas valle y horas punta.

La estructura general del diagrama de flujos y niveles, desarrollado en el *software* VENSIM, se observa en el diagrama 2.

Diagrama 2
Vista general del modelo

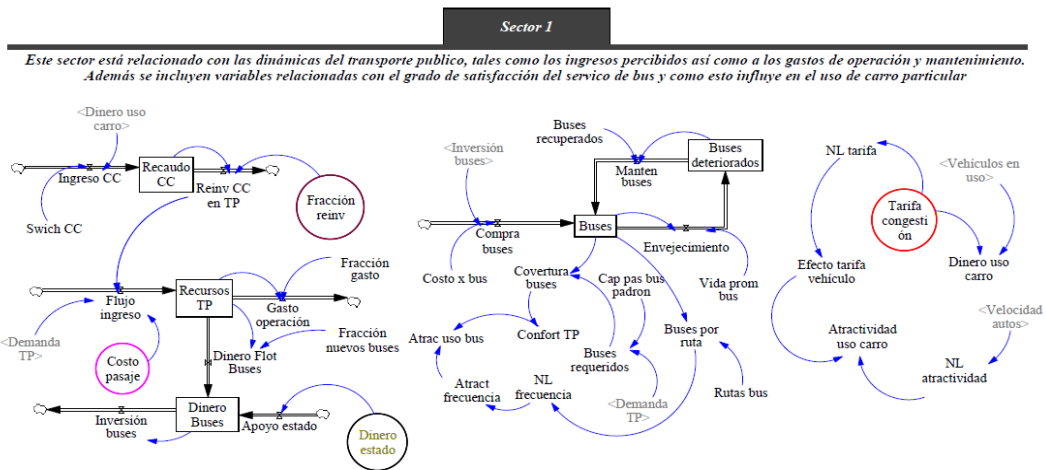


Fuente: Elaboración propia.

Esta vista panorámica del modelo contiene cuatro sectores, que a su vez están directamente relacionados con la estructura global del modelo presentado en el diagrama 1. Estos cuatro sectores agrupan variables de interés y cada uno contiene una descripción básica de ellas para orientar a los usuarios, no expertos en dinámica de sistemas, que hagan uso del modelo. Habiendo presentado la vista general del diagrama de flujos y niveles, a continuación, presentamos una vista detallada de cada uno de los sectores expuestos en el diagrama 2.

El siguiente diagrama ilustra el sector 1 que contiene variables relacionadas con el funcionamiento del transporte público, tales como compra y mantenimiento de buses, recaudo económico derivado de la actividad diaria del transporte público, entre otras variables. Sumado a lo anterior, este sector contiene las variables que representan la recolección de dinero derivada del cobro por congestión vehicular y también representa como dicho dinero se puede gestionar para beneficio del transporte público.

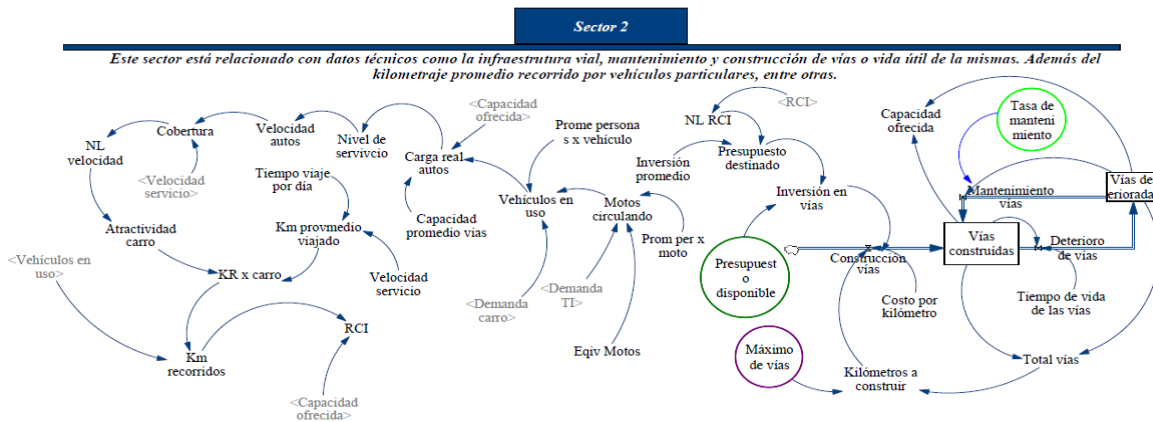
Diagrama 3
Sector 1, transporte público y el cobro por congestión a vehículos privados



Fuente: Elaboración propia.

El diagrama 4 resume el sector 2. Este sector contiene variables de flujos y niveles para representar la dinámica de construcción y mantenimiento de vías. Este sector incluye las variables que representan como la construcción de nuevas vías generan mejores condiciones de circulación vial, lo cual puede terminar induciendo nueva congestión en el mediano y largo plazo. Es relevante resaltar que este sector incluye las variables relacionadas con la congestión e incorpora la forma como los modos de transporte disponibles contribuyen a este fenómeno de movilidad.

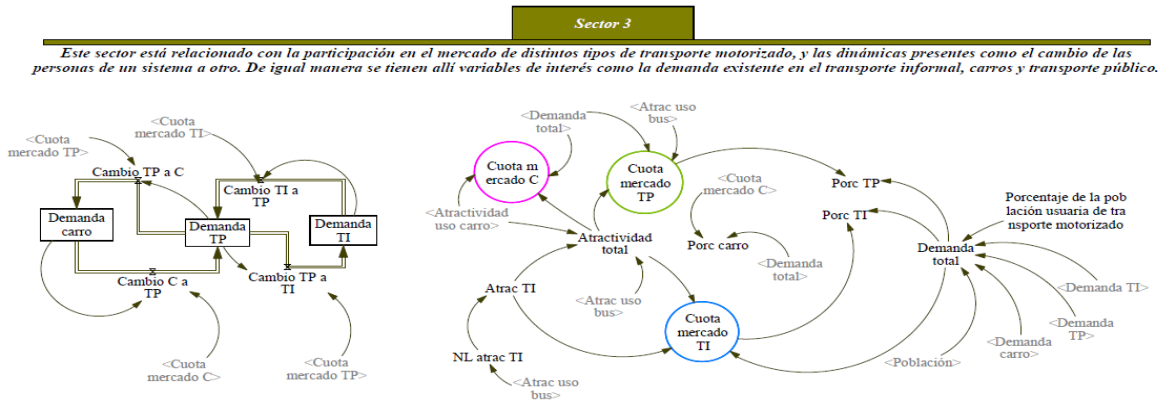
Diagrama 4
Sector 2 relacionado con infraestructura vial y con kilómetros recorridos por el transporte privado e informal



Fuente: Elaboración propia.

El diagrama 5 contiene el sector 3 que corresponde al uso de los medios de transporte disponibles por parte de la población. Para lograr tal objetivo, este sector contiene flujos y niveles que ilustran como los usuarios pueden usar un medio de transporte determinado o como pueden cambiarse de un medio a otro. Es importante resaltar que la suma de los usuarios que hacen uso de todos los medios de transporte del modelo constituye la demanda total de transporte por parte de la población.

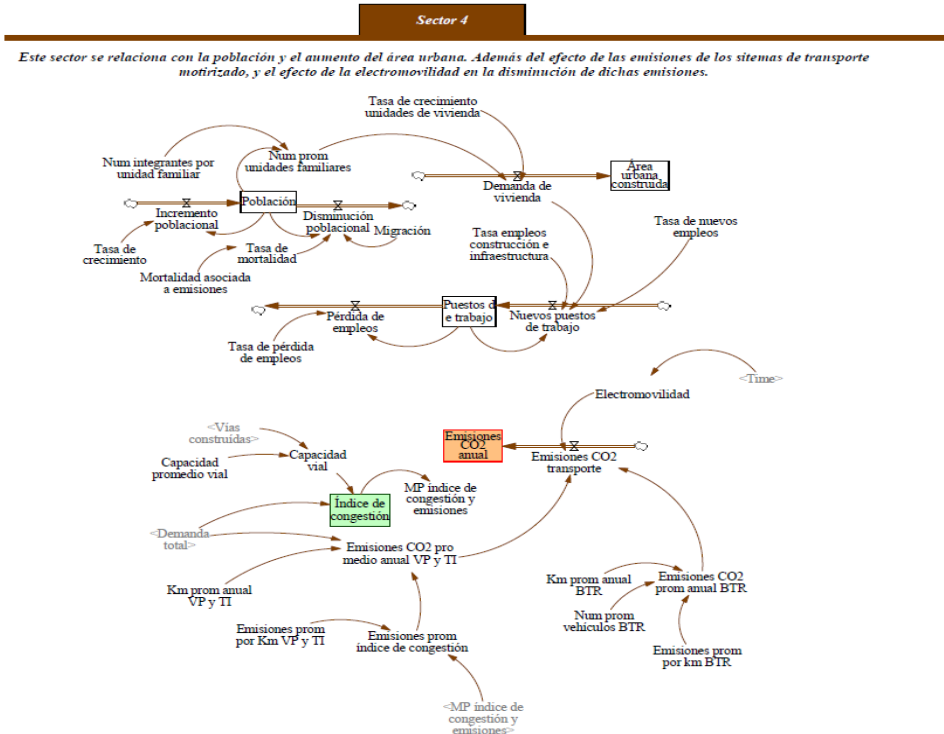
Diagrama 5
Sector 3, número de usuarios que usan los medios de transporte disponibles



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el diagrama 6 resume el sector 4 del modelo. Este sector contiene variables vinculadas con la población, el área urbana construida, la demanda de empleo y los puestos de trabajo generados por la urbanización. Igualmente, este sector contiene variables relacionadas con el índice de congestión y su influencia sobre las emisiones, así como un impacto estimado de estas sobre la calidad de vida de la población.

Diagrama 6
Sector 4 relacionado con población, emisiones y electromovilidad



Fuente: Elaboración propia.

Habiendo presentado los cuatro sectores de variables que componen el diagrama de flujos y niveles a través de 124 variables, este apartado finaliza con las ecuaciones matemáticas de dichas variables que permiten la simulación usando el *software* VENSIM. Las variables del modelo se presentan a continuación:

Cuadro 1
Tipología y variables del modelo

Niveles	Flujos	Parámetro	Variables auxiliares	Relaciones no lineales
Buses	Reinv_CC_en_TP	Maximo_de_Vias	InversionENvias	Confort_TP
Área urbana construida	Apoyo_Estado	Presup_Disponibl	KR_X_carro	NL_RCI
Buses_Deteriodad	Cambio_C_a_TP	Prom_Pers_X_Veh	Kilom_Recorridos	NL_Tarfia
Emisiones CO ₂ anual	Cambio_TI_a_TP	Prom_Pers_X_Veh	Km_A_construir	NL_Velocidad
Demanda_TI	Cambio_TP_a_C	Rutas_bus	Motos_circulando	NL_atract_TI
Demanda_TP	Cambio_TP_a_TI	Rutas_bus	Porc_Carro	NL_atractividad
Demanda_carro	Compra_Buses	TarifaCongestion	Porc_TI	NL_frecuencia
Dinero Buses	ConstruccionVias	TasaMantinimient	Porc_TP	NiveldeServicio
Población	Deterioro_vias	TiempoVida_vias	Presup_destinado	MP índice de congestión y emisiones
Puestos de trabajo	Demanda de vivienda	Tiempo_viaje_dia	RCI	Electromovilidad
Recaudo_CC	DineroFlotBuses	Velocidad_Servic	TotalVias	
Recursos_TP	Disminución poblacional	VidaProm_Bus	Vehiculos_en_uso	
Vias_Construidas	Emisiones CO ₂ transporte	Buses_recuperado	Velocidad_autos	
Vias_Deteriorada	Envejecimiento	CapPas_BusPadron	km_prom_viajados	
	FlujoIngreso	CapPas_BusPadron	Atrac_Uso_Carro	
	Gasto_Operacion	Capacidad promedio vial	Aract_uso_Bus	
	Ingreso_CC	CostoXbus	Atract_Frecuenci	
	InversonBuses	CostoXkilometro	Atract_TI	
	Incremento poblacional	Costo_Pasaje	AtractividadTota	
	Manten_Buses	Dinero_estado	Atractividad_Car	
	MantenimientoVia	Equiv_motos	Buses_Requeridos	
	Nuevos puestos de trabajo	FraccNuevosBuses	Buses_x_ruta	
	Pérdida de empleos	FraccionGasto	CapacidadOfrecid	
		FraccionReinvers	CargaReal_Autos	
		InversionPromed	Cobertura	
		Migración	Covertura_Buses	
		Mortalidad asociada a emisiones	CuotaMercado_C	
		Num integrantes por unidad familiar	CuotaMercado_TI	
		Tasa de crecimiento unidades de vivienda	CuotaMercado_TP	
		Tasa de crecimiento poblacional	Demanda_Total	
		Tasa de pérdida de empleos	DinderoUsoCarro	
		Tasa empleos construcción e infraestructura	Efecto_Tarif_Veh	
		Tasa de nuevos empleos	Num prom unidades familiares	
		Emisiones prom anual km VP y TI	Tasa de mortalidad	
		Emisiones prom por Km VP y TI	Capacidad vial	
		Km prom anual BTR	Emisiones CO ₂ promedio anual VP y TI	
		Num prom vehículos BTR	Emisiones prom índice de congestión	
		Emisiones prom por km BTR	Emisiones CO ₂ prom anual BTR	
		Porcentaje de la población usuaria de transporte motorizado		

Fuente: Elaboración propia.

III. Escenarios de simulación

La presente sección presenta los resultados de simulación, del modelo de flujos y niveles presentado en la sección anterior, todo con vistas a un horizonte de tiempo de 8 años. Nuevamente es pertinente aclarar que el propósito de las simulaciones de este modelo 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 las gráficas emergen a partir de las interacciones entre los ciclos de realimentación que constituyen la estructura realimentada propuesta.

Los resultados de simulación del modelo fueron evaluados bajo tres escenarios definidos en el diagrama 7. Cada escenario contiene diferentes políticas y su propósito es reflexionar cómo la priorización de diferentes estrategias impacta la congestión vial y las emisiones de CO₂, como variables centrales de análisis de este modelo. En concreto, el escenario 1 representa la construcción de nuevas vías como única política para mejorar la movilidad. En este escenario no se aplica el cobro por congestión (política *push*) y aunque si hay transporte público, su calidad no se prioriza. Posteriormente, el escenario 2 ilustra una combinación de construcción de vías y política *push* para lograr una mejora de la movilidad. Complementario a lo anterior, el escenario 3 representa el efecto *push-pull* donde se prioriza la calidad del transporte público mediante la inversión de recursos económico, obtenidos mediante el cobro por congestión. En este escenario 3 si hay construcción de vías, sin embargo, solo se construyen para garantizar conectividad urbana más no para disminuir la congestión vial.

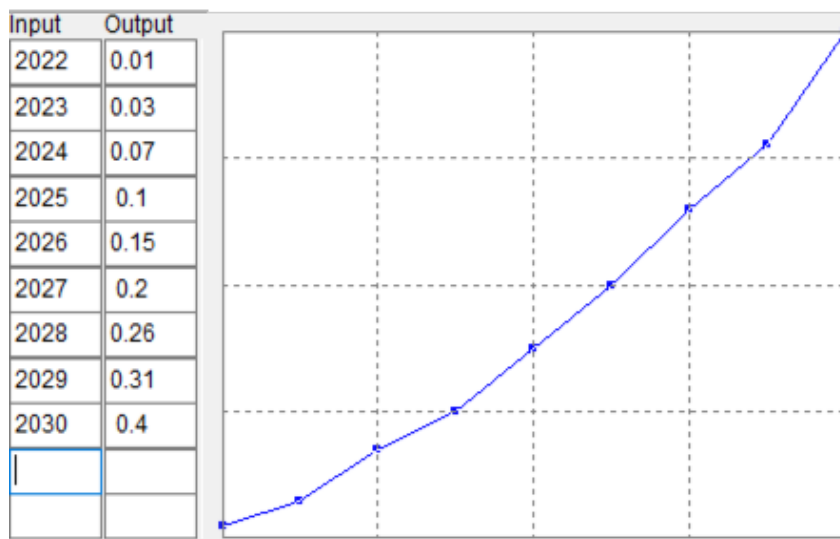
Es importante resaltar que en estos tres escenarios se asume un un incremento y adopción progresiva de la electromovilidad. Específicamente, la electromovilidad se ha representado como el reemplazo progresivo del parque automotor privado por vehículos no basados en combustibles fósiles, es decir, vehículos eléctricos. El diagrama 8 ilustra la evolución de la electromovilidad en el horizonte de tiempo de simulación del modelo. Como se observa, el año 2022 empieza con una adopción de electromovilidad aproximadamente del 1%. Este valor incrementa progresivamente hasta el año 2030 donde se proyecta una tasa penetración del 40% sobre el parque automotor existente.

Diagrama 7
Escenarios de simulación

Escenarios	Política 1 - Infraestructura vial	Política 2 - Política "Push" - Cobro por congestión	Política 3 - "Pull" - Transporte público
Escenario 1	✔	✘	✘
Escenario 2	✔	✔	✘
Escenario 3	✔	✔	✔

Fuente: Elaboración propia.

Diagrama 8
Porcentaje de penetración de electromovilidad en el parque automotor de vehículos privados durante el horizonte de tiempo de la simulación



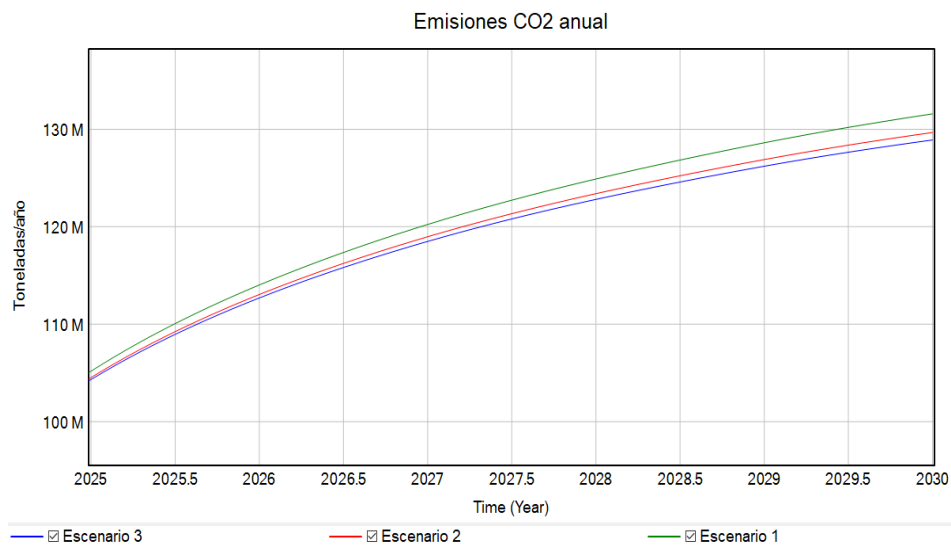
Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

Habiendo descrito los escenarios de políticas, a continuación, presentamos los resultados de simulación obtenidos mediante dichos escenarios. Es relevante resaltar que el modelo construido contiene un gran número de variables que podrían ser graficadas. Sin embargo, solo se han seleccionado las variables directamente relacionadas con el objetivo definido para la presente consultoría, esto es, la congestión vial y las emisiones de CO₂.

El diagrama 9 ilustra el comportamiento anual de las emisiones de CO₂ bajo los tres escenarios previamente definidos. Se observa que el escenario 3, donde se priorizan todas las políticas disponibles, es el que mejor resultado alcanza en el largo plazo, es decir, es el escenario con más bajas emisiones de CO₂ en un horizonte de tiempo proyectado a 8 años. Es pertinente mencionar que en este escenario se

construyen vías, pero su construcción solo busca garantizar la conectividad del contexto urbano objeto de estudio. De igual manera, el escenario con mayor número de emisiones es en el escenario 1 donde precisamente la construcción de nuevas vías es la única política priorizada para la mejor de la movilidad. Así, la incursión creciente de la electromovilidad se beneficiaría aún más con el acompañamiento de políticas integrales que buscan disminuir el impacto de las emisiones en la movilidad urbana (ej., políticas *push-pull*), tal como lo es el caso de los escenarios 2 y 3.

Diagrama 9
Emisiones CO₂ bajo los tres escenarios de simulación definidos

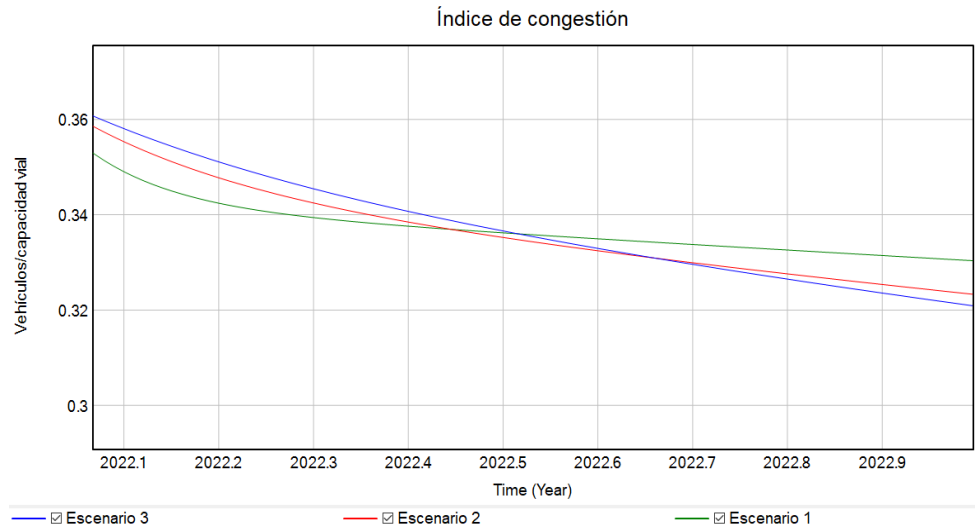


Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

Las emisiones de CO₂ están estrechamente vinculadas a la congestión vial, ya que este fenómeno recoge las emisiones provenientes de los medios de transporte considerados en el modelo, en especial las emisiones generadas por el transporte privado y el transporte informal. En este contexto, el diagrama 10 muestra el comportamiento de la congestión vial mediante un índice adimensional entre cero y uno. Valores cercanos o superiores a uno representan una movilidad congestionada, mientras que valores cercanos a cero representan una movilidad descongestionada.

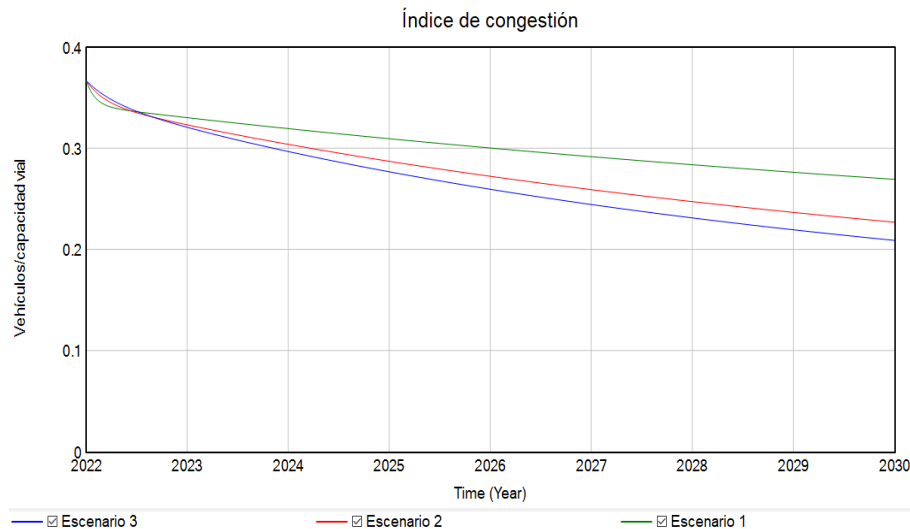
En el diagrama 10 se aprecia el comportamiento del índice de congestión en el primer año de simulación, tras la construcción de vías de los tres escenarios definidos. Se puede apreciar como en el corto plazo el escenario 1 es el que mejor resultados trae para disminuir la congestión. Recordando que el escenario 1 prioriza únicamente la construcción de vías, los resultados del diagrama 11 son coherentes con lo reportado en la literatura donde diferentes autores mencionan que esta política de construcción trae resultados positivos en el corto plazo con respecto a otros escenarios que no priorizan la construcción vial (Angarita et al., 2016; Cervero, 2002).

Diagrama 10
Congestión vial en el corto plazo bajo los tres escenarios de simulación definidos



Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

Diagrama 11
Congestión vial en el largo plazo bajo los tres escenarios de simulación definidos



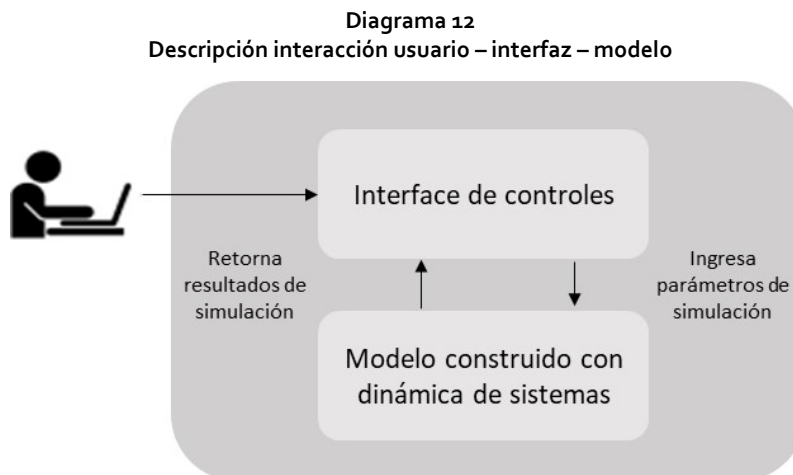
Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

Sin embargo, en el largo plazo los beneficios de nuevas vías para mitigar la congestión desaparecen (Pfaffenbichler, 2011; Pfaffenbichler et al., 2010). Este comportamiento contraintuitivo donde la priorización exclusiva de construcción vial genera nueva congestión vehicular en el mediano y largo plazo se observa en el diagrama 11. En concreto, a medida que los años de simulación transcurren, los escenarios 2 y 3 tienen resultados positivos y permanentes en la reducción de la congestión vehicular, lo cual está relacionado a su vez con sus bajas emisiones de CO₂ observadas en el diagrama 9. De forma contraria, el escenario 1 es el que peor resultados trae para la congestión y las emisiones en el largo plazo. De esta manera, se podría decir que un conjunto de políticas complementarias puede lidiar de una mejor forma con la complejidad de la movilidad urbana y puede traer mejores resultados en materia de movilidad y emisiones en contextos urbanos con tasas crecientes de penetración de vehículos eléctricos.

IV. Instrucciones de uso del modelo

En los apartados anteriores se presentó el modelo de flujos y niveles y sus escenarios de simulación correspondientes. Este modelo puede ser concebido como un elemento de apoyo a la toma de decisiones y generación de políticas públicas. Lo anterior se debe a la capacidad del modelo de representar estructuralmente, a un nivel de abstracción tal que permite la simulación por computador, las influencias que la movilidad y los medios de transporte tienen sobre las emisiones de CO₂ y la congestión vehicular.

Sin embargo, las áreas de conocimiento y experiencia de los colectivos de personas donde se genera política pública pueden no estar relacionadas con el modelado y la simulación con dinámica de sistemas. Por lo tanto, este apartado presenta una interfaz *software* desarrollada en VENSIM que opera el modelo de flujos y niveles tal como lo muestra el diagrama 12. Estos dos elementos en conjunto son un útil tecnológico que permite realizar experimentación simulada y, en consecuencia, facilitan la apropiación del modelo matemático en grupos de tomadores de decisiones no especializados en dinámica de sistemas.

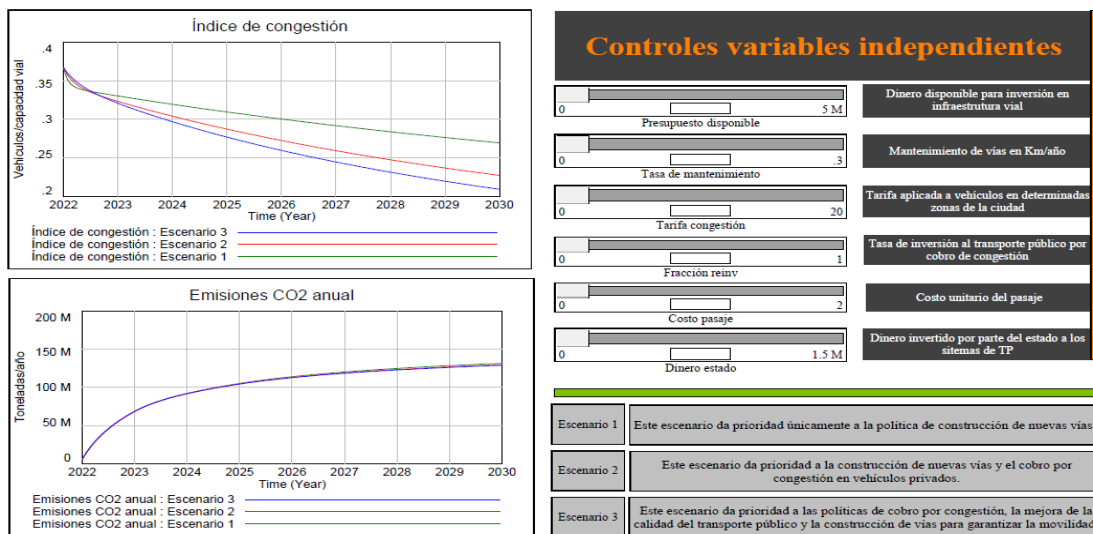


Fuente: Elaboración propia.

Complementariamente, el diagrama 13 presenta la interfaz *software* desarrollada. Esta interfaz se compone de tres elementos principales: resultados de simulación, controles de políticas y descripción de escenarios de simulación. El primer componente contiene los diagramas de resultados de simulación asociadas a las dos variables de interés de este modelo, las cuales son emisiones de emisiones de CO₂ y congestión vial. El segundo componente representa los controles de simulación que el usuario puede modificar, mediante una serie de deslizadores y dentro de unos rangos de valores. Estos controles representan parámetros clave que cambian el funcionamiento de las políticas estructurales definidas internamente en el modelo. De esta manera, cuando el usuario modifica las políticas a través de estos controles, los resultados de simulación en las variables clave cambian en función de los valores asignados por el usuario usando los deslizadores de los controles. Finalmente, el tercer componente de la interfaz presenta la descripción de cada escenario de simulación definido. Es importante resaltar que dichos escenarios de políticas pueden ser modificados para simular diferentes escenarios futuros mediante los controles anteriormente mencionados.

Diagrama 13

Vista principal de la interfaz *software* que opera la simulación del modelo de flujos y niveles desarrollado



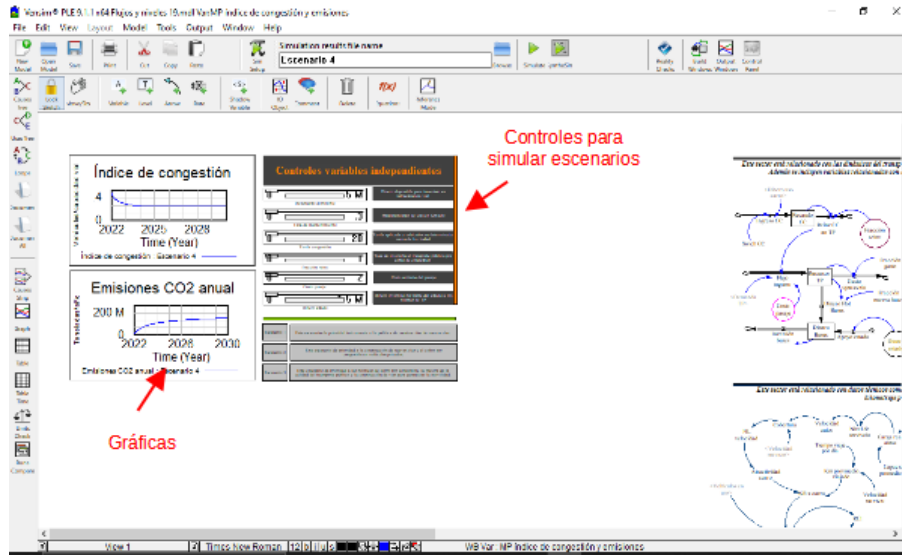
Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

Habiendo presentado la interfaz *software* que operan el modelo de flujos y niveles, a continuación, presentamos los principales pasos para utilizar el modelo tomando en consideración que diferentes usuarios puedan interactuar con la interfaz y desarrollar acciones tales como simular, agregar nuevos escenarios de simulación, graficar nuevas variables de interés, entre otras acciones.

El primer requisito para utilizar el modelo de simulación es disponer del programa Vensim. Este *software* puede ser utilizado en su versión de evaluación que está disponible en el sitio web del desarrollador (<https://vensim.com/>). La versión que le permite utilizar el modelo es la denominada "Vensim PLE". Luego de instalar el programa se requiere seguir los siguientes pasos:

- i) Descargar los archivos del modelo de simulación, los cuales podrá encontrar en el sitio web del observatorio de planificación de CEPAL <https://observatorioplanificacion.cepal.org>, en el sitio web de la plataforma urbana de ciudad de CEPAL <https://plataformaurbana.cepal.org/es> en la sección planes de movilidad y en el sitio de la plataforma elearning de ILPES CEPAL (<https://tinyurl.com/2p83p7fh>).
- ii) Una vez abiertos los archivos del modelo, se podrán ver las variables y las relaciones entre variables.

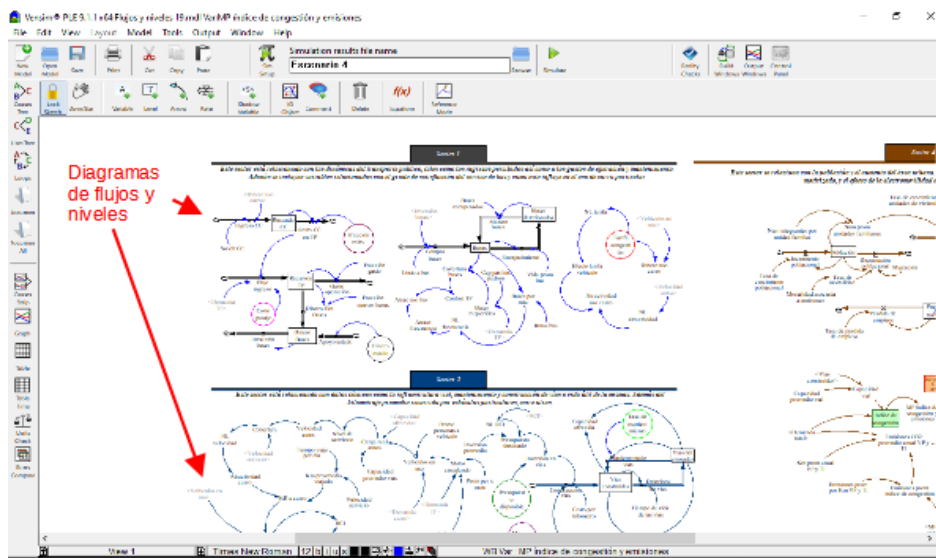
Diagrama 14
Componentes de la pantalla principal



Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

Igualmente se podrán ver los diagramas de flujos y niveles, las variables y las relaciones entre variables.

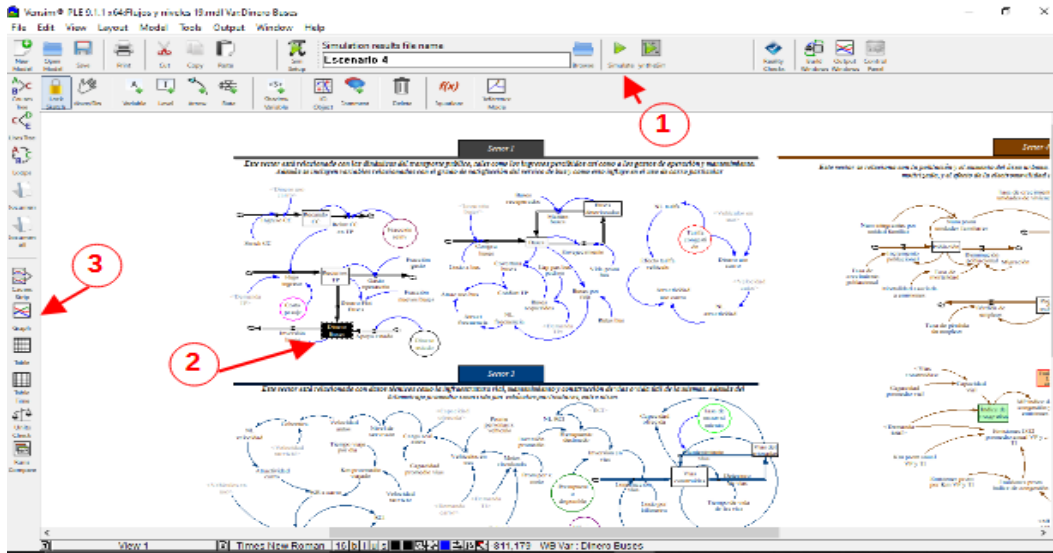
Diagrama 15
Diagramas de flujos y niveles



Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

- iii) Para realizar una simulación es necesario ejecutar el comando "Simulate" (señalado con el número 1 en el diagrama 16), luego seleccionar la variable de interés y posteriormente clic en "Graph" (indicado con el número 3 en el diagrama 16).

Diagrama 16
Simulación



Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

- iv) El resultado de la simulación de una variable se muestra en un gráfico que señala su comportamiento a futuro. En el diagrama 17 se presenta el resultado para la variable Dinero buses, que está relacionada con la inversión en los buses de transporte público.

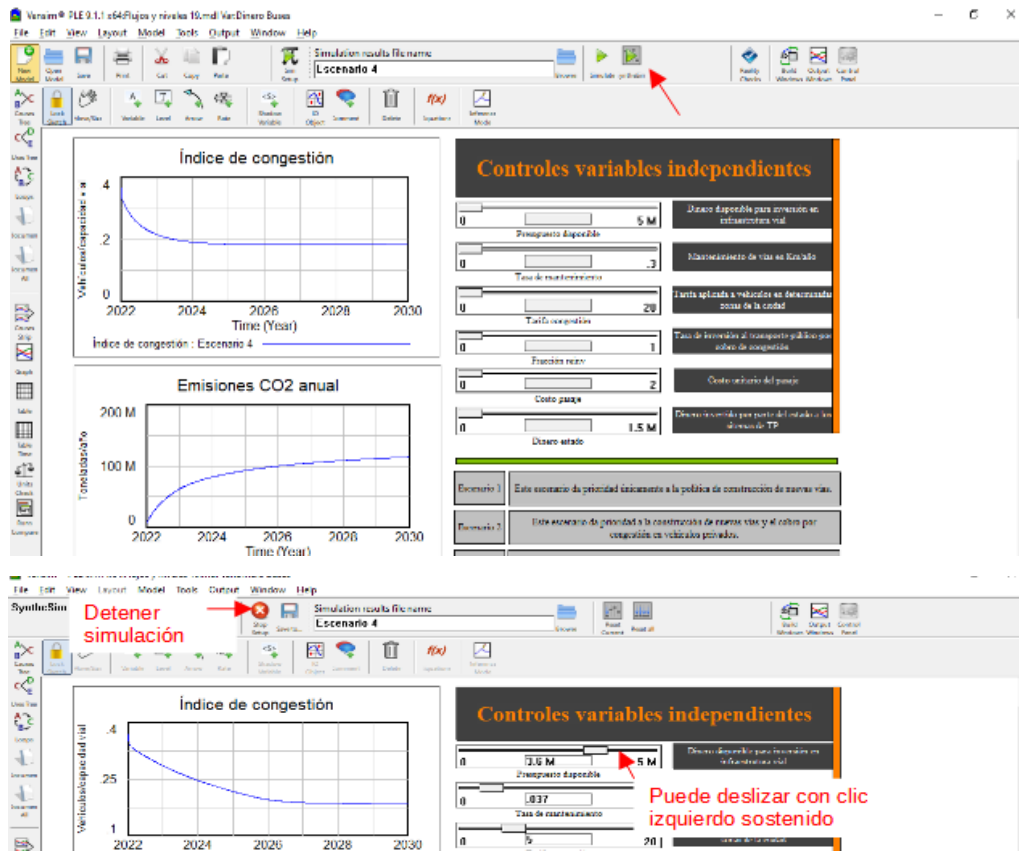
Diagrama 17
Resultado para la simulación variable "Dinero Buses"



Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

- v) También es posible generar una simulación en una modalidad gráfica a escala de cada una de las variables, así como algunos controles de los parámetros. Esto se puede realizar haciendo clic en el ícono "Synthe Sim". Se puede detener la simulación con el ícono "Stop Setup".

Diagrama 18
Simulación usando Synthe Sim



Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

- vi) Para generar un nuevo escenario es necesario cambiar el nombre en la ventana "Simulation results file name" y con ello, se genera un nuevo escenario dando clic en "SyntheSim" y manipulando los respectivos controles para establecer los valores que se desea observar en relación con su comportamiento a futuro.

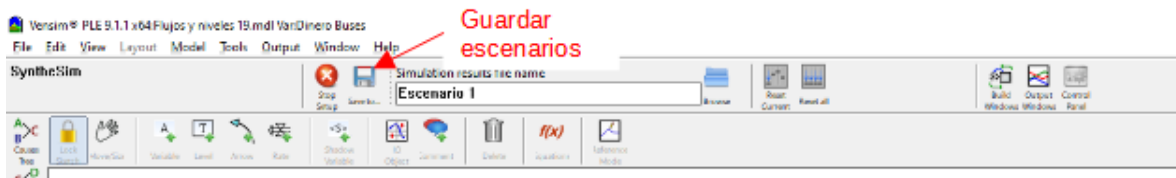
Diagrama 19
Creación de nuevos escenarios



Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

- vii) Luego es posible guardar el escenario simulado, haciendo clic en el botón "Save".

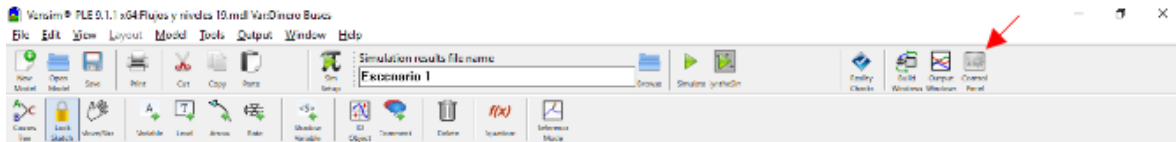
Diagrama 20
Guardar nuevos escenarios



Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

viii) Una de las funcionalidades más útiles es la posibilidad de visualizar diferentes escenarios de manera conjunta, para realizar esta operación es necesario ingresar a las opciones de “ontrol panel”.

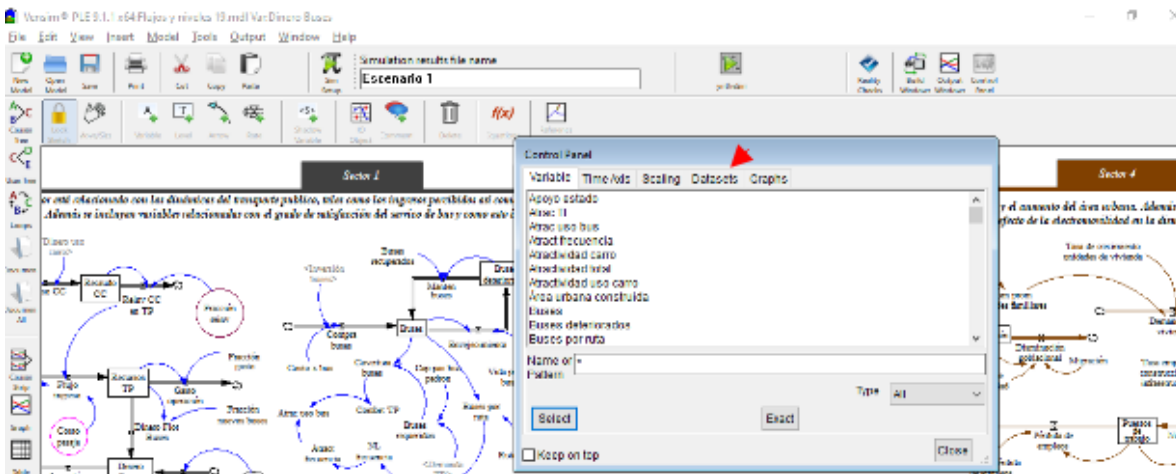
Diagrama 21
Visualización de múltiples escenarios



Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

ix) Luego de desplegada la ventana emergente, se selecciona “Datasets”.

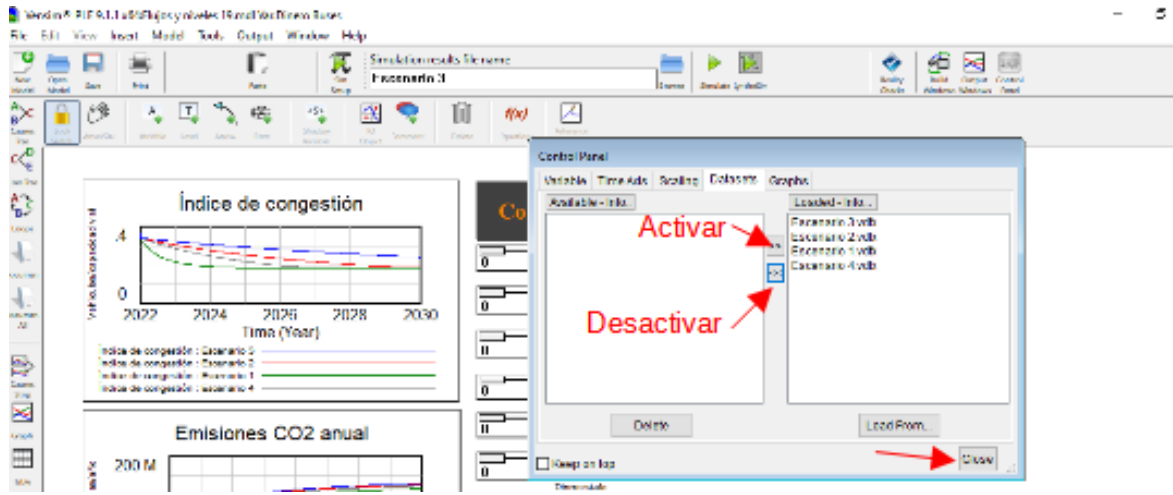
Diagrama 22
Selección de conjuntos de datos para la visualización de múltiples escenarios



Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

x) Y posteriormente se seleccionan las variables de interés para graficar dando clic en “>>”, o deshabilitar “<<”. Finalmente, clic en “Close”. De esta manera se generan las simulaciones correspondientes mediante la variación de parámetros.

Diagrama 23
 Selección de variables para la visualización de múltiples escenarios



Fuente: Elaboración propia en base al uso del programa VENSIM.

V. Conclusiones

El modelo de flujos y niveles contiene cuatro sectores que agrupan variables relacionadas de forma realimentada. Estos sectores de variables representan los medios de transporte (transporte privado, transporte público, transporte informal), electromovilidad, congestión vehicular, emisiones, población, demanda de empleo y área urbana construida, entre otros elementos. Como resultado de las relaciones realimentadas, lineales y no lineales entre estas variables se logra obtener un útil tecnológico que permite simular, analizar y reflexionar acerca de cómo diferentes políticas pueden contribuir en el tiempo, en mayor o menor medida, al objetivo de garantizar una movilidad sostenible. Esto se ejemplifica a través de los escenarios de simulación planteados en el presente informe.

Tales escenarios representan la construcción de nuevas vías y la inversión estatal, la calidad del transporte público y el cobro por congestión a vehículos privados. A su vez, estos escenarios son el puente de interacción del modelo con los usuarios posteriores que este tenga. Esto es posible mediante la interfaz desarrollada para operar el modelo sin necesidad de tener conocimiento previo y/o experto en dinámica de sistemas. La interfaz permite modificar elementos claves de las políticas y sus escenarios asociados mediante una serie de controles y deslizadores.

Es importante mencionar que los tres escenarios definidos para el modelo de flujos y niveles buscan ilustrar las capacidades del modelo para representar de forma sistémica diferentes escenarios futuros. Sin embargo, esto no implica que los usuarios no puedan definir nuevos escenarios de simulación. Específicamente los futuros usuarios del modelo podrán agregar nuevos escenarios, modificar o eliminar los escenarios existentes, o inclusive modificar las condiciones de simulación de los escenarios actuales para realizar comparativas.

Finalmente, diferentes líneas de trabajo futuro y colaboración se han identificado a partir de los logros de la presente consultoría. Por ejemplo, la influencia e impacto que tendrían los servicios de transporte *on-demand*, tales como Uber, en las emisiones de CO₂ y la congestión vehicular. Dentro de esta línea de trabajo futuro se estudiaría cómo la alta penetración de electromovilidad en estos servicios *on-demand* influenciaría en el corto y mediano plazo las variables de interés.

Sumado a lo anterior, se identifica la necesidad de diseñar, desarrollar y validar una metodología para la integración de modelos de dinámica de sistemas con técnicas de analítica de dato. Este enfoque de modelado híbrido permitiría, por ejemplo, explorar cómo el diseño de los diagramas de influencia estaría determinado por análisis de patrones y correlaciones. Sin embargo, lo anterior implicaría a su vez un estudio de cuáles serían las fuentes de información a priorizar dentro de la constante digitalización de los entes públicos y sus sistemas de gestión. Así, sería posible garantizar una metodología de recolección de información en un formato mínimo para apoyar la integración entre analítica de datos y dinámica de sistemas.

Bibliografía

- Angarita-Zapata, J. S., Parra-Valencia, J. A., & Andrade-Sosa, H. H. (2016), Understanding the structural complexity of induced travel demand in decision-making: a system dynamics approach. *Organizacija*, 49(3).
- Angarita-Zapata, J.S., Sosa, H. H. A., & Arredondo, A. D. M. (2020), White-box flight simulator built with system dynamics to support urban transportation decision-making and address induced travel demand. *Scientia et Technica*, 25(3), 438-447.
- Azhaginiyal, A., & Umadevi, G. (2014), System dynamics simulation modeling of transport, energy and emissions interactions. *Civil Engineering and Architecture*, 2(4), 149-165.
- Darquea, D. G. P. (2018), Estudio de emisiones contaminantes utilizando combustibles locales. *INNOVA Research Journal*, 3(3), 23-34.
- Dong, G., Ge, Y., Jia, H., Sun, C., & Pan, S. (2021), Land use multi-suitability, land resource scarcity and diversity of human needs: A new framework for land use conflict identification. *Land*, 10(10), 1003.
- Ercan, T., Onat, N. C., & Tatari, O. (2016), Investigating carbon footprint reduction potential of public transportation in United States: A system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1260-1276.
- Feng, Y. Y., Chen, S. Q., & Zhang, L. X. (2013), System dynamics modeling for urban energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing, China. *Ecological Modelling*, 252, 44-52.
- Fontoura, W. B., Chaves, G. D. L. D., & Ribeiro, G. M. (2019), The Brazilian urban mobility policy: The impact in São Paulo transport system using system dynamics. *Transport policy*, 73, 51-61.
- Jans, M. (2017), Movilidad urbana: en camino a sistemas de transporte colectivo integrados. *AUS [Arquitectura/Urbanismo/Sustentabilidad]*, (6), 6-11.
- Järv, O., Tenkanen, H., Salonen, M., Ahas, R., & Toivonen, T. (2018), Dynamic cities: Location-based accessibility modelling as a function of time. *Applied geography*, 95, 101-110.
- Jørgensen, B. H., Andersen, K. K., & Nielsen, O. A. (2019), Transforming urban mobility: key findings and recommendations. *Transforming Urban Mobility*, 9.
- 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. *Energy Policy*, 85, 253-270.

- Lizárraga Mollinedo, C. (2006), Movilidad urbana sostenible: un reto para las ciudades del siglo XXI. *Economía, sociedad y territorio*, 6(22), 283-321.
- Mateo, M. O. (2010), Reducción de las emisiones de CO₂ en vehículos de transporte: combustibles alternativos. *Energía & Minas: Revista Profesional, Técnica y Cultural de los Ingenieros Técnicos de Minas*, (8), 28-33.
- Nagy, A. M., & Simon, V. (2021), Improving traffic prediction using congestion propagation patterns in smart cities. *Advanced Engineering Informatics*, 50, 101343.
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., Piñeiro, G., Jobbagy, E. G., Verón, S. R., Baldi, G., & Baeza, S. (2006), Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia-Sitio en Reparación*, 10(2), 47-61.
- 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*, 31(2), 267-289.
- Pfaffenbichler, P., Emberger, G., & Shepherd, S. (2010), A system dynamics approach to land use transport interaction modelling: the strategic model MARS and its application. *System Dynamics Review*, 26(3), 262-282.
- Purnomo, H., Abdullah, L., & Irawati, R. H. (2012), Systems dynamics approach to reducing carbon emissions from Deforestation and Forest degradation at provincial level.
- Reillo, F. C. (2016), Usos de los medios de transporte y accesibilidad urbana. Un estudio de caso en el Área Metropolitana de Guadalajara, México. *Papeles de geografía*, (62), 90-106.
- Rumbaugh, J., Jacobson, I., & Booch, G. (2007), *El Lenguaje Unificado de Modelado. Manual de Referencia*.
- Saynes Santillán, V., Etchevers Barra, J. D., Paz Pellat, F., & Alvarado Cárdenas, L. O. (2016), Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 83-96.
- Shafiei, E., Davidsdottir, B., Leaver, J., Stefansson, H., & Asgeirsson, E. I. (2015), Simulation of alternative fuel markets using integrated system dynamics model of energy system. *Procedia Computer Science*, 51, 513-521.
- Shen, Q., Chen, Q., Tang, B. S., Yeung, S., Hu, Y., & Cheung, G. (2009), A system dynamics model for the sustainable land use planning and development. *Habitat International*, 33(1), 15-25.
- Suryani, E., Hendrawan, R. A., Adipraja, P. F. E., & Indraswari, R. (2020), System dynamics simulation model for urban transportation planning: a case study. *International Journal of Simulation Modelling*, 19(1), 5-16.
- Taibi, E. (2010), A system dynamics energy model for a sustainable transportation system. In 28th International Conference of the System Dynamics Society.



En este documento se presentan los pasos para la aplicación de un modelo de simulación de la movilidad sostenible. Esta herramienta permite desarrollar de manera interactiva escenarios futuros de movilidad que integren variables de diferentes áreas temáticas, para, de ese modo, visualizar las interrelaciones entre dimensiones del desarrollo y sus consecuencias en la movilidad de una ciudad. El uso del modelo permite identificar, mediante una interfaz visual de fácil operación, los impactos indirectos de ciertas variables o los efectos en el largo plazo de la aplicación de políticas, programas o proyectos sobre movilidad urbana.

El modelo está disponible para ser usado en procesos prospectivos o de planificación urbana y forma parte de la caja de herramientas prospectivas para la movilidad sostenible.