

Impacto de políticas de movilidad sostenible en el AMVA mediante dinámica de sistemas

Carlos A. Álvarez; Isaac Dynner

Abstract—Las políticas de transporte alternativo pueden contribuir significativamente al desarrollo sostenible urbano, cuando se encaminan a la reducción de emisiones contaminantes al ambiente y generan cambios en el comportamiento humano que propicien eficiencia energética. El Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA –, de la cual hace parte la ciudad de Medellín, ha sido una de las regiones de Colombia que más progreso económico, tecnológico e innovador ha tenido en años recientes, pero al mismo tiempo ha generado una contaminación ambiental preocupante. Esta dinámica ha promovido el transporte urbano, incrementando ampliamente la demanda y oferta de los diferentes modos de viaje; y, aunque el sistema integrado de movilidad ha promocionado alternativas de cero y bajas emisiones, aún se tienen desafíos medioambientales y económicos para la ciudad. Es en estas condiciones que, utilizando la metodología de dinámica de sistemas, se modeló el sistema de transporte de pasajeros del AMVA, para evaluar cómo la población se puede orientar hacia una distribución modal más sostenible, priorizando el transporte público eléctrico y el de cero emisiones, reduciendo el parque automotor a gasolina. El modelo demuestra que de esta manera el sistema de transporte puede lograr un gran ahorro en el uso de combustibles fósiles y una disminución en emisiones de gases efecto invernadero.

Keywords— Sustainable mobility, transport systems, energy consumption, environmental impact, electric vehicle.

I. INTRODUCTION

DE acuerdo con las metas y objetivos pactados en la Conferencia de las Partes (COP) y en el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas y los diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales se basan en los logros de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) (Naciones Unidas, 2020), se establece que el sector transporte es uno de los seis sectores prioritarios de la economía en los que se debe intervenir, para lograr el cumplimiento de estos compromisos, dado que contaba con una participación porcentual del 41% con respecto al total de los sectores en el consumo final de energía en 2019 (UPME, 2019a).

Carlos A. Álvarez is with the Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano Colombia (e-mail: carlosa.alvarez@utadeo.edu.co).

Isaac Dynner is with the Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano Colombia (e-mail: isaac.dynner@utadeo.edu.co).

En Colombia el consumo final de energía del país para el año 2019 fue de 1.346 PJ (Peta Julios), siendo el sector transporte el de mayor participación con un 41% (550 PJ), seguido por el sector industrial con un 24% (325 PJ), sector residencial con un 19 % (258 PJ), sector comercial y público con un 6% (80 PJ) y otros sectores con un 10% (133 PJ) (UPME, 2019a). Las emisiones por sector representan para los usos del suelo y cambio de usos del suelo un 36,5% del total, el sector agropecuario contribuye con el 18%, mientras que el sector transporte representa un 12%, industrias de la energía un 10%, industrias manufactureras y de la construcción con el 6%, residuos (6%), procesos industriales y uso de productos (4,5%), emisiones fugitivas (3,5%) y otros (3%); de un total de 236,9 Mton de CO_{2e} (IDEAM, 2015).

Particularmente en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, se tiene la distribución de emisiones de CO₂ asociado a las fuentes móviles para el año 2018. En este sentido, los automóviles particulares contribuyen con el 33% de las emisiones de CO₂, correspondiente a 1.039.677 de toneladas de emisiones de CO₂ (Ton CO₂), mientras que los camiones aportan el 21% (661.207 Ton CO₂); las motos de 4T emiten el 13% (413.573 Ton CO₂); por su parte los taxis y los buses aportan el 6% (187.664 Ton CO₂) y 5% (144320 Ton CO₂) respectivamente (Universidad Pontificia Bolivariana, 2018).

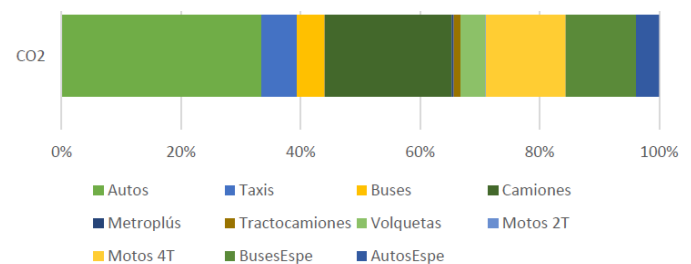


Figura 1. Distribución porcentual de emisiones de CO₂ de fuentes móviles en el AMVA

Fuente: (Universidad Pontificia Bolivariana, 2018)

Adicionalmente, a nivel mundial se han venido presentando grandes problemáticas globales por la inestabilidad del precio de los combustibles fósiles, el crecimiento de la demanda de energéticos en los países en desarrollo, los problemas de variabilidad climática y la inseguridad energética (IEA, 2020b). Colombia no ha sido ajena a esto y desde ya se pueden evidenciar cambios a futuro asociados con la necesidad, no solo de abastecimiento, sino de utilización de una energía menos contaminante, haciéndolo de manera más eficiente y, buscando, que sea a bajo costo, impactando directamente el

comportamiento de la demanda de energéticos.

Existe un gran interés en adaptarse a los cambios que se vienen dando en la demanda de energéticos en el sector de transporte, el cual ha estado incorporando, con mayor intensidad, tecnologías más eficientes en el consumo de energía y que generan menos impacto al ambiente.

Es por esto que resulta de gran importancia para Colombia conocer y analizar la evolución de las principales tecnologías en los principales sectores energéticos, con el fin de definir y promover la incorporación de las nuevas tecnologías eficientes y menos contaminantes.

En consecuencia, resulta necesario planear el desarrollo del sector transporte a nivel tecnológico, de infraestructura e institucional, definiendo metas, objetivos y estrategias que permitan orientar las decisiones hacia el uso de modos de transporte sostenibles, teniendo en cuenta las necesidades de la población. Por lo tanto, para llegar a un sistema de transporte eficiente deben tenerse en cuenta los motivadores para elegir el medio de movilización, incluyendo el precio, confiabilidad, calidad, tiempos de viaje y comodidad (Chowdhury et al., 2015) (Olfindo, 2021).

El transporte influye indirectamente en la satisfacción con la vida al facilitar el acceso a los elementos más fundamentales de la vida (empleo, relaciones, salud) (Delbosc, 2012). Por ello, las decisiones políticas contribuyen a reducir barreras de movilidad, mejorando el confort y satisfacción de los usuarios (Chatman, 2008).

En esta búsqueda, se deben tener presente aspectos relacionados con el efecto que pueda tener la política pública sobre cómo la toma de decisiones de los individuos con respecto al uso de transporte y, también, a las transferencias que realizan en sus viajes (Chowdhury & Ceder, 2016). En Collins & Chambers (2005) y S. & Ravi (2016) se evidencia que, para lograr un cambio del modo de transporte, las estrategias de política pública deben centrarse en las creencias ambientales y de confiabilidad en el acceso a los sistemas públicos. Mientras que Urbanek (2021) señala que los factores económicos, como precios del combustible o las tarifas de transporte público, no son efectivos para cambiar los comportamientos modales. En este sentido, plantean que las estrategias deben enfocarse hacia mejora de la calidad del transporte público y las restricciones o impuestos sobre el uso de automóviles privados.

Para Sivasubramaniyam et al. (2020) las normas sociales condicionan a ciertas personas en el uso de automóviles particulares, mientras que para otras los condicionantes para caminar o viajar en bicicleta son la facilidad, la cercanía y la calidad del medio. Por su parte, Jang & Ko (2019) y Calfee & Winston (1998) indican que las características sociodemográficas, características de viaje, comportamientos y actitudes individuales, características relacionadas con el trabajo y calidad percibida son elementos que toman en cuenta

los usuarios en el momento de decidir el modo de transporte que van a usar, al igual que factores como los ingresos percibidos y la educación de los individuos.

En este sentido, el entorno en el que se desenvuelven los individuos se torna relevante para la toma de decisiones sobre cómo realizar sus viajes, y esto lo contemplan las políticas de desarrollo de las ciudades y de transporte sostenible (Wong et al., 2021).

Es por esto, que en esta investigación se acude al enfoque que brinda la dinámica de sistemas, pues facilita el análisis de los problemas que enfrenta actualmente el sector transporte, dado que permite incorporar variables socioeconómicas, ambientales, tecnológicas y del entorno. De esta manera, se facilita la evaluación de políticas alternativas para el transporte, desde una perspectiva holística. Este artículo presenta un modelo de dinámica de sistemas para apoyar la toma de decisiones de políticas orientadas al transporte sostenible; tomando como caso de estudio la región del Valle de Aburrá, AMVA, del departamento de Antioquia.

II. DESAFÍOS DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DEL AMVA

El Plan de Desarrollo de Medellín 2020 – 2023 plantea una serie de desafíos para alcanzar lo que se ha denominado Eco-ciudad, y estos desafíos se originan como respuesta al cambio climático y a los desafíos medioambientales que enfrenta hoy en día la región (Alcaldía de Medellín, 2020).

Así mismo, se indica en el Plan de Desarrollo que, para alcanzar la meta de una Eco-ciudad, implica el desarrollo de una movilidad sostenible e inteligente, generando equilibrios socioambientales, culturales y económicos. En la actualidad, la ciudad cuenta con un Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá (SITVA), que permite la movilidad del 14% de los viajes que se realizan las personas en el Valle de Aburrá (Alcaldía de Medellín, 2020). Este SITVA se compone por el Metro, metrocables, tranvía, Metroplús, buses alimentadores y rutas integradas (Molina Montenegro, 2019).

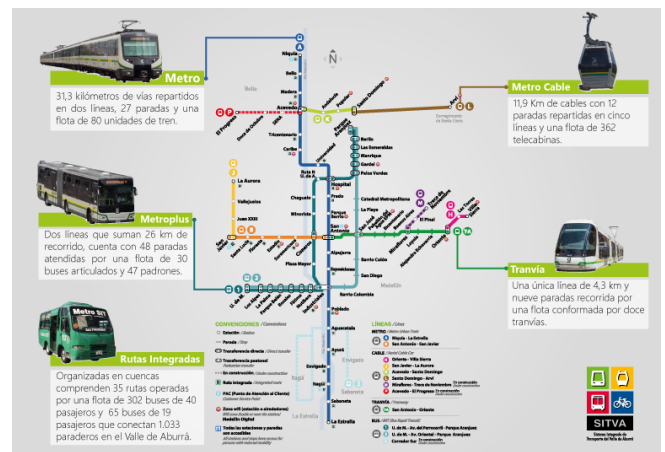


Figura 2. Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá (SITVA)
Fuente: Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2020

Adicionalmente, se cuenta con sistema de Transporte Público Colectivo de Pasajeros (TPC), conformado por las rutas que transitan por dos o más municipios al interior del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y la operación es realizada por diferentes empresas de transporte (AMVA, 2020).

La ciudad enfrenta retos importantes para alcanzar un transporte sostenible:

- Planificación y desarrollo urbano desarticulado
- Gestión ineficiente del transporte público colectivo
- Falta de actualización tecnológica de las flotas de transporte público
- Falta de integración tarifaria y de recauda del SITVA con el transporte público colectivo
- Aumento de la motorización y del uso del automóvil particular
- Capacidad limitada para ejecutar infraestructura vial y de transporte
- Vulnerabilidad de peatones, ciclistas y motociclistas ante la falta de seguridad vial

Adicionalmente, entre los años de 2004 a 2019, se tuvo un aumento en la movilidad de las personas en la ciudad a partir del uso particular de automóviles y motos, de un 19% y un 144% respectivamente, en detrimento del uso de transporte público, que disminuyó un 9%. Esto impacta directamente en la calidad del aire, ya que aproximadamente el 98% de los vehículos que operan en la ciudad funcionan con combustibles contaminantes, que resulta en un aporte anual de 900 toneladas de material particulado 2.5 (PM2.5) en el aire (Alcaldía de Medellín, 2020).

Particularmente, los registros arrojados por la red de monitoreo de calidad del aire en el AMVA, evidencian una seria problemática asociada al PM2.5 que se relaciona principalmente con los vehículos de transporte de carga y de pasajeros. El PM2.5 viene presentando valores superiores a lo indicado por la norma colombiana (resolución 610 del 24 de marzo de 2010), la cual establece una concentración diaria de 50 µg/m³, es decir dos veces más que el valor indicado por la OMS. Consecuentemente, las concentraciones de PM2.5 para el AMVA superan las referencias establecidas por la OMS y exponen a la población tanto a efectos agudos como crónicos (Martínez Ángel, 2018).

III. POLÍTICAS ALTERNATIVAS DE TRANSPORTE SOSTENIBLE

Para dar respuesta a estos desafíos que se presentan en la planificación del transporte, es importante que se diseñen políticas públicas alternativas que permitan llevar a que los usuarios tomen decisiones orientadas hacia una movilidad sostenible. Es por esto, que a continuación se presentan diferentes políticas encaminadas hacia la consecución de un transporte sostenible.

En Diao (2019) se presentan las acciones tomadas por

Singapur que, a pesar de las limitaciones de tierras y recursos y la presión por la motorización debido al rápido crecimiento demográfico y económico, ha logrado equilibrar las necesidades para satisfacer la creciente demanda de viajes y reducir los efectos negativos asociados. El modelo de Singapur para el transporte sostenible se basa en tres pilares: 1) restringir la movilidad motorizada privada; 2) promover el transporte público; y 3) planificación integrada del transporte y el uso de la tierra. Como resultado, por un lado, lograron estabilizar la tasa de propiedad de automóviles y disminuyeron el uso de automóviles, y, por el otro, fortalecieron el papel del tránsito ferroviario lo que contribuyó a reducción de emisiones de carbono y la contaminación vehicular. Esto se logró a través de altos impuestos y tarifas de los vehículos que no solo reducen la dependencia del automóvil, sino que también generan una cantidad significativa de ingresos para el gobierno, que pueden utilizarse para subsidiar el transporte público, con el fin de proporcionar servicios suficientes, de calidad y asequibles para satisfacer las necesidades de movilidad de las personas.

Por su parte, Thaller et al., (2021) evidencia que, para tener un impacto verdaderamente disruptivo, se deben diseñar políticas que guarden un equilibrio entre ser altamente efectivas y ser socialmente aceptables. Es por ello, que utilizar un enfoque hacia la sensibilización de la sociedad para aumentar la comprensión y el apoyo de las medidas resulta esencial para la adopción de dichas políticas.

En términos de reducción de emisiones, Hasan et al., (2020) y Canitez (2020) consideran que una de las políticas que representa mayor impacto en la reducción de emisiones es la de eliminar la importación de automóviles de gasolina y diésel en Nueva Zelanda para 2030, articulado con políticas de economías verdes, que permitan disminuir la tasa de propiedad individual de vehículos.

En línea para la reducción de emisiones, se plantea la utilización de la actitud proambiental como factor para orientar la compra de vehículos eléctricos. Por ejemplo, en ciudades con un buen suministro de transporte público, las medidas de política pueden ser orientadas hacia la adquisición de vehículos eléctricos y su uso compartido (Pucci, 2021).

Y si se quiere tener un efecto considerable sobre la transición hacia la movilidad eléctrica, Held & Gerrits (2019) plantea que, junto con el despliegue de infraestructura de carga, tanto privada como pública, se deben aplicar políticas que desincentiven el uso de automóviles convencionales. Para ello, se deben plantear políticas fiscales como incentivos no financieros, como lo son: Financiación a la compra, deducción o exención de impuestos, subsidio a la electricidad, estacionamiento gratuito, estacionamiento privilegiado, carga gratis, acceso a carriles prioritarios, introducción de zonas de bajas emisiones, tarifas altas de estacionamiento para convencionales e impuestos de congestión.

IV. MODELO DE DINÁMICA DE SISTEMAS PARA POLÍTICAS DE TRANSPORTE SOSTENIBLE

La dinámica de sistemas (DS) se plantea como una aproximación de simulación multidisciplinario que se emplea para comprender la relación existente entre variables que componen un sistema complejo, como lo es el transporte (Shepherd, 2014). Particularmente, se ha utilizado con el enfoque de evaluación de políticas y el comportamiento en un horizonte de tiempo dado, analizando aspectos sociales, económicos, técnicos y ambientales. Esta metodología es ideal para analizar la macroevolución de los mercados energéticos, evaluando los efectos en el largo plazo (Castaneda et al., 2020).

El modelado a través de dinámica de sistemas ha sido utilizado ampliamente en la evaluación de políticas asociadas a los mercados de energía, los cuales se caracterizan por ser altamente dinámicos, involucran inversiones que generan rezagos y son no lineales, lo que contribuye a la comprensión de variables ante diferentes políticas en el corto, mediano y largo plazo (Zapata et al., 2018). En Zapata et al., (2019) la DS permitió evaluar probables beneficios y efectos de las energías renovables en comparación con los sistemas tradicionales, analizando emisiones de CO₂ y precios de la electricidad, y evalúa bajo que condiciones las energías renovables permiten incrementar la seguridad y confiabilidad del sistema eléctrico ante diferentes escenarios.

De igual manera, se ha demostrado que la modelación mediante dinámica de sistemas permite evaluar los procesos de toma de decisiones de los consumidores ante la adopción de diferentes tecnologías, como lo muestran Cardenas et al., (2017) en su trabajo, evidenciando resultados que permiten comprender cómo las políticas encaminadas a promover la energía solar fotovoltaica, la eficiencia energética y la conservación de la electricidad, que permiten orientar decisiones hacia una economía más limpia. Otra de las aplicaciones del sector energético en donde se evalúa la aplicación de diferentes políticas mediante dinámica de sistemas, ha sido el de los biocombustibles, donde Franco et al., (2015) muestran los potenciales beneficios y la sostenibilidad de los biocombustibles cuando se liberaliza un mercado que se encuentra regulado.

Particularmente, asociado a los sistemas de transporte se han venido presentando diferentes retos a través de los años, y ello requiere necesidades de modelamiento. En este sentido, la dinámica de sistemas es un método que permite modelar los sistemas de transporte y puede contribuir a resolver problemas en toda la cadena de valor (Abbas, 1990).

En Strulak-Wójcikiewicz & Lemke (2019) se muestra la diversidad de los temas de transporte en dimensiones como lo social, económico y ambiental y sus relaciones, demostrando que la DS se adapta bien a los desafíos de varios problemas analíticos.

Estas diversas dimensiones evidencian la necesidad de

desarrollar modelos de transporte que sean capaces de mostrar las consecuencias de un amplio espectro de políticas encaminadas hacia un transporte sostenible, con el fin de contribuir en la toma de decisiones (Abbas & Bell, 1994).

A nivel mundial, el interés por comprender las dinámicas en los sistemas de transporte ha hecho que diversos autores en sus trabajos planteen diferentes modelos de comportamiento desde distintas perspectivas, analizando el impacto de las políticas de movilidad en el transporte urbano.

Muro-Rodríguez et al. (2017) desarrollaron un modelo de demanda desagregada o de elección discreta para determinar la capacidad de predecir cómo lo usuarios eligen el modo de transporte dependiendo de factores como el precio, el tiempo de viaje, calidad, conexiones intermodales, entre otras. Se enfocaron en políticas centradas en la sustitución del transporte privado, tiempos de viaje más cortos, visibilidad de la oferta, gestión integrada de la reserva y tarjetas de embarque, gestión de programas de fidelización, y facilidad de conexión intermodal, lo que contribuyó con la reducción en la congestión de los accesos a la ciudad de Madrid.

Wangsness et al. (2020) también presentan un modelo basado en la teoría de la elección, con el fin de estudiar cómo lo agentes demandan viajes en automóvil o transporte público, en horas pico o no en el área metropolitana de Oslo. Este análisis permitió analizar el establecimiento de políticas de tarifas y peajes para lograr un equilibrio óptimo entre el uso del transporte público y el automóvil particular.

Por su parte, Haghshenas et al. (2015) propone un modelo de DS teniendo en cuenta cuatro dimensiones: generación de viajes, participación modal, oferta de transporte y equilibrio entre oferta y demanda. El modelo fue aplicado para evaluar la política de transporte en Isfahan, en Irán, encontrándose que las mejores políticas orientadas hacia un transporte sostenible se encuentran asociadas con el mejoramiento de infraestructura para bicicletas, uso de vehículos de cero y bajas emisiones, y limitación del uso de transporte privado.

En el mismo sentido, Wang et al. (2008) establecen un modelo que comprende elementos como la población, desarrollo económico, número de vehículos influencia ambiental, demanda de viajes, oferta de transporte y congestión del tráfico, tomando como caso de estudio la ciudad de Dalian en China. Del análisis del modelo encontraron que políticas orientadas a la restricción de la propiedad y uso del automóvil privado hace que los usuarios se orienten por el uso de transporte público, en mejoramiento de la congestión, el medio ambiente y el desarrollo urbano.

Con el fin de evaluar el desempeño de la contaminación ambiental, Vafa-Arani et al. (2014) presentan un modelo de dinámica de sistemas en el que se evalúan políticas como la construcción de carreteras, mejoramiento tecnológico de la industria de combustibles y automotriz, planes de control de

tráfico y desarrollo de infraestructura de transporte público, tomando como base la ciudad de Teherán, Irán. Como resultado, se obtuvo que la mejora tecnológica en la industria de combustibles y automotriz y el desarrollo de infraestructura de transporte público fueron las políticas que tuvieron un efecto más notable y de largo plazo sobre la contaminación del aire.

Utilizando un enfoque para evaluar el mismo impacto, Wen & Bai (2017) evalúa políticas asociadas con el tráfico urbano, población y economía y consumo de energía y emisiones de carbono de la ciudad de Beijing, China. Como resultado de la simulación del modelo de DS se encontró que las políticas orientadas a mejorar el rendimiento de los vehículos y la calidad de combustibles, al mismo tiempo que las restricciones de vehículos de combustión interna y el fomento de vehículos eléctricos, son las que permiten obtener mejores resultados frente a la disminución de la contaminación ambiental.

Teniendo en mente el mismo objetivo visto en el trabajo anterior, Maggi & Vallino (2020) plantean que se deben establecer políticas encaminadas al uso de al menos el 80% de vehículos eléctricos en los sistemas de transporte y aumentar el atractivo hacia un transporte público mediante la mejora de calidad, cobertura, precio y oportunidad podrían contribuir con la reducción directa en las emisiones contaminantes a nivel urbano.

El modelado mediante dinámica de sistemas también ha sido utilizado para evaluar cómo las tendencias tecnológicas pueden afectar el desempeño de los sistemas de transporte y es así como Sayyadi & Awasthi (2017) presentan un modelo de evaluación de impacto de políticas de transporte sostenible, como resultado se obtuvo que una política orientada a la realización de viajes compartidos, los cuales efectivamente mejoran los índices de congestión en las ciudades, disminuyendo además la propiedad y uso de vehículos privados, el consumo de combustible y las emisiones de contaminación ambiental.

En adición, Melkonyan et al. (2020) evalúan mediante un modelo de DS el impacto de tendencias como la dinámica de la población (tasas de urbanización y cambios demográficos), digitalización y su aplicación a la movilidad, innovación abierta y cambio climático. Como recomendación de su trabajo proponen que, para realizar la transición hacia una movilidad urbana sostenible, se deberían plantear políticas orientadas hacia la electrificación del transporte e inversión en infraestructura pública, al mismo tiempo que se incrementa su atractivo con uso de tecnologías modernas de digitalización.

V. MODELO DE DINÁMICA DE SISTEMAS PROPUESTO PARA EL AMVA

El modelo que se presenta adelante analiza la relación existente entre diferentes variables del sistema de transporte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA. El modelo incluye elementos como: población, demanda de viajes, modos de transporte en los que se realizan los viajes, políticas orientadas al mejoramiento del transporte y de la ciudad para

llegar a obtener el comportamiento de las emisiones contaminantes y el consumo de energéticos ante diferentes escenarios. Aunque el modelo presenta variables que son objeto de estudio en diferentes estudios reportados anteriormente, presenta limitaciones al no involucrar todos los elementos que intervienen en un sistema de transporte urbano, como lo es el uso del suelo, el comportamiento a la elección, o el atraso tecnológico y solo analiza las emisiones in situ u operación de los sistemas de transporte y no abarca las emisiones en todo el ciclo de vida.

Las relaciones causales simplificadas entre las variables se muestran en la Figura 3. Se evidencia la estructura de realimentación y las relaciones de causa y efecto entre los elementos.

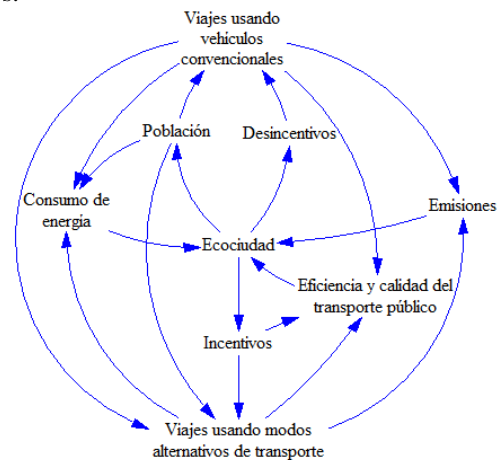


Figura 3. Diagrama causal para el modelo de transporte propuesto
Fuente: Elaboración propia

La hipótesis que se plantea en el diagrama causal de la Figura 3, está en función de determinar las emisiones contaminantes y el consumo de energéticos del sector transporte en el AMVA.

Se observa que el crecimiento poblacional presenta una relación directa, conllevando a que se tenga un incremento en la demanda de viajes de la ciudad (Fontoura et al., 2019). Estos viajes son realizados en diferentes modos de transporte, ya sea transporte público (Buses, busetas, microbús), Metro, Metroplús, taxis, automóviles, motocicletas, bicicletas o caminando y a su vez utilizando combustibles líquidos o electricidad. Estos modos de transporte a su vez son influenciados por políticas orientadas a incrementar el costo de los viajes particulares, por medio de impuestos o restricciones vehiculares; y de igual manera, se propende por mejorar los tiempos de viajes del transporte público y masivo; generando zonas de restricción para vehículos particulares, definiendo carriles exclusivos para el transporte público y mejorando la calidad del servicio del mismo. De otro lado, se establece una política de Eco-Ciudad, en la que se tiene como objetivo un sistema de transporte electrificado y un sistema integrado de transporte que sea el modo principal de uso en el AMVA, en línea con lo propuesto en el Plan de Desarrollo Medellín Futuro 2020 – 2023 (Alcaldía de Medellín, 2020).

Todas estas medidas de política pública permitirán evaluar las emisiones contaminantes que se originan en la zona urbana del AMVA y el consumo de energéticos, de tal manera que se puedan tomar decisiones para llegar a una movilidad sostenible e inteligente.

Adicionalmente, la política de Eco-Ciudad permite establecer un límite en la capacidad de carga poblacional, de tal manera que se tenga como objetivo el desarrollo de una ciudad más amigable con el medio ambiente y en equilibrio con los recursos disponibles (Gao et al., 2021).

El modelo de dinámica de sistemas propuesto se implementó en la plataforma iThink, la cual permite analizar la interrelación de variables de sistemas complejos simulando escenarios, evidenciando los impactos de las políticas propuestas sobre el sistema analizado.

Cómo se mencionó anteriormente, el propósito del modelo es evaluar el impacto de políticas sostenibles sobre el sistema de transporte del AMVA, evaluando su impacto en las emisiones contaminantes y en el consumo de energéticos.

La Figura 4 muestra el diagrama de flujos y niveles (del Inglés Stocks and Flows) simplificado para el modelo de transporte del AMVA. Las entradas y salidas se modelan teniendo en cuenta el crecimiento y decrecimiento de la población y el crecimiento del transporte eléctrico; que a su vez influyen en la demanda de viajes, en la participación modal de los viajes y por las políticas orientadas a mejorar el atractivo hacia el transporte público y a la electrificación de la flota de vehículos. Por ejemplo, una política restrictiva e impositiva hacia el transporte individual, ocasionaría que la participación del modo de transporte público y masivo se incremente en detrimento del transporte individual; y una política orientada hacia el transporte eléctrico impactaría en el número de vehículos de cero emisiones que circulan en la ciudad y por lo tanto en el consumo de energéticos y en las emisiones contaminantes.

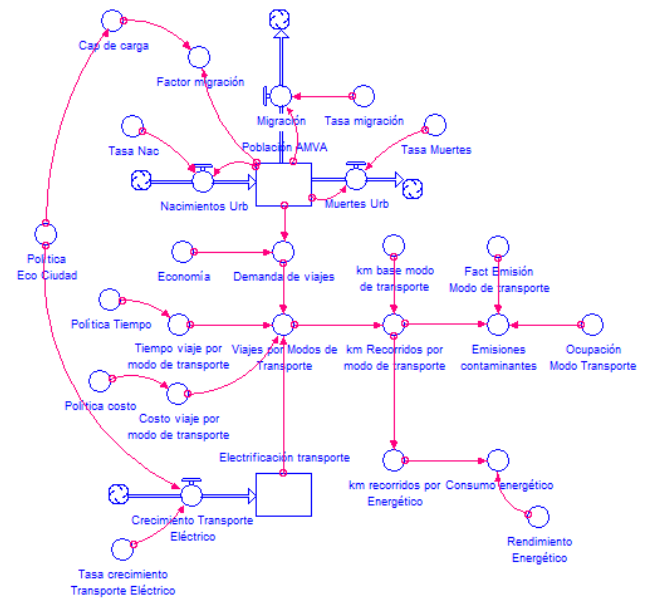


Figura 4. Diagrama de stocks y flujo para el sistema de transporte del AMVA
Fuente: Elaboración propia

En la modelación de la población, el equilibrio entre el número de nacimientos, capacidad de carga, número de migrantes y el número de muertes determina el stock de población. La población, la tasa de viaje promedio y la economía (PIB) determina el número total de viajes. El aumento en el número de viajes resulta en un aumento en el número de viajes en los diferentes modos de transporte y, en consecuencia, aumenta el número de viajes por vehículo y el número de kilómetros que recorre cada vehículo.

Para la modelación de las emisiones contaminantes de CO₂ en la atmósfera, son resultado de los kilómetros recorridos por cada vehículo, el factor de emisión de los diferentes modos de transporte y el factor de ocupación de cada modo. Las emisiones aumentan a medida que aumentan los kilómetros recorridos, sin embargo, tienden a disminuir con la política de electrificación del transporte y la preferencia por modos de transporte público y la bicicleta y caminata.

El consumo energético se determina mediante los kilómetros recorridos por cada modo de transporte y el rendimiento de cada energético utilizado. La política de eco-ciudad y la preferencia por el transporte público, ocasionarán cambios en el consumo de energéticos, orientándose por la electricidad en detrimento de los combustibles líquidos.

VI. MODELACIÓN MATEMÁTICA

Se utilizó como caso de estudio el Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA, que está compuesta por 10 municipios del departamento de Antioquia, en una extensión aproximada de 1.156 km² y una población de 3.726.219 habitantes para 2017 (Departamento nacional de estadísticas. DANE, 2019), los cuales realizan alrededor de 6.131.727 de viajes diarios (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2017).

Como variable de stock, la población se obtiene a partir de la población de un período anterior más el crecimiento de la población.

$$\text{Población} = \text{crecimiento poblacional} + \text{población} (t_0)$$

$$\text{Crecimiento de la población} = \text{Población} * \text{Tasa de crecimiento}$$

Según (Departamento nacional de estadísticas. DANE, 2019), hay 3.726.219 de habitantes en el AMVA a 2018 y la tasa de crecimiento poblacional es de 1,3 con tendencia a disminuir en el tiempo.

Para determinar el número de viajes realizados en el AMVA, se utilizará la relación entre la población y el número de viajes que realiza cada persona por día. Los viajes que realiza una persona al día están influenciados por el número de viajes que realiza una persona al día base (1,56) (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2017) y por el crecimiento económico (PIB per cápita).

$$\text{Viajes AMVA día} = \text{Población} * \text{viajes pers día}$$

$$\text{Viajes pers día} = \text{Viajes pers base} * \text{crecimiento econó}$$

A su vez los viajes realizados en el AMVA día son afectados por el porcentaje de participación de los diferentes modos de transporte, los cuales varían en el tiempo de acuerdo con las proyecciones UPME (UPME, 2016) y para la línea base se tienen unas participaciones en la realización de viajes de: Caminata (27%), transporte público (19%), Metro (14%), Automóvil (13%), Motocicleta (12%), Taxi (6%), Metroplús (1%) y Bicicleta (1%) (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2017).

$$\text{Viajes por modo de trans} = \text{Viajes AMVA día} * \% \text{Part modo transp}$$

Para la determinación de la influencia de la política orientada al costo y al tiempo sobre la participación modal, se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{\text{inf_pol}_i} = P_{\text{modo trans}_i} * \frac{\text{Var_pol}_{t_0_i}^\delta}{\text{Var_pol}_{\text{fut}_i}}$$

Donde:

$P_{\text{modo trans}_i}$: es el porcentaje de participación inicial del modo de transporte

$\text{Var_pol}_{t_0_i}$: es el valor de la variable de línea base

$\text{Var_pol}_{\text{fut}_i}$: es el valor futuro (esperado) de la variable

δ : es un componente aleatorio que captura la incertidumbre y da cuenta de los factores no observados y el intervalo de acción es entre 0 y 1.

$$0 < P_{\text{inf_pol}_i} < 1 \text{ donde todo } i, j \in \mathbb{N} \{P_j = 1 - \sum_1^N P_i\}$$

En el cual P_i es el porcentaje de participación inicial del modo de transporte y P_j es el porcentaje de participación normalizado respecto de los otros modos de transporte (Sayyadi & Awasthi, 2017).

Para este caso se tomaron los datos de referencia que se encuentran en la Tabla I.

TABLA I
VALORES INICIALES DE POLÍTICA DE COSTO Y TIEMPO

Modo Transporte	Costo/viaje (COP)	Tiempo/viaje (Min)
Metro	2.355	60
Transporte Público	2.300	47
Taxi	15.587	30
Metroplús	2.355	50
Automóvil	5.966	35
Motocicleta	2.856	32
Bicicleta	61	31
Caminata	0	30

Para el cálculo de los costos de viajes de taxi, automóvil, motocicleta y bicicleta se tomaron en cuenta las distancias promedio de viaje:

Taxi: 8,5 km/viaje; Automóvil: 9,4 km/viaje; Motocicleta: 6,1 km/viaje; Bicicleta: 5,1 km/viaje.

Fuente: (Medellín, 2020); (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2017)

Así mismo, y para determinar la influencia de la política pública de eco-ciudad, orientada a la electrificación del transporte y a una ciudad en equilibrio entre su población y sus recursos disponibles, se tomaron en cuenta la tasa de crecimiento de vehículos eléctricos por un factor de política pública por la participación actual.

$$\text{Veh EE Modo Trans} = \text{Tasa crec EE} * \text{Pol Púb} * \text{Part inicial modo transp}$$

Para definir las tasas de crecimiento de los vehículos eléctricos y la participación inicial de los mismos se tomaron en cuenta los escenarios propuestos en el estudio UPME, realizado por Usaene y Sumatoria en el 2019 (UPME, 2019).

El modelo de cálculo de las emisiones contaminantes al medioambiente se encuentra directamente relacionado con el factor de emisión por modo de transporte, los kilómetros recorridos de cada modo de transporte y la ocupación.

$$\text{Ton CO}_2 = (\text{Factor emisión modo trans/ocupación}) * \text{km recorridos}$$

Los factores de emisiones fueron tomados del International Vehicle Emissions Model (IVE), el cual posee factores de emisión para cerca de 450 tecnologías vehiculares clasificadas de acuerdo con la tipología vehicular, energético, peso, entre otros (Center for Environmental Research and Technology, 2021).

Finalmente, el cálculo del consumo energético asociado a cada modo de transporte se realiza mediante el producto entre los kilómetros recorridos por cada modo de transporte distribuido por energético y el rendimiento de cada energético para el tipo de transporte utilizado.

$\text{Consumo energético} = \text{km recorridos} * \text{rendimiento energético}$

El rendimiento energético de los diferentes energéticos se tomaron de (UPME, 2019) y de (UPME, 2016).

VII. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para la validación del modelo, se han comparado los resultados con la información histórica estimada por la UPME, a partir de la encuesta de calidad de vida 2015 reportada por el DANE.

A continuación, se presentan los resultados entre lo estimado y lo simulado por el modelo.

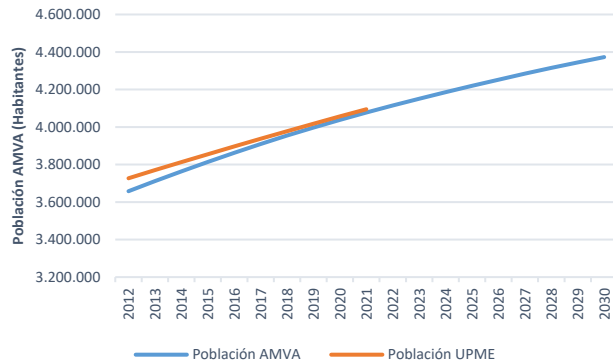


Figura 5. Validación Población del AMVA
Fuente: Elaboración propia

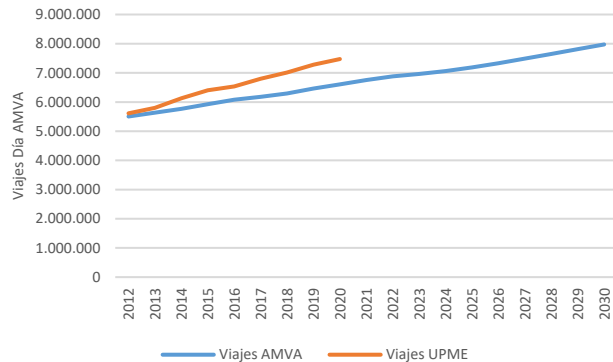


Figura 6. Validación Viajes Día del AMVA
Fuente: Elaboración propia

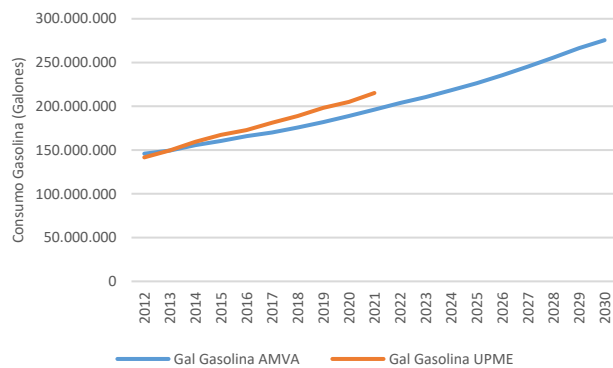


Figura 7. Validación Consumo Gasolina del AMVA
Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que el modelo es capaz de reproducir el comportamiento de la población, la demanda de viajes y el consumo de gasolina para el sector transporte en el horizonte de tiempo 2012 – 2019.

Para el 2015, el modelo estima una población de 3.813.830 frente a un histórico de 3.855.096, es decir, con una diferencia del 1%. Para el caso de la demanda de viajes, se tiene en el año 2015 una cantidad de viajes de 5.841.632 al día para el modelo, en comparación con 6.402.872 viajes del histórico proyectado por la UPME, teniendo una diferencia aproximada del 10%.

Finalmente, para el consumo de gasolina del AMVA, se tiene en el periodo de 2015 que el modelo refleja un consumo de 160 millones de galones de gasolina, y el histórico presentado es de 167 millones de galones de gasolina, representado en un 4% de diferencia, ofreciendo un comportamiento similar entre las dos proyecciones.

VIII. RESULTADOS

Para la evaluación de los resultados se tomaron en cuenta un análisis por escenarios, como se puede ver en la Figura 8. El escenario denominado “Alan Turing” es un escenario que se orienta con lo dispuesto en el Plan de Desarrollo de Medellín Futuro, en la búsqueda de una eco-ciudad. Para ello, consideran los siguientes aspectos:

- **Impuestos al uso** de automóvil particular y moto
- Aumento de **costos** de viaje de automóvil y moto
- Carriles **exclusivos** para transporte público
- Gestión eficiente de flotas de transporte público y masivo
- **Disminución de tiempos de viaje de transporte público y masivo**
- Fomento de viajes en **bicicleta**
- **Integración** transporte masivo con ciclovías
- **Electrificación** del transporte
- Población en **equilibrio con los recursos** disponibles

Para el escenario menos favorable, que se denomina “Another brick in the wall”, se trata de un escenario donde no se tienen aún muchas políticas orientadas hacia un transporte sostenible, y se caracteriza por los siguientes aspectos:

- **Falta de políticas claras**, coherentes y oportunas que favorezcan el uso de la movilidad sostenible
- Falta de política **ambiental clara**
- Crecimiento de la **tasa de motorización**
- **Saturación** del parque automotor
- **Inseguridad** del servicio público
- **Desarticulación** entre modos de transporte
- Falta de **infraestructura** para ciclistas
- **Saturación de la población** en relación con los recursos disponibles

Los otros dos escenarios “Dukes of Hazzard” y “Matrix”, son escenarios de transición que demuestra lo que sucede en el caso de que no se tengan en cuenta en el mismo sentido la política y el atractivo de las personas por una movilidad sostenible.

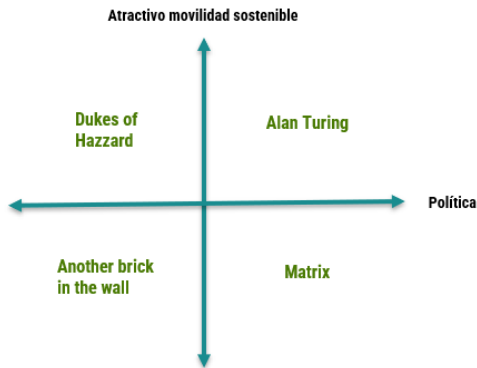


Figura 8. Escenarios de simulación del sistema de transporte del AMVA
Fuente: Elaboración propia

La demanda de viajes en el AMVA es una variable de gran preocupación, porque demuestra cómo se están movilizand las personas y en que modos de transporte. En un escenario que no se tengan políticas claras hacia la movilidad sostenible y que se oriente por un incremento de las tasas de motorización y el uso del transporte individual como principal modo de transporte, se tendría que el principal modo de transporte es el automóvil y la motocicleta, seguido del transporte público y el metro. En detrimento de los viajes que se realizan caminando o en bicicleta, como lo evidencia la Figura 9.

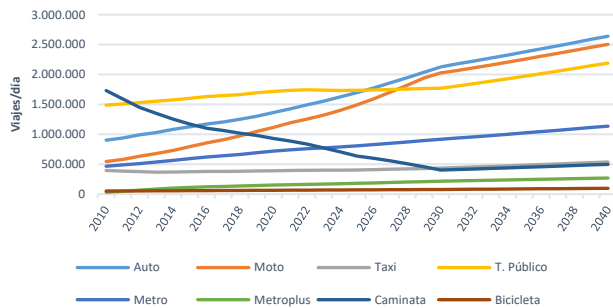


Figura 9. Escenario Another brick in the hall – Distribución modal en la demanda de viajes
Fuente: Elaboración propia

Por el contrario, si se tienen políticas coherentes con la movilidad sostenible, si se tiene una orientación por el medio ambiente y por el uso de transporte público y masivo, disminuyendo sus tiempos de viajes y aumentando la calidad del servicio, se tendría como resultado un mayor uso de estos modos de transporte, teniendo en primer lugar al transporte público, seguido del uso del metro y preferencia por caminatas. En este escenario tiene una menor participación el uso del automóvil y la motocicleta, como medios individuales, permaneciendo en el periodo analizado aproximadamente en el mismo valor de cantidad de viajes o tendiendo a disminuir, como se evidencia en la Figura 10.

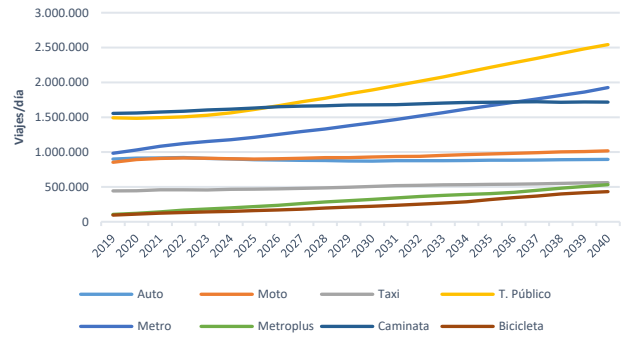


Figura 10. Escenario Alan Turing – Distribución modal en la demanda de viajes
Fuente: Elaboración propia

Como se mencionó anteriormente, la distribución modal del escenario “Alan Turing” tiene una fuerte influencia de políticas orientadas al mejoramiento de la calidad del servicio, generación costos competitivos y reducción de los tiempos de viaje, principalmente del transporte público, Metro y Metroplús.

En este sentido, la Figura 11, muestra una modelación de la reducción de los tiempos de viaje asociadas con la generación de carriles exclusivos para el transporte público, aumento de frecuencia de trenes, ingreso al sistema integrado de transporte del metro de la 80, mejoramiento del servicio intermodal y generando zonas de restricción para el transporte individual (Muro-Rodríguez et al., 2017).

Para este caso, el viaje en metro, que se encuentra en un tiempo de viaje aproximado de 60 min para los viajes más extensos (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2017), se tendría una reducción de alrededor de un 17% para el periodo de 2040, llegando a los 50 min por viaje de mayor duración. Para el caso del Metroplús, que hoy en día su viaje más extenso tiene una duración de aproximadamente 50 min, al igual que el Metro, se tendría una reducción del 17% para el año 2040, pasando a durar 41 min.

El transporte público es uno de los objetivos de dicha política y en este caso pasaría de un tiempo de viaje de 48 min a los 38 min en 2040, representado en una reducción del 21%. Contrariamente, estas políticas hacen que el viaje en automóvil y en motocicleta incrementen sus tiempos de viaje, para el caso del automóvil se tendría un incremento del 50% en el tiempo de viaje, mientras que la motocicleta estaría del orden de un 25%,

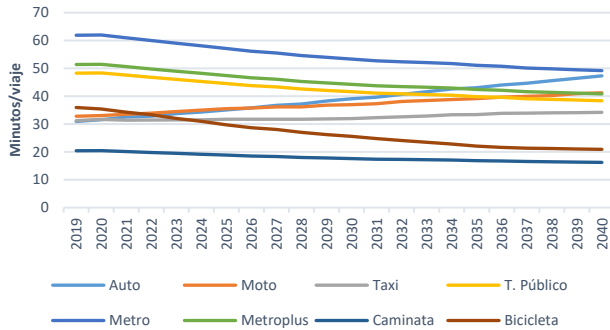


Figura 11. Tiempos de viaje del sistema de transporte del AMVA
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las políticas orientadas al sostenimiento del costo de viaje del sistema integrado de transporte y del transporte público, y a generar medidas impositivas a la propiedad del automóvil particular y la motocicleta, como por ejemplo impuestos al carbono, peajes urbanos y costo más elevado de los parqueaderos, la Figura 12 presenta la evaluación de dichas políticas (Wang et al., 2008).

Para este caso, el costo de viaje asociado al sistema integrado de transporte (Metro, Metroplús) y el transporte público mantendrían su costo por viaje de forma constante a través del tiempo. Mientras que las políticas en este sentido harían que el costo del viaje del automóvil particular pase de tener un costo aproximado de \$ COP 6.000 a estar en el orden de los \$ COP 12.000 en el año 2040. En este mismo contexto, el costo de viaje de las motocicletas, que se encuentra en alrededor de los \$ COP 3.000 pasaría a costar en torno a los \$ COP 8.700 a 2040. De igual manera, el viaje en taxi estaría influenciado por dichas políticas, lo que impactaría en que el costo ascienda desde los \$ COP 15.500 a los \$ COP 23.000.

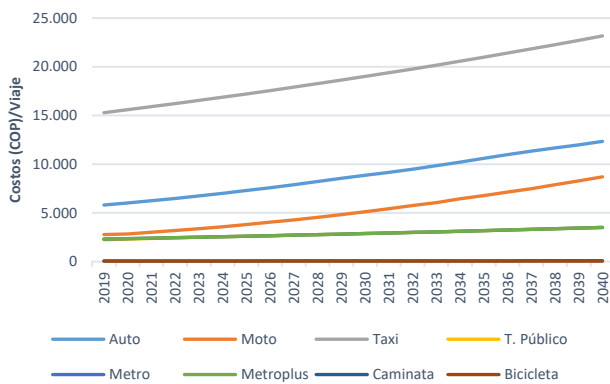


Figura 12. Costos de viaje del sistema de transporte del AMVA
Fuente: Elaboración propia

De otro lado, una política de eco-ciudad influye de manera directa el comportamiento de las ciudades urbanas, tomando como insumo la capacidad de soporte urbano - ambiental, con el fin de tener en cuenta aspectos como capacidades de carga ecológicas del AMVA, la disponibilidad de recursos naturales

y su consumo de acuerdo con los usos y formas de ocupación del territorio. Esto tiene impacto directo en la población, ocasionando que se genere una tasa mayor de migración hacia otras regiones del departamento o país, de acuerdo con los escenarios de simulación. El cambio en la dinámica poblacional ocasionará que disminuya la tasa de viajes realizados en el AMVA y por consiguiente los kilómetros recorridos por los diferentes modos de transporte. La Figura 13, presenta la distribución de kilómetros recorridos de acuerdo a los escenarios de simulación planteados, para este caso y considerando el escenario “Alan Turing” se tendría un 40% menos de kilómetros recorridos a 2030 respecto del escenario “Another brick in the wall” y un 46% menos de kilómetros recorridos para 2040.

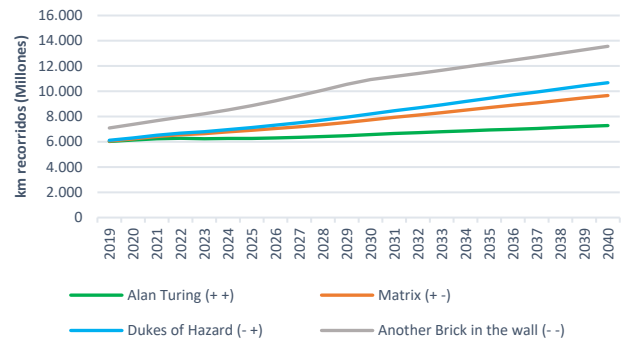


Figura 13. Kilómetros recorridos por los modos de transporte del AMVA
Fuente: Elaboración propia

La dinámica de demanda de viajes y los kilómetros recorridos en el sistema de transporte del AMVA, y con una política de eco-ciudad ocasionará un cambio en el consumo de energéticos. Para este caso, se tomaron como base las proyecciones planteadas en el Plan Energético Nacional de la UPME (UPME, 2020) y las proyecciones realizadas a nivel mundial por parte de la Agencia Internacional de Energía – AIE(IEA, 2020), para llegar a establecer metas de electrificación del sistema de transporte del AMVA, en concordancia con Maggi & Vallino, (2020) que indican que para llegar a conseguir un transporte sostenible se deben establecer porcentajes de participación de la flota eléctrica respecto a los vehículos con funcionamiento a combustibles líquidos.

Las metas establecidas para la electrificación del sector transporte en dichas referencias son las siguientes:

TABLA II
METAS DE ELECTRIFICACIÓN DEL TRANSPORTE

Modo Transporte	2030
Automóviles	8%
Motocicletas	5,4%
Transporte Público	20%
Taxi	14,8%

Fuente: (UPME, 2020); (IEA, 2020)

Estas metas se tomaron como base para el modelo, el cual

arrojó los porcentajes de participación asociado a los diferentes escenarios propuestos. Se puede observar en la Tabla III los porcentajes de participación de modos de transporte eléctrico. Para este caso, se tiene una participación en el parque de automóviles del 41% para el año 2030 en el escenario “Alan Turing”, en contraste con un 9% a 2030 para el escenario “Another brick in the wall”. Si observamos el transporte público, compuesto principalmente por buses, se tiene una participación del 55% para 2030 y de un 80% para 2040 en el escenario “Alan Turing” y de un 20% a 2030 y un 28% a 2040 correspondiente al escenario “Another brick in the wall”. Lo que permite deducir como las políticas orientadas a la electrificación de los diferentes sistemas de transporte permitirán incrementar la participación en los mismos hacia un energético sostenible y por consiguiente un impacto positivo en la reducción de emisiones contaminantes asociadas al sector transporte.

TABLA III
PORCENTAJE DE ELECTRIFICACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DEL AMVA

Modo Transporte	Alan Turing		Another brick in the wall	
	2030	2040	2030	2040
Automóviles	41%	72%	9%	13%
Motocicletas	39%	69%	8%	10%
Transporte Público	55%	80%	20%	28%
Taxi	44%	71%	15%	21%

Fuente: Elaboración propia

Estos porcentajes de participación de vehículos eléctricos en el sistema de transporte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, permitieron evaluar la dinámica de consumo de energéticos en los diferentes escenarios de simulación propuestos en el presente estudio. Para el análisis se tomó en cuenta el consumo de energía eléctrica en comparación con el consumo de galones de gasolina.

La Figura 14 y la Figura 15 presentan el consumo de energía eléctrica y el consumo de gasolina en los diferentes escenarios de análisis. En el escenario “Alan Turing” que propende por una electrificación del transporte dados los porcentajes de participación de la Tabla III, se observa un crecimiento exponencial del consumo de energía eléctrica (Figura 13) en detrimento del consumo de galones de gasolina (Figura 14), dado principalmente por un mayor uso de tecnologías con tracción eléctrica, en vez del uso de tecnologías de combustión interna. Mientras que en un escenario “Another brick in the wall”, que tiene pocas políticas orientadas con la electrificación del transporte y del cuidado del medio ambiente, se observa que el consumo de energía eléctrica es menor, dado principalmente por las políticas que se vienen dando de manera inercial y el consumo de galones de gasolina es elevado en comparación con los otros escenarios, ya que la principal tecnología utilizada para el transporte de pasajeros es la de combustión interna.

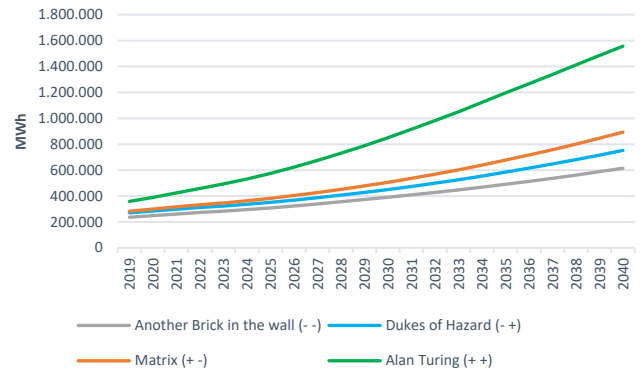


Figura 14. Consumo de energía eléctrica sistema de transporte del AMVA
Fuente: Elaboración propia

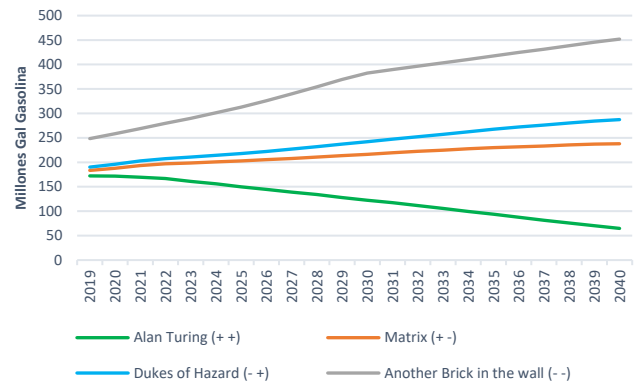


Figura 15. Consumo de gasolina sistema de transporte del AMVA
Fuente: Elaboración propia

De igual manera, la política de eco-ciudad impacta de manera directa en la generación de emisiones contaminantes, que para este caso se evalúan en Ton de CO2 equivalentes.

En este sentido, para un escenario “Alan Turing” se tendría un escenario de menor emisiones contaminantes, como lo mencionan Wen & Bai (2017) y Melkonyan et al., (2020) el fomento de la modernización del sistema de transporte hacia vehículos eléctricos representa en una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en las zonas urbanas.

Para el año 2030 en un escenario “Alan Turing” se tendrían unas emisiones equivalentes a 885.633 de Ton de CO₂ eq, mientras que en un escenario “Another brick in the wall” las emisiones son del orden de 2.304.112 de Ton de CO₂ eq, lo que corresponde a un ahorro de 1.418.479 de Ton de CO₂ eq. Para el año 2040 y analizando los dos escenarios propuestos, el ahorro asciende a 2.218.494 Ton de CO₂ eq. Si se considera que se requiere un (1) árbol para reducir 210 kg de CO₂ eq (Minenergía, 2020), y se tiene un ahorro de 1.418.479 de Ton de CO₂ eq para 2030, esto equivaldría a sembrar aproximadamente 6,7 millones de árboles/año y para 2040 supondría la siembra de aproximadamente 10,5 millones de árboles/año.

Adicionalmente, se puede ver como el escenario “Alan Turing” con el tiempo reduce las emisiones de CO₂ en el sector

transporte, ya que en el periodo comprendido entre 2030 a 2040, se presentó una reducción del 43% en las Ton de CO2 emitidas al ambiente. Lo cual contribuye con políticas de descarbonización del sector transporte y de alcanzar las metas propuestas a nivel mundial de tener cero emisiones.

TABLA IV
EMISIONES DE TON CO2 EQ

Emisiones de CO2 eq	Alan Turing		Another brick in the wall	
	2030	2040	2030	2040
<i>Ton CO2 eq</i>	885.633	498.434	2.304.112	2.716.927

Fuente: Elaboración propia

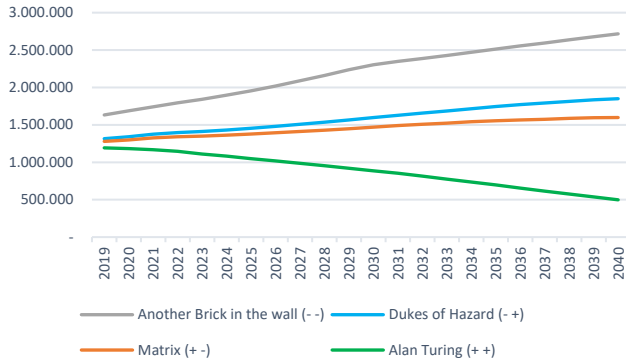


Figura 16. Emisiones de Ton CO2 eq por parte del sistema de transporte del AMVA

Fuente: Elaboración propia

La Tabla IV presenta un comparativo de las principales variables asociadas con los dos principales escenarios analizados en el presente estudio. Se puede observar inicialmente cómo evoluciona la cantidad de viajes por día realizados en los diferentes modos de transporte. En un escenario “Alan Turing” la cantidad de viajes que se realizan en el año 2030 es un 2% menor respecto a la cantidad de viajes realizados en un escenario “Another brick in the wall” y para 2040 esta reducción equivale a un 3%. Esta situación se presenta debido a la capacidad de carga poblacional y políticas orientadas a un uso eficiente de los recursos naturales, incentivando la migración de personas hacia otras regiones fuera del AMVA, lo que ocasiona un crecimiento menor en la población y por lo tanto, una reducción en el número de viajes.

Si se analizan los porcentajes de participación en la realización de viajes en el AMVA, se tiene que, a 2030 y 2040 y en un escenario “Alan Turing”, la representatividad del transporte público, la bicicleta, la caminata y el metro son mayores en detrimento del uso particular del automóvil y la motocicleta. Contrariamente a lo que sucede en un escenario “Another brick in the wall”, en donde los mayores porcentajes de participación en la distribución modal del transporte están dados por el uso del automóvil y la motocicleta.

Un número menor de viajes impacta directamente en el número de kilómetros recorridos, ya que para un escenario “Alan Turing” en el año 2030 se tendría un 40% de kilómetros que se dejarían de recorrer respecto a un escenario “Another

brick in the wall”, y a 2040 un 46% menos kilómetros recorridos, lo cual es proporcional a la cantidad de energéticos utilizados y a la contaminación ambiental.

En relación a la cantidad de energéticos utilizados por los diferentes modos de transporte, se observa que en un escenario “Alan Turing” el uso de energía eléctrica es mayor respecto al escenario “Another brick in the wall”, lo que es correspondiente a un uso mayor de tecnologías de tracción eléctrica. En contraste con el consumo de galones de gasolina, donde se evidencia que en un escenario “Alan Turing” este energético tiene menor representatividad.

TABLA V
COMPARATIVO DE ESCENARIOS

Modo Transporte	Alan Turing		Another brick in the wall	
	2030	2040	2030	2040
<i>Viajes/día</i>	7.846.430	9.626.608	7.979.865	9.877.285
<i>% T Público</i>	24%	26%	22%	22%
<i>% Bicicleta</i>	3%	4%	1%	1%
<i>% Caminata</i>	21%	18%	5%	5%
<i>% Automóvil</i>	11%	9%	27%	27%
<i>% Moto</i>	12%	11%	25%	25%
<i>% Metro</i>	18%	20%	12%	12%
<i>km recorridos (Mill)</i>	6.475	7.286	10.549	13.560
<i>MWh</i>	850.334	1.557.042	391.236	614.652
<i>Mill Gal Gasolina</i>	122	65	382	452
<i>Ton CO2 eq</i>	885.633	498.434	2.304.112	2.716.927

Fuente: Elaboración propia

IX. CONCLUSIONES

Este estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto asociado al establecimiento de políticas de transporte sostenible en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Con base en los resultados de la simulación, la implementación de políticas reduce la emisión de contaminantes, dado principalmente por una distribución modal orientada hacia lo público y no motorizado y a la electrificación de los sistemas de transporte.

En un escenario “Alan Turing”, orientado hacia políticas de mejoramiento de la calidad del servicio de transporte público, generando costos competitivos y con tendencia a reducir los tiempos de viaje, principalmente del transporte público (buses), Metro y Metroplús; mediante el establecimiento de carriles exclusivos, aumento de frecuencia de trenes, ingreso al sistema integrado de transporte del metro de la 80, mejoramiento del servicio intermodal y con zonas de restricción para el transporte individual, permitió obtener como resultado una reducción de alrededor de un 17% en los viajes de mayor duración del Metro y Metroplús para el periodo de 2040. Para el caso de los buses se tendría una reducción en la duración aproximadamente del 21% en los viajes de mayor duración.

La disminución en los tiempos de viaje, el establecimiento de costos competitivos del transporte público y la generación de medidas impositivas a la propiedad del automóvil particular y la motocicleta, demostraron resultados positivos en la distribución modal de los sistemas de transporte, priorizando el

transporte público y lo no motorizado, teniendo las siguientes participaciones a 2030: buses (24%), Metro (18%), bicicleta (3%) y caminata (21%), en detrimento del automóvil (11%) y la motocicleta (12%).

El establecimiento de metas ambiciosas en electrificación del transporte demostró tener resultados positivos en la dinámica de consumo de energéticos y en la cantidad de emisiones contaminantes; por lo tanto, en un escenario “Alan Turing” para el periodo 2030, los automóviles eléctricos deberían representar un 41% del parque total en el AMVA, en comparación de un escenario “Another brick in the wall” (9%). El parque automotor asociado al transporte público, compuesto principalmente por buses, supondría una participación del 55% para 2030 y del 80% para 2040 en el escenario “Alan Turing”. Para el caso de las motocicletas, se debería propender por llegar a tener participaciones del 39% con tecnología eléctrica a 2030 y de un 69% para 2040.

La electrificación del transporte modifica la dinámica del consumo de energéticos, lo cual para un escenario “Alan Turing” a 2030, el consumo de energía eléctrica representaría un 54% más de lo que se consume en un escenario “Another brick in the wall” y un 61% más en el 2040. Contrariamente a lo que sucede con el consumo de combustibles líquidos, que, para el caso de estudio, en un escenario “Alan Turing” se tendría un 68% de menos consumo de galones de gasolina a 2030 en comparación al escenario “Another brick in the wall” y un 86% menos a 2040.

Una distribución modal orientada hacia el transporte público y no motorizado y metas ambiciosas en el uso de tecnologías de tracción eléctrica, permitirán reducir las emisiones de gases contaminantes. Para este caso, se tendría en el año 2030 en un escenario “Alan Turing” un ahorro de 1.418.479 de Ton de CO₂ eq. Para el año 2040 y analizando los dos escenarios propuestos, el ahorro asciende a 2.218.494 Ton de CO₂ eq. Esta situación, representaría la siembra de aproximadamente 6,7 millones de árboles en el año 2030 y de aproximadamente 10,5 millones de árboles para el año 2040.

Finalmente, los hallazgos de este trabajo son una novedosa contribución al conocimiento relacionado con la implementación de políticas alternativas de transporte sostenible, ya que permite comprender en qué contexto y bajo que escenarios se pueden establecer mecanismos que contribuyan con una gestión eficiente de los sistemas de transporte del AMVA, mejorando la dinámica de consumo de energéticos e impactando en la disminución de emisiones de CO₂.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME y a la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano por brindar el apoyo financiero y técnico necesario para la realización de este trabajo.

REFERENCES

- Abbas, K. A. (1990). The Use of System Dynamics in Modelling Transportation Systems With Respect to New Cities in Egypt. In *Proceedings of the 8th International Systems Dynamics Conference*.
- Abbas, K. A., & Bell, M. G. H. (1994). System dynamics applicability to transportation modeling. *Transportation Research Part A*, 28(5). [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0965-8564(94)90022-1)
- Alcaldía de Medellín. (2020). Plan de Desarrollo Medellín Futuro. *Archivo Central Alcaldía de Medellín, Gaceta ofi*(Acuerdo 2 de 2020).
- AMVA. (2020). *Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá, SITVA*. Sistema Integrado de Transporte Del Valle de Aburrá, SITVA. <https://www.metropol.gov.co/movilidad/Paginas/transporte-publico/sitva.aspx>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2017). *Encuesta Origen - Destino*. Encuesta Origen - Destino.
- Calfee, J., & Winston, C. (1998). The value of automobile travel time: Implications for congestion policy. *Journal of Public Economics*, 69(1). [https://doi.org/10.1016/S0047-2727\(97\)00095-9](https://doi.org/10.1016/S0047-2727(97)00095-9)
- Canitez, F. (2020). Transferring sustainable urban mobility policies: An institutional perspective. *Transport Policy*, 90, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.02.005>
- Cardenas, L., Zapata, M., Franco, C. J., & Dyer, I. (2017). Assessing the combined effect of the diffusion of solar rooftop generation, energy conservation and efficient appliances in households. *Journal of Cleaner Production*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.068>
- Castaneda, M., Zapata, S., Cherni, J., Aristizabal, A. J., & Dyer, I. (2020). The long-term effects of cautious feed-in tariff reductions on photovoltaic generation in the UK residential sector. *Renewable Energy*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.051>
- Center for Environmental Research and Technology. (2021). *International Vehicle Emissions Model (IVE)*.
- Chatman, D. G. (2008). Deconstructing development density: Quality, quantity and price effects on household non-work travel. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(7). <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.02.003>
- Chowdhury, S., & Ceder, A. (2016). Users’ willingness to ride an integrated public-transport service: A literature review. *Transport Policy*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.03.007>
- Chowdhury, S., Ceder, A. (Avi), & Schwalger, B. (2015). The effects of travel time and cost savings on commuters’ decision to travel on public transport routes involving transfers. *Journal of Transport Geography*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.01.009>
- Collins, C. M., & Chambers, S. M. (2005). Psychological and situational influences on commuter-transport-mode choice. *Environment and Behavior*, 37(5). <https://doi.org/10.1177/0013916504265440>

- Delbosc, A. (2012). The role of well-being in transport policy. *Transport Policy*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.06.005>
- Departamento nacional de estadísticas. DANE. (2019). Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 - Medellín, Antioquia. *Dane*.
- Diao, M. (2019). Towards sustainable urban transport in Singapore: Policy instruments and mobility trends. *Transport Policy*, 81. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.05.005>
- Fontoura, W. B., Chaves, G. de L. D., & Ribeiro, G. M. (2019). The Brazilian urban mobility policy: The impact in São Paulo transport system using system dynamics. *Transport Policy*, 73. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.09.014>
- Franco, C. J., Zapata, S., & Dyer, I. (2015). Simulation for assessing the liberalization of biofuels. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 41). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.025>
- Gao, Q., Fang, C., Liu, H., & Zhang, L. (2021). Conjugate evaluation of sustainable carrying capacity of urban agglomeration and multi-scenario policy regulation. *Science of The Total Environment*, 147373. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147373>
- 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*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2014.11.003>
- Hasan, M. A., Chapman, R., & Frame, D. J. (2020). Acceptability of transport emissions reduction policies: A multi-criteria analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110298>
- Held, T., & Gerrits, L. (2019). On the road to electrification – A qualitative comparative analysis of urban e-mobility policies in 15 European cities. *Transport Policy*, 81. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.05.014>
- IDEAM. (2015). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero - Colombia*.
- IEA. (2020a). *Global EV Outlook 2020 – Analysis - IEA*. Iea.
- IEA. (2020b). *World Energy Outlook 2020 -Summary Report*.
- Jang, J., & Ko, J. (2019). Factors associated with commuter satisfaction across travel time ranges. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.09.019>
- Maggi, E., & Vallino, E. (2020). Price-based and motivation-based policies for sustainable urban commuting: An agent-based model. *Research in Transportation Business and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100588>
- Martinez Angel, J. D. (2018). Movilidad motorizada, impacto ambiental, alternativas y perspectivas futuras: consideraciones para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Revista de Salud Pública*, 20(1). <https://doi.org/10.15446/rsap.v20n1.57038>
- Medellín, M. de. (2020). *Tarifas Metro de Medellín*.
- Melkonyan, A., Koch, J., Lohmar, F., Kamath, V., Munteanu, V., Alexander Schmidt, J., & Bleischwitz, R. (2020). Integrated urban mobility policies in metropolitan areas: A system dynamics approach for the Rhine-Ruhr metropolitan region in Germany. *Sustainable Cities and Society*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102358>
- Molina Montenegro, M. A. (2019). Demanda de transporte en la ciudad de Medellín, Colombia. Periodo 2017. In *Demanda de transporte en la ciudad de Medellín, Colombia. Periodo 2017*. <https://doi.org/10.15332/tg.mae.2020.0663>
- Muro-Rodríguez, A. I., Perez-Jiménez, I. R., & Gutiérrez-Broncano, S. (2017). Consumer behavior in the choice of mode of transport: A case study in the Toledo-Madrid corridor. *Frontiers in Psychology*, 8(JUN). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01011>
- Naciones Unidas. (2020). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Olfindo, R. (2021). Transport accessibility, residential satisfaction, and moving intention in a context of limited travel mode choice. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.01.012>
- Pucci, P. (2021). Spatial dimensions of electric mobility—Scenarios for efficient and fair diffusion of electric vehicles in the Milan Urban Region. *Cities*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103069>
- S., M., & Ravi, R. S. (2016). Commuter's sensitivity in mode choice: An empirical study of New Delhi. *Journal of Transport Geography*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.11.001>
- Sayyadi, R., & Awasthi, A. (2017). A system dynamics based simulation model to evaluate regulatory policies for sustainable transportation planning. *International Journal of Modelling and Simulation*, 37(1). <https://doi.org/10.1080/02286203.2016.1219806>
- Shepherd, S. P. (2014). A review of system dynamics models applied in transportation. In *Transportmetrica B* (Vol. 2, Issue 2). <https://doi.org/10.1080/21680566.2014.916236>
- Sivasubramaniyam, R. D., Charlton, S. G., & Sargisson, R. J. (2020). Mode choice and mode commitment in commuters. *Travel Behaviour and Society*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2019.10.007>
- Strulak-Wójcikiewicz, R., & Lemke, J. (2019). Concept of a simulation model for assessing the sustainable development of urban transport. *Transportation Research Procedia*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.052>
- Thaller, A., Posch, A., Dugan, A., & Steininger, K. (2021). How to design policy packages for sustainable transport: Balancing disruptiveness and implementability. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102714>
- Universidad Pontificia Bolivariana. (2018). *Actualización del inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá - año 2018*.
- UPME. (2016). *Estimaciones del consumo de energía en el sector transporte*.
- UPME. (2019a). *Balance de Energía Útil*.

- UPME. (2019b). *Establecer Recomendaciones en Materia de Infraestructura de Recarga para la Movilidad Eléctrica en Colombia para los Diferentes Segmentos: Buses, motos, taxis, BRT*.
- UPME. (2020). Plan Energetico Nacional Colombia: 2020 - 2050. *Unidad de Planeación Minero Energética, Republica de Colombia*.
- Urbanek, A. (2021). Potential of modal shift from private cars to public transport: A survey on the commuters' attitudes and willingness to switch – A case study of Silesia Province, Poland. *Research in Transportation Economics*, 85. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.101008>
- Vafa-Arani, H., Jahani, S., Dashti, H., Heydari, J., & Moazen, S. (2014). A system dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.05.016>
- Wang, J. F., Lu, H. P., & Peng, H. (2008). System dynamics model of urban transportation system and its application. *Jiaotong Yunshu Xitong Gongcheng Yu Xinxu/ Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8(3). [https://doi.org/10.1016/s1570-6672\(08\)60027-6](https://doi.org/10.1016/s1570-6672(08)60027-6)
- Wangness, P. B., Proost, S., & Rødseth, K. L. (2020). Vehicle choices and urban transport externalities. Are Norwegian policy makers getting it right? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102384>
- Wen, L., & Bai, L. (2017). System Dynamics Modeling and Policy Simulation for Urban Traffic: a Case Study in Beijing. *Environmental Modeling and Assessment*, 22(4). <https://doi.org/10.1007/s10666-016-9539-x>
- Wong, R. C. P., Yang, L., & Szeto, W. Y. (2021). Wearable fitness trackers and smartphone pedometer apps: Their effect on transport mode choice in a transit-oriented city. *Travel Behaviour and Society*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2020.10.006>
- Zapata, S., Castaneda, M., Franco, C. J., & Dyner, I. (2019). Clean and secure power supply: A system dynamics based appraisal. *Energy Policy*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.028>
- Zapata, S., Castaneda, M., Garces, E., Franco, C. J., & Dyner, I. (2018). Assessing security of supply in a largely hydroelectricity-based system: The Colombian case. *Energy*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.118>