

Estado del arte sobre la eficiencia de la tarificación vial urbana, como estrategia de gestión de movilidad frente a escenarios de congestión vehicular en América Latina

Luis Felipe Garcés-Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Miller Humberto Salas Rondon

Ph.D. en Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

Agradecimientos

Sincero agradecimiento al profesorado del programa de ingeniería civil, cuyo arduo trabajo me ha proporcionado no solo conocimiento, sino también las herramientas necesarias para potenciar mis capacidades profesionales. Al ingeniero Miller H. Salas Rondón, por su inestimable guía y dirección durante la realización de este trabajo de investigación.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	8
1. Metodología	10
1.1 Fase 1: Búsqueda bibliográfica.....	10
1.2 Fase 2: Caracterización de la información general	11
1.3 Fase 3: Parámetros de selección	15
1.4 Fase 4: Revisión manual	19
1.4.1 Categorización de los artículos y trabajos seleccionados	19
1.4.1.1 Estudios de casos	19
1.4.1.2 Artículos de investigación.....	22
1.4.1.3 Proyecto de investigación	24
1.4.1.4 Revisiones de literatura.....	25
1.4.1.5 Simposios	26
2. Resultados	28
2.1 Modelos de tarificación vial más comunes en el mundo	28
2.1.1 Eficiencia y fracaso de medidas de tarificación vial implementadas en el mundo.....	32
2.2 Aceptación pública a partir de los modelos de tarificación y precios.....	35
2.3 Reducción en los niveles de CO2 a partir de los modelos de tarificación vial implementados	41
2.4 La Tarificación vial frente a escenarios de congestión vehicular	43
3. Conclusiones	45
Referencias Bibliográficas	47

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Documentos obtenidos por ecuación de búsqueda</i>	11
Tabla 2 <i>Documentos filtrados por presencia de términos relevantes</i>	17
Tabla 3 <i>Documentos a partir de los criterios de selección</i>	18
Tabla 4 <i>Tipo de documento seleccionado y tema de contribución</i>	27

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Producción anual de los documentos obtenidos.</i>	12
Figura 2 <i>Producción de documentos por países</i>	13
Figura 3 <i>Mapa bibliométrico del acoplamiento bibliográfico por países</i>	14
Figura 4 <i>Mapa bibliométrico de terminología indexada</i>	15
Figura 5 <i>Mapa de árbol de palabras clave</i>	16
Figura 6 <i>Variación de la demanda de elasticidad</i>	31
Figura 7 <i>Tecnologías implementadas para el cobro de tarificación vial en el condado de Cambridgeshire, Inglaterra</i>	33
Figura 8 <i>Puntos de control para tarificación en la zona céntrica de la ciudad de Estocolmo</i>	39

Resumen

Título: Estado del arte sobre la eficiencia de la tarificación vial urbana, como estrategia de gestión de movilidad frente a escenarios de congestión vehicular en América Latina*

Autor: Luis Felipe Garcés-Rodríguez**

Palabras Clave: Tarificación vial; Precios por congestión; Congestión vehicular; Transporte urbano; Gestión del tráfico; Movilidad urbana.

Descripción: Bajo el panorama de congestión vehicular que aqueja gran parte de la población mundial, el presente trabajo de investigación busca interpretar la efectividad de la tarificación vial urbana como estrategia para reducir la congestión vehicular en América Latina, mediante un análisis sistemático de la literatura. En función de una metodología analítica de 4 fases, se logró obtener una muestra de veintiséis referencias bibliográficas que fueron revisadas de manera exhaustiva. Como consecuencia, se identificaron y describieron los modelos disponibles más empleados en políticas de tarificación vehicular, así como también los aportes en materia de disminución de la congestión vehicular que presenta esta medida. Los resultados obtenidos indican que un sistema de tarificación vehicular, basado en un diseño estructurado de manera óptima y considerando las variables de mayor sensibilidad en términos de aceptabilidad, puede generar mejoras significativas tanto en la reducción de los flujos vehiculares como en la mitigación de la congestión vehicular.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Miller Salas Rondon Ph.D. en Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte

Abstract

Title: State of the art on the efficiency of urban road pricing as a mobility management strategy in the face of traffic congestion scenarios in Latin America*

Author(s): Luis Felipe Garcés-Rodríguez**

Key Words: Road pricing; Congestion pricing; Vehicle congestion; Urban transportation; Traffic management; Urban mobility.

Description: Within a context of traffic congestion that afflicts a large part of the world's population, this research work seeks to interpret the effectiveness of urban road pricing as a strategy to reduce traffic congestion in Latin America, through a systematic analysis of the literature. Based on a four-phase analytical methodology, a sample of twenty-six bibliographic references was obtained and exhaustively reviewed. As a result, we identified and described the available models most commonly used in vehicle pricing policies, as well as the contributions of this measure in terms of reducing vehicle congestion. The results obtained indicate that a vehicle pricing system, based on an optimally structured design and considering the most sensitive variables in terms of acceptability, can generate significant improvements both in reducing vehicle flows and mitigating vehicle congestion.

* Project of Investigation

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Miller Salas Rondon Ph.D. en Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte

Introducción

El constante desarrollo urbanístico y el aumento de la productividad asociado al proceso de concentración económica experimentado por los países latinoamericanos han provocado un aumento en la adquisición de vehículos, tanto en los hogares como en las empresas. Esta situación se ha traducido en un considerable aumento en el volumen de tráfico en las principales metrópolis de la región, y a su vez ha provocado afectaciones en materia de movilidad urbana al generar escenarios de congestión vehicular (Medina & Vélez, 2011).

La congestión vehicular se ha convertido en un problema central en el ámbito de la movilidad urbana, atrayendo la atención de especialistas en transporte, así como de economistas e investigadores de disciplinas relacionadas. Más allá de simplemente aumentar la capacidad de las vías, se han propuesto alternativas como la tarificación urbana y la promoción del transporte público, que destacan en la literatura como formas efectivas de mitigar la congestión. La tarificación resulta atractiva al seguir la línea de pensamiento de Arthur Pigou, quien abogaba por la internalización de los costos externos generados por los usuarios de la vía (Basso et al., 2011).

La tarificación vial, en términos generales, tiene como objetivo incentivar cambios en el comportamiento de los conductores. Esto incluye aspectos como el medio de transporte utilizado, la elección de la ruta, así como el horario, el número, la frecuencia y la distancia de los viajes realizados. Todo ello se logra mediante la aplicación de tarifas que incrementan los costos asociados al uso de vehículos particulares (de Palma & Lindsey, 2011). A nivel internacional, esta medida ha arrojado resultados alentadores en diversas ciudades densamente pobladas como Londres, Singapur y Estocolmo. Sin embargo, requiere de diversos estudios económicos y sociales que faciliten su desarrollo como una política popular, ya que con frecuencia la tarificación vial se

enfrenta a la oposición pública debido a temas como los precios de los peajes y el contraste psicológico generado por la transición del uso gratuito de las vías al tener que pagar una tarifa para transitar por ellas (Hsieh, 2022).

En algunas ciudades latinoamericanas se ha implementado una política de restricción vehicular en función del último dígito de la placa del vehículo, sin embargo, no se han obtenido los resultados esperados en materia de reducción de la congestión vehicular y disminución de niveles de contaminación del aire (Ramos et al., 2017). A partir de lo anterior, se hace preciso analizar alternativas como la tarificación vial en estas regiones del mundo, en busca de combatir estas problemáticas constantes.

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo interpretar la eficacia potencial de la tarificación vial en América Latina, mediante una revisión sistemática de la literatura disponible en la base de datos Scopus en este campo de estudio.

El documento se organiza en torno a 4 secciones principales. En la sección 2, que detalla la metodología de la investigación, se realizó un análisis sistemático en el cual se categorizaron y filtraron los documentos encontrados utilizando la ecuación de búsqueda seleccionada para esta investigación. Dentro de esta sección, se establecieron cuatro subsecciones que facilitaron el proceso de selección de los documentos finalmente estudiados. Como resultado, se identificaron veintiséis referencias bibliográficas consideradas de mayor utilidad para la elaboración del estado del arte. En la sección 3 se exponen los resultados obtenidos en el presente estudio, describiendo en 4 apartados la información más relevante encontrada en los documentos seleccionados. Finalmente, la sección 4 condensa las conclusiones y limitaciones adscritas a este trabajo de investigación.

1. Metodología

El desarrollo investigativo del presente documento ejecutó un análisis exhaustivo y estructurado de la literatura disponible sobre la tarificación vial, siguiendo un enfoque sistemático y riguroso. Se establecieron 4 fases de análisis y clasificación, las cuales facilitaron una evaluación crítica y objetiva de los documentos encontrados.

1.1 Fase 1: Búsqueda bibliográfica

Para el proceso de búsqueda de información se empleó la base de datos Scopus, la cual se caracteriza por ser una herramienta que cuenta con una alta cobertura de literatura científica e información detallada en diversas disciplinas de investigación académica.

Con el fin de realizar un proceso de búsqueda eficiente y abarcar la mayor cantidad de información posible, se opta por utilizar el idioma inglés en las diversas ecuaciones de búsqueda planteadas. Esto se debe al hecho de que el inglés ocupa una posición predominante en la publicación de literatura científica en el ámbito académico.

En primera instancia, se considera el término “Road pricing” como el vocabulario más frecuente para referirse a la tarificación vial. Partiendo de este análisis, se plantearon diferentes ecuaciones de búsqueda como: ("road pricing" OR "urban tolls" AND "traffic congestion" AND "acceptability") o (“road pricing” OR "urban tolls" AND "traffic congestion" AND “transport”). Sin embargo, los resultados obtenidos a partir de estas búsquedas no arrojaron un número considerable de publicaciones. Luego de varias búsquedas, se escogió la siguiente ecuación: TITLE-ABS-KEY ("road pricing" OR "congestion charging" OR "urban tolls" AND "traffic congestion" OR "urban traffic" OR "urban mobility") AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, 'english')).

Esta ecuación demostró una cobertura más amplia de documentos disponibles y abarcó un rango temporal considerable, convirtiéndose así en la opción más acertada para el desarrollo de la investigación.

Como se muestra en la Tabla 1, al introducir la ecuación de búsqueda (c) en la base de datos Scopus se obtuvieron 854 documentos. Posteriormente, se extrajo información detallada de cada referencia bibliográfica en formato BibTeX, que sirvió de base para llevar a cabo un análisis bibliométrico mediante las herramientas de software escogidas para esta investigación, tales como Bibliometrix y VOSviewer.

Tabla 1

Documentos obtenidos por ecuación de búsqueda

	Ecuación de búsqueda	Cantidad
(a)	"Road pricing" OR "urban tolls" AND "traffic congestion" AND "acceptability"	46
(b)	"Road pricing" OR "urban tolls" AND "traffic congestion" AND "transport"	267
(c)	"Road pricing" OR "congestion charging" OR "urban tolls" AND "traffic congestion" OR "urban traffic" OR "urban mobility") AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, 'English'))	854

1.2 Fase 2: Caracterización de la información general

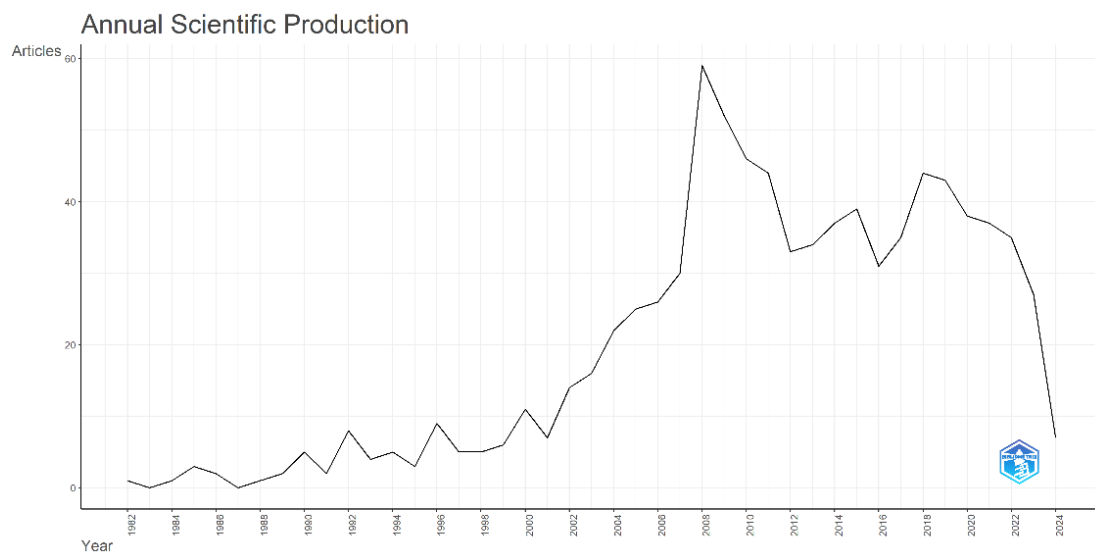
Continuando con la estrategia de investigación contemplada en este documento, se utiliza la herramienta Bibliometrix para realizar un análisis bibliométrico con el propósito de caracterizar la información principal de los documentos en una tabla de Excel. Esto permitió conocer que los resultados de búsqueda obtenidos arrojaron un total de 640 artículos, 169 conferencias, 18 revisiones, 25 libros, 1 nota y 1 encuesta.

En la Figura 1 se puede observar que los inicios investigativos de la tarificación vial se remontan a las últimas décadas del siglo XX, y que a principios de los años 2000 se presenta un crecimiento significativo en la producción científica de esta temática. Este crecimiento acelerado puede atribuirse a que la primera implementación de este modelo de gestión vehicular fue realizada alrededor de los años 70 en la ciudad de Singapur (Olszewski & Xie, 2005), lo cual, puede considerarse como un hito que abrió paso a que ciudades europeas como Londres y Estocolmo, empezaran a realizar estudios sobre la implementación de tarifas urbanas en sus territorios.

El estudio constante que presenta la tarificación vial a partir del 2008 se justifica principalmente por la relevancia que fue adquiriendo esta temática. Al implementar modelos de tarificación urbana en ciudades como Londres y Estocolmo, se lograron identificar mejoras significativas en la movilidad urbana y reducción de la contaminación del aire.

Figura 1

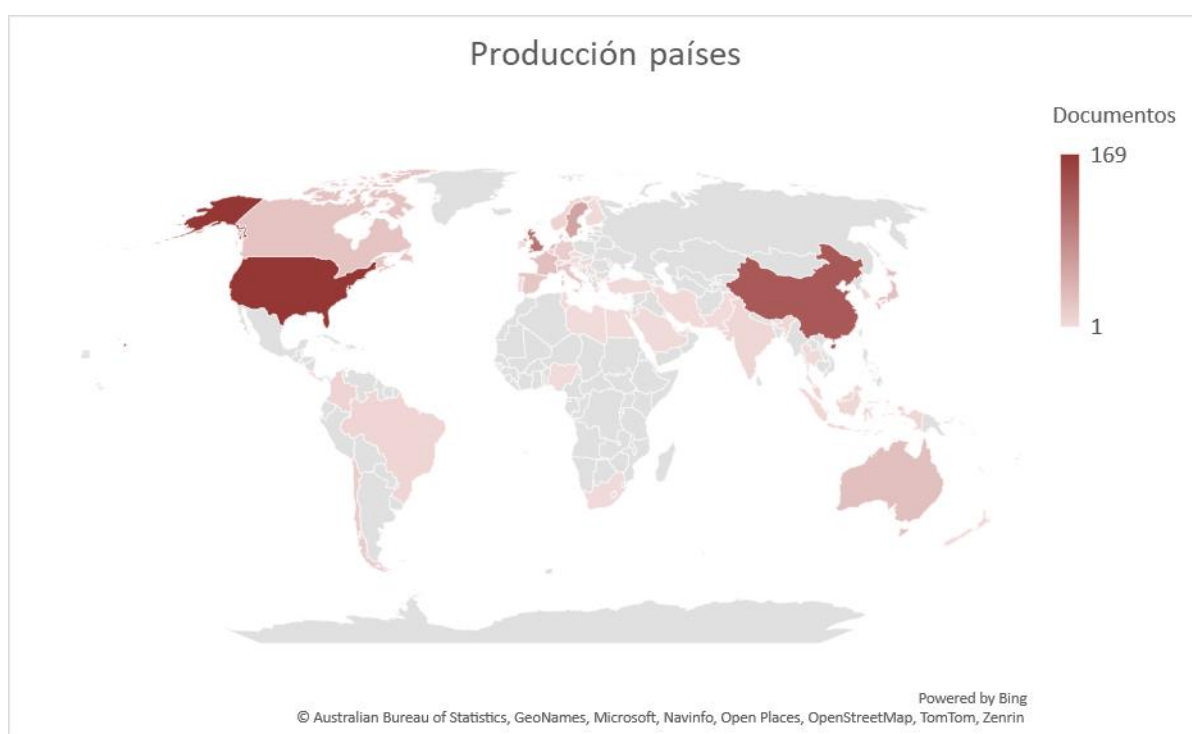
Producción anual de los documentos obtenidos.



Esta situación motivó a muchos investigadores a estudiar la viabilidad de esta medida, así como también a analizar diferentes tipos de modelos que optimicen la efectividad de esta herramienta de gestión.

Figura 2

Producción de documentos por países

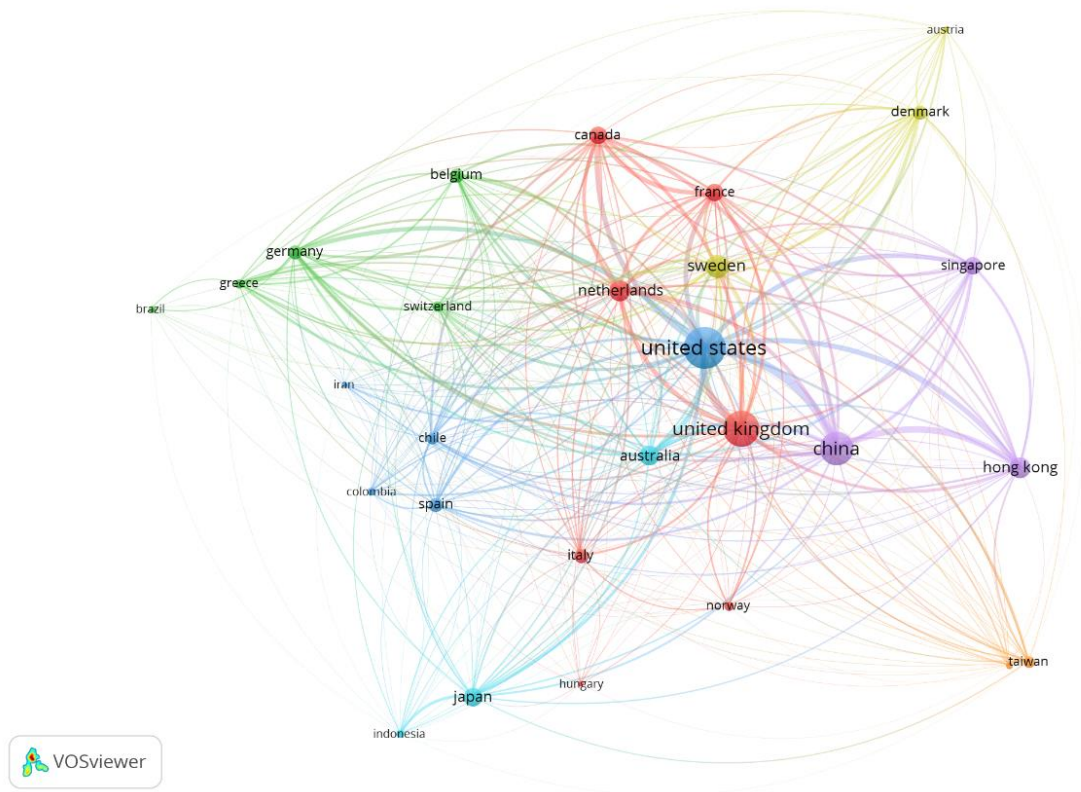


Como se puede apreciar en la Figura 2, las tonalidades más oscuras muestran un elevado porcentaje de contribución en la publicación de estudios e investigaciones acerca de la tarificación vial. A su vez, se puede observar que los países con mayores niveles de desarrollo son los que resaltan. Estados Unidos (USA) presenta 169 documentos, seguido de China con 134 y, posteriormente, Reino Unido (UK) con 106 publicaciones.

La participación o contribución de países latinoamericanos en la producción de los 854 documentos analizados en esta investigación, representa solo el 4% de la muestra total, destacando Chile en primer lugar con 15 publicaciones, seguido de Colombia con 8, finalmente Brasil con 7 documentos y Costa Rica con una publicación.

Figura 3

Mapa bibliométrico del acoplamiento bibliográfico por países



Utilizando la herramienta de software VOSviewer se logra obtener la Figura 3, en la que se pueden apreciar las redes de colaboración internacional en la investigación científica de la tarificación vial. Esta figura facilita la identificación de las influencias que han incidido en los territorios donde se ha adoptado un modelo de tarificación, contribuyendo al enriquecimiento del

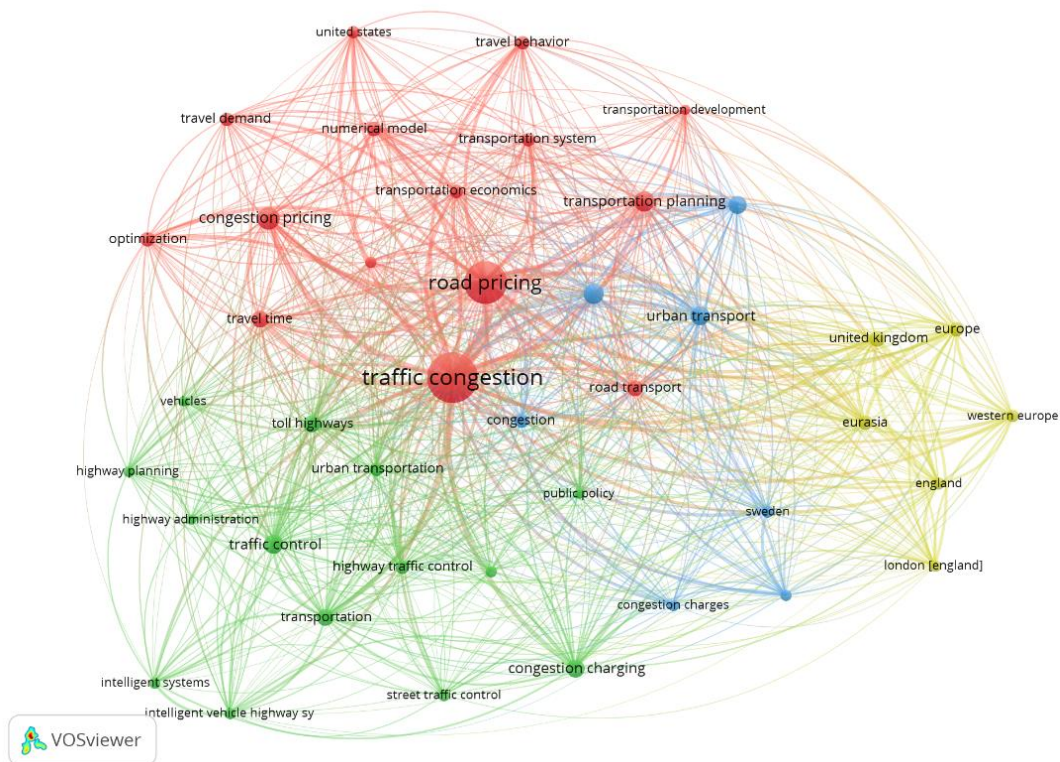
análisis de esta medida. Además, permite señalar el apoyo científico que brindan los países del primer mundo para el desarrollo de esta área de investigación.

1.3 Fase 3: Parámetros de selección

Continuando con el análisis bibliométrico, se ejecuta el programa VOSviewer con el propósito de destacar la terminología indexada en los documentos estudiados. Como se puede observar en la Figura 4, los términos “Traffic congestion” y “Road pricing” se muestran como las palabras de mayor presencia en la presente investigación.

Figura 4

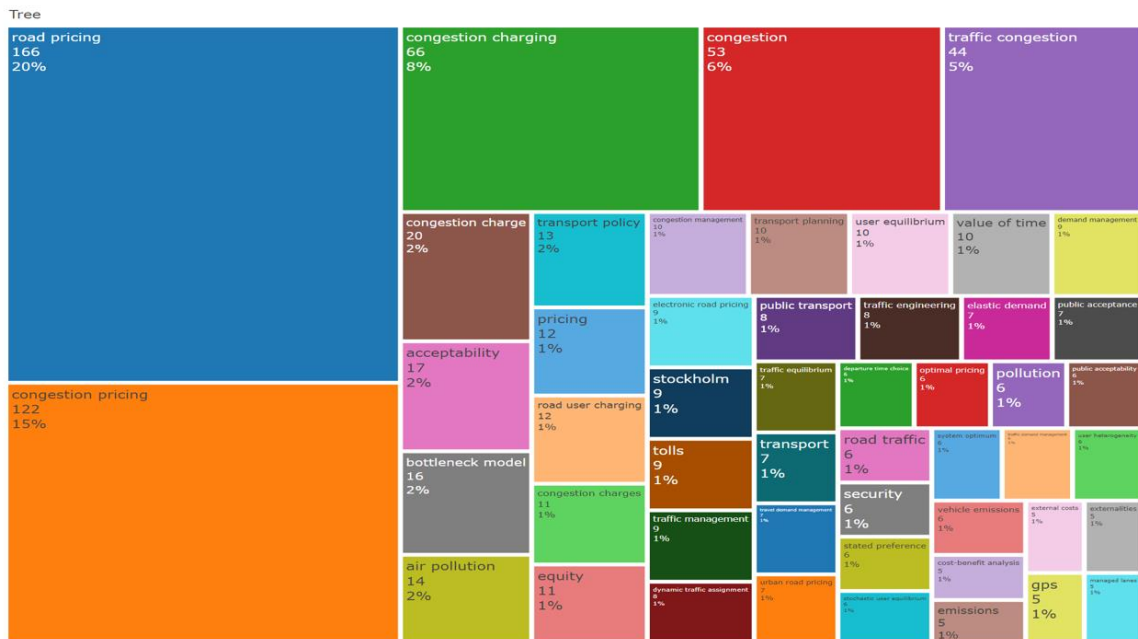
Mapa bibliométrico de terminología indexada



Profundizando un poco más en el análisis de las redes bibliométricas expuestas en la Figura 4 y apoyándose en las palabras clave mostradas en la Figura 5, se logra identificar que los términos “Road Pricing”, “Congestion Pricing” y “Congestion Charging” están estrechamente relacionados con la documentación de mayor interés para el objetivo de la investigación. Esto permite formular un procedimiento para seleccionar documentos utilizando estas tres palabras clave, con el que se pretende identificar las publicaciones más factibles para el desarrollo de este estudio.

Figura 5

Mapa de árbol de palabras clave



Bajo el análisis anterior, se procede a filtrar las referencias obtenidas en la base de datos Scopus, seleccionando aquellos documentos cuyo título y resumen contengan al menos uno de los tres términos clave. Este proceso garantiza que los objetivos de la documentación seleccionada buscan describir o analizar de alguna forma el tema de la tarificación vial.

Con este proceso se consigue reducir en un 66,6% el número de referencias encontradas, logrando limitar las áreas de estudio y dirigir la búsqueda hacia los documentos que mejor se alinean con el foco de la investigación.

Tabla 2

Documentos filtrados por presencia de términos relevantes

Tipo de Documento	Road pricing	Congestion pricing	Congestion charging	Total
Artículo	86	65	52	203
Conferencia	43	11	17	71
Revisión	2	3	1	6
Libro	4	0	1	5
Total	135	79	71	285

Como se puede apreciar en la Tabla 2, se han seleccionado un total de 285 publicaciones a partir de esta acción, y el término "road pricing" hace presencia en el 47,4% de estos documentos.

Las referencias obtenidas mediante este filtro se centran en el estudio de la tarificación vial. Sin embargo, dado que esta temática es bastante amplia, es necesario avanzar en el proceso de categorización de los documentos, descartando aquellos que no aporten al desarrollo de la investigación.

Con este fin, se proponen cuatro criterios de inclusión destinados a guiar la selección de las publicaciones encontradas hasta este momento, teniendo en cuenta su relevancia y utilidad para el presente documento. Estos criterios son:

- a) Identificación de los documentos que enfocan su investigación en casos de estudio o modelos de tarificación vial.
- b) Selección dentro de la información caracterizada de los documentos cuya participación incluya a los 10 autores más destacados.
- c) Señalar los documentos publicados que tuvieran colaboración con autores u entidades latinoamericanas.
- d) Selección de los documentos que incluyan la palabra “Efficiency” en su resumen.

Con el desarrollo del planteamiento anterior, se lograron obtener 107 documentos discretizados por su tipología como se muestra en la Tabla 3. Este proceso se llevó a cabo utilizando una tabla de Excel que contenía la información principal de las publicaciones. Es relevante destacar que durante la realización de esta actividad se identificaron 19 resultados duplicados, los cuales se eliminaron para no interferir en el proceso de selección.

Tabla 3

Documentos a partir de los criterios de selección

Criterio de inclusión	Artículo	Revisión	Conferencia o libro	Total
Casos de estudio	5	0	2	7
Modelos de tarificación	17	1	7	25
10 Autores principales	33	1	6	40
Producción Latam	18	1	4	15
“Efficiency” en el resumen	10	2	1	21
Total	83	5	20	108

1.4 Fase 4: Revisión manual

Para el desarrollo de esta etapa, en primer lugar, se examinaron las 107 publicaciones seleccionadas. Dado que, en este punto de la investigación, las referencias obtenidas estaban estrechamente relacionadas con el estudio de la tarificación vial, fue necesario analizar aspectos más detallados de cada documento. El objetivo era identificar aquellos que proporcionaran una información completa sobre las consecuencias que tiene la implementación de tarifas viales en materia de reducción de la congestión vehicular.

Parámetros como el año de publicación, el número de citas, los objetivos del documento, sus contribuciones y el enfoque descrito en su respectivo resumen desempeñaron un papel crucial en la selección de los artículos que se incluyeron en el desarrollo del presente estado del arte.

Desde lo anterior, se escogieron veintiséis archivos entre los que se destacan artículos, estudios de caso, informes, trabajos de carácter teórico y propuestas de investigación teórico-práctica.

1.4.1 Categorización de los artículos y trabajos seleccionados

Con el propósito de examinar las contribuciones que presentan las referencias disponibles en materia de tarificación vial, se procede a detallar los temas abordados en cada documento seleccionado, y posteriormente, a organizarlos en un cuadro según el tipo de trabajo académico al que pertenecen. Esta clasificación permitirá realizar un análisis más exhaustivo de las contribuciones que ofrecen las referencias escogidas.

1.4.1.1 Estudios de casos

En los estados del arte es usual hallar artículos investigativos a partir del estudio de casos. Durante la selección de datos, se hallaron diversos trabajos académicos pertenecientes a este tipo

de investigación donde se estudian casos de diferentes ciudades del mundo, en su mayoría caracterizadas por presentar un flujo vehicular extenso. Uno de estos, el trabajo de (Aboudina & Abdulhai, 2017) donde se realiza un estudio de caso basado en una simulación en el área metropolitana de la ciudad de Toronto, con el cual se busca optimizar los precios de congestión dependientes del tiempo en grandes redes.

Otro descubrimiento significativo en este campo de investigación se encuentra en el estudio de caso llevado a cabo por (Fuentes et al., 2022) en una carretera situada en el Caribe colombiano. En este estudio, se busca desarrollar un modelo de optimización continua no lineal para calcular peajes destinados al tráfico multiclase y multiperiodo, teniendo en cuenta una amplia gama de costos sociales e integrales, como los daños al pavimento, las emisiones ambientales y los gastos operativos de los viajes, entre otros aspectos. Se encuentra también en esta línea de investigación, en el trabajo (Ortúzar et al., 2021) donde se evalúa la posible aceptabilidad de la tarificación vial en la ciudad de Santiago de Chile en la cual se busca un modelo que sea aceptable por la población de dicha zona, ya que el implementado hasta ese momento ha causado un alto descontento de parte de ellos. De esta forma, la investigación se basa en varios modelos de tarificación vial y a su vez, en la encuesta para verificar con cuál de las posibilidades se identifican los conductores.

Otro estudio de caso realizado por de la Universidad de Toronto (Hall, 2021), se centra en la cuestión de si los peajes realmente ayudan a abordar el problema de la congestión vial, evaluando las ventajas y consecuencias derivadas de las tarifas por congestión. Durante este análisis, se lleva a cabo un exhaustivo examen de datos, gráficos y ecuaciones basado en los resultados recopilados en dicho trabajo. Luego, en (Ramos et al., 2017) se reconsidera la restricción del uso de automóviles a partir de su número de matrícula en la ciudad de Medellín

(Colombia) y en otras ciudades, cuyo modelo se conoce como "pico y placa", proponiendo el cobro por congestión, como se ha implantado en otros países. La medida que se ha llevado a cabo no ha tenido efectos positivos; por el contrario, ha provocado más problemas de contaminación y congestión en las vías. De esta manera, dicho trabajo propone un modelo de tarificación híbrida a través de variables latentes.

Otro estudio de caso, llevado a cabo en la ciudad de Budapest (Zefreh et al., 2021), analiza las implicaciones de diferentes tipos de sistemas de tarificación vial urbana, y a su vez investigan el modelo de tarificación desde la perspectiva del tráfico macroscópico. En este análisis, se observa que el modelo de precios es el menos eficiente, mientras que el modelo a distancia muestra un desempeño efectivo tanto dentro como fuera del componente de los precios. Se resaltan las desventajas y consecuencias del sistema implementado en esa ciudad, como el modelo tipo cordón. Esta misma línea de estudio se aborda en un estudio de caso en el que se investigan los niveles y ubicaciones óptimas de peajes en los esquemas de tarificación por congestión en la ciudad de Estocolmo (Ekström et al., 2016).

El cobro por congestión es uno de los temas más discutidos en los estudios de casos, especialmente debido a la falta de aceptación por parte de los conductores hacia las iniciativas impuestas para controlar el flujo vehicular y la congestión en las carreteras. Esto se menciona en la investigación (Grisolía et al., 2015), donde se desarrolla esta temática en un estudio de caso realizado en la ciudad española de Las Palmas de Gran Canaria. En este estudio, se propuso implementar la tarificación vial con el objetivo de reducir los niveles de CO₂ y, al mismo tiempo, aumentar los ingresos destinados al mantenimiento de las vías y la construcción de nuevas

carreteras. Sin embargo, este sistema no ha sido bien recibido por aquellos que transitan por la zona.

Otros trabajos de estudio de casos como el descrito en (Vonk Noordegraaf et al., 2014), se enfocan en el estudio de la implementación de sistemas de tarificación vial en ciudades grandes como Singapur, Londres, Estocolmo y algunas ciudades de Noruega, enfocando la atención en el contexto vial de cada ciudad para identificar los modelos que se ajustan de la mejor manera posible a cada una de estas como iniciativa para mejorar la congestión vehicular.

1.4.1.2 Artículos de investigación

Entre los artículos de investigación recopilados y seleccionados se identifican trabajos donde se estudian diferentes modelos de tarificación vial, y se comparan los resultados entre estos diseños. Uno de los trabajos encontrados con este propósito, estudia un modelo de tarificación de carreteras muy transitadas basado en densidades de enlaces, considerando la relación entre flujo y costos (De Grange et al., 2017). Posteriormente, en (Yang et al., 2010) se realiza un exhaustivo estudio sobre la eficiencia de la tarificación vial en las carreteras, mencionando varios de los modelos implantados en este sistema en diferentes partes del mundo, clasificando aquellos modelos que han presentado mayor eficiencia y aquellos que no han sido aceptados del todo por parte de los usuarios.

Otro de los trabajos recopilados (Ison, 2017), se centra en un importante estudio sobre los efectos de la tarificación vial realizado en el condado de Cambridge. Este estudio aborda los problemas de congestión vial presentados en dicha zona, especialmente en relación con el modelo aplicado en el año 1990, el cual no tuvo éxito debido al plan de sofisticación propuesto para aquella época y la falta de alternativas para considerar posibilidades aplicables a partir de la problemática.

Esta medida se retomó durante el año 2008 con el fin de estudiar su eficiencia a partir de las nuevas tecnologías implantadas. Por otra parte, los tiempos de viaje y la puntualidad son factores muy importantes para un viajero (Zhu et al., 2018). En este estudio, se afirma que la mayoría de las iniciativas en este sentido se centran en capturar el valor del ahorro del tiempo de viaje y en generar mejores acciones durante el uso de las vías. Sin embargo, pocas veces se da importancia a la confiabilidad en el diseño de los diferentes tipos de tarificación vial; es decir, no se presta suficiente atención a la efectividad y satisfacción de los usuarios a partir de las iniciativas implantadas.

Artículos como (Eliasson, 2008) ofrecen una visión panorámica de la historia de la tarificación vial en Estocolmo, destacando tanto su eficacia como las dificultades que ha enfrentado a lo largo del tiempo. Luego, encontramos un estudio centrado en el problema del peaje óptimo basado en el sistema de cordones. Este trabajo explora un modelo de programación convexa basado en enlaces para abordar el problema del Equilibrio de Usuario Estocástico (SUE, por sus siglas en inglés) utilizando la teoría Logit, junto con un patrón de peaje que considera tanto la distancia como el tiempo (Liu et al., 2014). Por otro lado, en (Lindsey, 2012) se examina la teoría detrás de la tarificación de la congestión y se cuestiona si esta estrategia realmente conduce a resultados óptimos.

En (Ortúzar, 2019) se define un grupo de términos que son clave para comprender en qué consiste una movilidad urbana sostenible, haciendo un análisis a partir de las iniciativas implementadas con fines de sostenibilidad y congestión vehicular. En la investigación de (de Palma & Lindsey, 2011) llevan a cabo un artículo de revisión sobre los métodos y tecnologías que

se tienen en cuenta en la fijación de precios por congestión en las carreteras, estudiando además los distintos tipos de peajes que más se imponen en distintas partes del mundo.

La investigación en (Rentziou et al., 2011) se examina la aceptación pública de los modelos de tarificación vial, resaltando que uno de los principales obstáculos para la implementación de un sistema de tarificación por congestión vehicular es la reticencia de las personas hacia estas medidas. Este rechazo se ve influenciado por varios factores, como el modelo de viaje propuesto o la distribución de los ingresos generados. Por otro lado, en (Hensher & Bliemer, 2014) abordan el tema de los precios en las carreteras, identificando el compromiso político como el principal obstáculo. A menudo, se aplican impuestos adicionales en estos procesos sin considerar un sistema de tarifas equitativo que pueda cubrir los costos de mantenimiento y la expansión de la red vial. Esta falta de equidad en la aplicación de los precios puede generar resistencia por parte de los usuarios y dificultar la aceptación de estas medidas.

Por último, se encuentra un artículo donde se analiza la eficiencia y los impactos distributivos de la tarificación de la congestión en el modelo dinámico de cuello de botella de Vickrey en 1969. En este estudio se distribuyen continuamente los valores de tiempo y se considera un retraso en los cronogramas, afirmando que los precios por congestión pueden mejorar la situación de los viajeros (Van den Berg & Verhoef, 2011).

1.4.1.3 Proyecto de investigación

Un pequeño grupo de los datos recopilados se centra en el desarrollo de proyectos que no solo abordan investigaciones teóricas, sino que también ponen a prueba propuestas concretas relacionadas con la movilidad vial y la tarificación de carreteras. El objetivo es determinar si estos proyectos son sofisticados y eficientes. En este sentido, el trabajo se enfoca en las políticas urbanas

sostenibles para países en desarrollo, explorando la integración del teletrabajo con el transporte y la tarificación de las carreteras. Su investigación se basa en un estudio de caso realizado en la región metropolitana de Bangkok, Tailandia (Dissanayake, 2008).

1.4.1.4 Revisiones de literatura

En la literatura y otros trabajos seleccionados, se presentan diversas propuestas y alternativas que se centran en evaluar la efectividad o las desventajas de los sistemas de tarificación vial. Algunas de estas propuestas demuestran ser altamente efectivas y contribuyen significativamente a la mejora de la congestión vehicular, mientras que otras no logran alcanzar los resultados esperados. Por ejemplo, la revisión de literatura realizada en (Selmoune et al., 2020) destaca que ciudades como Singapur, Londres y Estocolmo han tenido éxito con sus modelos de tarificación vial, especialmente debido a su alto volumen de tráfico vehicular. Sin embargo, en contraste, existen ciudades donde los sistemas de tarificación basados en el aumento del flujo de tráfico no han sido bien recibidos. Esto se debe a la falta de adaptación de las iniciativas a los contextos y necesidades específicas de cada localidad. El estudio menciona varios casos en los que estos modelos fueron rechazados, con base en diferentes argumentos.

Otros estudios, han resaltado la importancia de la democracia y la opinión pública en la toma de decisiones relacionadas con la tarificación vial y el cobro de peajes. Este documento revisa la evidencia recopilada sobre el uso de un referéndum en las ciudades de Estocolmo y Milán, donde se convocó a la población para que expresara su aprobación o desaprobación frente a las tarifas viales (Hensher & Li, 2013).

1.4.1.5 Simposios

El simposio seleccionado para este análisis de vanguardia profundiza en la complejidad de abordar las externalidades asociadas al transporte urbano por carretera, explorando tanto los fundamentos teóricos como las aplicaciones prácticas. Según (Anas & Lindsey, 2011) el transporte urbano por carretera plantea una serie de desafíos multifacéticos, que van desde la congestión vehicular hasta la contaminación ambiental, incluyendo la del aire y el suelo, así como problemas relacionados con el uso excesivo del suelo para estacionamiento y la gestión del drenaje en entornos urbanos. Dentro de este simposio, se analizan detenidamente los efectos de la tarificación vial en la mejora de algunos de estos aspectos, junto con la identificación de áreas donde la eficiencia aún no se ha logrado de manera clara y evidente.

A continuación, se presenta una tabla de clasificación que abarca los distintos tipos de trabajos y artículos seleccionados meticulosamente, junto con una descripción detallada de los temas que serán incorporados en el presente estado del arte. Esta tabla no solo enumera los diferentes tipos de trabajos, sino que también proporciona una síntesis minuciosa de los temas tratados en cada uno de ellos, resaltando su relevancia y contribución al campo de estudio en cuestión.

Tabla 4*Tipo de documento seleccionado y tema de contribución*

Tipo de Investigación o artículo	Tema o aporte
Artículo de investigación	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Modelos de tarificación de carreteras muy transitadas. ▸ Eficiencia de los modelos de tarificación vial. ▸ Efectos positivos y negativos de la tarificación vial. ▸ Confiabilidad en el diseño de diferentes tipos de tarificación vial. ▸ Historia de la tarificación vial en ciudades grandes. ▸ Peaje óptimo y sistemas de cordones viales. ▸ Sostenibilidad y congestión vial. ▸ Métodos y tecnologías para la fijación de precios en la tarificación. ▸ Aceptación pública a partir de los modelos de tarificación y precios. ▸ Cobro justo ▸ Modelos de tarificación para “cuellos de botella”.
Proyecto de Investigación	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Integración del teletrabajo en centros con el transporte y la tarificación de las carreteras.
Estudio de caso	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Optimización de los precios de congestión vehicular. ▸ Modelo de optimización continua no lineal para estimar peajes para tráfico multiclase y multiperiodo. ▸ Aceptabilidad de la tarificación vial. ▸ Eficiencia de los peajes, ventajas y desventajas. ▸ Restricción a partir del “pico y placa”. ▸ Tráfico macroscópico ▸ Esquemas de Tarificación. ▸ Tarificación según contexto vial. ▸ Reducción de los niveles de CO2.
Simposio	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Contaminación derivada de la congestión vial.
Revisión de literatura	<ul style="list-style-type: none"> ▸ Tarificación según el flujo vehicular. ▸ Democracia y opinión pública sobre el tema de la tarificación vial.

2. Resultados

La Tabla 4 exhibe que la mayoría de los artículos e investigaciones se centran en estudios de casos y artículos de investigación, abordando una variedad de temas que van más allá de la movilidad. Además, exploran aspectos políticos, aceptación popular, contaminación por CO₂, eficacia de la tarificación vial en ciudades específicas, ventajas y desventajas, y equidad en la fijación de precios.

A continuación, se expondrán los aspectos más relevantes tratados en los diversos trabajos de investigación seleccionados, así como las variables y temáticas que han respaldado la adopción de diferentes modelos de tarificación vial. Se examinarán las problemáticas abordadas por esta medida, así como las variables que han dificultado la obtención de resultados efectivos.

2.1 Modelos de tarificación vial más comunes en el mundo

Existen distintos modelos de tarificación vial en el mundo; en su mayoría, se busca controlar la congestión vehicular mediante medidas como el cobro de tarifas dinámicas según la hora del día. Esto se realiza con el objetivo de prevenir la formación de largas filas de automóviles y reducir los retrasos en el tiempo de viaje de los conductores. En (Aboudina & Abdulhai, 2017) destacan que la primera implementación moderna de tarificación por congestión ocurrió en Singapur en 1975, mediante un esquema basado en licencias de área. Desde entonces, se han adoptado diversos modelos de tarificación en diferentes regiones del mundo, especialmente en ciudades con altos índices de tráfico.

la investigación de (De Grange et al., 2017) se propone un modelo de tarificación vial analítico que se fundamenta en categorías de tráfico a gran escala para detectar peajes en autopistas altamente congestionadas. Este modelo se apoya en la densidad de enlaces y no en el flujo de estos,

lo que permite capturar con mayor precisión la relación entre el flujo de vehículos y los costos asociados. Los autores también resaltan que el uso de densidades de enlaces ofrece ciertas ventajas respecto al enfoque convencional que se basa en el flujo vehicular. Esta diferencia radica en que la densidad no permanece estática, sino que fluctúa de acuerdo con la velocidad y densidad de los enlaces, lo que proporciona un mayor grado de realismo a las ecuaciones básicas del tráfico.

Por otra parte, en (Fuentes et al., 2022) desarrollan una investigación que se fundamenta en un modelo de optimización continua no lineal, con el propósito de identificar modelos de tráfico multiclase y multiperiodo basados en los costos sociales integrales. Además, señalan que las externalidades del transporte impactan en el bienestar social debido a los tiempos de viaje, daños a la infraestructura, emisiones de gases contaminantes y accidentes de tránsito, provocando consecuencias económicas y sociales. En su revisión literaria resaltan también, que la tarificación vial como medida para financiar redes viales, ha tomado un gran valor en la comunidad académica, y que a su vez muestra una gran capacidad de mitigar la congestión vehicular.

En (Ortúzar et al., 2021) afirman que en varias ciudades del mundo se han desarrollado distintas políticas con el fin de evitar el uso indiscriminado de vehículos particulares mediante un sistema de acordonamiento en las zonas más transitadas, y que el cobro de tarifas por congestión ha demostrado ser uno de los modelos más eficientes alrededor del mundo, obteniendo una reducción del tránsito en las horas en las que normalmente se registraba un elevado flujo vehicular. A través de un estudio de aceptabilidad, lograron establecer que un sistema de cobro tipo cordón, en el cual los usuarios de las vías pagaran por solo ingresar a la zona delimitada sería el modelo de tarificación más aceptable para la ciudad de Santiago de Chile. Es importante destacar de esta investigación que la mayoría de la población expresa su interés en que los recursos recaudados a

partir de esta medida sean debidamente invertidos en la mejora del estado de las vías y en esquemas eficientes de transporte público.

El modelo de cuello de botella es otro de los sistemas utilizados para la tarificación vial; (Hall, 2021) describe este modelo como similar a la teoría hidrodinámica del flujo del tráfico, en donde se busca gestionar las secciones de la carretera donde la capacidad del flujo vehicular se reduce considerablemente, a través de la implementación de peajes con tarifas dinámicas que suelen aumentar en las horas de mayor congestión. Este documento presenta una contribución práctica importante al desarrollar un modelo que permite estimar tanto las consecuencias agregadas como las distribucionales de la tarificación de la congestión.

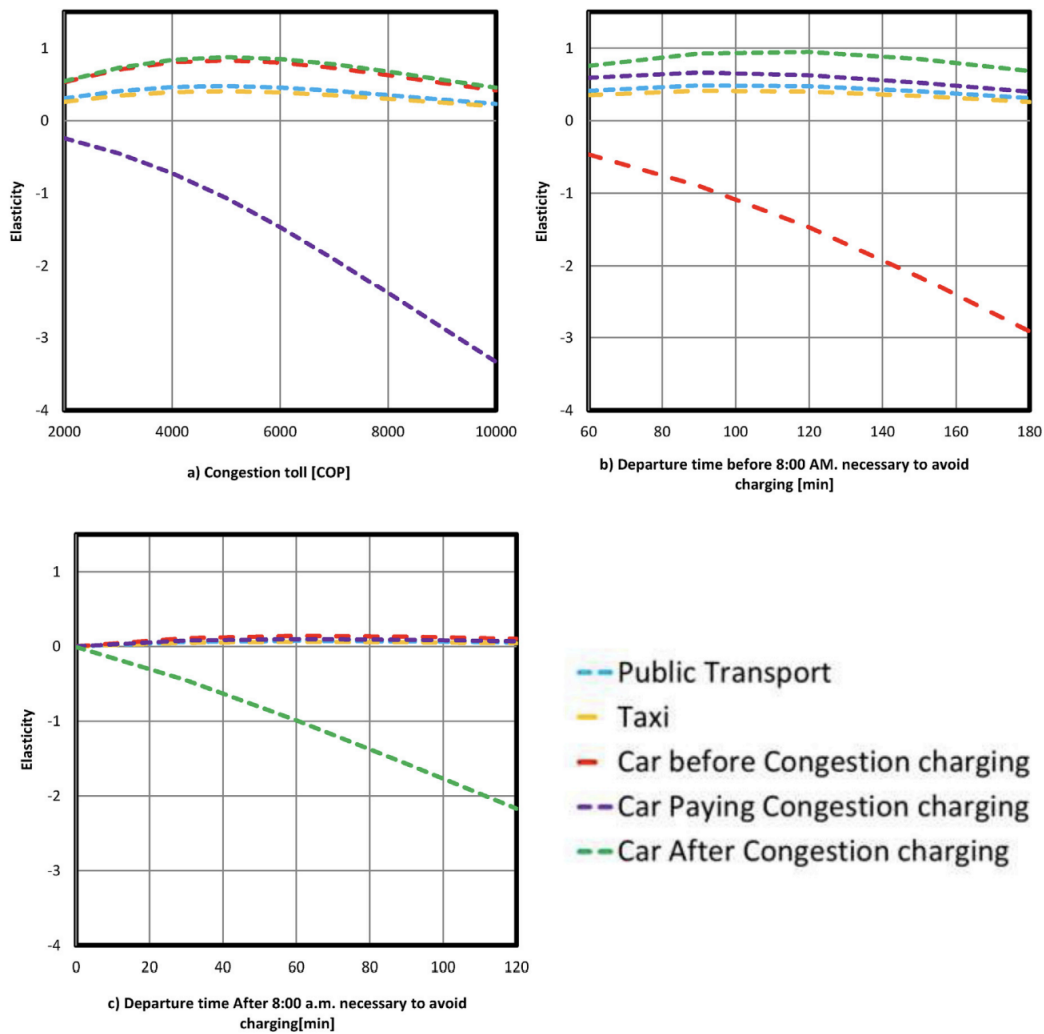
En (Zhu et al., 2018) afirman que, a pesar de ser un factor clave en la preferencia de las decisiones de viaje, la confiabilidad del tiempo de viaje no es una variable que se haya estudiado mucho para el diseño de modelos de tarificación vial. Partiendo del estudio de la confiabilidad en un modelo de cuello de botella, logran obtener resultados tanto analíticos como numéricos. Estos resultados respaldan la idea de que la implementación de un peaje urbano mejora la confiabilidad del tiempo de viaje al reducir la demanda en el sistema vial, lo que a su vez disminuye los retrasos aleatorios en los tiempos de viaje.

Hasta ahora, se han mencionado los modelos más utilizados en las grandes metrópolis del mundo para controlar la congestión vehicular. No obstante, existen otros sistemas que buscan restringir la demanda vehicular, como el implementado en algunas ciudades latinoamericanas como Medellín, Bogotá y Bucaramanga, conocido como "pico y placa". En (Ramos et al., 2017) Se evalúa la transición del modelo de restricción anteriormente mencionado hacia un esquema de tarificación vial en la ciudad de Medellín, Colombia. A través de un modelo de elección híbrido

buscan analizar el impacto que genera implementar un peaje por congestión en los usuarios de las vías. Considerando diferentes planteamientos en cuanto al valor del peaje, horas de instauración de la medida, entre otras políticas, evalúan la elasticidad en la demanda de los viajes, encontrando las variaciones mostradas en la Figura 6.

Figura 6

Variación de la demanda de elasticidad



Nota. Tomado de (Ramos et al., 2017).

A partir del análisis de la demanda realizado en el documento anteriormente mencionado, se puede afirmar que los usuarios muestran una disposición muy baja para mutar a un sistema de transporte público, por el contrario, prefieren continuar utilizando el vehículo particular en horarios alternos a la medida del cobro por congestión e incluso durante la aplicación de la tarifa. Esta conducta permite inferir que la implementación de un sistema de tarifas adecuado puede proveer mayores beneficios que la medida de restricción vehicular “pico y placa”.

2.1.1 Eficiencia y fracaso de medidas de tarificación vial implementadas en el mundo

En diversas ciudades del mundo, se han implementado una variedad de modelos o sistemas de tarificación vial con el objetivo no solo de reducir la congestión en las carreteras, sino también de recaudar fondos para su mantenimiento y mitigar los niveles de contaminación vehicular, entre otras razones. Algunos de estos modelos han tenido éxito y siguen en operación o han experimentado mejoras continuas. Sin embargo, otros intentos han fracasado, sin lograr resolver el problema de la congestión vehicular por diversas razones.

En (Ison, 2017) narran que, en la década de 1990 en el condado de Cambridgeshire, se consideró un plan para cobrar a los conductores de vehículos mediante un sistema de tarificación de la congestión. Sin embargo, el plan fracasó debido a varias causas, entre ellas el interés del gobierno en preservar los centros históricos, lo que llevó a dirigir los proyectos de vivienda hacia las afueras del condado. Esto resultó en que las personas tuvieran que desplazarse en automóvil hacia la ciudad para ir a trabajar o estudiar, lo que generó caos vehicular y largas congestiones. En el caso de esta ciudad se implementaron rápidamente una serie de modelos tecnológicos. Los vehículos debían llevar una tarjeta para transitar y, además, se instalaron sistemas de cámaras que registraban el paso de los vehículos. Esto permitió a las autoridades tomar medidas contra los

infractores. A pesar de los avances que presentaba este sistema, resultó ser un fracaso debido al descontento de la población y al hecho de que los fondos recaudados no cubrían los costos de mantenimiento de las carreteras ni la adquisición de nuevas tecnologías necesarias para implementar este modelo. La siguiente imagen muestra una de las tecnologías que se implementaron para tal fin:

Figura 7

Tecnologías implementadas para el cobro de tarificación vial en el condado de Cambridgeshire, Inglaterra



Nota. Tomado de (Ison, 2017).

Por otra parte, en (Zefreh et al., 2021) llevaron a cabo un estudio sobre un sistema implementado en Budapest (Hungría), en el que se evaluaron tanto el contexto dentro como fuera del área de tarifas, así como los ingresos generados por estos sistemas. Los resultados mostraron

que el modelo basado en el tiempo fue más efectivo en términos de fijación de precios. Sin embargo, este modelo provocó congestiones significativas en las carreteras no sujetas a tarifas, lo que resultó en mayores tiempos y retrasos en los viajes, así como en emisiones de CO₂, lo que contrarrestó sus objetivos.

El modelo de cobro por congestión ha demostrado ser altamente eficiente y ha arrojado resultados sobresalientes en diversas regiones del mundo, como lo señalan en (Aboudina & Abdulhai, 2017). La mayoría de los expertos en el tema sostienen que el cobro por congestión es la iniciativa más adecuada para abordar los problemas asociados con las externalidades del transporte. Argumentan que al hacer que los usuarios paguen por las externalidades que generan, se les incentiva a cambiar ciertos comportamientos o acciones que contribuyen a la congestión vehicular en un corto plazo.

En Estocolmo, se implementó un modelo conocido como "Red Estática", el cual se consideraba que sobreestimaba las velocidades y las mejoras relativas de velocidad. Las pruebas demostraron que este enfoque hacía que las medidas de evaluación globales, como el excedente social agregado, fueran insuficientes y engañosas. Este sistema mostró limitaciones en la predicción de los tiempos de viaje y problemas, excepto en "Lidingo", lo que resultó en un aumento de los costos operativos. Estas experiencias proporcionaron lecciones importantes, como la necesidad de considerar el tipo de vías, la geografía de la ciudad y el contexto vial al implementar medidas similares, y ajustar los sistemas en consecuencia (Eliasson, 2008).

Respecto al peaje conjunto óptimo de distancia y tiempo basado en cordones, en (Liu et al., 2014) explican que este modelo cobra tanto por tiempo como por distancia de manera no lineal en un cordón de tarificación para cada usuario, asumiendo que el comportamiento de elección de ruta

de cada usuario sigue un equilibrio estocástico basado en un Logit. Consideran que este tipo de estructura de precios no es equitativa, ya que cobra menos de lo necesario a los automóviles que realizan viajes largos dentro de un cordón, limitando a los usuarios cuyos viajes son cortos. Esta metodología aborda el diseño óptimo de peajes para fijar precios de congestión basados en cordones; no obstante, presenta algunas limitaciones, como la falta de reducción efectiva de la congestión o la posibilidad de que los conductores elijan rutas más cortas para evitar los peajes.

Lo anterior entra en discordancia con lo expuesto en (Yang et al., 2010), ya que sus autores sostienen que el principal objetivo de la tarificación vial en las carreteras es establecer un patrón de distribución de flujo óptimo para minimizar el tiempo total de viaje. Esto se logra al cobrar un valor a los usuarios por utilizar enlaces congestionados de la red, lo que permite a los conductores darse cuenta de que los problemas de congestión dependen de sus prácticas en la carretera.

La tarificación vial ha sido implementada en ciudades con grandes flujos vehiculares como Singapur, Londres, Milán y Estocolmo, generando mejoras significativas en materia de movilidad. Sin embargo, la literatura estudiada afirma que obtener beneficios a partir de la tarificación vial está estrechamente relacionado con un diseño óptimo y un análisis exhaustivo de los diversos parámetros que involucra esta medida. Esto se debe a que muchos de estos sistemas muestran variaciones en sus resultados dependiendo de las ciudades donde se implementen, así como de los aspectos o acciones específicas aplicadas en cada caso.

2.2 Aceptación pública a partir de los modelos de tarificación y precios

Se menciona anteriormente que existen modelos que han demostrado una eficiencia y aceptabilidad significativas debido a los resultados evidenciados. Además, que los resultados óptimos de cada modelo propuesto a través de la tarificación de precios dependen del contexto de

cada sitio. De esta manera, en las grandes metrópolis del mundo donde el caos vehicular ha disminuido mediante estas iniciativas, existe una mayor aceptación por parte de los usuarios que transitan dichas vías. Esto se debe a que se refleja un mejoramiento en los tiempos de salida y llegada en los viajes, así como un control de la congestión vehicular.

Por otra parte, existen ciudades o poblaciones donde se han intentado implementar sistemas de tarificación que no logran ser aceptados por los usuarios. Esto sucede por diversas razones que van desde las tarifas cobradas y diseños poco viables, hasta incluso problemáticas que se desencadenan a partir de la implementación del sistema.

A continuación, se exponen algunos de los principales casos en los que ciertos modelos de tarificación vial no han sido bien recibidos por la población, lo que ha conducido a la implementación de distintos métodos de participación pública donde se considera la opinión individual al momento de decidir si es apropiado implementar este sistema.

En (Grisolía et al., 2015) consideran que el sistema de tarificación vial es una política necesaria e imprescindible en un gran número de ciudades del mundo. Sin embargo, la aceptación de las personas respecto al tema es crucial antes de su implementación, así como comprender las razones por las cuales puede ser aceptable o no. En su estudio en Las Palmas de Gran Canaria, España, donde el gobierno propuso iniciativas de mejora para la movilidad, como la implementación de la tarificación vial para reducir las emisiones de CO₂, los autores realizaron una encuesta para evaluar el grado de aceptación de los conductores hacia las medidas propuestas. Algunos estuvieron de acuerdo, mencionando que apoyaban la cuestión siempre y cuando se hiciera un uso eficiente de los fondos recaudados. Otros expresaron preocupación por los precios, que podrían perjudicar a quienes no tenían ingresos suficientes para sobrevivir, mientras que un

grupo mencionó su inconformidad con la privatización de espacios públicos, donde las personas con más recursos económicos disfrutaban de estos privilegios, mientras que otros no tenían acceso. También se argumentó que la medida era innecesaria, dado que Las Palmas no es una ciudad muy grande, y la implementación limitaría los pocos lugares a los que la población tendría libertad para transitar.

En el documento anteriormente mencionado se proponen estudios de aceptación que resultan ser muy oportunos para medir la aprobación de la tarificación vial, analizando variables que van desde el aspecto económico hasta el ámbito social. Por otra parte, a partir de su investigación, logran validar que las tarifas por congestión suelen ser políticas impopulares en ciudades medianas y con niveles moderados de congestión.

En otro documento se analiza el respaldo electoral a las tarifas por congestión, centrándose en la revisión de la historia de los referéndums llevados a cabo en diversas partes del mundo para conocer la opinión de los ciudadanos sobre dichas tarifas. En el documento se exploran diferentes variables y comportamientos de los votantes, como la percepción de equidad, las opiniones sobre la medida y su impacto ambiental, entre otros aspectos. Se argumenta que la inclusión de un referéndum para recabar la opinión de los votantes es un ejercicio de democracia directa. Por ejemplo, se menciona el referéndum realizado en la ciudad de Edimburgo, donde se propuso un plan de cobro por cordones que debía implementarse en 2006. Bajo este plan, los usuarios debían pagar una tarifa de 2 libras por cruzar cualquiera de los cordones. Sin embargo, el 75% de los votantes rechazaron esta medida, argumentando que los esquemas de cordones eran demasiado complicados y dificultaban la comprensión clara de los planes propuestos. Meses después, una

encuesta reveló la confusión y el desconocimiento por parte de los usuarios sobre el funcionamiento de esta medida y los precios a pagar (Hensher & Li, 2013).

Diversos son los motivos por los cuales en ciertas ciudades puede ser rechazada una iniciativa similar, ya que no solo se enfoca en los contextos de movilidad, sino que también, en ocasiones, llega a afectar en gran medida el ritmo de vida de las personas o generar más problemas que soluciones. En una revisión de literatura sobre los factores que influyen en la aceptabilidad de los precios de congestión, los autores del documento afirman que muchos países tratan de implementar sistemas donde las personas no se vean afectadas y que consideran qué factores de tipo político y público se pueden incluir en estas medidas para lograr que los conductores acepten estas iniciativas. Además, mencionan que con el crecimiento demográfico de las ciudades, también se hace necesaria la construcción y ampliación de carreteras. Sin embargo, al mismo tiempo, se aumentan los niveles de contaminación y de congestión vehicular en las vías, y se pierden grandes cantidades de combustible en los embotellamientos, causando no solo más gastos para los conductores, sino también el debilitamiento de las carreteras y las altas emisiones de dióxido de carbono en el aire (Selmoune et al., 2020).

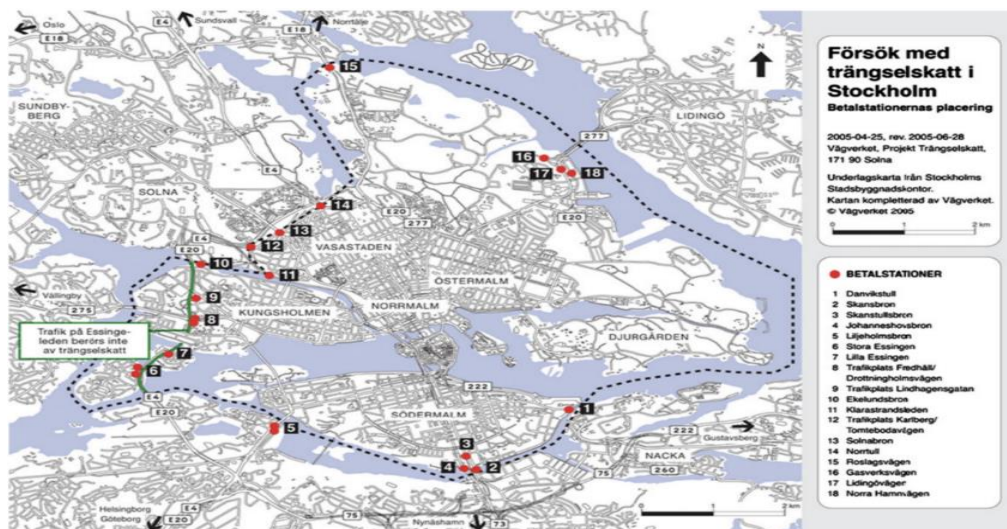
En ese estudio, también se examinan las medidas de tarificación vial implementadas en ciudades como Londres, Estocolmo, Singapur, Edimburgo, Nueva York, Noruega, Hong Kong y Milán. Entre los hallazgos destacados sobre los factores que influyen en la aceptación de la tarificación vial, se resalta la importancia de llevar a cabo una sólida campaña educativa como la ofrecida en la ciudad de Nueva York. Esta campaña permitiría que la población comprenda las mejoras que se pueden lograr y tome conciencia de los costos marginales asociados a la movilidad.

Como se ha observado en algunas situaciones en las que los ciudadanos no aceptan ciertos esquemas de tarificación vial, la falta de conocimiento y la ausencia de información clara generan confusiones que llevan a interpretaciones erróneas sobre el significado de estas iniciativas. Sin embargo, según (Hensher & Li, 2013) no todos los referéndums realizados con este propósito han arrojado resultados negativos. Por ejemplo, en el caso de Estocolmo, se llevó a cabo una votación para evaluar la aceptación del cobro por congestión. Durante el período de prueba de este sistema, los ciudadanos experimentaron notables mejoras y beneficios significativos, como una mayor confiabilidad en los tiempos de viaje y una mejor calidad del aire. Como resultado, el modelo fue aprobado con un 52% de apoyo.

En la Figura 8 se pueden apreciar los 18 puntos de control de pagos que se establecieron en Estocolmo con la finalidad de establecer la tarificación de la zona céntrica del territorio.

Figura 8

Puntos de control para tarificación en la zona céntrica de la ciudad de Estocolmo



Nota. Tomado de (Hensher & Li, 2013).

En (Rentziou et al., 2011) señalan que la región de residencia desempeña un papel importante en la aceptabilidad pública de la tarificación por congestión. Por ejemplo, los no residentes en el estado de Florida pueden aceptar los precios de congestión, mientras que los residentes locales tienen una opinión diferente. Sin embargo, en ciudades como Nueva York y Estocolmo, los residentes del centro de la ciudad están a favor de estos precios. Además, se observa que las personas mayores, es decir, aquellas de 60 años en adelante, rara vez están de acuerdo con las iniciativas de tarificación vial. Por otro lado, los usuarios que perciben mayores impactos en el medio ambiente y la calidad del aire suelen respaldar estas iniciativas. Otro factor que influye en la aceptación de esta medida es la asignación de los ingresos obtenidos de las tarifas de congestión, especialmente cuando se utilizan para reducir los impuestos sobre los automóviles y mejorar la equidad.

Finalmente, en (Hensher & Bliemer, 2014) se sostiene a partir de su investigación, que el mayor obstáculo para la reforma de los precios en las carreteras es el compromiso político. Cuando los usuarios se oponen a los pagos requeridos o a su aumento para este propósito, resulta difícil implementar iniciativas. Señalan que los gobiernos suelen ser responsabilizados constantemente por la congestión en las vías, y se exige la ampliación de las carreteras sin considerar que esto implica mantenimiento constante y altos costos. Sin embargo, no hay suficiente conciencia sobre cómo estas reformas pueden mejorar significativamente los problemas derivados de la congestión vehicular. Gran parte de estas dificultades surgen de las conductas de los conductores, quienes necesitan una mayor concienciación sobre el uso de las vías y el impacto de los horarios de viaje en estas cuestiones.

A partir de lo anterior, se presentan diversas alternativas de tarificación por congestión que permiten recaudar fondos de manera equitativa. Estos fondos son destinados al mantenimiento de las vías, la gestión de obras, la reducción de los retrasos en los viajes y la promoción de la descongestión de las carreteras. La clave para lograr la aceptación de estas políticas por parte de la población radica en brindar información clara y precisa sobre los modelos a implementar, lo cual contribuirá a mejorar las condiciones de movilidad para todos los usuarios de las vías.

2.3 Reducción en los niveles de CO₂ a partir de los modelos de tarificación vial implementados

La mayoría de los estudios seleccionados destacan la eficacia de los modelos de tarificación por congestión vehicular, la aceptación de los usuarios hacia estas medidas, el fracaso de algunos sistemas implementados en diferentes ciudades del mundo, así como la importancia de estas iniciativas para mejorar las vías y reducir la congestión vial. Sin embargo, a pesar de que el tema del medio ambiente es una de las principales razones citadas por los gobiernos para implementar estos sistemas y reducir los efectos de la contaminación causada por los gases emitidos por los automóviles, no se abordan ampliamente los efectos de esta reducción en los niveles de contaminación del aire. A continuación, se presentan algunos de los estudios seleccionados que abordan este tema, considerando que una de las principales motivaciones detrás de estos modelos de descongestión vehicular es precisamente la reducción de los niveles de dióxido de carbono.

En (Ramos et al., 2017) señalan que, en ciudades como Santiago de Chile, los vehículos sin convertidor catalítico han experimentado restricciones en ciertas épocas del año con el fin de reducir los niveles de contaminación del aire por dióxido de carbono. Del mismo modo, medidas como las implementadas en varias ciudades de América Latina mediante el sistema de restricción

vehicular por placa, mencionado anteriormente, también buscan reducir la cantidad de vehículos circulantes para mejorar la calidad del aire.

En ciudades con un crecimiento demográfico constante, la reducción de la contaminación ambiental se ha vuelto imperativa debido al aumento de los flujos vehiculares, que son una de las principales causas de este tipo de contaminación. Esto genera problemas de salud para la población y una calidad deficiente del aire. En (Muñoz Pérez et al., 2021) señalan que algunas ciudades del mundo han experimentado un incremento excesivo de vehículos, lo que ha provocado congestión en las vías y una contaminación atmosférica casi insostenible.

Finalmente, en un simposio sobre transporte y medio ambiente, abordan los desafíos que enfrenta el transporte urbano por carretera, incluida la contaminación del agua, las vibraciones y la intrusión visual. Los altos consumos de combustible y la dependencia del petróleo para estos fines contribuyen a las elevadas emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de vehículos motorizados tanto privados como públicos a nivel mundial. En este sentido, destacan la necesidad de establecer tarifas fijas por el uso de vehículos y de implementar regulaciones para abordar la congestión vial (Anas & Lindsey, 2011).

Desde esta perspectiva, resulta inevitable no considerar estrategias de tarificación vial en áreas que enfrentan las problemáticas anteriormente mencionadas. Asumir los costos de congestión y las externalidades asociadas al transporte por carretera contribuye a concientizar a los usuarios viales sobre la importancia y eficacia que puede ofrecer esta política de gestión de movilidad urbana.

2.4 La Tarifación vial frente a escenarios de congestión vehicular

Desde los anteriores parámetros descritos en el presente estado del arte, se refleja que la mayoría de las iniciativas relacionadas con modelos de tarifación vial se fundamentan en la importancia de reducir los niveles de congestión vehicular, especialmente en ciudades con una alta densidad poblacional, lo que implica también un gran número de vehículos que circulan por las carreteras.

Sin embargo, se evidencia también que no todos los modelos de tarifación vial se pueden aplicar en todos los territorios, ya que como se describe en (Selmoune et al., 2020) y (Hensher & Li, 2013) las condiciones de cada ciudad y los niveles de congestión vehicular que enfrente la población en cuestión, serán parámetros vitales en el desarrollo de un modelo de tarifación óptimo.

Algunos de los aportes en materia de reducción de la congestión vehicular que se tienen a partir de la documentación seleccionada son:

- (Eliasson, 2008) afirma que la aplicación de la tarifación vial en Estocolmo logro reducir el volumen de tráfico, disminuyendo a su vez las problemáticas de congestión en la ciudad

- (Hensher & Bliemer, 2014) encuentran que la tarifación vial puede ayudar a reducir la congestión del tráfico al incentivar a los conductores a trasladarse en horarios de menor actividad o emplear modos de transporte alternativos.

- (de Palma & Lindsey, 2011) aseguran que la implementación de tarifas de congestión puede ayudar a internalizar los costos de la congestión del tráfico y reducir las

externalidades negativas. Esto puede derivar en la reducción del uso de vehículo particular, reduciendo así los altos volúmenes de tráfico y la congestión vehicular.

- (Ortúzar, 2019) concluye que gestionar la demanda reduciendo el flujo de vehículos en las calles de la ciudad es la solución más eficiente para la congestión urbana y que esto se puede lograr mediante la tarificación de carreteras.

- (Lindsey, 2012) sostiene que la tarificación vial basada en principios de costes sociales marginales puede ayudar a cubrir los costes de la infraestructura viaria y controlar la congestión vehicular.

- (Anas & Lindsey, 2011) respaldan que la tarificación vial tiene el potencial de gestionar la congestión de una manera económicamente eficiente, especialmente teniendo en cuenta el aumento de los kilómetros recorridos por los vehículos.

En general, la tarificación vial, cuando se aplica de manera eficaz, puede contribuir a reducir la congestión de los vehículos al incentivar los modos de transporte alternativos y gestionar los volúmenes de tráfico (Viegas, 2001).

El diseño eficiente de un sistema de tarifas viales, acompañado de campañas de concientización y una interacción directa con los usuarios de las vías al evaluar las diversas variables asociadas a esta medida, puede contribuir de manera significativa a la reducción de la congestión vehicular.

3. Conclusiones

El presente análisis investigativo en comparación con los frecuentes trabajos de revisión literaria encontrados en las diferentes bases de datos académicas ha tenido lugar a través de un menor número de estudios acerca de la tarificación vial. Pese a eso, las referencias abordadas en el presente estado del arte suministran aportes significativos en materia de la eficiencia de la tarificación vial frente a la problemática de la congestión vehicular.

La brecha social, económica y cultural, que existe entre las ciudades en las que se han implementado medidas de tarificación vial y las consideradas como grandes metrópolis latinoamericanas, desempeñan un papel importante a la hora de evaluar la eficacia de las tarifas viales en estos territorios. Como se pudo observar en el análisis de los artículos estudiados, la identificación de las variables particulares de cada territorio y la integración de las políticas de tarificación de carreteras, son instancias cruciales que permitirán obtener resultados eficaces en las poblaciones donde se quiera instaurar esta medida.

La singularidad de las ciudades medianas y pequeñas, la falta de alternativas de movilidad, los niveles de congestión en función de la hora del día, la definición de la tarifa del peaje y la inversión tangible de los recursos recaudados a partir de estrategias de tarificación, son algunos de los parámetros más sensibles en la implementación de estas políticas en América Latina. Es importante destacar que, a partir del estudio realizado en el presente estado del arte, se logra precisar que la implementación de la tarificación vial en ciudades latinoamericanas debe estar acompañada de un fuerte vínculo con las entidades públicas y actores políticos pertinentes. Esto

se debe a que, a través de mecanismos de participación pública, actividades de socialización de la medida y un equitativo manejo de los recursos, se puede obtener una aceptación social significativa que contribuya con el buen desempeño de la tarificación.

Indudablemente la tarificación vial como estrategia de mitigación de la congestión vehicular, es una de las alternativas más llamativas a escala mundial. Las contribuciones palpables que presenta esta medida en función de las experiencias que se tienen en distintas partes del mundo, han llevado a los investigadores a estimar modelos de tarificación cada vez más rigurosos. Los sistemas de tarificación más innovadores, respaldados por tecnologías futuristas, son un tema poco evaluado en este documento. Sin embargo, se anticipa que la investigación sobre estos nuevos enfoques contribuirá positivamente al desarrollo de futuras políticas de tarificación vehicular. Además, se aclara que los resultados obtenidos están estrechamente ligados a la metodología empleada, y existe la posibilidad de que se omitan ciertos documentos relevantes debido a las restricciones de selección y al uso exclusivo de una base de datos (Scopus).

La actual evaluación de la literatura proporciona información relevante que puede servir como base para futuros estudios sobre la tarificación vial en América Latina. Considerando que esta estrategia de gestión de la movilidad podría implementarse en esta región del continente americano en un futuro cercano.

Referencias Bibliográficas

- Aboudina, A., & Abdulhai, B. (2017). A bi-level distributed approach for optimizing time-dependent congestion pricing in large networks: A simulation-based case study in the Greater Toronto Area. En *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* (Vol. 85, pp. 684-710). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.10.004>
- Anas, A., & Lindsey, R. (2011). Reducing urban road transportation externalities: Road pricing in theory and in practice. En *Review of Environmental Economics and Policy* (Vol. 5, Número 1, pp. 66-88). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/reep/req019>
- Basso, L. J., Guevara, C. A., Gschwender, A., & Fuster, M. (2011). Congestion pricing, transit subsidies and dedicated bus lanes: Efficient and practical solutions to congestion. *Transport Policy*, 18(5), 676-684. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.01.002>
- De Grange, L., Troncoso, R., & González, F. (2017). A Road Pricing Model for Congested Highways Based on Link Densities. En *Journal of Advanced Transportation* (Vol. 2017). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2017/3127398>
- de Palma, A., & Lindsey, R. (2011). Traffic congestion pricing methodologies and technologies. En *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* (Vol. 19, Número 6, pp. 1377-1399). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.02.010>
- Dissanayake, D. (2008). Sustainable urban policies for developing countries by integrating center-based telecommuting with transit and road pricing case study of Bangkok, Thailand, metropolitan region. En *Transportation Research Record* (Número 2067, pp. 137-145). National Research Council. <https://doi.org/10.3141/2067-16>

- Ekström, J., Kristoffersson, I., & Quttineh, N.-H. (2016). Surrogate-based optimization of cordon toll levels in congested traffic networks. En *Journal of Advanced Transportation* (Vol. 50, Número 6, pp. 1008-1033). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/atr.1386>
- Eliasson, J. (2008). Lessons from the Stockholm congestion charging trial. *Transport Policy*, 15(6), 395-404. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2008.12.004>
- Fuentes, R., Cantillo, V., & López-Ospina, H. (2022). A road pricing model involving social costs and infrastructure financing policies. En *Applied Mathematical Modelling* (Vol. 105, pp. 729-750). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.01.013>
- Grisolía, J. M., López, F., & Ortúzar, J. de D. (2015). Increasing the acceptability of a congestion charging scheme. En *Transport Policy* (Vol. 39, pp. 37-47). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.01.003>
- Hall, J. D. (2021). Can Tolling Help Everyone? Estimating the Aggregate and Distributional Consequences of Congestion Pricing. En *Journal of the European Economic Association* (Vol. 19, Número 1, pp. 441-474). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/jeea/jvz082>
- Hensher, D. A., & Bliemer, M. C. J. (2014). What type of road pricing scheme might appeal to politicians? Viewpoints on the challenge in gaining the citizen and public servant vote by staging reform. En *Transportation Research Part A: Policy and Practice* (Vol. 61, pp. 227-237). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.02.017>
- Hensher, D. A., & Li, Z. (2013). Referendum voting in road pricing reform: A review of the evidence. En *Transport Policy* (Vol. 25, pp. 186-197). <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.11.012>

- Hsieh, H.-S. (2022). Road pricing acceptability and persuasive communication effectiveness. *Transport Policy*, 125, 179-191. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.05.004>
- Ison, S. (2017). Road user charging: Issues and policies. En *Road User Charging: Issues and Policies*. Taylor and Francis. <https://doi.org/10.4324/9781351149884>
- Lindsey, R. (2012). Road pricing and investment. En *Economics of Transportation* (Vol. 1, Números 1-2, pp. 49-63). <https://doi.org/10.1016/j.ecotra.2012.07.001>
- Liu, Z., Wang, S., & Meng, Q. (2014). Optimal joint distance and time toll for cordon-based congestion pricing. En *Transportation Research Part B: Methodological* (Vol. 69, pp. 81-97). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.08.005>
- Medina, C. A., & Vélez, C. E. (2011). *Agglomeración económica y congestión vial: Los perjuicios por racionamiento del tráfico vehicular*. Banco de la República. <https://doi.org/10.32468/be.678>
- Muñoz Pérez, S., Salcedo Reátegui, J., & Sotomayor Mendoza, A. (2021). Contaminación ambiental producida por el tránsito vehicular y sus efectos en la salud humana: Revisión de literatura. *INVENTUM*, 16(30), 20-30. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.16.30.2021.20-30>
- Olszewski, P., & Xie, L. (2005). Modelling the effects of road pricing on traffic in Singapore. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 39(7), 755-772. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.02.015>
- Ortúzar, J. de D. (2019). Sustainable Urban Mobility: What Can Be Done to Achieve It? En *Journal of the Indian Institute of Science* (Vol. 99, Número 4, pp. 683-693). Springer. <https://doi.org/10.1007/s41745-019-00130-y>

- Ortúzar, J. de D., Bascuñán, R., Rizzi, L. I., & Salata, A. (2021). Assessing the potential acceptability of road pricing in Santiago. En *Transportation Research Part A: Policy and Practice* (Vol. 144, pp. 153-169). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.12.007>
- Ramos, R., Cantillo, V., Arellana, J., & Sarmiento, I. (2017). From restricting the use of cars by license plate numbers to congestion charging: Analysis for Medellin, Colombia. En *Transport Policy* (Vol. 60, pp. 119-130). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.09.012>
- Rentziou, A., Milioti, C., Gkritza, K., & Karlaftis, M. G. (2011). Urban road pricing: Modeling public acceptance. En *Journal of Urban Planning and Development* (Vol. 137, Número 1, pp. 56-64). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000041](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000041)
- Selmoune, A., Cheng, Q., Wang, L., & Liu, Z. (2020). Influencing Factors in Congestion Pricing Acceptability: A Literature Review. En *Journal of Advanced Transportation* (Vol. 2020). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2020/4242964>
- Van den Berg, V., & Verhoef, E. T. (2011). Winning or losing from dynamic bottleneck congestion pricing?. The distributional effects of road pricing with heterogeneity in values of time and schedule delay. En *Journal of Public Economics* (Vol. 95, Números 7-8, pp. 983-992). <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2010.12.003>
- Viegas, J. M. (2001). Making urban road pricing acceptable and effective: Searching for quality and equity in urban mobility. *Transport Policy*, 8(4), 289-294. [https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(01\)00024-5](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(01)00024-5)

- Vonk Noordegraaf, D., Annema, J. A., & van Wee, B. (2014). Policy implementation lessons from six road pricing cases. En *Transportation Research Part A: Policy and Practice* (Vol. 59, pp. 172-191). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.11.003>
- Yang, H., Xu, W., He, B., & Meng, Q. (2010). Road pricing for congestion control with unknown demand and cost functions. En *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* (Vol. 18, Número 2, pp. 157-175). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2009.05.009>
- Zefreh, M. M., Esztergar-Kiss, D., & Torok, A. (2021). Implications of different road pricing schemes in urban areas: A case study for Budapest. En *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport* (Vol. 174, Número 7, pp. 407-418). ICE Publishing. <https://doi.org/10.1680/jtran.19.00094>
- Zhu, S., Jiang, G., & Lo, H. K. (2018). Capturing value of reliability through road pricing in congested traffic under uncertainty. En *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* (Vol. 94, pp. 236-249). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.08.016>