



**Propuesta de Actualización al Impuesto Vehicular en Antioquia Basada en
Emisiones de CO_2**

Estefanía Hernández Arroyave

Monografía presentada para optar al título de Economista

Asesor

Carlos Andrés Vasco Correa

Universidad de Antioquia
Facultad de Ciencias Económicas
Departamento de Economía
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	(Hernández Arroyave, 2023)
Referencia	Hernández Arroyave, E. (2023). <i>Propuesta de Actualización al Impuesto Vehicular en Antioquia Basada en Emisiones de CO₂</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano: Jair Albeiro Osorio Agudelo.

Jefe departamento: Ramón Javier Mesa Callejas.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Resumen

En el presente trabajo se analiza la viabilidad de modificar el impuesto automotor en Antioquia, basado en las emisiones de tCO_2eq por kilómetro en lugar del valor del vehículo. Actualmente, las tarifas en Colombia no logran una contribución ambiental significativa y están por debajo de los rangos recomendados a nivel internacional. Utilizando simulaciones Monte Carlo, el estudio compara el recaudo actual con el que se alcanzaría bajo el esquema propuesto donde bajo diferentes escenarios, se evidencia que un ajuste en la tarifa de tCO_2eq podría aumentar significativamente los ingresos fiscales, promover la adopción de tecnologías más limpias y reducir el impacto ambiental del parque automotor. Se concluye que un impuesto más alineado con los precios internacionales del carbono incentivaría el uso de vehículos sostenibles y fortalecería la infraestructura de carga vehicular. La propuesta combina el compromiso ambiental con la efectividad fiscal, dada la importancia de políticas que estén alineadas con la acción climática en la región.

Palabras clave: Impuesto vehicular, Emisiones de tCO_2eq , Recaudo fiscal, Impuesto al carbono

Clasificación JEL: H23, R48, Q58

Abstract

This study examines the feasibility of reforming the vehicle tax in Antioquia by shifting its basis from the vehicle's value to emissions of tCO_2eq per kilometer. Currently, tax rates in Colombia fail to provide significant environmental benefits and fall below internationally recommended thresholds. Using Monte Carlo simulations, the analysis compares current tax revenues with those projected under the proposed scheme. The results demonstrate that adjusting the tCO_2eq rate could significantly increase fiscal revenues, encourage the adoption of cleaner technologies, and reduce the environmental impact of the vehicle fleet. The findings suggest that a tax more closely aligned with international carbon pricing would incentivize the use of sustainable vehicles and enhance charging infrastructure. This proposal integrates environmental responsibility with fiscal efficiency, emphasizing the importance of policies aligned with regional climate action objectives.

Keywords: Vehicle tax, tCO_2eq emissions, Fiscal revenue, Carbon tax

JEL Classification: H23, R48, Q58

1 Introducción

Desde hace décadas, las problemáticas ambientales han sido objeto de discusión debido al deterioro prolongado de los ecosistemas, afectados por el aumento demográfico y el desarrollo económico. Los bosques desempeñan importantes funciones, como moderar la temperatura y capturar gases contaminantes, han sido talados para permitir el desarrollo urbano y diversas actividades comerciales. Este cambio ha incrementado el consumo energético de hidrocarburos fósiles, como el petróleo y el carbón, que, al ser utilizados en motores o procesos industriales, emiten gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O) y finas partículas que contaminan el aire y afectan la salud pública (Kolstad, 2001).

A nivel internacional, algunos países han adoptado regulaciones para mitigar las emisiones. Reino Unido, por ejemplo, le precede una larga historia de problemas relacionados con la calidad del aire, en especial después de la gran niebla tóxica de 1952¹. Una espesa niebla en la ciudad de Londres, debido al uso excesivo del carbón, causó enfermedades respiratorias e incluso la muerte de más de 3000 ciudadanos. La magnitud de este evento fue tal que llevó a la reglamentación de la Ley de Aire Limpio en 1956, la cual restringió la emisión de humos incómodos u opacos y estableció que los nuevos hornos no liberarán ningún humo (Blakemore Erin, 2022).

Las regulaciones ambientales de los gases contaminantes son motivo de gran preocupación, no exclusivamente por las fuentes fijas, sino también por las fuentes móviles. En el caso de los vehículos, dado el uso de combustibles derivados del petróleo, ha sido de interés su regulación debido a las externalidades negativas que generan. Generalmente, en las ciudades, los habitantes deben tolerar una considerable pérdida de tiempo por la congestión, el alto riesgo de accidentalidad y la falta de aire limpio, debido al uso de los vehículos públicos y privados, que reducen el bienestar social, incluso de quienes no usan transporte vehicular (Kolstad, 2001).

Por consiguiente, países como Noruega, Suiza y otros, llevan varios años buscando la mitigación y la disminución de los contaminantes producidos por los vehículos mediante diferentes mecanismos de política, tales como impuestos, etiquetado ambiental, subsidios

¹La niebla tóxica se dio por el humo de las hogueras de carbón y el fenómeno meteorológico conocido como inversión térmica. Este atrapó las emisiones de las hogueras de la ciudad, envolviendo una niebla de dióxido de carbono, dióxido de azufre y ácido sulfúrico, que llegó a convertirse incluso en lluvia ácida (Blakemore Erin, 2022).

para modificar las preferencias de los consumidores y la promoción de la responsabilidad ambiental (Alberini & Bareit, 2019; Ciccone, 2018; Yan & Eskeland, 2018). También, países en desarrollo como Ecuador, llevan desde el 2011 desarrollando políticas para desincentivar el uso y la compra de vehículos con altas emisiones contaminantes (Bajaña & Torres, 2019). Estos mecanismos han mostrado resultados positivos en la disminución de emisiones de gases contaminantes y en que los consumidores prefieran vehículos más sostenibles; sin embargo, no se atribuye que estos impuestos reduzcan las ventas del sector automotor.

En Colombia, regular las emisiones contaminantes es particularmente relevante en la capital de Antioquia, Medellín, y el Valle de Aburrá, que experimenta frecuentes temporadas de alta contaminación del aire. Este problema se debe al fenómeno de inversión térmica, que evita que el aire contaminado salga de la ciudad y genere condiciones de riesgo en la salud de la población. Este fenómeno se da por diferentes factores; entre estos se destaca el uso de combustibles fósiles, que representa una parte del inventario de emisiones. Las fuentes móviles, como los vehículos, representan el 82 % del material particulado² (PM2.5), siendo los camiones y volquetas las principales fuentes de contaminación con un 61 % del total de PM2.5 del Valle de Aburrá, seguidos de los buses, que emiten un 29 %, y las motos y los autos particulares, con un 3 % (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, s.f.). Las características topográficas y climatológicas del Valle de Aburrá exacerban este problema, resaltando la necesidad de implementar políticas que desincentiven el uso de vehículos con altas emisiones y promuevan tecnologías más limpias.

El gobierno colombiano, por medio de la Ley 488 de 1998 estableció un impuesto sobre los vehículos automotores, el cual es declarado y pagado a los departamentos por los contribuyentes propietarios de vehículos. La distribución del recaudo asigna un 80 % a los departamentos y un 20 % a los municipios, y el valor a pagar del impuesto se ajusta anualmente. Desde 2016, se han comenzado a implementar nuevos impuestos verdes, entre ellos el impuesto a las emisiones de carbono, al consumo de bolsas plásticas e impuestos ya existentes, como el de vehículos automotores (Sánchez Muñoz, 2017).

En ese sentido, teniendo en cuenta la perspectiva económica, además de la técnica, entenderemos que una externalidad negativa ocurre cuando, por el uso de un bien o el comportamiento de un consumidor, se imponen costos sobre otros agentes económicos que

²Una mezcla de partículas líquidas y sólidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran en suspensión en el aire. Su composición es muy variada y podemos encontrar, entre sus principales componentes, sulfatos, nitratos, el amoníaco, el cloruro sódico, el carbón, el polvo de minerales, cenizas metálicas y agua. Dichas partículas se catalogan en función de su tamaño (Instituto para la Salud Geoambiental, s.f.)

no se incluyen en el precio de mercado. Para corregirla, se utilizan impuestos pigouvianos que buscan igualar el costo marginal privado con el costo marginal social, internalizando así los costos externos y alineando los incentivos privados con el bienestar social. Es por tal razón que, en este trabajo, se propone mejorar el esquema de incentivos que corrigen la externalidad asociada con la contaminación mediante una modificación al impuesto vehicular, enfocado en los niveles de CO_2 emitidos por kilómetro recorrido, en lugar del impuesto actual, que solo tiene en cuenta el valor del vehículo sin contemplar los kilómetros y las emisiones asociadas.

Para evaluar la viabilidad de la propuesta, se realizan simulaciones estocásticas basadas en el método Monte Carlo, que nos permitirá evaluar la propuesta novedosa de reorientar el impuesto vehicular hacia un impuesto que persigue la reducción de las emisiones (Colombia. Congreso de la República, 2022, Art.221). Por sí solo, el impuesto al carbono incluido en el precio de la gasolina no ha contribuido considerablemente a la disminución de gases contaminantes. La consideración de este nuevo enfoque de política fiscal regional para el impuesto que recae sobre los vehículos podría ser una estrategia adecuada, tal como lo demuestran países como Suiza, donde la combinación de mecanismos de política fiscal ha dado buenos resultados (Alberini & Bareit, 2019).

Además de esta introducción, el trabajo está estructurado en cuatro secciones. La primera presenta una revisión de la literatura sobre mecanismos fiscales con enfoque ambiental aplicados a los vehículos; la segunda sección describe los datos y la metodología utilizada en la investigación; en la tercera se exponen los resultados obtenidos, y, finalmente, las conclusiones en la cuarta sección.

2 Revisión de Literatura

Cuando las personas toman decisiones de consumo, lo hacen inducidas por el mercado, el cual, a su vez, es el reflejo de las costumbres, ideologías e institucionalidad de los habitantes de un país. La contaminación generada por las empresas, los consumidores y los gobiernos ha ocasionado efectos negativos sobre el medio ambiente y ha acelerado el cambio climático. Por eso, los gobiernos han comenzado a tomar medidas rigurosas ante los efectos adversos ocasionados por inundaciones, sequías y tormentas, que afectan especialmente a aquellos países con índices de pobreza más altos (Stern, 2008). Los sectores económicos, como el agrícola y el forestal, cuya producción depende del agua, enfrentan mayores dificultades cuando este recurso escasea, ocasionando problemáticas económicas y desplazamientos hacia

lugares con mejor disponibilidad de insumos de producción o con menor probabilidad de que ocurran eventos climáticos extremos (Balboni et al., 2023).

Aunque el Protocolo de Kioto³ representó un avance importante en la mitigación del calentamiento global, comprometiendo a los países industrializados a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, originadas principalmente por la quema de combustibles fósiles, la tala de árboles y la cría de ganado (UNFCCC, 2024), no todos los países han permanecido comprometidos. China es el país con mayor volumen de emisiones en el mundo, con 9.9 mil millones de toneladas de dióxido de carbono emitidas al aire, debido en gran medida a sus exportaciones de bienes y su dependencia al carbón como fuente de energía. Este país firmó el protocolo, pero no asumió compromisos de reducción obligatoria en virtud de su clasificación como país en desarrollo en ese momento. Por su parte, Estados Unidos es el segundo emisor y responsable de 4.4 mil millones de toneladas de emisiones de CO_2 , y ha suspendido y reanudado en varias ocasiones la implementación del Protocolo de Kioto (Garrett C., 2023).

Dado que acuerdos internacionales como el Protocolo de Kioto han revelado limitaciones en su alcance y cumplimiento, los impuestos son un instrumento clave de política fiscal para corregir las externalidades negativas generadas por diversos emisores. Un ejemplo de esto es la implementación de un impuesto a los vehículos basado en sus emisiones de CO_2 , que ha tenido efectos importantes en la venta de vehículos, las emisiones de CO_2 y el mercado de combustible. Un estudio que utilizó el método de diferencias en diferencias reveló impactos positivos tanto en las preferencias de los consumidores como en la reducción de las emisiones; aunque estas disminuyeron, las ventas de vehículos continuaron creciendo (Ciccone, 2018; Yan & Eskeland, 2018). Dado que este instrumento está enfocado en los consumidores y sus preferencias, otros mecanismos, como subvenciones o tasas impositivas dirigidas a las empresas, pueden contribuir a la disminución de agentes contaminantes, puesto que los mecanismos dinámicos resultan óptimos para las empresas, ya que, a diferencia de los estáticos, fomentan la adaptación financiera en lugar de realizar cambios en métodos de producción o innovación (Chen & Hu, 2018).

Otro mecanismo para reducir las emisiones son las etiquetas a los vehículos nuevos, que, con base en unas categorías, indican el nivel de producción de gases contaminantes, estableciéndose de manera independiente a los impuestos ya existentes y premiando a los no emisores de gases contaminantes en comparación con los que sí contaminan. Aunque la idea es interesante y se aplica en Suiza, el sistema de tributación es complejo y conlleva altos costos

³Un acuerdo internacional adoptado en 1997 para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que causan el calentamiento global, el cual entró en vigencia en 2005.

administrativos; sin embargo, los consumidores suizos han respondido a las bonificaciones y penalidades, logrando así buenos resultados en la reducción de emisiones (Alberini & Bareit, 2019). Estas eco-etiquetas ayudan a brindar información a los consumidores en el momento de la compra; sin embargo, es crucial que estén reguladas para prevenir sesgos de información (Yokessa & Marette, 2019). Por otro lado, la percepción de las etiquetas con un impuesto y un enfoque ambiental genera incertidumbre y desconfianza hacia el sistema político, especialmente cuando los recursos recaudados no se destinan a fines ambientales (Baranzini & Carattini, 2017).

Las alternativas que existen para una movilidad más sostenible continúan en aumento; los vehículos eléctricos son un sustituto de los vehículos de combustión, pero, al aplicarse impuestos o subvenciones hacia los consumidores, estos se ven influenciados por la sustitución y la variabilidad en las características de los vehículos. Aunque la transición hacia transportes eléctricos o a gas natural depende de la cantidad de estaciones de servicio disponibles, esto influye en el aumento o disminución de su cuota de mercado (Kieckhäfer et al., 2014). Asimismo, la micromovilidad es una alternativa que está ganando terreno en varias ciudades importantes debido a su relación con la movilidad sostenible (Rivero Mejía et al., 2022).

En Colombia se han implementado normas y acciones orientadas a la reducción de gases de efecto invernadero (GEI) generados por el consumo de combustibles fósiles y la diversificación de fuentes energéticas. En 2015, tras la firma del Acuerdo de París, que entró en vigor en 2016 (UNFCCC, 2021), Colombia se comprometió a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 20 % para 2030 como parte de sus Contribuciones Nacionales Determinadas (NDCs)⁴ y a realizar esfuerzos adicionales con apoyo internacional (García Arbeláez et al., 2016).

Esto da paso a la Ley 1819 de 2016 (Colombia. Congreso de la República, 2016, Art.221), que introduce el impuesto al carbono, afectando el precio de los combustibles fósiles, incluyendo gasolina, diésel y gas natural, y asignando una tarifa a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El objetivo de este impuesto es desincentivar el uso de combustibles fósiles e incentivar una transición hacia energías más limpias, en línea con los compromisos asumidos en el Acuerdo de París. No obstante, un estudio que analiza el impacto de este impuesto sobre el bienestar de los hogares muestra efectos negativos para

⁴Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional, por sus siglas en inglés. Son compromisos específicos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que cada país establece de manera voluntaria en el marco del Acuerdo de París.

la población debido a los aumentos en los precios de la canasta de consumo, lo cual tiene sentido por el uso y la influencia que tiene el combustible en los sistemas de producción y el sistema económico (Romero et al., 2018).

Las leyes 1964 y 1972 de 2019 (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019a, 2019b) promueven el uso de vehículos eléctricos mediante incentivos fiscales, como descuentos en el SOAT, la revisión técnico-mecánica y el impuesto vehicular, además de la exención en las restricciones de pico y placa. Estas leyes también buscan disminuir de manera significativa la contaminación generada por el transporte de carga y público, sectores que contribuyen considerablemente a las emisiones de material particulado y otros contaminantes en las áreas urbanas, apoyándose en el mejoramiento de la calidad del combustible. De hecho, se ha trabajado en reducir el contenido de azufre en los combustibles, dado que esta sustancia está directamente relacionada con la contaminación del aire y permite una mayor eficiencia en el consumo de combustible (Ecopetrol, 2022).

Por otro lado, el sector transporte es clave para Colombia, ya que fortalece y orienta de manera coherente las metas del país hacia la sostenibilidad. La Ley 2099 de 2021 (Colombia. Congreso de la República, 2021a) se enfoca en la transición energética y en la dinámica del mercado, respaldando así la reactivación económica del país mediante energías limpias, en paralelo con la Ley 2128 de 2021 (Colombia. Congreso de la República, 2021b), que estimula el uso del gas como un combustible más limpio en comparación con otros combustibles, promoviendo su cobertura y confiabilidad. Estas leyes, en conjunto, pueden ayudar a Colombia a avanzar hacia sus objetivos de carbono neutralidad, en línea con los compromisos internacionales, no solo en el sector transporte, sino también en otros sectores económicos que integran la economía nacional (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

Aun así, se han planteado estrategias adicionales para impulsar la movilidad sostenible en Colombia (Colombia. Ministerio de Transporte, 2022), dado que el sector transporte tiene un alto consumo de energía, representando el 40,06 % de la demanda energética total, según el Balance Energético Colombiano de 2018 (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022). Estas estrategias establecen pautas para facilitar la adopción de vehículos eléctricos en el transporte público y de carga, promoviendo a su vez alternativas de movilidad, como el uso de bicicletas y caminatas en entornos urbanos.

En conjunto, estas políticas y estrategias reflejan el compromiso de los gobiernos en combatir y mitigar los gases contaminantes generados por los derivados del petróleo, que

siguen siendo la principal fuente de energía a nivel mundial, y se alinean con la transición global hacia una movilidad más sostenible. Esto ha impulsado el diseño de políticas, como impuestos, etiquetas y subsidios, las cuales buscan influir en las preferencias de los consumidores y promover una adaptación del mercado hacia opciones de transporte más sostenibles.

3 Metodología

En esta sección se evalúa la propuesta de la entrada en vigencia de una modificación al impuesto vehicular que recaudan los entes territoriales, enfocándolo en los niveles de tCO_2eq emitido por kilómetro recorrido, en lugar del impuesto actual, que solo tiene en cuenta el valor del vehículo con tarifas menores para vehículos sostenibles. Se espera analizar, mediante simulación de Monte Carlo, los cambios en el recaudo que podría obtener la Gobernación de Antioquia con la implementación del nuevo modelo de impuesto.

3.1 Descripción de los datos

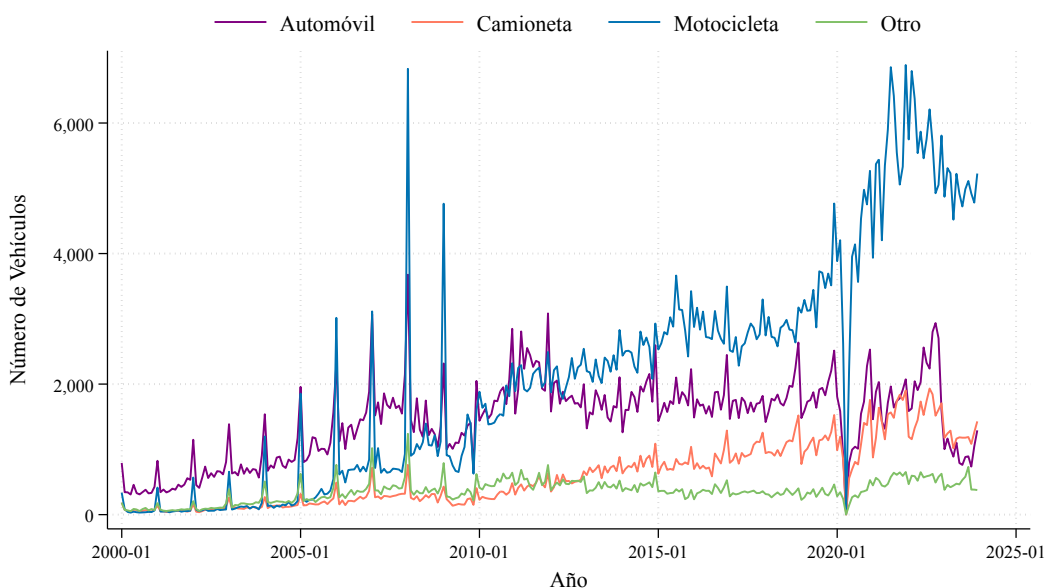
Los datos fueron obtenidos desde la Secretaría de Hacienda de la Gobernación de Antioquia. Este conjunto de datos abarca el recaudo fiscal del impuesto vehicular entre los años 2014 y 2023, que reúne todo el parque automotor que declaró el impuesto. Cabe destacar que cada observación en el conjunto de datos se presenta de manera individual y anonimizada, incluyendo características específicas de cada vehículo y el monto pagado por el propietario o poseedor.

Por otro lado, el estudio realizado por (UPME et al., 2024) analizó las emisiones vehiculares, considerando factores como la antigüedad, el tipo de combustible, entre otros. Las mediciones se realizaron utilizando ciclos de conducción específicos, que replican el comportamiento real de los vehículos en condiciones controladas.

El parque automotor de Antioquia ha experimentado un crecimiento continuo año tras año, en el cual los automóviles, las camionetas y las motocicletas han influido en este aumento. Los automóviles y camionetas han mostrado un comportamiento similar en los últimos años, pero, entre el periodo 2020 y 2021, se observa una caída, la cual se puede atribuir en gran parte a la pandemia de COVID-19. Sin embargo, a partir de 2015, las motocicletas han crecido de manera acelerada, superando a los automóviles de manera significativa en aproximadamente un 34 %. Este aumento puede darse por la mayor accesibilidad económica

Figura 1

Evolución del número de matrículas por tipo de vehículo en el periodo de enero de 2000 a diciembre de 2023.



Fuente: *Elaboración con datos de matrículas registradas por la Secretaría de Hacienda de Antioquia de enero de 2000 a diciembre de 2023.*

de las motocicletas frente a otros vehículos, además de su practicidad tanto en zonas urbanas como rurales. Es importante destacar que estas cifras de motocicletas son parciales, ya que solo se incluyen aquellas que declaran el impuesto vehicular, es decir, las que tienen un cilindraje superior a 150 cc, como se observa en la Figura 1.

Por otro lado, en la Figura 6 se resalta la dinámica del tipo de combustible de los automóviles que circulan en Antioquia, conforme a las matrículas registradas entre enero de 2015 y diciembre de 2023. A pesar de la predominancia de los automóviles a gasolina, se observa un interés por parte de los consumidores hacia fuentes de energía más limpias. Entre 2012 y 2014, se registraron los primeros vehículos sostenibles, como se observa en la Tabla 1. Para el año 2022, se alcanzó un máximo de 1.454 automóviles híbridos registrados en el departamento. Este crecimiento en la adopción de automóviles sostenibles podría estar relacionado con los incentivos de políticas públicas, avances en tecnología e innovación, así como con una mayor conciencia sobre los efectos del cambio climático. No obstante, este sector enfrenta desafíos debido a la limitada infraestructura de carga en la región, lo cual

Tabla 1

Matrículas de automóviles por tipo de combustible entre enero de 2012 a diciembre de 2023.

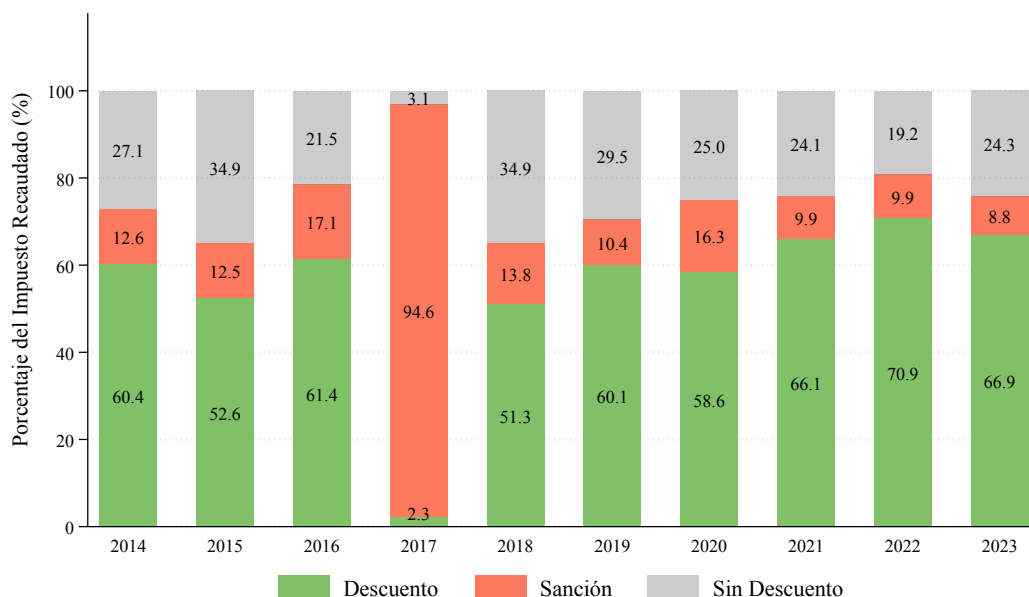
Año	Tipo de Combustible		
	Eléctricos	Gasolina	Híbrido
2012	1	18,930	-
2013	-	17,542	-
2014	-	19,772	1
2015	30	18,916	-
2016	47	18,971	-
2017	39	18,333	9
2018	110	20,348	120
2019	169	20,048	489
2020	107	13,836	997
2021	131	17,954	1,214
2022	138	22,751*	1,454*
2023	277*	10,027	1,220
Total	1,049	217,428	5,504

*Nota: *Representan el máximo de automóviles registrados por combustible*

Fuente: *Elaboración con datos de matrículas registradas por tipo de combustible de la Secretaría de Hacienda de Antioquia de enero de 2012 a diciembre de 2023.*

puede influir en el bajo crecimiento de automóviles eléctricos.

Mediante ordenanza, el impuesto vehicular de Antioquia establece que los contribuyentes que declaren y paguen el impuesto dentro del año gravable correspondiente, en los plazos establecidos, obtendrán un descuento del 10 % como incentivo por pronto pago. Una vez vencido este plazo, los pagos deberán realizarse sin descuento y, en caso de continuar el retraso, se aplican sanciones e intereses de mora. Dada la Figura 2, la Gobernación de Antioquia, en los últimos 10 años, ha logrado, por pronto pago, aproximadamente más del 50 % del recaudo total, seguido por las sanciones y pagos sin descuento.

Figura 2*Recaudo del impuesto vehicular en Antioquia por tipo de pago (2014-2023)*

Fuente: Elaboración con datos por pagos del impuesto de la Secretaría de Hacienda de Antioquia de enero de 2014 a diciembre de 2023.

3.2 Desarrollo del método

Para llevar a cabo el análisis de este trabajo⁵, se utilizó el recaudo fiscal del impuesto vehicular del departamento de Antioquia, en el que se consideró únicamente el último año 2023, ya que este representa el parque automotor más reciente. Además, se empleó el estudio de factores de emisión de gases contaminantes de vehículos livianos (UPME et al., 2024), en el cual se midieron diferentes gases, como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de carbono (CO_2) e hidrocarburos (HC). Estos gases contaminantes se agruparon y se expresaron en términos de emisiones equivalentes por tonelada de dióxido de carbono tCO_2eq . Cabe destacar que las emisiones se calcularon con base en el número de vehículos analizados.

Dado el estudio (UPME et al., 2024), se realizaron pruebas repetidas para cada vehículo estudiado, con el objetivo de calcular un promedio de emisiones específico para cada uno.

⁵Los datos y el código utilizados en este trabajo están disponibles en el repositorio de GitHub. Consulte el Anexo 5.1

Se tuvieron en cuenta variables como el modelo y el cilindraje, además de considerar el mínimo, el máximo y el promedio de las emisiones generadas en las pruebas repetidas. De este modo, se seleccionaron vehículos clasificados como automóvil, campero o camioneta del parque automotor, cuyo modelo correspondiera entre el año 2011 y 2023, a excepción de los modelos 2018 y 2019, debido a la falta de información necesaria para estimar sus emisiones contaminantes. Teniendo en cuenta que un vehículo del parque automotor cumpliera con las características de modelo y cilindraje presentes en el estudio, se asignaron directamente los valores de las emisiones registradas; en caso contrario, en que estas características no coincidieran exactamente, se realizó una ponderación de las emisiones de acuerdo con el cilindraje del mismo modelo, para así estimar sus emisiones. También se realizó un proceso de limpieza de los datos para garantizar que cumplieran con los criterios del análisis, junto con filtros como incluir todo vehículo de uso particular sin tener en cuenta los públicos o de uso comercial.

Teniendo en cuenta las emisiones ya estimadas, para fines de la simulación Monte Carlo, se construyó para cada vehículo una función de distribución PERT de acuerdo con las emisiones estimadas anteriormente, así como una distribución PERT para los kilómetros recorridos. Según el estudio, un vehículo, en promedio, recorre 15.000 kilómetros al año. Para calcular el recaudo total por vehículo, se tomó como referencia el precio por tonelada de dióxido de carbono equivalente establecido en la Ley 2277 de 2022 (Colombia. Congreso de la República, 2022, art. 222), que, para 2023, es de \$23,394.60. Sin embargo, este precio aumenta año tras año de acuerdo con la variación en el Índice de Precios al Consumidor calculada por el DANE⁶ del año anterior más un punto, hasta que sea equivalente a tres UVT⁷.

La inflación a utilizar se basa en las predicciones de (Grupo Bancolombia, 2024), lo que permitió aproximar los cálculos de este análisis y proyectar esta propuesta tributaria a 10 años. A partir de las emisiones estimadas, los kilómetros recorridos y la tarifa por emisiones, se calculó el impuesto anual para cada vehículo mediante la combinación de estas variables. Además, considerando la inflación proyectada, se estimó el precio esperado de la tarifa para los años siguientes. De igual manera, se proyectó el impuesto actual tomando como referencia el recaudo de los pagos realizados en el último periodo de 2023, considerando la depreciación

⁶Departamento Administrativo Nacional de Estadística, que tiene como objetivo garantizar la producción, disponibilidad y calidad de la información estadística estratégica, y dirigir, planear, ejecutar, coordinar, regular y evaluar la producción y difusión de información oficial básica (Función Pública, s.f.).

⁷La Unidad de Valor Tributario es una medida de valor implementada para simplificar los cálculos y deberes tributarios, así como para facilitar el pago de otras obligaciones financieras al Estado (Díaz S., 2023)

de los vehículos dado su uso y desgaste, lo cual reduce su valor con el tiempo. Este valor es fundamental para determinar la base gravable sobre la cual se aplica el impuesto, la cual también se ajusta anualmente en función de la inflación. Cada año, el Ministerio de Hacienda y el Ministerio de Transporte emiten normativas específicas que actualizan los umbrales y tarifas tributarias, garantizando que el impuesto refleje tanto las condiciones económicas como las características particulares de los vehículos, como marca, línea, cilindraje y capacidad.

Para estimar el recaudo que obtendría la Gobernación de Antioquia al implementar un impuesto basado en las emisiones por kilómetro recorrido, la simulación Monte Carlo resulta una herramienta ideal. Esta metodología, ampliamente utilizada en diferentes estudios tanto económicos como de políticas públicas (Metropolis & Ulam, 1949; Rubinstein & Kroese, 2016), permite analizar sistemas complejos mediante la generación de un gran número de escenarios posibles. Su principal fortaleza radica en su capacidad para integrar múltiples variables con incertidumbre, como las emisiones contaminantes y los kilómetros recorridos anualmente, modelando diferentes escenarios cuyos resultados dependen de combinaciones de variables aleatorias. Esto no solo proporciona una estimación precisa del promedio esperado, sino también una distribución completa que incluye resultados extremos, ofreciendo una visión integral del posible ingreso fiscal.

En este análisis, la metodología Monte Carlo se implementó generando 10.000 simulaciones para capturar la variabilidad de las principales variables involucradas. Las emisiones contaminantes por kilómetro recorrido junto con los kilómetros recorridos anualmente. En cada simulación, se combinaron valores aleatorios de estas distribuciones para estimar el impuesto anual por vehículo, permitiendo posteriormente calcular el recaudo total proyectado. La implementación se realizó utilizando software estadístico ⁸, lo que permitió automatizar la generación de escenarios y extraer indicadores clave, permitiendo evaluar con mayor precisión el rango potencial de ingresos fiscales derivados de la implementación del impuesto.

4 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las proyecciones del recaudo fiscal para la Gobernación de Antioquia, bajo diferentes escenarios de precios por tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO_2eq) aplicados a la propuesta del impuesto automotor

⁸Para la estimación y simulación del impuesto, se utilizó el complemento de Excel Risk, que permite realizar análisis de riesgo y simulaciones Monte Carlo para evaluar la incertidumbre en modelos financieros y estadísticos.

por emisiones de tCO_{2eq} de vehículos particulares. Este análisis incluye automóviles, camionetas y camperos que realizaron el pago del impuesto. También se consideraron las emisiones de tCO_{2eq} por vehículo de manera constante a lo largo de los diez años proyectados. Los resultados permiten evaluar la viabilidad de la propuesta tributaria en comparación con el sistema actual, considerando los efectos de los precios diferenciados y las implicaciones en el recaudo total.

Como se observa en la Figura 3, se presentan cuatro escenarios diferentes, en los cuales cada uno representa el ingreso total que podría recibir la Gobernación de Antioquia durante los 10 años proyectados. En el caso del impuesto actual, se observa una disminución progresiva en el recaudo anual debido a la naturaleza de este impuesto, que se basa en el valor del vehículo, el cual es estimado anualmente por el Ministerio de Transporte. A medida que los vehículos se deprecian, la base gravable se reduce, reduciendo naturalmente el recaudo, incluso cuando los umbrales y tarifas tributarias se actualizan de manera creciente cada año, debido a la inflación. Además, esta caída en el recaudo también responde a que, en la proyección, no se considera la entrada de nuevos vehículos al parque automotor, lo que limita la capacidad del impuesto para mantener su nivel de ingresos a lo largo del tiempo.

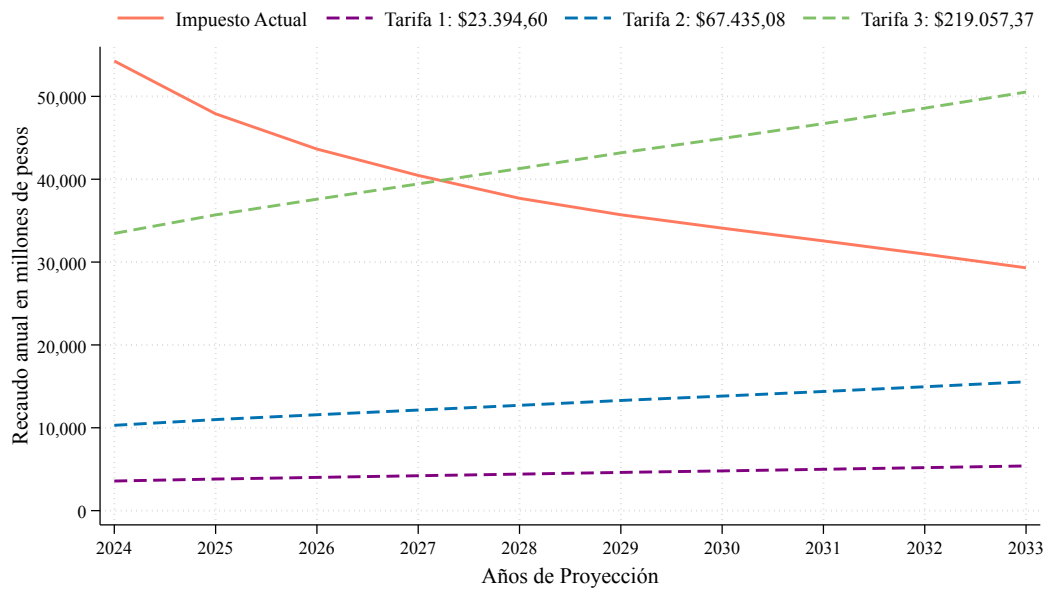
En los tres escenarios propuestos se modifican las tarifas para analizar su viabilidad. La Tarifa 1 sigue los lineamientos de la Ley 2277 del 2022 (Colombia. Congreso de la República, 2022, art. 222), que para el 2023 establece un valor de \$23.394,60. Según la proyección, el recaudo estimado con esta tarifa sería considerablemente inferior al actual y permanece constante a lo largo del tiempo. Esto se debe a que, si bien la tarifa se ajusta anualmente por inflación, la estructura del impuesto no contempla incrementos progresivos acorde con el crecimiento del parque automotor ni con la evolución del costo social de las emisiones.

Por su parte, la Tarifa 2 se basa en el proyecto de Ley 300 del 2024 (Colombia. Congreso de la República, 2022, Pág. 75), el cual establece una tarifa de 1.59 UVT⁹, equivalente a \$67.435,08. A diferencia de la Tarifa 1, este esquema permitiría un aumento gradual del recaudo en el tiempo, lo que mitiga la erosión del ingreso fiscal. No obstante, el análisis muestra que, aunque este ajuste mejora el recaudo con respecto a la Tarifa 1, sigue sin igualar los niveles generados por el impuesto actual basado en el valor del vehículo. El valor presente sigue siendo mayor con el esquema actual que con el propuesto.

Finalmente, la Tarifa 3 se estimó con el objetivo de igualar un nivel de recaudo

⁹El valor de una UVT para 2023 es de \$42.412, de acuerdo con la Resolución 001264 del 18 de noviembre de 2022.

Figura 3
Proyección a 10 años del Recaudo del Impuesto Vehicular en Antioquia: Comparativa entre Régimen Actual y Propuestas de Ajuste por tarifa



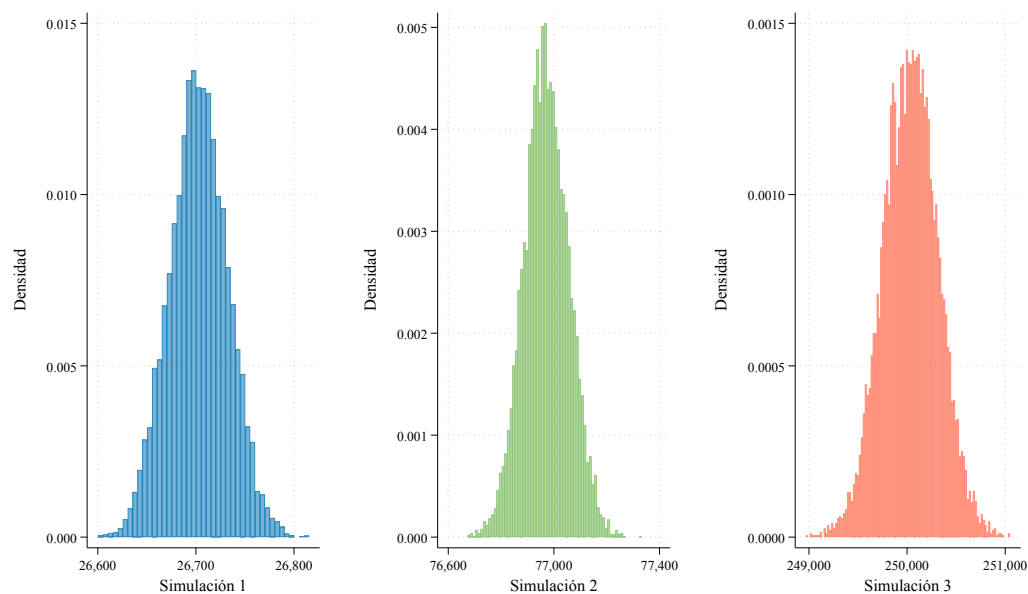
Fuente: *Elaborado con datos de la Secretaría de Hacienda de Antioquia y basado en resultados de proyecciones propias a 10 años.*

semejante al impuesto actual; como resultado, se obtuvo una tarifa propuesta de \$219.057,37. Este valor representa un incremento significativo respecto a las tarifas establecidas en las normativas previas, pero se justifica en función de la necesidad de mantener la estabilidad de los ingresos tributarios sin depender de la depreciación del parque automotor. A diferencia de las otras dos tarifas, esta propuesta permitiría asegurar un nivel de financiamiento similar al actual, reduciendo el riesgo de una caída progresiva en el recaudo a medida que los vehículos envejecen.

De este modo, se muestra el comportamiento de las proyecciones bajo los tres escenarios, en el cual la tercera tarifa, a partir del 2027, es significativamente superior al impuesto actual, conservando un crecimiento paulatino durante los siguientes años. Esto refleja que, con una tarifa de \$219.057,37, se pueden maximizar los ingresos fiscales, logrando niveles más altos en los últimos años proyectados. Lo cual sugiere que las tarifas establecidas por el gobierno son considerablemente inferiores a su potencial. Esto plantea la posibilidad de una viabilidad sostenible y óptima a lo largo del tiempo, siempre y cuando la tarifa por tonelada

Figura 4

Simulaciones del recaudo fiscal según Tarifas para la propuestas del impuesto vehicular



Fuente: *Elaborado con datos de la Secretaría de Hacienda de Antioquia y basado en resultados de proyecciones propias.*

de dióxido de carbono equivalente (tCO_2eq) sea superior a la establecida actualmente.

Dada la Figura 3, se observan tres distribuciones que reflejan los posibles recaudos fiscales según los diferentes escenarios de tarifas planteadas. Estas distribuciones corresponden a las tarifas presentadas en la Figura 4, expresadas en pesos colombianos por tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO_2eq). Además, los valores dentro de cada distribución representan los pagos que realizaría cada propietario de manera individual. La simulación Monte Carlo genera múltiples iteraciones considerando la incertidumbre y la variabilidad asociadas a cada escenario, permitiendo así evaluar el impacto de cada tarifa en el recaudo fiscal.

La Simulación 1 (Figura 7) está relacionada con una tarifa de \$23.394,60 por tCO_2eq . Esta distribución de recaudo tiene un valor promedio de \$26.702,92 millones de pesos y una desviación estándar de 29,79 millones, lo que indica una baja variabilidad en comparación con las siguientes dos simulaciones. A su vez, los valores oscilan entre \$26.600,38 y \$26.814,48 millones de pesos. Dada su concentración y estabilidad, el ingreso fiscal es bajo; aunque

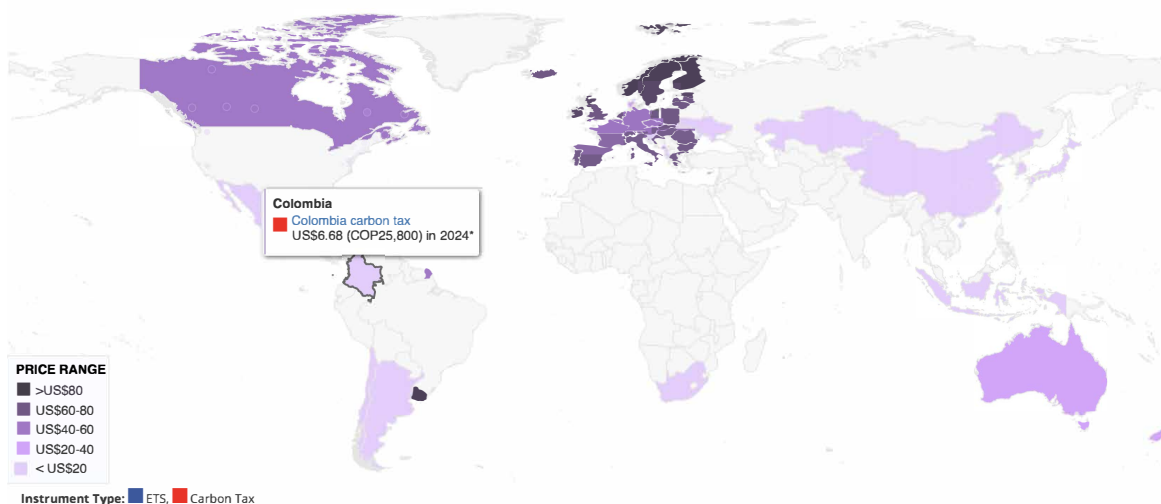
estable, su potencial de incremento es limitado.

Por otro lado, la Simulación 2 (Figura 8) está asociada con una tarifa de \$67.435,08 por tCO_2eq . Este recaudo es notablemente superior al de la simulación anterior, con un promedio de \$76.971,36 millones de pesos y una desviación estándar de 84,95 millones, lo que lo hace más variable. Su recaudo fluctúa entre \$76.672,60 y \$77.332,55 millones de pesos, ofreciendo así oportunidades para ingresos más altos.

Finalmente, en la Simulación 3 (Figura 9) se propone una tarifa de \$219.057,37 por tCO_2eq , que igualaría el recaudo de esta propuesta impositiva con el del impuesto actual. Este recaudo refleja una mayor dispersión, con un rango entre \$248.968,70 y \$251.038,20 millones de pesos, permitiendo alcanzar niveles de ingreso significativamente más altos que en las simulaciones anteriores. Esto también conlleva una mayor variabilidad, con una desviación estándar de 280,69 millones y un valor promedio de \$250.035,10 millones de pesos, el más alto de los tres escenarios. De acuerdo con la estrategia fiscal, alguno de estos escenarios puede resultar más viable y óptimo, según su variación, estabilidad, potencial fiscal y predictibilidad, logrando el mejor recaudo al asumir uno de estos enfoques.

Figura 5

Precios del Carbón en diferentes países del Mundo



Fuente: World Bank Group, 2024b

Los resultados de las proyecciones fiscales muestran que el ajuste de las tarifas del impuesto vehicular basadas en las emisiones de tCO_2eq tiene un impacto significativo en el

recaudo de la Gobernación de Antioquia. La simulación Monte Carlo resalta cómo las tarifas actuales son insuficientes para alcanzar el potencial máximo de ingresos, lo cual se alinea con este reporte, en el que “la Comisión de Alto Nivel sobre Precios del Carbono concluyó que los precios del carbono debían situarse entre USD 40-80 por tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO_2eq) en el 2020 y alcanzar entre USD 50-100 por tCO_2eq en 2030 para estar en camino de limitar el aumento de temperatura muy por debajo de $2^\circ C$ ” (World Bank Group, 2024a, pág.26). Colombia aún no sitúa sus tarifas dentro de este rango de precios y se encuentra en el límite inferior de precios al carbono. Además, no cuenta con esfuerzos suficientes para mitigar las emisiones, dado que aún reporta solo el impuesto al carbono y no a las emisiones.

5 Conclusiones

Los resultados presentados en este trabajo demuestran que el impuesto automotor actual en el departamento de Antioquia, basado en el valor comercial de los vehículos, no es suficiente para corregir las externalidades negativas generadas por este bien, especialmente las emisiones de gases contaminantes. La propuesta de un impuesto basado en las emisiones de tCO_2eq por kilómetro recorrido busca promover la sostenibilidad y alinear al departamento con los compromisos internacionales adquiridos por Colombia, como el Acuerdo de París. Sin embargo, las simulaciones 1 y 2, que consideran la tarifa actual y la propuesta en el proyecto de ley, muestran un recaudo fiscal que resulta inferior al esperado en comparación con el esquema vigente.

Por otro lado, la simulación 3 presenta la propuesta más viable, ya que establece una tarifa por tCO_2eq aproximadamente diez veces mayor que la actual, con un valor cercano a \$219.057,37. Este ajuste permite igualar el recaudo del impuesto actual y superarlo en el mediano plazo, ofreciendo una solución sostenible y fiscalmente eficiente.

En este sentido, tanto los países industrializados como los países en desarrollo han avanzado en la implementación de políticas, tales como etiquetas de eficiencia, impuestos ambientales e inversiones en energías renovables, dirigidas a reducir el consumo de combustibles fósiles. Este esfuerzo incluye a Colombia, cuyo transporte terrestre representa el 78 % del sector (IDEAM et al., 2021) y constituye un foco importante para lograr una reducción significativa en las emisiones.

La propuesta es viable bajo ciertos ajustes. Las simulaciones evidencian que, para ser

viable, es importante un incremento sustancial de la tarifa por tCO_2eq y establecerla dentro de la franja de tarifas internacionales, las cuales han demostrado su capacidad de influir en las decisiones de consumo. Aunque esto puede ser un desafío político debido a la resistencia de los contribuyentes, dicha resistencia podría mitigarse mediante una transición gradual y progresiva. Esto facilita la adaptación pública y fomenta la transformación hacia un parque automotor más sostenible, la mejora en la infraestructura de carga de vehículos y el avance en tecnologías más limpias. Además, una comunicación efectiva sobre los posibles beneficios ambientales y económicos es fundamental para contrarrestar las percepciones negativas de dicho aumento tributario.

En conclusión, este estudio confirma que la tarifa vigente no es lo suficientemente alta para permitir un recaudo óptimo en comparación con el impuesto actual. Aunque la propuesta es viable, su éxito depende de un ajuste en la tarifa, medidas complementarias como el uso de la revisión técnico-mecánica para medir las emisiones de gases, así como estrategias para monitorear y prevenir acciones fraudulentas, como la adulteración de los kilómetros recorridos, entre otras posibles prácticas. Además, es fundamental un diseño de implementación gradual, dado que la tarifa debe ser lo suficientemente elevada para alcanzar los resultados esperados y cumplir con los objetivos de sostenibilidad.

Referencias

- Alberini, A., & Bareit, M. (2019). The effect of registration taxes on new car sales and emissions: Evidence from Switzerland. *Resource and Energy Economics*, 56, 96-112. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2017.03.005>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (s.f.). El Valle de Aburrá como cuenca atmosférica y área fuente de contaminación. <https://www.metropol.gov.co/ambientales/calidad-del-aire/generalidades/condiciones-especiales>
- Bajaña, E. Z., & Torres, S. G. (2019). Incidencia del impuesto ambiental a la contaminación vehicular en el sector automotriz en el Ecuador. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales (RCCS)*, (7), 74.
- Balboni, C., Boehm, J., & Waseem, M. (2023). Firm adaptation and production networks: Structural evidence from extreme weather events in Pakistan. <https://steg.cepr.org/projects/firm-adaptation-and-production-networks-structural-evidence-extreme-weather-events>
- Baranzini, A., & Carattini, S. (2017). Effectiveness, earmarking and labeling: testing the acceptability of carbon taxes with survey data. *Environmental Economics and Policy Studies*, 19(1). <https://doi.org/10.1007/s10018-016-0144-7>
- Blakemore Erin. (2022, diciembre). The Great Smog of London woke the world to the dangers of coal. <https://www.nationalgeographic.com/history/article/great-smog-of-london-1952-coal-air-pollution-environmental-disaster>
- Chen, W., & Hu, Z. H. (2018). Using evolutionary game theory to study governments and manufacturers' behavioral strategies under various carbon taxes and subsidies. *Journal of Cleaner Production*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.007>
- Ciccone, A. (2018). Environmental effects of a vehicle tax reform: Empirical evidence from Norway. *Transport Policy*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.05.002>
- Colombia. Congreso de la República. (2016, diciembre). *Ley 1819 de 2016 (Diciembre 29): Por medio de la cual se adopta una reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=79140>
- Colombia. Congreso de la República. (2021a, julio). *Ley 2099 (Julio 10): Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>

- Colombia. Congreso de la República. (2021b, agosto). *Ley 2128 (Agosto 4): Por medio de la cual se promueve el abastecimiento, continuidad, confiabilidad y cobertura del gas combustible en el país*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=168087>
- Colombia. Congreso de la República. (2022, diciembre). *Ley 2277 de 2022 (Diciembre 13): Por medio de la cual se adopta una reforma tributaria para la igualdad y la just Social y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial.
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019a, julio). *Ley 1964 (Julio 11): Por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia y se dictan otras disposiciones*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/ley-1964-2019.pdf>
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019b, julio). *Ley 1972 (Julio 18): por medio de la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano estableciendo medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes de fuentes móviles y se dictan otras disposiciones*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/ley-1972-2019.pdf>
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021, diciembre). *Ley 2169 (Diciembre 22): Por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad y resiliencia climática y se dictan otras disposiciones*. <https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%202169%20DEL%2022%20DE%20DICIEMBRE%20DE%202021.pdf>
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostible. (2022). Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (ENME). *Republica de Colombia*. <https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/ENME.pdf>
- Colombia. Ministerio de Transporte. (2022, agosto). Estrategia Nacional de Movilidad Activa (ENMA). <https://mintransporte.gov.co/publicaciones/11052/ministerio-de-transporte-presenta-la-estrategia-nacional-de-movilidad-activa-para-promover-modos-de-transporte-donde-el-desplazamiento-depnde-de-la-energia-de-las-personas/>
- Díaz S. (2023, diciembre). ¿Cómo se calcula el UVT y por qué es importante para los contribuyentes? <https://www.portafolio.co/economia/impuestos/uvt-que-es-como-se-calcula-y-para-que-se-usa-594518>
- Ecopetrol. (2022). Calidad de combustibles. <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostecnibilidad/ambiental/aire-limpio/calidad-combustibles>

- Función Pública. (s.f.). Manual de Estructura del Estado. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/manual-estado/pdf/20_Sector_Estadistica.pdf
- García Arbeláez, C., G. Vallejo, M. L. Higgings & E. M. Escobar. (2016). El Acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático. https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/documentos_tecnicos_soporte/As%C3%AD_actuar%C3%A1_Colombia_frente_al_cambio_clim%C3%A1tico.pdf
- Garrett C. (2023, julio). Ranking de los países más contaminantes del mundo. <https://climate.selectra.com/es/huella-carbono/paises-contaminantes>
- Grupo Bancolombia. (2024). Actualización de proyecciones económicas Colombia Luces y sombras: la economía colombiana y sus contrastes. https://www.bancolombia.com/wcm/connect/www.bancolombia.com-26918/ff222f2d-017f-456b-b4f1-eb9aad7518e2/Actualizacio%CC%81n+de+Proyecciones+Econo%CC%81micas+para+Colombia+-+Junio+2024.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE.Z18_K9HC1202P864E0Q30449MS3000-ff222f2d-017f-456b-b4f1-eb9aad7518e2-p4OWC5S
- IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP & CANCELLEERÍA. (2021). Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). *IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia.* <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/BUR3%20-%20COLOMBIA.pdf>
- Instituto para la Salud Geoambiental. (s.f.). Material particulado. <https://www.saludgeoambiental.org/material-particulado/>
- Kieckhäfer, K., Volling, T., & Spengler, T. S. (2014). A hybrid simulation approach for estimating the market share evolution of electric vehicles. *Transportation Science*, 48(4). <https://doi.org/10.1287/trsc.2014.0526>
- Kolstad, C. (2001). Economía Ambiental.
- Metropolis, N., & Ulam, S. (1949). The monte carlo method. *Journal of the American statistical association*, 44(247), 335-341.
- Rivero Mejía, S., Urán Úsuga, E., Marín Tabares, E., Escudero Mercado, J., & Bolaño Restrepo, K. (2022). Análisis del presente y del futuro de la micromovilidad como alternativa de transporte en la ciudad de Medellín. <https://doi.org/10.26507/paper.2193>
- Romero, G., Álvarez-Espinosa, A., Calderón, S., & Ordóñez, A. (2018). Impactos distributivos de un impuesto al carbono en Colombia: vínculo entre modelos de microsimulaciones y equilibrio general. *Lecturas de Economía*, (89), 163-198. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-25962018000200163&script=sci_arttext

- Rubinstein, R. Y., & Kroese, D. P. (2016). *Simulation and the Monte Carlo method*. John Wiley & Sons.
- Sánchez Muñoz, C. (2017). Tributación medioambiental en Colombia. Otros impuestos al consumo: carbono, bolsas plásticas, gasolina y ACPM. *Revista de Derecho Fiscal*, (11). <https://doi.org/10.18601/16926722.n11.05>
- Stern, N. (2008). The economics of climate change. *American Economic Review*, 98(2). <https://doi.org/10.1257/aer.98.2.1>
- UNFCCC. (2021). ¿Qué es el Acuerdo de París? <https://unfccc.int/es/most-requested/ques-el-acuerdo-de-paris#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20el%20Acuerdo%20de%20Par%C3%ADs%3F,-Progress%20Tracker&text=El%2012%20diciembre%20de%202015,con%20bajas%20emisiones%20de%20carbono>.
- UNFCCC. (2024). ¿Qué es el Protocolo de Kyoto? https://unfccc.int/es/kyoto_protocol
- UPME, Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería & Grupo de Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL). (2024). Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+) Fase 3: Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas para Colombia. https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Doc_Hemeroteca/FECOC%2B2-3.pdf
- World Bank Group. (2024a). State and Trends of carbon pricing. <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/253e6cdd-9631-4db2-8cc5-1d013956de15/content>
- World Bank Group. (2024b). State and Trends of Carbon Pricing Dashboard. <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/price>
- Yan, S., & Eskeland, G. S. (2018). Greening the vehicle fleet: Norway's CO2-Differentiated registration tax. *Journal of Environmental Economics and Management*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2018.08.018>
- Yokessa, M., & Marette, S. (2019). A review of eco-labels and their economic impact. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 13(1-2). <https://doi.org/10.1561/101.00000107>

Anexos

5.1 Material complementario

El código, los datos y demás materiales utilizados para el desarrollo de esta monografía de grado se encuentran disponibles en el repositorio de GitHub:

<https://github.com/estefahernandez/Monografia>

Este repositorio contiene:

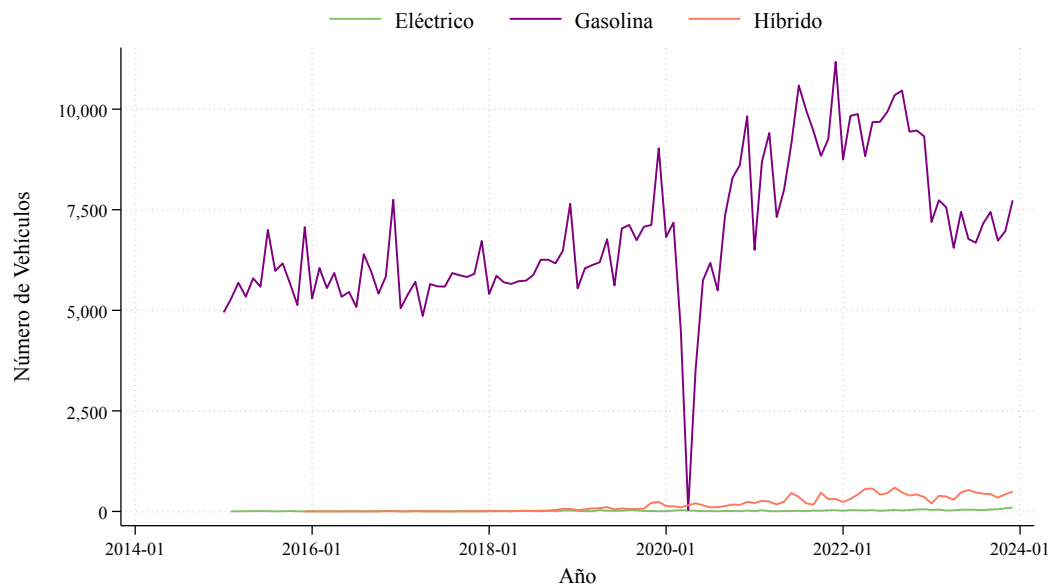
- Datos anonimizados utilizados para el análisis.
- Código en lenguaje **Stata** para las simulaciones y cálculos.
- Scripts y gráficos generados en el desarrollo de la investigación.

El repositorio está diseñado para facilitar la replicación de los análisis y proyecciones fiscales, así como para promover la transparencia y el acceso abierto al conocimiento generado en este trabajo.

5.2 Figuras y Tablas Complementarias

Figura 6

Evolución del tipo de combustible entre enero de 2012 a diciembre de 2023



Fuente: *Elaboración con datos de matrículas registradas por tipo de combustible de la Secretaría de Hacienda de Antioquia de enero de 2012 a diciembre de 2023.*

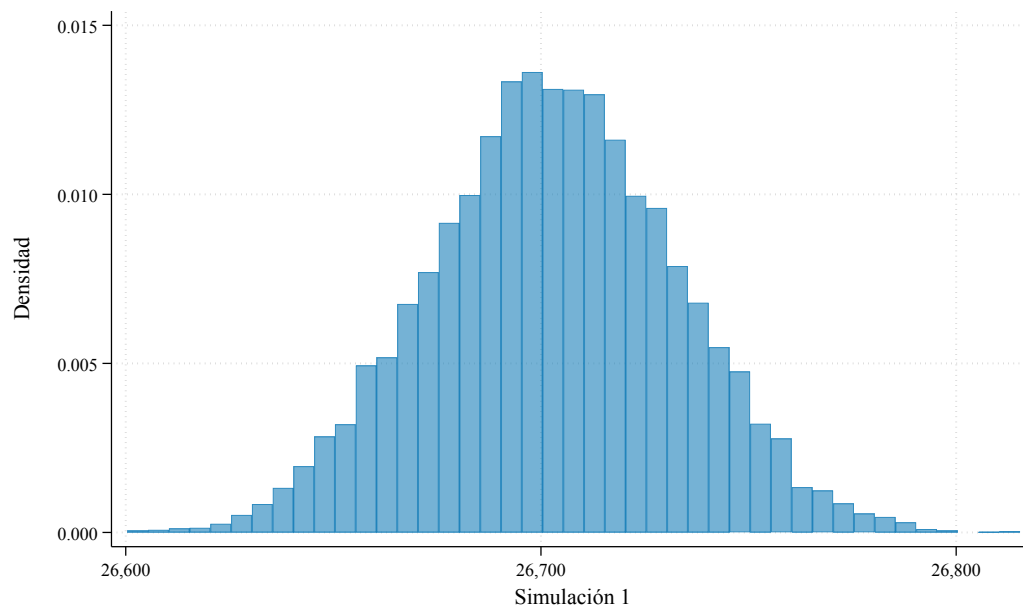
Tabla 2*Recaudo de los últimos 10 años del impuesto vehicular actual dada las fechas de pronto pago*

Año	Descuento	Sanción Mínima	Sin Descuento	Total
2014	91.330	19.044	40.935	151.309
	60,36 %	12,59 %	27,05 %	100,00 %
2015	80.759	19.186	53.642	153.586
	52,58 %	12,49 %	34,93 %	100,00 %
2016	112.035	31.242	39.223	182.500
	61,39 %	17,12 %	21,49 %	100,00 %
2017	5.076	210.256	6.884	222.216
	2,28 %	94,62 %	3,10 %	100,00 %
2018	126.725	34.037	86.332	247.094
	51,29 %	13,77 %	34,94 %	100,00 %
2019	170.516	29.380	83.648	283.544
	60,14 %	10,36 %	29,50 %	100,00 %
2020	180.049	50.215	76.948	307.212
	58,61 %	16,35 %	25,05 %	100,00 %
2021	232.473	34.694	84.604	351.772
	66,09 %	9,86 %	24,05 %	100,00 %
2022	329.129	45.868	89.012	464.009
	70,93 %	9,89 %	19,18 %	100,00 %
2023	373.923	48.889	135.851	558.663
	66,93 %	8,75 %	24,32 %	100,00 %

*Nota: Recaudo expresado en Millones de pesos***Fuente:** *Elaboración con datos de pagos del impuesto de la Secretaría de Hacienda de Antioquia de enero de 2014 a diciembre de 2023.*

Figura 7

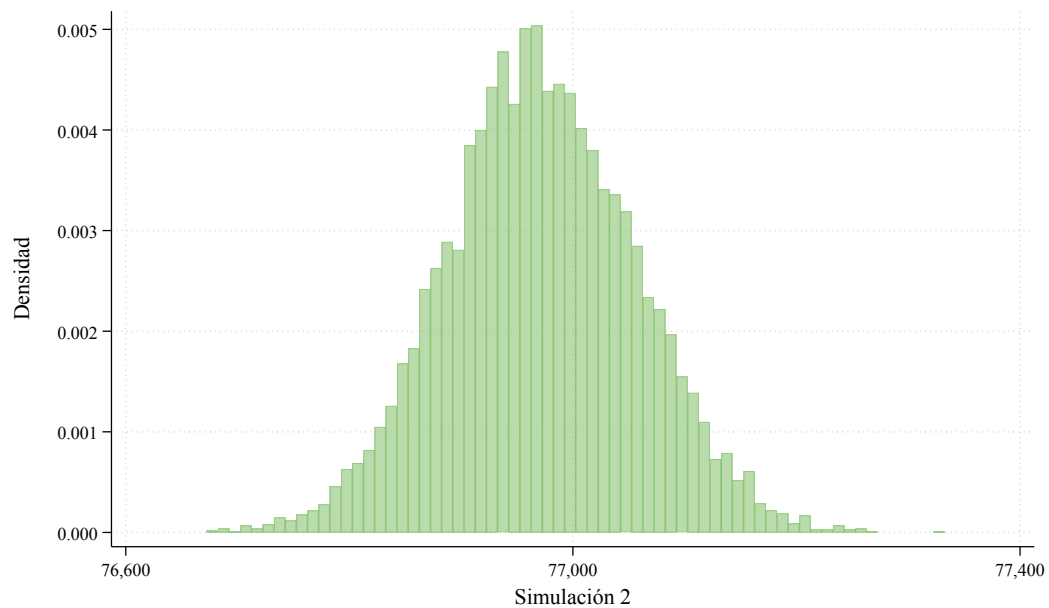
Simulación 1: Recaudo fiscal según la Tarifa 1 de la propuesta para el impuesto vehicular



Fuente: *Elaborado con datos de la Secretaría de Hacienda de Antioquia y basado en resultados de proyecciones propias en la simulación 1.*

Figura 8

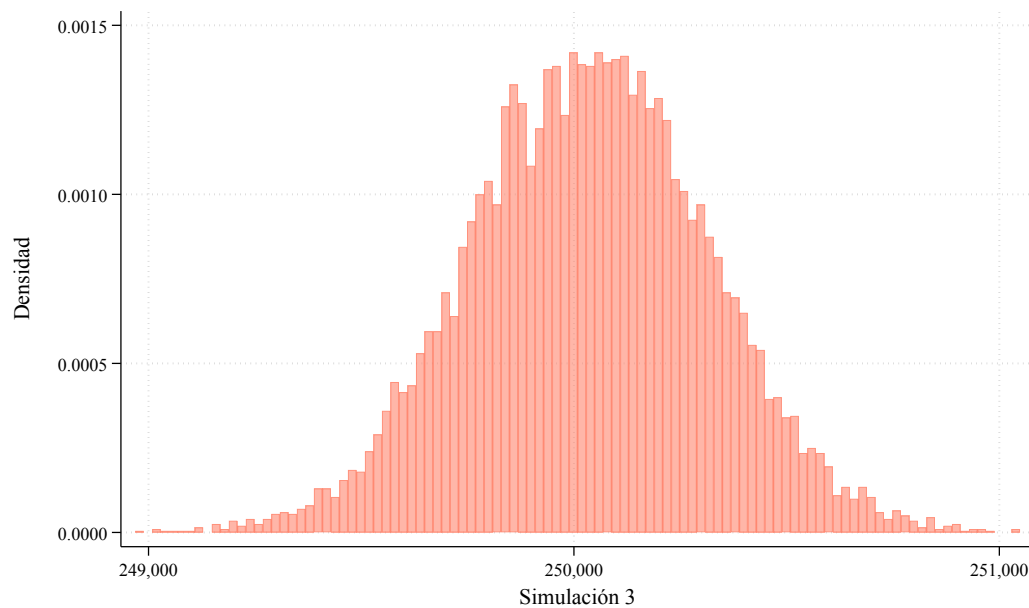
Simulación 2: Recaudo fiscal según la Tarifa 2 de la propuesta para el impuesto vehicular



Fuente: *laborado con datos de la Secretaría de Hacienda de Antioquia y basado en resultados de proyecciones propias en la simulación 2.*

Figura 9

Simulación 3: Recaudo fiscal según la Tarifa 3 de la propuesta para el impuesto vehicular



Fuente: *laborado con datos de la Secretaría de Hacienda de Antioquia y basado en resultados de proyecciones propias en la simulación 3.*