

Cálculo de la huella de carbono del ciclo operativo de los vehículos eléctricos livianos de
pasajeros en Colombia

Elaborado por:

Eliana Paola Caro Arias

Rodrigo Hernando Benavidez Ariza

Universidad Ean

Especialización en Gerencia de Proyectos

Seminario de Investigación de Postgrado

Bogotá, 1 de diciembre de 2023

Contenido

Índice de tablas	4
Índice de Figuras	5
Resumen	6
1. Planteamiento del problema	7
1.1 Antecedentes del problema.....	7
1.2 Descripción del problema	9
1.3 Pregunta de investigación.....	9
1.4 Objetivos	10
1.4.1 Objetivo general.....	10
1.4.2 Objetivos específicos.	10
1.5 Conveniencia de la Investigación	11
2. Marco Teórico	12
2.1 Huella de carbono	12
2.2 Reducción de Emisiones de GEI en el transporte terrestre	13
2.3 Matriz Energética	15
2.4 Tipos vehículos eléctricos	17
2.5 Baterías	19
2.6 Estaciones de carga.....	21
3. Metodología.....	22
3.1 Enfoque de la investigación	22
3.2 Alcance de la investigación	22
3.3 Diseño	23
3.4 Variables de la investigación.....	23
3.5 Población y tamaño de la muestra	25
3.6 Selección de métodos o instrumentos para recolección de información	25
4. Técnicas de análisis de datos	27
5. Análisis y discusión de resultados.....	28
5.1 Cálculo de las emisiones de GEI en la operación de los vehículos eléctricos livianos de pasajeros en Colombia	28
5.2 Cálculo de las emisiones de GEI en la operación de los vehículos a combustión interna livianos de pasajeros en Colombia.....	31
5.3 Comparación de las emisiones de GEI en la operación de los vehículos livianos de pasajeros eléctricos y a combustión interna.....	35

5.4	Estimación del número de vehículos eléctricos livianos de pasajeros que deben estar en circulación para alcanzar la meta de reducción de emisiones de GEI de Colombia para el año 2030.....	36
6.	Conclusiones	36
7.	Recomendaciones	38
8.	Referencias.....	39

Índice de tablas

Tabla 1. Rendimiento energético de vehículos eléctricos por Km	29
Tabla 2. Matriz energética y FE para Colombia por año	30
Tabla 3. Emisiones vehículos eléctricos particulares de pasajeros en Colombia	31
Tabla 4 Emisiones de GEI promedio para vehículos de pasajeros particulares de combustión interna.....	33
Tabla 5. Comparación entre emisiones de GEI de vehículos eléctricos y vehículos a gasolina en Colombia.....	35

Índice de Figuras

Figura 1. Consumo del mercado, kW	16
Figura 2. Relación entre Factor de emisión y calidad de matriz energética	34

Resumen

Como necesidad mundial y compromiso de Colombia de reducir la huella de carbono en el segmento del transporte vehicular, se plantea avanzar hacia una movilidad más sostenible y eficiente desde el punto de vista ambiental. Esto implica la transición de vehículos de combustión interna a vehículos eléctricos y la implementación de fuentes de energía más limpias en el sector del transporte.

La presente investigación se centró en evaluar el impacto ambiental de los vehículos eléctricos livianos de pasajeros durante su operación en el contexto colombiano, a través del cálculo de las emisiones de carbono en donde se determine si los vehículos eléctricos livianos de pasajeros tienen una huella de carbono significativamente menor en comparación con los vehículos de combustión interna livianos de pasajeros, considerando la matriz energética colombiana, la cual es una variable relevante para definir la huella de carbono de los vehículos objeto de la investigación.

En este sentido, se proporciona información valiosa para respaldar políticas públicas orientadas a promover la movilidad sostenible y la electrificación del transporte en Colombia como estrategia clave para mitigar el cambio climático y mejorar la eficiencia energética.

Palabras clave: Huella de carbono, vehículos eléctricos livianos de pasajeros, vehículos de combustión interna livianos, movilidad sostenible, electrificación del transporte en Colombia.

1. Planteamiento del problema

Colombia enfrenta un desafío importante en la reducción de su huella de carbono y la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. El sector del transporte es uno de los mayores aportantes de gases efecto invernadero (en adelante GEI) en el país, con un 12% del total de emisiones (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA., 2018, pág. 101). En este contexto, surge la pregunta crucial: ¿Los vehículos eléctricos livianos de pasajeros pueden ser una solución efectiva para reducir la huella de carbono en Colombia?

1.1 Antecedentes del problema

Calentamiento global originado por emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

Desde el inicio de la revolución industrial hasta nuestros días, la emisión de GEI ocasionados por la actividad humana ha crecido de forma acelerada. (Rosen, 2021). El CO₂ es el GEI derivado de actividades humanas más influyente en el calentamiento global y es emitido principalmente por el consumo de combustibles fósiles y leña para generar energía (Benavides Ballesteros & Leon Aristizabal, 2007, pág. 36). Los medios de transporte son la segunda mayor fuente de emisión de GEI, constituyendo el 25% del total de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía (PNUMA, 2022, pág. 46).

Contaminación del aire en las ciudades

La contaminación del aire en las ciudades colombianas es un problema significativo que afecta la calidad de vida de sus habitantes. Según el informe "Calidad del aire en América Latina" publicado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2016 (Organización mundial de la Salud, 2016), varias ciudades colombianas, como Bogotá y Medellín, tienen

niveles de contaminación del aire que superan los límites recomendados por la OMS, lo que puede tener graves consecuencias para la salud pública.

Regulación gubernamental

La Ley 1964 de 2019 promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia, con el fin de contribuir al cuidado del ambiente. Dentro de los beneficios que traer esta ley, se destaca que los vehículos eléctricos y aquellos que no emiten contaminantes estarán eximidos de cualquier limitación en la circulación (pico y placa, día sin carro, restricciones por materia ambiental, entre otros) (Ley 1964 de 2019). También se establece un descuento en la revisión técnico-mecánica de dichos vehículos (Ley 1964 de 2019).

A estas medidas se suman los beneficios otorgados por la Ley 1116 de 2017, donde se eliminó el arancel sobre los vehículos eléctricos y se redujo el IVA de estos a 5% (Ley 1116 de 2017). En cuanto al pago de impuestos, se estableció que este no puede exceder el 1% del valor comercial del vehículo eléctrico.

Beneficios económicos

Aunque hoy los vehículos eléctricos tienen un costo inicial mayor hasta en un 80% en comparación con vehículos a de combustión interna, su atractivo económico radica en su facilidad de operación y mantenimiento. Se estima los costos de mantenimiento de los vehículos eléctricos pueden ser menores en unos USD 5.000 durante la vida útil del vehículo. Si consideramos los costos elevados del combustible comparado con el valor de la electricidad, el ahorro puede ser aún mayor (Banco Mundial, 2022).

1.2 Descripción del problema

Los esfuerzos actuales para disminuir la emisión de GEI no son suficientes. Según el informe sobre la brecha de emisiones de 2022, (PNUMA, 2022), estamos lejos de los objetivos de los acuerdos de París, que buscaban limitar el incremento del calentamiento global a 1.5°C. Con las políticas actuales, se prevé un incremento de temperatura promedio de 2.8°C a finales del siglo XXI. Según este informe, se requiere una reducción de 45% adicional a los compromisos nacionales actuales de ahora al 2030 para lograr la meta de incremento de 1.5 °C, o del 30% para lograr 2°C de incremento global de temperatura.

Una de las intervenciones importantes que debe hacerse para acercarnos a los objetivos de los acuerdos de París, radica en la expansión de vehículos eléctricos (PNUMA, 2022, págs. 39-40), la cual también debe ir acompañada de una transformación en la matriz energética para que esta también alcance 0 emisiones. En Colombia se observa cada vez más oferta de vehículos eléctricos de uso particular. Sin embargo, al margen de la transformación de la matriz energética de nuestro país, esta clase de vehículos tiene una importante huella de carbono en su fabricación, durante su vida útil y en su disposición final (Noticias parlamento europeo, 2022), la cual no está claramente definida. De hecho, no es exagerado decir que los beneficios ecológicos de los vehículos eléctricos pueden desaparecer al final de la vida útil de sus baterías, (Huerta, 2021) si no se logra un proceso adecuado de reciclaje o disposición final adecuado para estas.

1.3 Pregunta de investigación

Según el informe sobre la brecha de emisiones de 2022, (PNUMA, 2022, pág. 47), la transformación del sistema de transporte debe darse por etapas, migrando a modos de

transporte de cada vez menores emisiones de GEI, incentivando el transporte público de pasajeros libre de carbono en lugar del vehículo particular, hasta llegar finalmente a tener transporte aéreo y marítimo de cero emisiones.

Teniendo en cuenta la distribución de la matriz energética media en Colombia y las emisiones de CO₂ durante la operación de un vehículo eléctrico, ¿El vehículo eléctrico particular es una opción sostenible para reducir la huella de carbono en Colombia?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general.

Determinar si la operación del vehículo eléctrico particular es una opción sostenible para reducir la huella de carbono en Colombia.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Cuantificar las emisiones de GEI que se producen durante la operación de los vehículos eléctricos livianos de pasajeros en Colombia, clasificados según el inventario nacional de GEI como categoría 1A3bi y 1A3bii (IDEAM, 2022, pág. 157).
- Cuantificar las emisiones de GEI asociadas a la operación de los vehículos de combustión interna livianos de pasajeros en Colombia, clasificados según el inventario nacional de GEI como categoría 1A3bi y 1A3bii (IDEAM, 2022, pág. 157).
- Comparar las emisiones de los vehículos livianos de pasajeros que emplean gasolina como combustible y las de los vehículos eléctricos livianos de pasajeros, clasificados según el inventario nacional de GEI como categoría 1A3bi y 1A3bii (IDEAM, 2022, pág. 157) para determinar impacto ambiental.

- Estimar el número de vehículos eléctricos livianos de pasajeros que deben estar en circulación para alcanzar la meta de reducción de emisiones de GEI de Colombia para el año 2030.

1.5 Conveniencia de la Investigación

La investigación puede ayudar a evaluar el impacto real de la adopción de vehículos eléctricos livianos de pasajeros en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en Colombia. Esto es fundamental para contribuir a la reducción de la brecha entre las metas de emisiones y los esfuerzos actuales para lograr desacelerar el calentamiento global.

Así mismo, la investigación puede ser insumo para identificar oportunidades de inversión en infraestructura de carga y tecnologías relacionadas con la movilidad eléctrica en Colombia, en caso de una positiva evaluación de la conveniencia de sustitución de parque automotor particular de combustión interna por vehículos eléctricos livianos de pasajeros.

Fruto del resultado de esta investigación, se podría evaluar la forma en que se dan beneficios gubernamentales actuales a los vehículos livianos de pasajeros dependiendo de sus emisiones de GEI, considerando su ciclo operativo y enfocar estos beneficios donde sean más eficientes en reducir las emisiones de GEI en Colombia.

Adicionalmente, esta investigación proporciona un valor muy importante en la formación profesional del equipo investigador, siendo una oportunidad para adquirir habilidades en el desarrollo de este estudio descriptivo el cual se encamina a la recopilación y análisis de datos,

y el planteamiento de hipótesis para la resolución del problema que permita finalmente incidir en la toma de decisiones informadas.

2. Marco Teórico

Para lograr los objetivos planteados en este estudio, es necesario establecer una base teórica que proporcione al lector una visión y una comprensión clara.

2.1 Huella de carbono

La huella de carbono se refiere a la cantidad total de gases efecto invernadero (en adelante GEI) emitidos directa o indirectamente como resultado de una actividad, producto, servicio, organización o individuo en particular. “Los GEI más comunes son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O)” (BBVA, 2021, pág. 12).

La huella de carbono se mide en CO₂ equivalente, es un patrón utilizado para mostrar en términos de CO₂, la equivalencia de los diferentes gases de efecto invernadero en relación con su potencial de calentamiento global (Ministerio del ambiente de Perú, 2019).

El colombiano promedio emite 1,6 toneladas de CO₂ equivalente al año (Información del Banco Mundial, 2018), y para alcanzar en 2030 el ambicioso compromiso de reducir en un 51% las emisiones de gases de efecto invernadero y alcanzar la neutralidad de carbono como meta para el año 2050 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2022).

¿Cómo se mide la huella de carbono?

El cálculo de la huella de carbono se realiza bajo las directrices del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), que es una organización científica que

se dedica a evaluar la información relacionada con el cambio climático. En Colombia, estos lineamientos han sido adaptados por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) y se usan para el cálculo de inventario nacional de emisiones a nivel nacional.

De acuerdo con el alcance de esta investigación, los lineamientos del IPCC para evaluar las emisiones de GEI para el sector del transporte móvil, emplea las siguientes metodologías:

Nivel 1: Los datos de la actividad se multiplican por un factor de emisión, el cual es un valor propio de cada tipo de combustible empleado en la actividad y se emplea un valor factor de emisión (FE) por defecto, calculado por el IPCC.

Nivel 2: es igual al nivel 1, pero empleando la información de composición del combustible propio usado en el país. (IPCC, 2006, pág. 3.12).

ICONTEC agrega una metodología adicional, en la cual se toman los datos de emisión directamente en la fuente con ayuda de instrumentos metrológicos. (ICONTEC, 2013)

2.2 Reducción de Emisiones de GEI en el transporte terrestre

De acuerdo con el marco mencionado en los antecedentes, en el afán de contribuir a las metas de disminución de emisiones, el gobierno de Colombia fija como meta para 2030 una reducción del 51% de las emisiones de GEI, con respecto a la proyección de emisiones en 2030 (345.8 Mt CO₂ equivalente (Ministerio de Ambiente, 2020, págs. 29, 32). Para los ministerios de minas y de transporte, se fija una meta de introducción (o conversión) de parque

automotor de 600.000 vehículos eléctricos, entre camiones ligeros, taxis, vehículos oficiales, livianos y de pasajeros, con un potencial de mitigación de 4.04 Mt CO₂ equivalente (Ministerio de Ambiente, 2020, pág. 90).

Para acelerar esta transición hacia la movilidad eléctrica, es necesaria la creación de un entorno normativo, técnico y financiero favorable para incentivar la comercialización y operación de vehículos eléctricos (EV), ya que producir vehículos de combustión interna es más económico que producir vehículos eléctricos (EV) o con motorización híbrida. Las marcas y comercializadores de vehículos no tendrán incentivos económicos para producir y comercializar vehículos ecológicamente eficientes a menos que las políticas ambientales sean suficientemente robustas. (Espinosa Ramírez & Ozgur Kayalica, 2023).

Teniendo en cuenta el potencial de mitigación de la conversión objetivo indicado en líneas anteriores y al esfuerzo en el que se debe incurrir para lograrlo, es necesario revisar algunos datos importantes.

En Colombia la contribución del sector transporte a la emisión de GEI total del país es del 12% (Ministerio de transporte, 2021). Las emisiones estimadas de todo el sector transporte en Colombia para 2030 son de 50.3 Mt CO₂ equivalente, luego la reducción esperada de 4.03 Mt CO₂ equivalente es el 8% del total de emisión del sector transporte, a través de acciones de electrificación para el transporte público e infraestructura para bicisuarios (Ministerio de ambiente, 2021, págs. 26-27). La mitad de las emisiones de GEI del sector transporte en Colombia son provienen de buses y camiones. (ANDEMOS, 2023, 1h56m09s)

Considerando que, según cifras del 2022, el parque automotor en Colombia es de alrededor de 17 millones de vehículos, de los cuales un 39% son Automóviles, camionetas, buses, busetas, camiones y volquetas, (RUNT, 2022, pág. 1). De este porcentaje total, 35% (6 millones) corresponden a vehículos livianos, con tendencia a aumentar cerca de un 30% para 2030 y un 55% para 2050. (Ministerio de Minas y Energía, 2022, pág. 13). Podemos inferir que el impacto del vehículo eléctrico particular en la reducción de emisiones esperada es inferior al 4% del total de emisiones que se espera reducir.

El consumo de gasolina promedio para vehículos a gasolina, según el ministerio de minas y energía para 2019 fue de 7.06 lge/100km (con emisión promedio de 164.81 gCO₂/km), (Ministerio de Minas y Energía, 2022, pág. 19), este dato será referencia para calcular la huella de carbono de los vehículos de combustión interna livianos de pasajeros, para posteriormente compararlo con la huella de carbono de vehículos eléctricos livianos de pasajeros , teniendo en cuenta el ciclo operativo de estos vehículos, bajo la hipótesis de que los vehículos eléctricos livianos de pasajeros tienen una menor huella de carbono en el contexto colombiano.

2.3 Matriz Energética

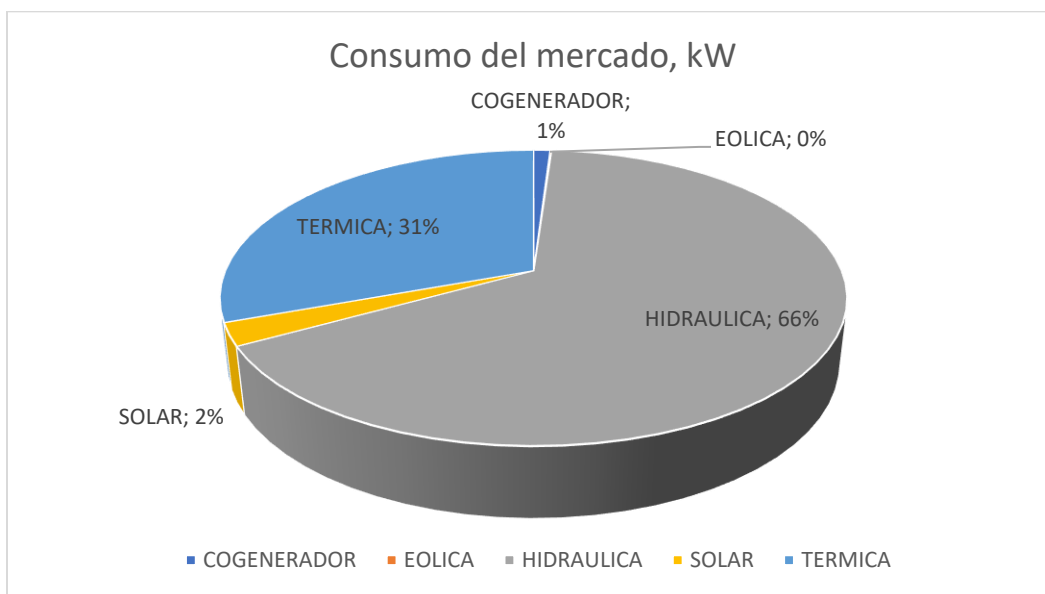
“La matriz energética es una representación cuantitativa de todas las fuentes de energía utilizadas en un país: eólica, hidráulica, solar, nuclear, biomasa, geotérmica o combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas” (educ.ar, 2015, pág. 1) y sirve de guía para que el sector energético proyecte las actividades de producción, transporte y ventas. (Polyexce, 2020)

La capacidad instalada de generación eléctrica de Colombia en 2020 está compuesta en su mayoría por hidroeléctricas y otras fuentes libres de carbono, sumando un 68.54%, donde el porcentaje restante lo componen las centrales termoeléctricas (31.46%). (OLADE,

2021, pág. 116). Según estas cifras, se puede indicar que la matriz energética de Colombia es relativamente limpia, favoreciendo así la reducción de huella de carbono en la operación de vehículos eléctricos livianos de pasajeros.

Tomando como referencia las cifras aportadas por XM que es el operador del mercado de energía eléctrica en Colombia, en su informe de Capacidad Efectiva Neta (kW) 2023 se puede visualizar el consumo del mercado actual en la , así:

Figura 1. Consumo del mercado, kW



Nota. Fuente elaboración propia a partir de datos de (XM S.A. E.S.P, 2023).

Del análisis de los datos podemos inferir que Colombia tiene una importante capacidad de generación de energía hidroeléctrica, con represas como la de Guatapé y la de El Quimbo.

También la generación térmica ha sido una fuente significativa de energía en Colombia (XM S.A. E.S.P, 2023).

No obstante, en los últimos años, Colombia ha estado invirtiendo en la diversificación de su matriz energética y en el desarrollo de fuentes de energía renovable, como la energía solar y la energía eólica. En la ley 697 de 2001 mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se impulsa el uso de fuentes de energía alternativas, se contempla un estímulo a la educación e investigación en fuentes de energía renovable (FER) (Ley 697 de 2001).

2.4 Tipos vehículos eléctricos

Según la Asociación Nacional de Movilidad Sostenible Andemos, “el volumen de ventas de vehículos eléctricos creció 1.809% entre 2018 y 2021 gracias a los incentivos brindados por el gobierno saliente de Iván Duque”. (ANDEMOS, 2022, pág. 9)

Varios países y ciudades han anunciado planes y políticas para eliminar gradualmente los vehículos de combustión interna en favor de vehículos eléctricos en un esfuerzo por reducir las emisiones de carbono y promover la movilidad sostenible. (Panwar, 2015).

Existen varios tipos de vehículos eléctricos (VE) en el mercado, cada uno diseñado para satisfacer diferentes necesidades de movilidad y contribuir a la reducción de emisiones de carbono, tales como:

- Vehículos Eléctricos de Batería (BEV por sus siglas en inglés, Battery Electric Vehicles), funcionan completamente con electricidad almacenada en baterías y no tienen un motor

de combustión interna. Son conocidos por su capacidad de viajar largas distancias con cero emisiones de escape. Cuentan con una autonomía de entre 200 y 450 km.

Ejemplos de BEV incluyen el Tesla Model 3 y el Nissan Leaf. (Montecelos, 2019)

- Vehículos Híbridos Enchufables (PHEV, por sus siglas en inglés, Plug-in Hybrid Electric Vehicles) tienen tanto un motor eléctrico como un motor de combustión interna. Pueden funcionar con electricidad pura durante un cierto rango antes de que el motor de combustión interna entre en acción o cargar la batería mediante enchufe. Ejemplos de BEV incluyen el Toyota Prius Prime y el Mitsubishi Outlander. (Doblado, 2017)
- Los Vehículos Híbridos Eléctricos (HEV, por sus siglas en inglés, Hybrid Electric Vehicles) son un tipo de vehículo que combina un motor de combustión interna con un motor eléctrico y una batería para lograr una mayor eficiencia en el consumo de combustible y reducir las emisiones de gases contaminantes. Los HEV no necesitan ser enchufados para recargar la batería, ya que la carga se produce principalmente durante la frenada regenerativa y mediante el funcionamiento del motor de combustión interna. Un ejemplo es el Toyota Corolla Híbrido el cuál además de su motor a combustión posee uno eléctrico que se asiste a una batería de 1.3KW/h suministrándole una autonomía teórica de 25km en modo eléctrico. (Panwar, 2015).
- Eléctricos de Rango Extendido (ER-EVs): Los Vehículos Eléctricos de Rango Extendido (ER-EVs, por sus siglas en inglés, Extended Range Electric Vehicles) son un tipo de vehículo eléctrico que combina características de vehículos eléctricos (EV) y vehículos híbridos enchufables (PHEV). Los ER-EVs se caracterizan por tener un motor eléctrico

principal que impulsa las ruedas y una batería recargable, pero también cuentan con un motor de combustión interna que actúa como generador para extender su autonomía eléctrica. Un ejemplo puede ser el Honda HRV-e, con un motor a combustión 1.5 turbo que le permite una autonomía de 700km en promedio. (Panwar, 2015).

- Los Híbridos Ligeros (MHEV, por sus siglas en inglés, Mild Hybrid Electric Vehicles) son un tipo de vehículo híbrido que combina un motor de combustión interna (generalmente de gasolina o diésel) con un motor eléctrico y una pequeña batería. Sin embargo, a diferencia de los híbridos convencionales (HEV), los MHEV no pueden funcionar únicamente con el motor eléctrico, sino que el motor eléctrico proporciona asistencia al motor de combustión interna para mejorar la eficiencia de combustible y reducir las emisiones de gases contaminantes (Panwar, 2015).

2.5 Baterías

Las baterías generalmente se clasifican como baterías primarias (no se pueden recargar) y secundarias (se puede realizar pasándolas por la corriente en la dirección opuesta invierte la reacción. electroquímica) (Moreno, 2016).

“Los parámetros más importantes para evaluar diferentes tipos de baterías son: el precio unitario (€/kWh), la densidad de energía (kWh/kg), la velocidad de la carga y el número de recargas aceptadas” (Moreno, 2016, pág. 124).

La industria automotriz emplea principalmente baterías de iones de litio como fuente electromotriz para los vehículos eléctricos. Según (Korthauer, 2018) “las principales ventajas de

las baterías de iones de litio frente a otras tecnologías son su alta energía específica, alta potencia específica, alta eficiencia durante la recarga y descarga, así como una tasa de descarga reducida” (Pág. 16)

La demanda creciente de baterías de iones de litio (LIB), impulsada principalmente por la continua electrificación de la industria automotriz, agrega gran presión ambiental por la explotación de minerales como el litio (Li), cobalto (Co). La vida útil de estas baterías oscila entre 5 y 10 años. Adicionalmente al Litio y Cobalto, estas están compuestas de metales pesados y productos químicos tóxicos y/o cancerígenos, electrolitos tóxicos y polímeros difíciles de degradar. Luego si su disposición final no es la adecuada, se generará una grave contaminación ambiental y de salud humana. (Li, y otros, 2018)

La minería y extracción de Litio es complicada y costosa, se requieren 250 ton de espudomena (mineral rico en litio en forma de cristales estriados) (Rock Identifier, s.f.) o 750 ton de salmuera de litio y 1900 ton de agua para producir 1 tonelada de litio. (Li, y otros, 2018). De estas 2 fuentes de litio, la que presenta menos emisiones de GEI es la salmuera de litio. (Kelly & Wang, 2021). Esta información da una idea del impacto ambiental inicial en la fabricación de baterías de litio para el sector automotriz, para el cual se destinará más de un tercio del litio extraído en el mundo en 2025. (Li, y otros, 2018).

La fabricación de baterías de iones de litio causa importantes emisiones de GEI, por ejemplo, el combustible fósil empleado durante la minería de los minerales materia prima de las baterías y del consumo energético durante su fabricación. (Peiseler, 2022, pág. 1386)

La recuperación de los materiales que componen las baterías de iones de litio usadas mediante el reciclaje ha mejorado y logran una alta eficiencia de recuperación. Sin embargo, aunque los impactos ambientales del reciclaje son mucho menores que los del proceso de minado de MP estas baterías, la energía requerida en el proceso, su complejidad y las emisiones asociadas al mismo hacen que los fabricantes prefieran producir baterías desde 0 a reciclar baterías usadas. (An, 2019)

2.6 Estaciones de carga

Las estaciones de carga para vehículos eléctricos son infraestructuras diseñadas para recargar las baterías de los vehículos eléctricos (VE) y proporcionar la energía necesaria para que funcionen. Estas estaciones son fundamentales para apoyar la adopción de VE al permitir a los conductores recargar sus vehículos de manera conveniente. Existen varios tipos de estaciones de carga para VE a saber (U.S. Department of Energy, 2011):

Carga en el hogar: Los propietarios de vehículos eléctricos pueden instalar un cargador de nivel 2 (220 V) en sus hogares. Esto permite una recarga conveniente durante la noche y es ideal para mantener el vehículo listo para el uso diario (U.S. Department of Energy, 2011).

Estaciones de Carga Pública: Estas estaciones se encuentran en lugares públicos, como estacionamientos de centros comerciales, estaciones de servicio, restaurantes, y más. Ofrecen cargadores de nivel 2 y, en algunos casos, cargadores de nivel 3 (carga rápida) que pueden cargar un VE más rápidamente (U.S. Department of Energy, 2011).

Carga Rápida: Estas estaciones de carga rápida, también conocidas como estaciones de carga de nivel 3 o DCFC (Carga de Corriente Continua de Alta Potencia), son capaces de cargar un VE a un ritmo mucho más rápido que los cargadores de nivel 2. Son ideales para viajes largos y se encuentran a lo largo de autopistas (U.S. Department of Energy, 2011).

Cargadores Inalámbricos: Algunas estaciones de carga utilizan tecnología inalámbrica para cargar el vehículo a través de placas de carga en el suelo o montadas en la pared, eliminando la necesidad de cables (U.S. Department of Energy, 2011).

Carga Inteligente: Algunas estaciones de carga están equipadas con sistemas de carga inteligente que permiten a los usuarios programar y controlar la carga de sus vehículos a través de una aplicación móvil (U.S. Department of Energy, 2011).

3. Metodología

3.1 Enfoque de la investigación

Por las características de esta investigación, seguirá la ruta cuantitativa, debido a que durante su desarrollo se surten diferentes etapas que se deben seguir de manera secuencial en orden riguroso, partiendo de una idea delimitada que una vez acotada, después del proceso de recolección y análisis de datos, se presentaran unas conclusiones acerca de las hipótesis planteadas. (Hernandez Sampieri, 2018)

3.2 Alcance de la investigación

El alcance de la investigación es de tipo descriptivo lo cual implica la recopilación de datos y la descripción detallada de los procesos y factores involucrados en la medición de la

huella de carbono los vehículos eléctricos livianos de pasajeros. (Hernandez Sampieri, 2018, pág. 108)

3.3 Diseño

El diseño de la investigación es no experimental ya que se realiza sin manipular las variables y los datos se tomarán de fuentes secundarias. También es de tipo longitudinal, porque se calculará la huella de carbono de los vehículos livianos de pasajeros en objeto de estudio (eléctrico y de combustión interna) en diferentes momentos en el tiempo (línea de tiempo) donde varia la calidad de la matriz energética. (Hernandez Sampieri, 2018, pág. 174)

3.4 Variables de la investigación

Con base en el marco teórico presentado en el aparte anterior, las variables a tener en cuenta son las siguientes:

Variable	Definición
Calidad de la Matriz Energética	Representa la composición y origen de la fuente de energía utilizada para la generación eléctrica de un país. Tendrá mejor calidad (100%) si las fuentes de energía son renovables y generan 0 emisiones, como por ejemplo la energía solar, eólica, hidroeléctrica o geotérmica. Estas fuentes de energía tienen una huella de carbono baja o nula, ya que no emiten directamente gases de efecto invernadero durante la generación de electricidad.
	Definición operacional

	<p>Debido a que la energía generada por la matriz energética sirve para cargar los vehículos eléctricos, la emisión de GEI es indirecta y depende de la calidad de la matriz energética. Se establecerán diferentes escenarios de calidad de matriz energética a través del tiempo, empleando datos históricos y proyecciones de calidad de matriz energética tomados del último informe de inventarios de GEI nacional para obtener sus correspondientes factores de emisión y así evaluar las emisiones de vehículos eléctricos livianos de pasajeros.</p>
<p>Actividad del vehículo</p>	<p>Esta variable determina el comportamiento del vehículo mientras emite GEI. Las unidades de medida de esta variable para vehículo de combustión interna será el consumo de combustible en galones por Km recorrido. En el caso del vehículo eléctrico, como no emite GEI durante su operación, su emisión de GEI es indirecta y está relacionada al gasto de energía eléctrica en su operación, medido en kW/h por kilómetro recorrido.</p>
	<p>Definición operacional</p>
	<p>El producto de esta actividad del vehículo y el factor de emisión da como resultado la emisión de GEI. Se evaluarán diferentes escenarios de kilómetros recorridos en un año, empleando promedios históricos para los vehículos livianos de pasajeros a nivel nacional tomados de último informe de inventarios de GEI nacional. También se evaluarán escenarios de Km recorridos promedio y mayores al promedio. En estos escenarios se evaluarán las emisiones anuales de los vehículos</p>

eléctricos livianos de pasajeros y eléctricos equivalentes en un periodo fijo de tiempo de 8 años, que corresponde a la duración media de las baterías a pleno rendimiento para vehículos eléctricos (Hyundai, 2022)
--

3.5 Población y tamaño de la muestra

Debido a que el tipo de investigación que se llevara a cabo es de tipo cuantitativo empleando datos de fuentes secundarias, no hay una población a estudiar, luego tampoco se emplean muestras de población.

3.6 Selección de métodos o instrumentos para recolección de información

Para el cálculo de las emisiones de vehículos eléctricos livianos de pasajeros y de combustión interna livianos de pasajeros se emplearán los lineamientos del Panel intergubernamental del cambio climático (IPCC por sus siglas en ingles), según los cuales se estiman las emisiones a partir de un factor de emisión (FE) que es propio según el tipo de combustible que se esté consumiendo o quemando. La fórmula para el cálculo de emisiones se muestra en la ecuación 1:

$$\text{Emisiones} = \text{Datos de la actividad} \times \text{factor de emisión} \quad (1)$$

Donde los datos de la actividad para el caso de la investigación que se llevará a cabo serán la cantidad de combustible (gasolina) consumido para el caso de vehículos de

combustión interna livianos de pasajeros y energía eléctrica utilizada para el caso de vehículos eléctricos livianos de pasajeros, durante la misma cantidad de Kilómetros recorridos.

Los lineamientos del IPCC de 2006 en su numeral 3.2.1 para vehículos terrestres, indican 2 niveles para la estimación de las emisiones cuyo origen es el uso de combustibles fósiles, dependiendo de la información disponible acerca de los contenidos de carbono del combustible empleado en cada país.

Nivel 1: en este nivel en el cálculo de emisiones de CO₂ se usan los FE según el combustible sujeto de estudio publicados en los listados del IPCC y otras fuentes. Este es un FE por defecto y se emplea cuando no hay datos del contenido de carbono del combustible empleado por el vehículo de combustión interna. Las emisiones se dan según la ecuación 2:

$$Emisión = combustible_a \times FE_a \quad (2)$$

Donde:

Emisión = Emisiones de CO₂ (kg)

Combustible a= Combustible empleado

FE_a = Factor de emisión (Kg/TJ). Es igual al contenido de carbono del combustible multiplicado por 44/12

a = tipo de combustible

Nivel 2: es igual al nivel 1, con la diferencia de que se usa el contenido de carbono específico del país empleado en el vehículo, luego el FE es propio de cada combustible y país. Se emplea la misma fórmula indicada para el nivel 1. (IPCC, 2006)

En el cálculo de emisiones de CO₂ del vehículo de combustión interna, se aplicará el nivel 2, considerando el FE propio de Colombia para la gasolina corriente tomado del informe del inventario nacional de GEI 1990-2018 (IDEAM, 2022, pág. 172) y del informe final de la calculadora de emisiones FECOC de la Unidad de Planeación Minero-Energética UPME (UPME, 2016, pág. 31)

Según las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006), "Las emisiones de CH₄ y N₂O son más difíciles de estimar con exactitud que las del CO₂ porque los factores de emisión dependen de la tecnología del vehículo, del combustible y de las condiciones de uso ". (Capítulo 3, Pág. 12). Por esta razón, y ante la falta de datos de factor de emisión de CH₄ y N₂O para Colombia, para el cálculo de las emisiones de CH₄ y N₂O se empleará el nivel 1 y se usaran los FE indicados en las bases de datos del IPCC.

4. Técnicas de análisis de datos

En el caso de la presente investigación, según las variables establecidas anteriormente, se realiza cálculo directo de la huella de carbono del vehículo eléctrico y el de combustión interna.

Luego del cálculo, se realiza análisis por cada una de las variables definidas para comparar y concluir a cerca de las emisiones de los vehículos livianos de pasajeros eléctricos y a gasolina.

5. Análisis y discusión de resultados.

A continuación, se presenta el cálculo de las emisiones de la operación de cada vehículo:

5.1 Cálculo de las emisiones de GEI en la operación de los vehículos eléctricos livianos de pasajeros en Colombia

Para realizar el cálculo se utilizará la siguiente expresión mostrada en la ecuación 3:

$$Emisión\ CO_2 = Actividad\ del\ vehiculo \times FE_q \quad (3)$$

Donde:

Actividad del vehículo = Energía consumida en kWh/km en un año x Número de años

FE_q = Factor de emisión de la matriz energética para un año n.

Para determinar la energía consumida en kWh/km promedio, se revisan las fichas técnicas de 10 de los vehículos más vendidos en Colombia en agosto de 2023 (Motor, 2023), se calcula el rendimiento en Km por kWh para cada uno y se hace el consumo energético por Km mediante un promedio simple, mostrado en la Tabla 1.

Tabla 1. Rendimiento energético de vehículos eléctricos por Km

Modelo del vehículo	Capacidad batería kWh	Autonomía Km	kWh/Km
MX-30	35.5	200	0.178
ZHIDOU D2S	18	150	0.120
BYD YUAN	60.48	480	0.126
MINI COOPER SE	32.6	135	0.241
RENAULT ZOE	52	395	0.132
CHEVROLET BOLT	20	132	0.152
NISSAN LEAF	40	389	0.103
AUDI Q8	114	595	0.192
MERCEDES BENZ EQA350	66.5	411	0.162
MG ZS	44.5	263	0.169
		Promedio	0.157

Nota. Fuente elaboración propia con base en el listado de carros híbridos y eléctricos más vendidos en Colombia a agosto de 2023 según la Revista Motor y fichas técnicas de los vehículos listados.

La cantidad de Km recorridos se toma del promedio para automóvil-campero de combustión interna, el cual es 5.500 al año según el informe de supuestos para la realización de escenarios de referencia NDC (VITO, 2020, pág. 68). También, considerando que un vehículo eléctrico no tiene restringida su movilidad por medidas como el pico y placa (Ley 1964 de 2019), se empleará un recorrido anual de 11.000 Km.

Para los factores de emisión de la matriz energética, los cuales dependen de la calidad de la matriz energética de Colombia, se emplean datos del año 2021 y 2020 tomados de la calculadora FECOC de la UPME y de los históricos de años anteriores, junto con la calidad de matriz energética de esos años, se proyecta el factor de emisión para los años 2030 y 2050.

En la Tabla 2 se resumen los datos relevantes para el cálculo de la calidad de matriz energética para cada año y su correspondiente factor de emisión, el cual es la razón entre las emisiones totales del SIN (sistema de interconexión eléctrica) y la energía generada en un año (XM, 2020).

Tabla 2. Matriz energética y FE para Colombia por año

Año	Capacidad instalada MW	Generación GWh	Capacidad instalada renovable MW	Generación renovable GWh	Calidad Matriz energética	FE (KgCO2/kWh)
2013	16.213	72.184	10.082	50.915	70,53%	0.2
2014	17.197	69.06	11.154	48.625	70,41%	0.19
2015	17.849	76.216	11.756	49.395	64,81%	0.199
2016	17.86	74.549	11.887	49.979	67,04%	0.21
2017	18.155	77.468	12.071	62.076	80,13%	0.11
2018	19.048	79.182	12.194	60.673	76,63%	0.13
2019	19.406	78.149	12.516	54.741	70,05%	0.166
2020	19.265	77.153	12.374	50.797	68,54%	0.203
2021	19.435	80.905	12.544	60.5	74,78%	0.126
2030	22321.8	117249	14365.5	77148	65,80%	0.149
2050	37580	187000	24360	120241	64,30%	0.187

Nota: Fuente elaboración propia con datos de capacidad instalada y generación obtenidos de (Expansión, 2021), factores de emisión hasta 2021 tomados de calculadora FECOC 2016 (UPME, 2016) y datos para proyecciones de 2030 y 2050 obtenidos de (VITO, 2020)

A continuación, se muestra el cálculo realizado para el año 2021 usando el recorrido por año de 5.500 Km durante 8 años y el rendimiento promedio de vehículos eléctricos de la tabla 1.

$$\begin{aligned} \text{Emisiones (2021) x km} &= 0,126 \text{ KgCO}_2/\text{kWh} \times 0,157 \text{ kWh/Km} \times 5.500 \text{ Km/año} \times 8 \text{ años} \\ &= 870,408 \text{ KgCO}_2 = 0,870 \text{ TonCO}_2 \end{aligned}$$

En la Tabla 3 se muestran los resultados de los cálculos para 2020, 2021, 2030 y 2050, para 5.500 y 11.000 Km.

Tabla 3. Emisiones vehículos eléctricos particulares de pasajeros en Colombia

Año	Calidad Matriz energética Qe	FE (KgCO2/kWh)	Emisión Ton CO2 5.500 Km	Emisión Ton CO2 11.000 Km
2020	68.54%	0.203	1.402	2.805
2021	74,78%	0.126	0.870	1.741
2030	65.80%	0.149	1.031	2.063
2050	64.30%	0.187	1.293	2.586

Nota. Fuente elaboración propia con datos obtenidos de (Expansión, 2021), factores de emisión 2020 y 2021 tomados de calculadora FECOC 2016 (UPME, 2016) y datos para proyecciones de 2030 y 2050 obtenidos de (VITO, 2020).

5.2 Cálculo de las emisiones de GEI en la operación de los vehículos a combustión interna livianos de pasajeros en Colombia

Con base en los datos de emisión de vehículos de a gasolina mencionados anteriormente, la emisión de CO2 promedio de vehículos a gasolina en Colombia es de 164,81 gCO2/km, con un consumo promedio de 7.06 lge/100km (Ministerio de Minas y Energía, 2022, pág. 19). Para el tiempo fijado de evaluación de 8 años, considerando que el recorrido promedio de vehículos en Colombia es de 5.500 Km, la emisión de CO2 equivalente en la operación del vehículo de combustión interna liviano de pasajeros en Colombia se calcula según la ecuación 4:

$$CO2eTTW = FECH4 * GWPC4 * km * VU + FEN20 * GWPN20 * km * VU + CE * FECO2 * km * VU \quad (4)$$

(HINICIO, 2021, págs. 6-7)

Donde:

CO2eTTW: Emisión de GEI en CO2 equivalente del combustible consumido, del 'tanque a la rueda' (*tank-to-wheel* en inglés).

FECH4: Factor de emisión de CH4 en gCH4/km. Tomado de (UPME, 2016, pág. 32)

FEN2O: Factor de emisión de N2O en gN2O/km. Tomado de (UPME, 2016, pág. 32)

FECO2: Factor de emisión de CO2 debido a la combustión del combustible (gasolina) en gCO2/km tomado de (Ministerio de Minas y Energía, 2022, pág. 19)

GWPC4: Potencial de calentamiento global del CH4. Tomado de (IPCC, 2006)

GWPN2O: Potencial de calentamiento global del N2O. Tomado de (IPCC, 2006)

km: Kilometraje anual (km/año). En este caso se emplea 5.500 km.

VU: Cantidad de años de evaluación (años). En este caso el número de años es 8.

A continuación, se muestra el cálculo de emisiones de GEI promedio para un vehículo particular de combustión interna en Colombia:

$$\begin{aligned} \text{Emisiones gCO}_2 &= 164,81 \text{ gCO}_2/\text{km} \times 5,500 \text{ km/año} \times 8 \text{ años} \\ &= 7,251,640 \text{ gCO}_2 = 7,25 \text{ TonCO}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones gCH}_4 &= 5.46 \times 10^{-3} \text{ gCH}_4/\text{km} \times 28 \times 5,500 \text{ km/año} \times 8 \text{ años} \\ &= 6,732 \text{ gCO}_2\text{eq} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones gN}_2\text{O} &= 5.22 \times 10^{-4} \text{ gCH}_4/\text{km} \times 265 \times 5,500 \text{ km/año} \times 8 \text{ años} \\ &= 6,089 \text{ gCO}_2\text{eq} \end{aligned}$$

En la Tabla 4 se resumen y totalizan los cálculos realizados.

Tabla 4 Emisiones de GEI promedio para vehículos de pasajeros particulares de combustión interna

GEI	FE (g/galón)	FE (g/km)	GWP	gCO2eq/Km	gCO2eq en 8 años
CO2	8,808	164.81	1	164.81	7,251,640.00
CH4	0.293	5.46E-03	28	0.153	6,732.40
N2O	0.028	5.22E-04	265	0.138	6,089.03
				Total	7,264,461.44

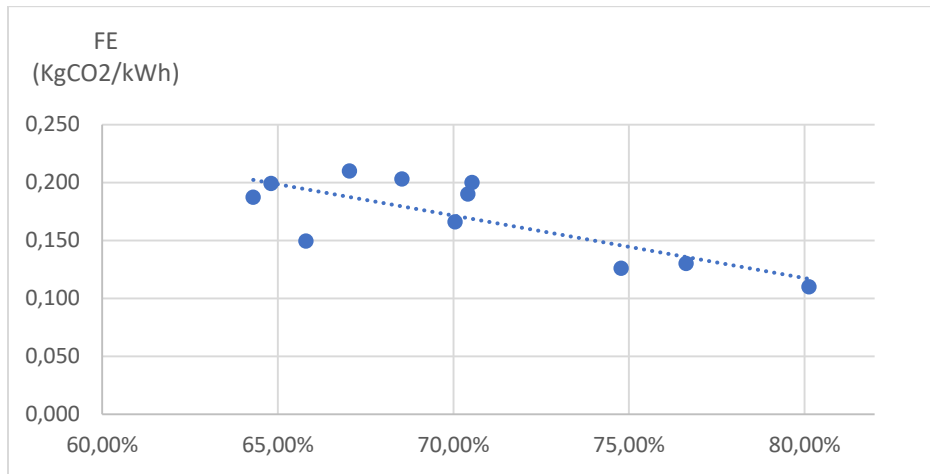
Nota. Fuente elaboración propia a partir de datos de Ministerio de minas y energía (Ministerio de Minas y Energía, 2022, pág. 19) y unidad de planeación minero-energética (UPME, 2016, pág. 31).

Considerando un recorrido promedio de 5.500 Km al año, durante 8 años, considerando solo las emisiones de la operación del vehículo (conducción) se obtiene una emisión de CO2eq de 7,26 TonCO2eq.

La huella de carbono de los vehículos particulares a gasolina considerando solo su operación es mayor en todos los escenarios contemplados en la presente investigación a la huella de carbono de los vehículos eléctricos particulares. Los vehículos eléctricos particulares tienen entre un 12% y un 19% de la huella de carbono de un vehículo particular a gasolina, considerando la misma cantidad de kilómetros recorridos.

De los datos de calidad de matriz energética y factores de emisión del SIN (Sistema de interconexión nacional) se puede inferir que presentan una relación inversa, a mayor calidad de la matriz energética, menor factor de emisión. En la Figura 2 se puede apreciar la relación mencionada:

Figura 2. Relación entre Factor de emisión y calidad de matriz energética



Nota. Fuente elaboración propia

También se puede apreciar una alta sensibilidad del factor de emisión anual con respecto a la calidad de matriz energética, según la información mostrada en la Figura 2 y las tablas 2 y 3, donde una variación de 15% de la calidad de la matriz energética casi duplica el valor del factor de emisión de la matriz energética, lo cual lleva a incrementar en la misma proporción las emisiones indirectas de los vehículos eléctricos.

De los datos de actividad de los vehículos, (Kilómetros recorridos), por los cálculos realizados y la posición de los km recorridos en las fórmulas del cálculo de GEI, se puede concluir que las emisiones de GEI tanto para vehículos eléctricos como para vehículos de combustión interna tienen una relación directamente proporcional a la cantidad de kilómetros recorridos, incrementándose a medida que se incrementa la intensidad de operación de los vehículos.

5.3 Comparación de las emisiones de GEI en la operación de los vehículos livianos de pasajeros eléctricos y a combustión interna

La relación entre las emisiones de GEI de vehículos eléctricos de pasajeros y vehículos livianos de pasajeros a gasolina se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparación entre emisiones de GEI de vehículos eléctricos y vehículos a gasolina en Colombia

Año	Calidad Matriz energética Qe	Emisión vehículo eléctrico Ton CO2 5.500 Km	Emisión vehículo a gasolina TonCO2 5.500 Km	Emisiones VE/Emisiones VCI %
2020	68.54%	1.402		19.3%
2021	74,78%	0.870		12.0%
2030	65.80%	1.031	7.264	14.2%
2050	64.30%	1.293		17.8%

Nota. Fuente elaboración propia

Se evidencia que teniendo en cuenta solamente la operación del vehículo, los vehículos livianos eléctricos de pasajeros tienen emisiones menores al 20% en comparación con sus pares de combustión interna, con la calidad de matriz energética histórica y proyectada mostrada en la tabla 5.

5.4 Estimación del número de vehículos eléctricos livianos de pasajeros que deben estar en circulación para alcanzar la meta de reducción de emisiones de GEI de Colombia para el año 2030.

Según los cálculos realizados en puntos anteriores, para el año 2030 la diferencia de emisiones entre un vehículo eléctrico liviano de pasajeros y su par de combustión interna es de 6,233 Ton CO₂eq ((7,264 – 1,031) TonCO₂eq).

Para alcanzar la meta de reducción de 4% (2 MtonCO₂eq correspondientes a la mitad de la meta total, debido a que el % de emisiones atribuibles a vehículos livianos de pasajeros a gasolina son la mitad de las emisiones a reducir) en emisiones para ese año (Ministerio de ambiente, 2021, págs. 26-27), en 2030 deberían circular 320.873 vehículos eléctricos livianos de pasajeros en Colombia.

6. Conclusiones

- Gracias a la investigación realizada y los instrumentos aplicados para la comprobación de las hipótesis planteadas se puede determinar que los vehículos eléctricos livianos de pasajeros, teniendo en cuenta solo su ciclo operativo, son una opción sostenible para reducir la huella de carbono en Colombia considerando la calidad de matriz energética actual y la proyectada a los años 2030 y 2050.
- Los factores anuales de emisión del SIN (sistema interconectado nacional) están fuertemente relacionados con la calidad de la matriz energética nacional. Si la calidad

de la matriz disminuye mucho (debido al incremento de generación por fuentes térmicas), la efectividad de los vehículos eléctricos en la reducción de emisión de GEI se reduce significativamente. La electrificación del parque automotor debe ir de la mano con la descarbonización de la Matriz energética nacional. (PNUMA, 2022, pág. 39).

- Colombia aún está lejos de alcanzar la meta de vehículos eléctricos matriculados en Colombia para lograr la meta de reducción de GEI propuesta para 2030. A corte de Junio de 2023, se han matriculado 8,299 vehículos eléctricos de todo tipo, de los cuales solamente 2,422 son vehículos eléctricos particulares livianos de pasajeros (Ministerio de transporte, 2022). La meta para 2030 es de 600,000 vehículos eléctricos de todo tipo (Ministerio de Ambiente, 2020, pág. 90) de los cuales aproximadamente la mitad deberían ser vehículos eléctricos livianos de pasajeros (ANDEMOS, 2023, 1h56m09s), lo cual se acerca al resultado del cálculo en el marco de la presente investigación el cual arrojó 320,873 vehículos eléctricos particulares de pasajeros.
- Aunque los vehículos híbridos también aportan a disminuir la emisión de GEI, son menos eficientes para lograr esa reducción y en su acumulado suman 63,620 unidades a corte de julio de 2023 (ANDI, 2023). Se deberían matricular aproximadamente 45.200 vehículos eléctricos particulares livianos de pasajeros al año del 2024 al 2030 para alcanzar la meta de reducción de emisiones propuesta.
- Las políticas gubernamentales y los incentivos desempeñan un papel fundamental en la promoción de vehículos eléctricos. Subsidios, exenciones fiscales y otras medidas

pueden hacer que los vehículos eléctricos sean más accesibles y atractivos para los consumidores. (Espinosa Ramírez & Ozgur Kayalica, 2023)

- Los vehículos eléctricos no emiten contaminantes atmosféricos locales directamente durante su operación, a diferencia de los vehículos de combustión interna que emiten partículas finas, óxidos de nitrógeno y otros contaminantes. La reducción de estas emisiones tiene un impacto en la salud pública

7. Recomendaciones

- Para futuras investigaciones de impacto en huella de carbono de vehículos eléctricos, se recomienda ampliar el alcance incluyendo el impacto de la construcción de los vehículos. En la comparación de construcción entre vehículos eléctricos y de combustión interna la principal diferencia está en las emisiones de GEI derivadas de la fabricación de las baterías de Iones de litio, las cuales durante su fabricación pueden alcanzar emisiones de GEI hasta de 60 KgCO₂eq por kWh de batería. (Kelly & Wang, 2021, pág. 10).
- Para futuras investigaciones que requieran proyecciones de calidad de matriz energética y capacidad de generación eléctrica, se sugiere realizar una proyección de demanda de energía de vehículos eléctricos y compararla con la capacidad de generación en el año proyectado.
- Una vez las baterías de vehículos eléctricos cumplan su vida útil, deben disponerse de manera adecuada. Sin embargo, existe un potencial importante para aprovechamiento

en otras aplicaciones, una vez no sean funcionales en vehículos eléctricos. Este tema podría ser base de investigaciones e incluso emprendimientos, aprovechando la necesidad de disposición de baterías que se presentará en unos años.

- Se recomienda expandir el análisis a los vehículos de combustión interna más eficientes en consumo de combustible (y por lo tanto de menores emisiones de GEI/km), considerando que la tecnología avanza también en el mejoramiento de los motores de combustión interna.

8. Referencias

- An, L. (2019). *Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries Processing Methods and Environmental Impacts*. Springer International Publishing. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-31834-5>
- ANDEMOS. (2022). Andemos. Obtenido de https://www.andemos.org/_files/ugd/d1a7a0_5caab511f49a4d1082d78bfc4cb28ba.pdf
- ANDEMOS. (27 de septiembre de 2023). IV congreso de movilidad sostenible [video]. Youtube. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=qQcBS7DdcEM>
- ANDI. (Julio de 2023). *Boletín vehículos eléctricos e híbridos*. Obtenido de [https://www.andi.com.co/Uploads/07.%20INFORME%20MENSUAL%20VEHÍCULOS%20E&H%20JULIO%202023%20\(Prensa\).pdf](https://www.andi.com.co/Uploads/07.%20INFORME%20MENSUAL%20VEHÍCULOS%20E&H%20JULIO%202023%20(Prensa).pdf)
- Banco Mundial. (17 de noviembre de 2022). Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2022/11/17/electric-vehicles-an-economic-and-environmental-win-for-developing-countries>
- BBVA. (14 de diciembre de 2021). *La huella de carbono y el desafío de las emisiones*. Obtenido de BBVA: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/monografico-bbva-sostenibilidad-la-huella-de-carbono-y-el-desafio-de-las-emisiones/>
- Benavides Ballesteros, H. O., & Leon Aristizabal, G. E. (diciembre de 2007). *IDEAM*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfindmkaj/http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf
- Demográfico, M. p. (2023). *Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización*. Madrid, España: Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado.
- Doblado, J. A. (2017). *Vehículo Eléctricos e Híbridos*. Madrid: Ediciones Paraninfo S.A.

- educ.ar*. (2015). Obtenido de https://energiasdemipais.educ.ar/edmp_lecturas/matriz-energetica/
- Espinosa Ramírez, R., & Ozgur Kayalica, M. (2023). Strategic environmental policies: Electric vehicles vs internal combustion engine vehicles. *Contaduría, Administración*, 68(4) 233-235. Obtenido de <https://doi.org/10.22201/fca.24488410e.2023.3234>
- Expansión. (2021). *Datosmacro.com*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2023, de Datosmacro.com: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/electricidad-generacion/colombia>
- Hernandez Sampieri, R. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas: cuantitativa, cualitativa y mixta*. México: Mc Graw Hill- educación.
- HINICIO. (2021). *Nota Metodológica de la Herramienta de Sustitución Vehicular Nota Metodológica*. Bogotá. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Nota_metodologica.pdf
- Huerta, L. (23 de septiembre de 2021). El lado oscuro de los vehículos eléctricos. *Gaceta UNAM*, pág. 4. Obtenido de [/https://www.gaceta.unam.mx/wp-content/uploads/2021/09/210923.pdf](https://www.gaceta.unam.mx/wp-content/uploads/2021/09/210923.pdf)
- Hyundai. (18 de Mayo de 2022). *ZONAECO*. Obtenido de <https://www.hyundai.com/es/zonaeco/eco-life/recarga/cuanto-dura-bateria-coche-electrico>
- ICONTEC. (2013). Obtenido de <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:tr:14069:ed-1:v1:es>
- IDEAM. (2022). *INFORME DEL INVENTARIO NACIONAL DE GASES EFECTO INVERNADERO 1990-2018 Y CARBONO NEGRO 2010-2018 DE COLOMBIA*. Bogotá D.C. Obtenido de <chrome-extension://efahhttps://unfccc.int/sites/default/files/resource/Annex%20BUR3%20COLOMBIA.pdf>
- IDEAM. (2023). *ideam.gov.co*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2018). *Segundo Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC)*. Bogotá D.C. Obtenido de http://www.ideam.gov.co/documents/24277/77448440/PNUD-IDEAM_2RBA.pdf/ff1af137-2149-4516-9923-6423ee4d4b54
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero Volumen 2*. Obtenido de www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf
- Kelly, J., & Wang, M. (2021). Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 174. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105762>
- Korthauer, R. (2018). *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications* (first ed.). (R. Korthauer, Ed.) Heidelberg, Germany: Springer. Obtenido de

- https://books.google.com.co/books?id=ll1oDwAAQBAJ&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Li, L., Zhang, X., Li, M., Chen, R., Wu, F., Amine, K., & Lu, J. (2018). The Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries: a Review of Current Processes and Technologies. *Electrochemical Energy Reviews*, 1(4), 461–482. Obtenido de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/eem2.12271>
- Ministerio de Ambiente. (10 de diciembre de 2020). Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/informe-actualizacion-contribucion-determinada-Colombia-ndc-2020.pdf>
- Ministerio de ambiente. (2021). *Aplicación de la guía NSA de ICAT*. Bogotá: WWF Colombia. Obtenido de https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/aportes_de_actores_subnacionales_y_no_estatales_en_la_reduccion_de_emisiones_de_gases.pdf
- Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible. (2017, 29 de junio). *Ley 1116*. Diario Oficial 50279.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019, 11 de Julio). *Ley 1964*. Diario Oficial N° 51011.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. (28 de enero de 2022). *Minambiente*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/en-promedio-un-colombiano-emite-al-ano-16-toneladas-de-co2/#:~:text=Un%20colombiano%20promedio%20puede%20emitir,alcanzar%20la%20c%20arboloneutralidad%20al%202050>.
- Ministerio de Minas y Energía. (2001, 3 de octubre). *Ley 697*. Diario Oficial N° 44573.
- Ministerio de Minas y Energía. (2022). *Eficiencia Energética En Vehículos Livianos Nuevos*. Bogotá D.C. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/documents/8474/220805_AIN_Normativa_de_EE_veh%C3%ADculos_livianos_OARE_V3.pdf
- Ministerio de transporte. (2021). *ABECE vigesima sexta conferencia de las partes de la convencion Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climatico*. Obtenido de <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/10381/intermodalidad-transicion-energetica-y-movilidad-sostenible-las-tres-grandes-acciones-del-sector-transporte-en-cop26/>
- Ministerio de transporte. (6 de Julio de 2022). *Colombia tiene 8.299 vehículos eléctricos en el Runt, 1.699 más de la meta del Plan Nacional de Desarrollo*. Obtenido de <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/11015/colombia-tiene-8299-vehiculos-electricos-en-el-runt-1699-mas-de-la-meta-del-plan-nacional-de-desarrollo/>
- Ministerio del ambiente de Perú. (13 de junio de 2019). *SINIA*. Obtenido de SISTEMA NACIONAL DE INFORMACION AMBIENTAL: <https://sinia.minam.gob.pe/indicadores/emisiones-dioxido-carbono-equivalente>
- Montecelos, J. T. (2019). *Vehículos eléctricos*. Marid: Ediciones Paraninfo S.A.

- Moreno, F. M. (2016). Vehículos eléctricos, historia, estado actual y retos futuros. *European Scientific Journal*, 124.
- Motor. (08 de Septiembre de 2023). Listado de los carros híbridos y eléctricos mas vendidos en agosto. *Revista Motor*. Recuperado el 26 de Octubre de 2023, de <https://www.motor.com.co/industria/Listado-de-los-carros-hibridos-y-electricos-mas-vendidos-en-Colombia-a-agosto-20230908-0006.html>
- Noticias parlamento europeo. (14 de junio de 2022). Obtenido de <https://www.europarl.europa.eu>:
<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>
- OLADE. (2021). *Panorama Energético de América Latina y el Caribe 2021*. Obtenido de <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0442a.pdf>
- Organizacion mundial de la Salud. (2016). Obtenido de <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/258705/9789275319893-spa.pdf>
- Panwar, N. S. (2015). Electric Vehicles: Prospects and Challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 748-764. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>
- Peiseler, L. B. (2022). Toward a European carbon footprint rule for batteries. *Science (American Association for the Advancement of Science)*, 377(6613), 1386-1388.
doi:<https://doi.org/10.1126/science.abp9505>
- PNUMA. (27 de octubre de 2022). Obtenido de <https://www.unep.org/es/resources/informe-sobre-la-brecha-de-emisiones-2022>
- Polyexce. (12 de 21 de 2020). *Polyexce*. Obtenido de <https://polyexcel.com.br/es/productos/matriz-energetica-entienda-que-es-y-para-que-sirve/>
- Restrepo Peña, H. (2019). *Valoración económica de los efectos en la salud humana debidos a las emisiones de contaminantes a la atmósfera generados por camiones*.
- Rock Identifier. (s.f.). Obtenido de <https://rockidentifier.com/es/wiki/Spodumene.html#:~:text=La%20espodumena%20es%20un%20mineral,tonalidades%20verdes%2C%20blancas%20o%20rosas>
- Rosen, J. (19 de abril de 2021). The Science of Climate Change Explained: Facts, Evidence and Proof. *The New York Times*. Recuperado el 20 de septiembre de 2023, de <https://www.nytimes.com/article/climate-change-global-warming-faq.html>
- RUNT. (2022). *Balance del primer semestre de 2022*. Obtenido de <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.runt.com.co/sites/default/files/Cifras-%20Balance%20Semestre%202022.pdf>
- U.S. Department of Energy. (September de 2011). Charging Infrastructure for Electric Vehicles: A Review of Key Issues and Research Needs. Obtenido de <https://www.energy.gov/eere/vehicles/downloads/charging-infrastructure-electric-vehicles-review-key-issues-and-research>
- UPME. (2016). *Calculadora FECOC 2016*. Obtenido de Calculadora FECOC 2016: http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html

UPME. (enero de 2016). *Unidad De Planeacion Minero Energetica*. Obtenido de www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/Informe_Final_FECOC.pdf

VITO. (2020). *Informe sobre el desarrollo y los supuestos para la realización de escenarios de referencia*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/cambio-climatico-Informe-sobre-el-desarrollo-y-los-supuestos-para-la-realizacion-de-escenarios-de-referencia-ndc.pdf>

XM. (06 de Febrero de 2020). *Noticias*. Obtenido de <https://www.xm.com.co/noticias/en-colombia-factor-de-emision-de-co2-por-generacion-electrica-del-sistema-interconectado>

XM S.A. E.S.P. (19 de septiembre de 2023). *Sinergox*. Obtenido de [https://sinergox.xm.com.co/oferta/_layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc={7FAC2763-6B80-4E5A-893B-FF99A1448FA1}&file=ComprasEnergia_AGPE_\(KWh\)_2023.xlsx&action=default](https://sinergox.xm.com.co/oferta/_layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc={7FAC2763-6B80-4E5A-893B-FF99A1448FA1}&file=ComprasEnergia_AGPE_(KWh)_2023.xlsx&action=default)