



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

Análisis de las consecuencias Económicas y Medioambientales del uso de autos eléctricos en Chile.

por

César Arancibia

Profesores guía:

Dra. Lorena Pradenas Rojas

Dra. Magdalena Jensen Castillo

Tesis presentada a

DIRECCIÓN DE POSTGRADO UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Para optar al grado de

MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Concepción, Agosto 2025

Abstract:

This study evaluates the economic and environmental impacts of electric vehicle adoption in Chile through three scenarios (sustainable, conservative, non-sustainable) for the period 2025-2050. Using machine learning models and international subsidy frameworks adapted to Chilean conditions, we project Battery Electric Vehicles (BEV) market penetration, energy demand, emissions, and consumer costs. Results show that aggressive policy intervention (including 25% purchase subsidies and expanded charging infrastructure) could achieve 100% BEV sales by 2035, reducing transportation CO₂ emissions by 28%. Chile's renewable-dominated grid can support full electrification with only 4% of national generation capacity. Despite a 25% energy penalty from heating in cold climates, BEVs demonstrate 184% lower emissions than conventional vehicles and 18% lower annual costs under supportive policies. Lithium extraction for domestic BEV production poses localized environmental challenges regarding water usage. The transition requires coordinated government intervention combining financial incentives, infrastructure development, and sustainable mining practices to prevent electromobility from becoming exclusive to high-income sectors.

Resumen

Este estudio evalúa los impactos económicos y ambientales de la adopción de vehículos eléctricos en Chile a través de tres escenarios (sostenible, conservador y no sostenible) para el periodo 2025-2050. Utilizando modelos de aprendizaje automático y marcos de subsidios internacionales adaptados a las condiciones chilenas, proyectamos la penetración en el mercado de los vehículos eléctricos de batería (BEV), la demanda de energía, las emisiones y los costos para los consumidores. Los resultados muestran que una intervención política agresiva (que incluye subsidios del 25 % para la compra y la ampliación de la infraestructura de recarga) podría lograr que el 100 % de las ventas de vehículos fueran BEV para 2035, reduciendo las emisiones de CO₂ del transporte en un 28 %. La red eléctrica de Chile, dominada por las energías renovables, puede soportar la electrificación total con solo el 4 % de la capacidad de generación nacional. A pesar de un 25 % de penalización energética por la calefacción en climas fríos, los BEV registran un 184 % menos de emisiones que los vehículos convencionales y un 18 % menos de costos anuales con políticas de apoyo. La extracción de litio para la producción nacional de BEV plantea retos medioambientales localizados en relación con el uso del agua. La transición requiere una intervención gubernamental coordinada que combine incentivos financieros, desarrollo de infraestructuras y prácticas mineras sostenibles para evitar que la electromovilidad se convierta en algo exclusivo de los sectores de altos ingresos.

Contenido	
1.	Introducción 1
2.	Revisión de la literatura 2
3.	Objetivos..... 3
3.1.	Objetivo General 3
3.2.	Objetivos Específicos 3
4.	Métodos 3
4.1.	Vehículos y participación de eléctricos 3
4.1.1.	Subsidios..... 5
4.2.	Energía 9
4.2.1.	Energía de movimiento para vehículos eléctricos..... 9
4.2.1.	Energía necesaria en la calefacción del vehículo eléctrico 10
4.3.	Contaminación 13
4.3.1.	Mix energético 13
4.3.2.	Baterías de Litio..... 14
4.3.3.	Contaminación de vehículos tradicionales..... 15
4.4.	Costos 15
4.4.1.	Costos de vehículos eléctricos 15
4.4.2.	Costos de vehículos tradicionales 16
4.5.	Escenarios..... 17
5.	Resultados..... 19
5.1.	Vehículos 19
5.1.1.	Venta de vehículos nuevos 19
5.1.2.	Venta de vehículos eléctricos 20
5.2.	Energía 23
5.2.1.	Energía de uso..... 23
5.2.2.	Energía de calefacción 24
5.3.	Emisión de gases de efecto invernadero..... 25
5.3.1.	Contaminación por uso 25
5.3.2.	Contaminación por extracción de Litio..... 28
5.4.	Costos 29
6.	Discusión 32
6.1.	Energía 32
6.2.	Demanda vehicular..... 32
6.3.	Subsidios 33
6.4.	Costos 33
6.5.	Contaminación 34
7.	Conclusión 35
8.	Bibliografía 37

Índice de Tablas

<i>Tabla 1: Modelos de vehículos eléctricos más populares durante el año 2024, datos obtenidos de ANAC 2025</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 2: Participación en la demanda automotriz por región en Chile 2024, datos obtenidos de ANAC (2025)</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 3: Dimensiones básicas de los modelos más populares en ventas 2024, según la información disponible en las fichas técnicas específicas de cada modelo.</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 4: Contaminación estimada por fuente de energía eléctrica, datos obtenidos de IPCC 6ta edición.</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 5: Participación de mercado de los diez modelos de vehículos convencionales más populares en el año 2024, información de ANAC (2025) y MTT(2025)</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 6: Precios promedios de mercado de los vehículos eléctricos más populares en el año 2024, según información de plataformas de compraventa vehicular: AutoFact y concesionarias nacionales.</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 7: Precios promedios de mercado de los vehículos convencionales más populares en el año 2024, según información de plataformas de compraventa vehicular: AutoFact y concesionarias nacionales.</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 8: Resumen de escenarios analizados, Sustentable, Conservador y No Sustentable</i>	<i>18</i>

Índice de Figuras

<i>Figura 1: Participación de mercado de vehículos eléctricos en Noruega, datos obtenidos de Statista (2024) .</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2: Participación de mercado de vehículos eléctricos ne Países Bajos, datos obtenidos de Statista (2024).</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3: Cantidad de cargadores públicos y semipúblicos por año en Países Bajos, datos obtenidos de Statista (2024) .</i>	<i>9</i>
<i>Figura 4: Resumen de los escenarios energéticos presentes en el PELP (2022) .</i>	<i>18</i>
<i>Figura 5: Parque vehicular estimado segmento livianos y medianos no comerciales entre los años 2025 y 20250.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 6: Cantidad (barras) y porcentaje de participación de mercado (línea punteada) vehículos eléctricos 2025 - 2050 por escenario.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 7: Cantidad de cargadores públicos y semipúblicos estimados para los años 2025- 2050 en cada escenario .</i>	<i>22</i>
<i>Figura 8: Porcentaje de participación de mercado de vehículos eléctricos estimado por descuento aplicado en precio del vehículo en cada escenario entre los años 2025 - 2050.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 9: Porcentaje de participación de vehículos eléctricos estimado por descuento aplicado en el combustible (energía eléctrica o combustible fósil) en cada escenario entre los años 2025 a 2050 .</i>	<i>22</i>
<i>Figura 10: Energía requerida por un vehículo eléctrico promedio anualmente y el porcentaje que ocupan los requerimientos de movimiento en el total.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11: Energía total requerida por el parque vehicular eléctrico y porcentaje de requerimiento sobre el total de la energía generada para cada escenario entre los años 2025 y 2050 .</i>	<i>24</i>
<i>Figura 12: Energía requerida para calefaccionar vehículo anualmente aproximado .</i>	<i>25</i>
<i>Figura 13: Contaminación individual anual promedio para los vehículos eléctricos y convencionales para la misma distancia en el año 2025. .</i>	<i>26</i>
<i>Figura 14: Contaminación total del parque automotriz eléctrico en los tres escenarios para los años 2025 a 2050.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 15: Emisiones contaminantes estimadas de parque automotriz vehicular convencional en los tres escenarios para los años 2025 a 2050 .</i>	<i>28</i>

1. Introducción

La contaminación atmosférica ha sido asociada desde hace décadas con diversas complicaciones de salud a nivel mundial, destacándose como un factor determinante en las complicaciones cardiovasculares y respiratorias (Asghar et al., 2021; Rentschler & Leonova, 2023). La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2024) enfatiza que los principales contaminantes relacionados con la combustión, como las partículas finas (MP), Óxidos de Nitrógeno (NOX), Óxidos de Azufre (SOx) y emisiones de Carbono, afectan directamente a la salud humana, con efectos particularmente letales en grupos vulnerables (EDGAR, 2023).

En Chile, el transporte vehicular representa una fuente significativa de emisiones contaminantes, siendo responsable del 24% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el país (SINIA, 2023). Esta problemática generó aproximadamente 4 mil muertes prematuras anuales y superó las 127 mil emergencias de salud asociadas (Ostro et al., 1999; UNEP, 2017). A pesar de los esfuerzos regulatorios, Chile mantiene concentraciones de contaminantes más altas que el promedio de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), afectando al 98% de su población y constituyendo una amenaza persistente para la salud pública (OECD, 2024).

En este contexto, los vehículos eléctricos emergen como una opción prometedora para la mitigación de la contaminación atmosférica. Los vehículos eléctricos a batería (BEV por sus siglas en inglés), que prescindan de combustibles fósiles y no general emisiones operativas locales, presentan un potencial considerable para reducir los impactos negativos del transporte (Milev et al., 2021; Olabi & Abdelkareem, 2022; Pamidimukkala et al., 2023). Sin embargo, la efectividad ambiental y económica de esta tecnología depende directamente del perfil energético del país, siendo claves la matriz eléctrica que alimenta a los vehículos, los factores climatológicos y sociales (De Santis et al., 2022; Raffaella et al., 2022).

A pesar del crecimiento del parque vehicular eléctrico en Chile, acumulando 4,5 mil ventas y un crecimiento del 183% a fines de 2024, logra únicamente alcanzar el 1,5% en la participación del mercado nacional (ANAC, 2025). Aún persiste la ausencia de análisis integrales que evalúen el desempeño de la electromovilidad bajo escenarios adaptados a las particularidades del contexto nacional. Además de integrar un análisis amplio sobre los impactos reales que podría tener medioambiental y económicamente en la población. Los marcos regulatorios nacionales presentan desafíos en las próximas décadas, y la evaluación de las opciones se vuelve clave para alcanzar los ambiciosos objetivos medioambientales del país (Lorenzo & Ramos, 2025).

El siguiente texto busca mitigar el vacío de información a través del modelamiento prospectivo basado en escenarios estandarizados internacionales como las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP)(O'Neill et al., 2017; Riahi et al., 2017) y las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP)(NCCARF, 2016). Lo anterior, evaluando el potencial nacional en el combate a las emisiones contaminantes y los impactos asociados al despliegue masivo de la electromovilidad en Chile durante los próximos 25 años.

2. Revisión de la literatura

En cuanto a la adopción de esta nueva tecnología automotriz, las políticas sociales resultan clave en la toma de decisión del consumidor. La literatura evidencia que los subsidios financieros (descuentos de compra, exenciones fiscales) y no financieros (infraestructura de carga) son catalizadores clave (Bjerkan et al., 2016; Breetz & Salon, 2018; Deuten et al., 2020; Sheldon et al., 2023a; Sheldon & Dua, 2022; Q. Zhang et al., 2025). En Noruega, un subsidio del 25% en la compra, nacido de la excepción del cobro de impuesto en la adquisición, junto a subsidios en el costo de la electricidad y la instalación de puertos de carga, incrementó drásticamente la participación del BEV desde 0,2% en 2010 a 90% (2024)(Bjerkan et al., 2016). Las elasticidades precio reportan aumentos de entre 1,3% y 1,5% en ventas por cada 1% de reducción de precios en los vehículos (Bushnell et al., 2021a). Además, impuestos a combustibles fósiles incrementan la competitividad del BEV, asumiendo alzas de entre 0,8% y 1,5% en ventas por cada aumento del 1% en el costo de la gasolina (Muehlegger et al., 2022). En Chile, los incentivos al año 2024 se enfocan principalmente en vehículos comerciales, otorgando hasta 15 millones de pesos en aportes para vehículos que serán utilizados como taxis (ASE, 2025). Aunque también otorga subsidios a los cobros eléctricos de familias vulnerables que podrían llegar a incentivar la compra (Dote, 2025).

Los vehículos eléctricos (BEV) ofrecen una ventaja fundamental en la mitigación de los contaminantes originados en la combustión de los vehículos convencionales (ICEV) (Milev et al., 2021). Su impacto en las emisiones de GEI a ciclo completo, sin embargo, depende críticamente de la intensidad de las emisiones de la matriz eléctrica que alimenta a estos vehículos (Olabi & Abdelkareem, 2022; Rafaella et al., 2022). En este punto Chile presenta ventajas claves, ya que durante el 2024 la matriz eléctrica alcanzó un porcentaje de energía renovable de 64%, siendo esta asumida libre de contaminantes en la producción eléctrica (CNE, 2024a). Este porcentaje proyecta crecimiento de hasta un 85% para el año 2050 aun elevando seis veces su capacidad de generación eléctrica (Lorenzo & Ramos, 2025). En la evaluación de la capacidad que puede soportar la matriz eléctrica, es imperativo considerar cómo se elevará la necesidad de cada vehículo en según la temperatura de la región (Milev et al., 2021). Debido a que el combustible utilizado para el movimiento es el mismo que el utilizado para la calefacción (Olabi et al., 2022).

La evaluación ambiental de la nueva tecnología requiere considerar todas las etapas del ciclo de vida en las que participa Chile. Aunque este no es un país fabricante de vehículos, si es uno de los más importantes exportadores del Litio, el metal más importante en la fabricación de las baterías (Cabello, 2022; Catsaros, 2024; Guzmán et al., 2022; Kuki et al., 2025). Siendo el poseedor del 45% de las reservas mundiales del litio en el año 2022 (Jaskula, 2023). Un nuevo mercado eléctrico requerirá evaluar cómo la extracción del Litio necesario para sustentarlo emitirá agentes contaminantes al ambiente. Guzmán et al. (2022) presenta los requerimientos hídricos y emisiones por kilogramo extraído de Litio a través del método de salmuera utilizado en Chile. Información que será usada para estimar el impacto que tendrá cada gramo necesario para producir un vehículo que será utilizado en el país. La exportación

de litio bruto sin valor agregado local (Zaino et al., 2024), seguida de la fabricación de baterías principalmente en China (Kuki et al., 2025), nacionaliza los efectos negativos.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Evaluar el impacto ambiental, energético y económico de la adopción masiva de la electromovilidad en Chile, mediante un modelamiento integral que considera tanto las características específicas de Chile como los escenarios estandarizados internacionales.

3.2. Objetivos Específicos

- Analizar la evolución histórica y proyecciones del parque vehicular en Chile, identificando los principales factores en su adopción, incluyendo incentivos económicos e infraestructura.
- Caracterizar la matriz energética nacional proyectada y modelar la demanda adicional de electricidad del parque electromotriz bajo diferentes escenarios.
- Cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero asociados a la producción y operación de los vehículos eléctricos, considerando tanto la extracción del litio como la producción energética nacional.
- Evaluar los costos económicos que debe absorber el consumidor relacionados con la implementación de la electromovilidad en el transporte.
- Desarrollar escenarios prospectivos integrados que permitan comparar el desempeño ambiental, energético y económico de distintas trayectorias de adopción de vehículos eléctricos, apoyando la formulación de políticas públicas efectivas y sostenibles en Chile.

4. Métodos

Para modelar el impacto en el tiempo del uso de los vehículos eléctricos (BEV) y cómo ciertas políticas o subsidios podrían impactar en su adopción, se desarrollan y analizan tres escenarios. Estos se consideran para la toma de decisiones en el contexto nacional. El primero es el escenario sustentable, representa una toma de decisiones basadas en un país ambientalmente responsable y sostenible, con subsidios estrictos para la adopción de la electromovilidad. El segundo escenario, conservador, representa un futuro con medidas menos estrictas para el cuidado del medio ambiente y parámetros más conservadores según la evolución histórica del país. En el tercer escenario menos sustentable se retratan las consecuencias de decisiones no enfocadas en el medio ambiente. Al simular la evolución del parque automotor eléctrico se puede estimar cómo la cantidad de vehículos puede aumentar o disminuir el costo percibido por el consumidor, la contaminación emitida al medioambiente y la energía que se deberá producir para soportar el nuevo parque electromotriz.

4.1. Vehículos y participación de eléctricos

En 2017, el número de vehículos livianos y medianos no comerciales ascendía a aproximadamente 3,4 millones de unidades (Yahel & Campos, 2023), mientras que en 2023

alcanzó los 4,1 millones (INE, 2024). Incorporando variables como el crecimiento anual del parque automotor, la tasa de siniestralidad y la incorporación de nuevos vehículos, se estima una base proyectada de aproximadamente 4,4 millones de unidades para el año base 2025 del análisis. Cada nuevo mes se utiliza una estimación a través de un cálculo de regresión XGB (Bentéjac et al., 2019) la cual es capaz de trabajar con un set reducido de variables básicas de demanda vehicular. Este tipo de regresión se enfoca en la combinación de varios árboles de decisión, con cada nuevo árbol corrigiendo los errores del anterior. Aunque es un método utilizado principalmente para conjuntos de datos robustos, es el más conveniente en este caso porque logra enfrentar y corregir la existencia de datos atípicos y faltantes (Bentéjac et al., 2019) y alcanzar un R cuadrado ajustado de 70% en los datos.

Usando la Ecuación 1 se estima la cantidad de vehículos que serán vendidos en el mes, del cual luego se extraerá la estimación de la cantidad de vehículos eléctricos. El IMACEC¹, que es un indicador tangible de la salud financiera de la población nacional (Kimia & Tehranchian, 2016) que varía entre los escenarios SSP según lo indicado en cada caso. El costo de combustible está altamente relacionado con la venta de vehículos en general, esta variable además será utilizada como una de las principales a cambiar en cada escenario, por lo que adquiere especial importancia (Epa, 2021; Özçam & Özçam, 2012). Por último, se nota que la venta de vehículos cumple un comportamiento estacional, debido a que, en ciertas fechas, existen mayores incentivos externos para la compra (ANAC, 2022). Para representar este comportamiento se añade el mes estudiado como variable independiente dentro del modelo, transformado en función de seno y coseno para mitigar efectos temporales difusos (Stolwijk et al., 1999). Junto a lo anterior, se asume que cada año la venta vehicular tendría alrededor de un 7% de crecimiento, según la información histórica de la venta en Chile sin considerar datos atípicos causados por la pandemia COVID-19 entre 2020 y 2021 (ANAC, 2024).

$$Q_{vehiculos} = XGB(\beta_1 Dolar + \beta_2 Poblacion + \beta_3 IMACEC + \beta_4 Costo_{combustible} + \beta_5 \sin(mes) + \beta_6 \cos(mes) + \beta_7 Año)$$

Ecuación 1: Regresión XGB para la estimación mensual de ventas de vehículos nuevos en Chile

Para calcular el porcentaje de vehículos eléctricos en este estudio, se utiliza una nueva regresión *ExtraTrees* (Galelli & Castelletti, 2013) de aprendizaje automático basado en árboles de decisión elegidos aleatoriamente, representada en la Ecuación 2. Al igual que el método XGB es capaz de reconocer las relaciones no lineales entre las variables y de combatir la falta de información y data presente registrando un R cuadrado ajustado de 70%. La poca cantidad de datos relacionados a la venta de vehículos eléctricos en el país no es capaz de estudiarse efectivamente a través de una regresión lineal, y debe utilizarse este método para combatir la precariedad de información (Galelli & Castelletti, 2013). El

¹ Índice Mensual de Actividad Económica

conflicto de cantidad de datos limita las estimaciones basadas en datos chilenos a alrededor de un 2~4% de participación de vehículos eléctricos en la demanda total para cualquier set de parámetros y valores de variables socioeconómicas.

Estas variables son, nuevamente, las que en conjunto describen el estado socioeconómico del país descritas en los escenarios SSP y estimados según el escenario descrito, como la población, el IMACEC y los costos del combustible. La Ecuación 2 presenta datos específicos chilenos, que además incluye el comportamiento de otros países que han logrado un mercado eléctrico maduro durante la última década. Las variables internacionales son relacionadas a los subsidios principales (Lu et al., 2020) utilizados para incentivar la venta automotriz eléctrica, como el precio de compra, subsidios de uso e infraestructuras de carga públicas (Breetz & Salon, 2018; Sheldon et al., 2023a).

$$\begin{aligned} \%BEV = & \left(ExtraTrees(\beta_1 Poblacion + \beta_2 IMACEC + \beta_3 Costos_{combustible} \right. \\ & \left. + \beta_{4,5} \cos/\sin(Mes) \right) + \left[\left(\frac{L}{1 + e^{(k*(t_0-t))}} \right) \right] \left[Subsidio_{compra} \right] \\ & + \left(\frac{L}{1 + e^{-k*(t-t_0)}} \right) [Subsidio_{infraestructura}] \end{aligned}$$

Ecuación 2: Regresión método ExtraTrees para la estimación del porcentaje de vehículos eléctricos en la venta de vehículos nuevos

4.1.1. Subsidios

Los factores utilizados en el cálculo del porcentaje de vehículos impulsados por energía eléctrica se extraen de la experiencia internacional en base a tres tipos de subsidios estatales más utilizados (Sheldon & Dua, 2022). Primero, subsidios de precio de compra del vehículo, que se define como el monto descontado al costo de adquisición del vehículo. Segundo, subsidios de uso del vehículo o aquellos aportes al combustible del vehículo eléctrico. Además, se incluye en esta categoría los impuestos extras a los combustibles fósiles. Por último, existen los subsidios no financieros que aplican los gobiernos, como la instalación de infraestructura de carga para vehículos. Esta se rige en la literatura como uno de factores de fomento de nuevas tecnologías más importantes para el consumidor (Deuten et al., 2020; Funke et al., 2019; Nazari et al., 2019).

Subsidios de compra: El subsidio de compra corresponde al descuento percibido por el consumidor en el momento de la compra del auto. Se puede modelar este tipo de subsidio considerando la elasticidad del precio. La elasticidad del precio de los vehículos eléctricos a batería (BEV) oscila entre 1,3% y 1,5% de aumento en las ventas por cada 1% de disminución en el precio de los vehículos (Bushnell et al., 2021a; DeShazo et al., 2017; Yan, 2018). Sin embargo, este descuento no necesariamente constante durante todos los periodos de tiempo evaluados. Noruega tiene un impuesto aplicado a la venta de automóviles del 25%, y desde

el año 2001 los vehículos eléctricos han estado exentos de su pago (Elbil, 2025). En 2010 el descuento comenzó un impacto significativo, presumiblemente, por la inserción de nuevas tecnologías en el mercado, y otros tipos de incentivos (Bjerkan et al., 2016). Esto aumentó la venta de vehículos eléctricos desde un 0,2% anual y alcanza el 90% en el año 2024 (Figura 1).

Al aislar el efecto que tiene cada año consecutivo en el crecimiento de la participación de mercado de los vehículos eléctricos en Noruega, se obtiene un factor internacional de 7,2% de crecimiento en la venta de este tipo de vehículos. Este valor debe ser homologado desde los estándares europeos al contexto chileno. Se usa el PIB per cápita para lo anterior, con el indicador en el año 2010 de Noruega (año en el que existía un *market share*² similar al actual chileno) y el valor del indicador en Chile 2024. En otros países europeos, como Países Bajos, se estima que este tipo de subsidios es responsable de un 40% del impacto en el mercado (Sheldon et al., 2023b). Por lo que, al crear el factor, este se erige como el máximo posible alcanzable, en un plazo de 14 años aproximadamente, según experiencia de Noruega presentado en la Figura 1. Al añadir este subsidio a la Ecuación 2, se modela el impacto como una distribución logística inversa, ya que esta modela impactos leves en los primeros años de aplicación para luego aumentar exponencialmente de manera acelerada. Esto debido a la consideración de que el añadir una nueva tecnología al mercado enfrentaría resistencia por parte del consumidor. Luego al solidificarse el mercado y expandir tanto los consumidores como el contexto propicio, mayor parte de la población se vería incentivada al cambio de tecnología (Sheldon et al., 2023).

² Market Share: participación de mercado

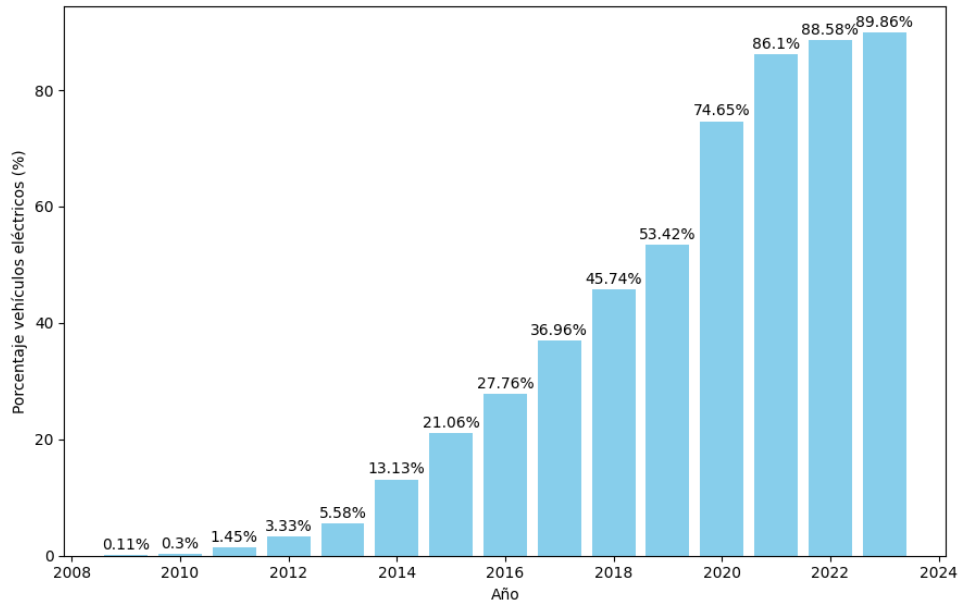


Figura 1: Participación de mercado de vehículos eléctricos en Noruega, datos obtenidos de Statista (2024)

Subsidios de uso: Por cada 1% de incremento en el costo de los combustibles fósiles, se percibe un 1,5% de cambio positivo en el mercado de vehículos eléctricos (J. P. Bushnell et al., 2021; Muehlegger et al., 2022). En comparación, a la misma magnitud en el precio de la energía eléctrica que es capaz de incentivar un cambio de entre 0,3% y 0,5%. En la experiencia de Holanda, se registra una responsabilidad de alrededor de 35% del *market share* a este tipo de subsidios (Dabush et al., 2025; Sheldon & Dua, 2022) presentado en la Figura 2. Otras experiencias, como, la estadounidense en 2024 concluye que un aumento de 1% en el precio de la gasolina lleva a un aumento de 0,8% en ventas de vehículos eléctricos (Ma et al., 2024). El tiempo de aplicación de la curva de distribución logística inversa es el mismo que el aplicado en el subsidio de compra. Por último, se ajusta la tasa de crecimiento con la relación entre el PIB per cápita de Países Bajos el año 2014 y Chile en el año 2024 debido a las condiciones y similitudes en la venta vehicular eléctrica. Bajo la misma lógica del subsidio de compra, al evaluar este tipo de incentivo, se modela una distribución logística inversa. Asumiendo que las primeras etapas de subsidio a la energía e impuesto al combustible tendrán menor impacto en la preferencia del consumidor, que una vez que se haya consolidado el mercado.

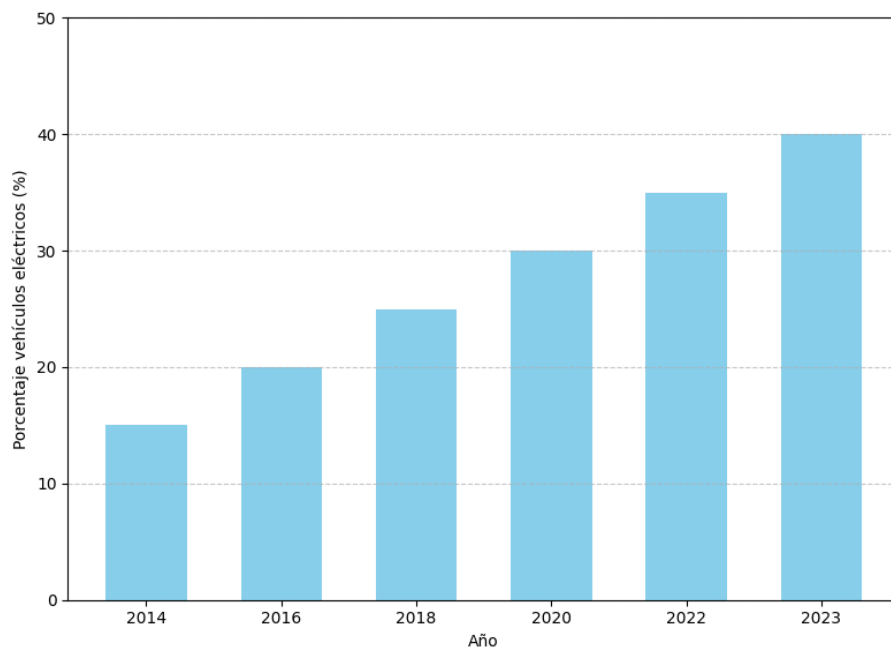


Figura 2: Participación de mercado de vehículos eléctricos ne Países Bajos, datos obtenidos de Statista (2024).

Cargadores: Este tipo de incentivos son más efectivos en las primeras etapas de aplicación, ya que la instalación de un nuevo punto de carga en una zona sin cobertura tiene un impacto mayor que la instalación de un nuevo punto de carga en una zona que ya registra otros anteriores (Zheng et al., 2025).

Así, el subsidio se modela como una distribución logística, que comienza de manera acelerada y luego, mientras más cerca del objetivo definido por el escenario, comienza a disminuir el impacto. Europa, es ejemplo del estándar internacional de cantidad de cargadores, y Holanda el líder con 8,2 cargadores por cada 1000 habitantes (ACEA, 2024). Aunque la experiencia internacional no es clara respecto al factor específico de impacto en las ventas de vehículos eléctricos, por cada cargador instalado. Estudios en distintas locaciones resultan en diferentes experiencias de consumo (Funke et al., 2019; Zheng et al., 2025). Un estudio aplicado en el condado de Los Ángeles, Estados Unidos, concluyó que un aumento de 1% en estaciones públicas de carga conllevan un aumento de 0,36% en ventas de BEV (Ma et al., 2024). Según datos de web Statista (2024), bajo la misma lógica utilizada en el subsidio de compra, se puede aislar el efecto anual para obtener un factor de 2% de crecimiento por cada 1000. Teniendo un crecimiento y objetivo límite de infraestructura similar al país, ilustrado en la Figura 3.

Este último es utilizado para modelar la cantidad de cargadores públicos y semipúblicos instalados hacia el año 2050 aplicando la tasa de crecimiento que obtenga un resultado de crecimiento más realista a lo estipulado en cada escenario. Nuevamente, se corrige el factor

según la relación del PIB per cápita nacional y extranjero, aplicando un coeficiente extra de $\sim 0,6$ que simula la participación regional del país con características demográficas similares de urbanización, población y edad (WorldData, 2024).

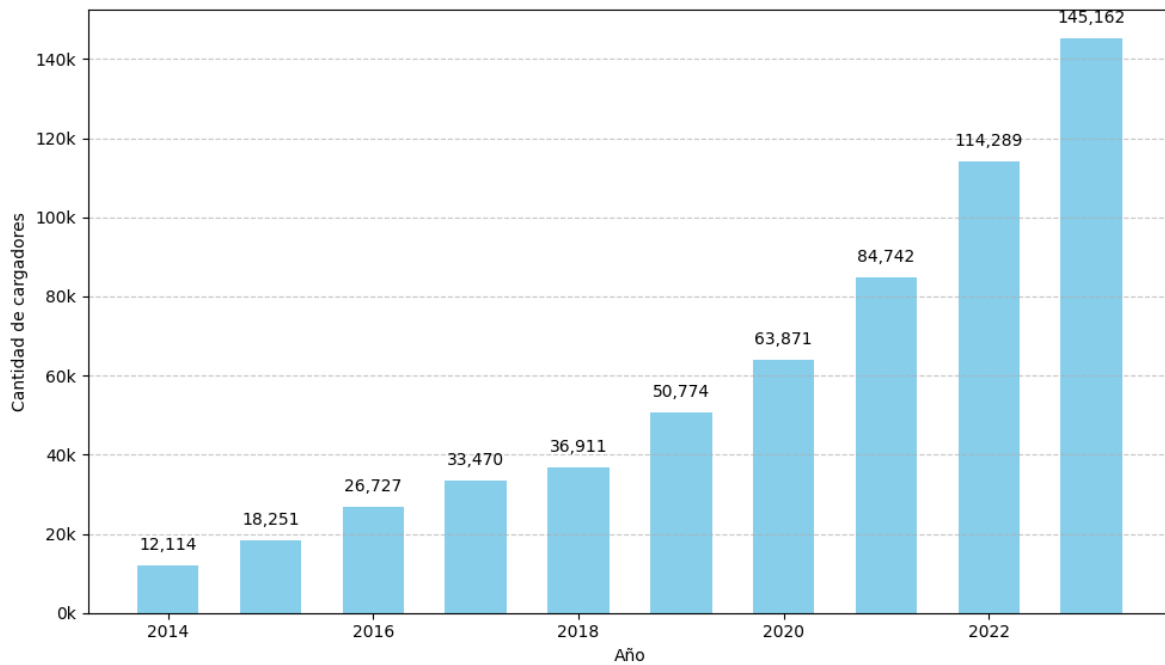


Figura 3: Cantidad de cargadores públicos y semipúblicos por año en Países Bajos, datos obtenidos de Statista (2024)

4.2. Energía

4.2.1. Energía de movimiento para vehículos eléctricos

Los cálculos se hacen utilizando los aspectos técnicos de los diez vehículos eléctricos más vendidos en Chile durante el año 2024, que son presentados en la Tabla 1. Cada vehículo tiene características de consumo energético a utilizar para crear un vehículo “modelo”. Que incluye la tecnología de cada uno de los vehículos con una ponderación según su participación en la venta acumulada. Se calcula la necesidad energética para movimiento a nivel individual y luego extrapolar el resultado según la cantidad estimada de vehículos eléctricos totales presentes en el año estudiado. Cada vehículo recorre en promedio 20.000 kilómetros anuales, según las principales plataformas de mecánica automotriz en el país, y el rango de 15.000 a 20.000 kilómetros al año el estándar utilizado (Muñoz, 2025; USDT, 2017). Basado en este supuesto se logra asumir que el conductor promedio conduce alrededor de una hora diaria con una velocidad promedio de 55 kilómetros por hora para cumplir con el supuesto (Honda, 2018).

De lo anterior, se obtiene la siguiente Ecuación 3 (Milev et al., 2021), que calcula el consumo energético de movimiento anual (E_m). A través de la multiplicación del consumo PP_i (KWh/100km) por la participación porcentual en las ventas, a su vez, expandido a través de los kilómetros anuales y la cantidad de vehículos en circulación en el mismo periodo de tiempo (Q_e).

$$E_m = Q_e \cdot \sum_i^{10} (PP_i \cdot R_i) \cdot km$$

Ecuación 3: Cálculo de la energía necesaria para movilizar el vehículo eléctrico promedio en una cantidad de kilómetros determinados (Milev et al., 2021)

Marca	Modelo	Consumo de energía (KWh/100 km)	Ventas acumuladas 2024	Participación [%]
Tesla	Model 3 Standard Range (RWD)	13,2	560	19
Volvo	EX30 E40 Core	17,1	514	18
Tesla	Model Y –Standard Range (RWD)	15,7	386	13
Dong Feng	E70	14,3	352	12
BYD	Dolphin Mini GL	9,4	292	10
Renault	E-Kwid AT	14,6	267	9
BYD	Yuan Plus	13,2	203	7
Neta	Aya	10,1	152	5
BYD	Dolphin	15,9	98	3
Chevrolet	Bolt	14,4	90	3
Total	Vehículo modelo	13.85	2.914	100

Tabla 1: Modelos de vehículos eléctricos más populares durante el año 2024, datos obtenidos de ANAC 2025

4.2.1. Energía necesaria en la calefacción del vehículo eléctrico

A diferencia de los vehículos de combustión interna, que ceden parte del calor disipado de la combustión del motor para calefaccionar parte de la cabina de pasajeros, los autos eléctricos deben utilizar la misma energía reservada para moverse (Bebo & Simpson, 2014; Pirotais et al., 2002). Esto hace imperativo el cálculo de la energía extra necesaria para recorrer los mismos kilómetros en bajas y altas temperaturas (Mao et al., 2018). Esta energía extra se calcula con la distribución de participación por región en Chile en ventas anuales debido a la variabilidad climática distintiva entre regiones, junto a: la temperatura mínima diaria promedio mensual y la temperatura promedio diaria, descritas en la Tabla 2: Participación en la demanda automotriz por región en Chile 2024. Se asume que el

comportamiento del conductor promedio corresponde a conducir media hora en la temperatura mínima y media hora en la temperatura promedio. O sea, el conductor promedio no comercial utiliza su vehículo por aproximadamente una hora, en las primeras o últimas horas del día, y en el mediodía (Honda, 2018; USDT, 2017). Además de la diferenciación por región de la temperatura, también se considera la evolución de la temperatura por mes, extraída desde el explorador de amenazas climáticas del ministerio de Medio Ambiente (Ministerio del medio Ambiente, 2020). Para el caso de la simulación futura de las temperaturas, se considerarán los escenarios de aumentos de temperatura RCP 2,6 y 8,5 presentados regionalmente en el informe de simulaciones regionales del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (Rojas et al., 2018).

Considerando las temperaturas mencionadas y la participación en la demanda de cada región, se propone un vehículo “modelo” para calcular el volumen de aire dentro de la cabina de pasajeros. Este volumen se calcula como aproximadamente del cubo de aire conformado por la altura, ancho y distancia entre los ejes de las ruedas y detallado en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Lo anterior considerando el volumen real definido por algunos fabricantes de vehículos como Tesla, que corresponden a un tercio del valor calculado utilizando las dimensiones. Luego se utiliza la temperatura óptima de manejo según Milev et al. (2021) de 21°C para cada región y hora de conducción. El volumen (v) del vehículo (l) se pondera con su participación de mercado ($Participacion_l$). Para luego utilizar la fórmula de transferencia de calor, con los coeficientes de calor específico (c) y densidad del aire (ρ). Para cada temperatura (T) en la región j , del mes i y la hora k . El valor de cada región se obtiene utilizando la participación de esta en la venta acumulada del año 2024 (PR_j) presentadas en la Tabla 2.

Al cálculo de la variación de energía necesaria para calefaccionar el volumen de aire dentro del vehículo, se debe considerar la energía necesaria para mantener esa temperatura en el tiempo de conducción definido. Se utiliza la Ecuación 4, que calcula la energía perdida por escape de calor según los materiales de fabricación del vehículo, por ende, la energía que debe reponerse. La fórmula considera $5,67e-8[W/m^2K^4]$ como la constante de Stefan-Boltzman. ϵ es la emisividad térmica del material de los exteriores del vehículo: aluminio y vidrio (0,29 y 0,93 respectivamente). T_d , la temperatura deseada (21°C) y T_{ijk} , la temperatura en la región j , mes i y hora del día k , mantienen su valor, pero se dimensionan a Kelvin. $3,8054 [W/m^2K]$ es el factor de pérdida de energía por convección, que se multiplica por la velocidad estimada del vehículo de 55 km/h, con el supuesto de 1 hora de conducción al día y 20.000 km (BTS, 2022; IEA, 2008). El resultado de esta ecuación se caracteriza como $E_{\{1,2\}} [W]$ y se separa según el área exterior del vehículo, simplificando la estructura del vehículo a un semi-rectángulo de tres lados: el techo y las dos áreas laterales donde se ubican las puertas. Estas dimensiones se calculan según el largo entre los ejes y el ancho (sin considerar espejos), para el techo, y este mismo largo por el alto del vehículo para las puertas, de los diez vehículos más populares eléctricos. El área total exterior del vehículo asociada a la cabina de pasajeros resulta en un total de 12 [m²], al cual se le debe separar el área asociada

a ventanas y parabrisas de 2,96[m²] (Al-Habaibeh et al., 2010; Milev et al., 2021). Esta separación se realiza para calcular la energía perdida por la parte hecha de aluminio (Ecuación 5) y lo fabricado con vidrio (Ecuación 6).

$$E_t = \sum_{i=1}^{12} \left(\sum_{j=1}^{16} \sum_{k=1}^2 \left(\sum_{l=1}^{10} (V_l \cdot Participacion_l) \cdot |T_d - T_{ijk}| \cdot Q_e \cdot PR_j \cdot c_{especifico} \cdot \rho \right) \right) \cdot C_{J \rightarrow kWh} + (E_{1t} + E_{2t})h$$

Ecuación 4: Cálculo de la energía necesaria para calefaccionar el vehículo completo por región, me y hora del día según vehículo promedio (Al-Habaibeh et al., 2010)

$$E_{1t} = \left(5,67e^{-8} \varepsilon_{aluminio} \left[(T_d)^4 - (T_{ijk})^4 \right] + 3,8054 v (T_d - T_{ijk}) \right) (a_1 + 2a_2 - a_3)h$$

Ecuación 5: Cálculo de la energía perdida por las áreas del vehículo fabricadas principalmente por aluminio

$$E_{2t} = \left(5,67e^{-8} \varepsilon_{vidrio} \left[(T_d)^4 - (T_{ijk})^4 \right] + 3,8054 v (T_d - T_{ijk}) \right) (a_3)h$$

Ecuación 6: Cálculo de la energía perdida por las áreas del vehículo fabricadas principalmente de vidrio

Región	Participación [%]
1. Arica y Parinacota	0,3
2. Tarapacá	0,9
3. Antofagasta	3,3
4. Atacama	1,2
5. Coquimbo	3,3
6. Valparaíso	9,0
7. Metropolitana de Santiago	57,7
8. O'Higgins	3,8
9. Maule	3,5
10. Ñuble	1,4
11. Biobío	6,2
12. La Araucanía	3,0
13. Los Ríos	1,2
14. Los Lagos	3,8
15. Aysén	0,4
16. Magallanes	0,9

Tabla 2: Participación en la demanda automotriz por región en Chile 2024, datos obtenidos de ANAC (2025)

Modelo	Ancho (mm)	Distancia entre ejes (mm)	Alto (mm)
Model 3 Standard Range (RWD)	1.850	2.875	1.440
Model Y –Standard Range (RWD)	1.921	2.890	1.624
Dolphin Mini GL	1.715	2.500	1.580
E-Kwid AT	1.759	2.423	1.481
Dolphin	1.530	2.700	1.570
Dong Feng E70	1.720	2.700	1.530
EX30 E40 Core	1.940	2.650	1.550
Yuan Plus	1.865	2.720	1.615
Neta Aya	1.690	2.420	1.540
Chevrolet BOLT	1.770	2.675	1.616

Tabla 3: Dimensiones básicas de los modelos más populares en ventas 2024, según la información disponible en las fichas técnicas específicas de cada modelo.

4.3. Contaminación

4.3.1. Mix energético

La producción de energía eléctrica es la mayor fuente de contaminación asociada a los BEV en su vida útil (Rafaella et al., 2022). Así mantener una forma renovable y medioambientalmente sostenible es importante la transición a la vida más ecológica. Existe variada evidencia de países en los que se promueven los vehículos eléctricos, pero la producción energética es en base a combustibles fósiles que disminuyen la emisión de contaminantes ahorrados (Prival, 2023). El caso nacional presenta un contexto optimista ya que se han empleado medidas para “limpiar” la matriz energética. Actualmente, más del 60% de la producción de electricidad en Chile proviene de fuentes renovables (CNE, 2024b; Coordinador eléctrico nacional, 2025), y el impacto ambiental es mínimo en comparación a sus contrapartes tradicionales basadas en combustibles fósiles descritas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Durante el año 2022 se emitieron un total de 84.791 kilotoneladas de dióxido de Carbono equivalentes asociados al sector de producción energético (SNI, 2022).

Fuente de energía	gCO ₂ eq/kWh
Almacenamiento	5 - 50
Biocombustible	150 - 400
Carbón	900 - 1.200
Co-firing	600 - 900
Diesel	700 - 900
Eólica	3 - 15

Geotérmica	40 - 100
GNL	500 - 600
Hidráulica Embalse	10 - 150
Hidráulica Pasada	1 - 10
Solar CSP Torre	20 - 40
Solar Fotovoltaica	20 - 60

Tabla 4: Contaminación estimada por fuente de energía eléctrica, datos obtenidos de IPCC 6ta edición.

4.3.2. Baterías de Litio

Un aspecto clave en la estimación del impacto ambiental de los vehículos eléctricos es indicar que Chile no es un país productor o reciclador de baterías, pero sí es el principal exportador de litio, materia prima principal de esta tecnología. El Litio es uno de los minerales claves de Chile, siendo poseedor del 45% de las reservas mundiales y el segundo mayor productor mundial (Jaskula, 2023). Chile generó en el año 2023 un total de 44.000 toneladas métricas de Litio a través de un solo método de extracción denominado Salmuera (Statista, 2024). Este tipo de extracción presenta una opción económica asociado a un factor contaminante por gramo extraído, en términos de emisión de contaminantes en el aire y contaminación del agua. La extracción por salmuera contamina, según Guzmán et al. (2022): 4.27 [kgCO₂eq/kgLCE] (kilogramos de CO₂eq por cada kilogramo de litio extraído) y 3.192 [L/kgLCE] (Litros por kilogramo extraído).

Es crucial estudiar la extracción del Litio, ya que es necesario en la fabricación de las baterías que almacenan la energía utilizada por los autos de nueva tecnología. Se asume que, entre más capacidad de almacenaje de energía en la batería más litio es necesario para su fabricación. Estudios previos establecen un aproximado de 8 kilogramos de litio por batería (Zaino et al., 2024). Los detalles técnicos específicos de los diez vehículos utilizados no indican el gramaje de litio presente en la batería. Se hace una distribución teórica de lo que se asume que el vehículo puede contener basado en su rendimiento energético, al existir una relación directa entre estas dos características (Olabi et al., 2022).

Se identifica el fabricante de vehículos para determinar cuántos de estos serán vendidos y demandados por el mercado nacional y cómo afectarían la producción y extracción del litio. De este análisis se obtiene que nueve de los diez vehículos eléctricos más populares en Chile son producidos en China. Es el principal consumidor del litio, adquiriendo el 55% de la producción internacional. China en 2023 produjo el 80% de las baterías de litio (Kuki et al., 2025; Q. Zhang et al., 2025), de estas, el 65% se asume está destinada al sector transporte (Cheng et al., 2024; Guzmán et al., 2022). Se considera también cuánto de la extracción de litio de Chile se exporta a China, siendo 71% hasta mayo 2024 (López, 2024). El resultado obtenido en gramos Kg de litio por vehículo, se puede usar el factor de 4,27[kg CO₂eq/kg LCE] descrito por Guzmán et al. (2022).

$$CO_L = \left(\sum_{i=1}^n (L_i * Emisiones_{salmuera} * PP_{ik}) \right) \quad (6)$$

Ecuación 7: Cálculo de la contaminación aproximada por extracción de Litiop necesario para cada vehículo. Según datos específicos de las fichas técnicas de cada vehículo y Guzmán et al. (2022)

4.3.3. Contaminación de vehículos tradicionales

Para modelar las emisiones vehiculares, se construyó un vehículo representativo de combustión interna basdo en los diez modelos más vendidos den Chile durante 2024 (ANAC, 2024). Los factores de emisión individuales de cada modelo (obtenidos de los informes de homologación del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT, 2025)) se podenraron según su participación porcental en las ventas totales. Esta metodología permite calcular un factor de emisión promedio ponderado, el cual se utiliza posteriormente para cuantificar las emisiones totales en cada escenario analizado.

Modelo	Participación [%]	Emisiones [gCO ₂ /km]
Chevrolet Groove	12	166
Kia Soluta	12	128
Suzuki Swift	11	142
Suzuki Baleno	11	132
Hyundai grand i-10	10	131
Great Wall Jolion	10	167
MG ZS	9	180
Chevrolet Sail	9	151
Ford Territory	8	150
Hyundai Tucson	7	153
Total / Promedio	100	150

Tabla 5: Participación de mercado de los diez modelos de vehículos convencionales más populares en el año 2024, información de ANAC (2025) y MTT(2025)

4.4. Costos

4.4.1. Costos de vehículos eléctricos

El costo de los vehículos eléctricos se realiza en base a la realidad del mercado en el instante del estudio, con el rango promedio de precios de compra del vehículo nuevo en diversas concesionarias, según Tabla 6. No se consideran descuentos propios de la localización de compra, ni descuentos por tipo de financiamiento, solo valores de compra al contado.

Además, se toma un valor aproximado de costo de permiso de circulación para vehículos nuevos según su versión más reciente: CLP 203.975, que estarán exentos en sus primeros dos años de uso según incentivos chilenos (Monroy, 2022).

En cuanto a los costos de mantenimiento, al requerir menor número de partes mecánicas de constante revisión, se mantendrá igual a cero, aunque si deba revisar partes automotrices comunes como ruedas y frenos. En cuanto al costo considerado de electricidad utilizada como combustible, se utilizan los últimos datos disponibles de 2024, CLP 117,14 por KWh en web de tarifas de suministro de la Compañía General de Electricidad y la Comisión Nacional de Energía (CGE, 2025; CNE, 2024b).

Marca	Modelo	Precio (CLP) aproximado
Tesla	Model 3 Standard Range (RWD)	\$39.900.000 - \$44.900.000
Tesla	Model Y –Standard Range (RWD)	\$42.900.000 - \$52.900.000
BYD	Dolphin Mini GL	\$19.990.000 - \$21.490.000
Renault	E-Kwid AT	\$14.990.000 - \$16.990.000
BYD	Dolphin	\$23.990.000 - \$28.990.000
Dong Feng	E70	\$26.990.000
Volvo	EX30 E40 Core	\$38.900.000
BYD	Yuan Plus	\$27.990.000 - \$29.990.000
Neta	Aya	\$26.000.000
Chevrolet	Bolt	\$29.990.000

Tabla 6: Precios promedios de mercado de los vehículos eléctricos más populares en el año 2024, según información de plataformas de compraventa vehicular: AutoFact y concesionarias nacionales.

4.4.2. Costos de vehículos tradicionales

El costo de compra de los vehículos tradicionales se configura de la misma manera que los vehículos eléctricos, comparando el costo de los vehículos en distintas concesionarias según su última versión disponible, resumido en la Tabla 7. El costo de las mantenciones considera cambios en aceites de motor, revisión de los filtros de aire, cambios de bujías, revisión de inyectores y reemplazo de correas de distribución, con un total anual de CLP 337.200 más que un vehículo eléctrico (VE) obtenido de la misma plataforma del respectivo precio vehicular. Además, estos vehículos deben pagar el precio del permiso de circulación e impuesto verde, que promedia un valor de CLP 426.960. El costo del combustible utilizado es el promedio de los tres tipos de gasolinas disponibles en el mercado (octanaje 93,95 y 97) a diciembre 2024 disponible en CNE (2024a) por un total de CLP 1.304. Este costo consideraría en los escenarios a describir, un subsidio del 25%,0% y un impuesto extra de 50% según tarifas internacionales. En Países Bajos se tiene el impuesto más alto, mientras que el subsidio para el escenario menos sustentable es Brasil (líder latinoamericano en market share de vehículos eléctricos), según la plataforma *Global Petrol Prices (2025)*.

Marca	Modelo	Precio (CLP) aproximado
Chevrolet	Groove	\$10.590.000 - \$12.900.000
Kia	Soluto	\$7.990.000 - \$11.990.000
Suzuki	Swift	\$9.590.000 - \$11.390.000
Suzuki	Baleno HB	\$11.650.000 - \$14.600.000
Hyundai	Grand I-10Hb	\$9.490.000 - \$10.480.000
Gwm	Jolion	\$13.490.000 - \$17.690.000
Mg	ZS	\$8.800.000 - \$17.490.000
Chevrolet	Sail	\$9.990.000 - \$13.990.000
Ford	Territory	\$14.990.000 - \$21.500.000
Hyundai	Tucson	\$19.490.000 - \$23.702.050

Tabla 7: Precios promedios de mercado de los vehículos convencionales más populares en el año 2024, según información de plataformas de compraventa vehicular: AutoFact y concesionarias nacionales.

4.5. Escenarios

Los tres escenarios simulados están basados en la experiencia internacional respecto a la aplicación de subsidios que impactan financiera y no financieramente a la adopción de los vehículos eléctricos, se encuentran resumidos en la Tabla 8. Se utilizan las proyecciones de población y de salud financiera, tanto de Chile como del extranjero, de los escenarios SSP (O'Neill et al., 2017). Estos escenarios son consensos internacionales respecto a cómo podrían variar las condiciones sociodemográficas y económicas si se siguiesen distintos caminos más o menos sustentables. El escenario más sustentable se basa en el escenario SSP1 (llamado “tomar el camino verde”), que representa bajos desafíos en la mitigación y adaptación a medidas medioambientalmente responsables (Riahi et al., 2017). Los escenarios conservador y menos sustentable se basan en los escenarios SSP2 (llamado “Mitad del camino”) y SSP3 (llamado “El camino rocoso”), que representan medios y altos desafíos en la mitigación y adaptación a medidas ecológicas respectivamente (Riahi et al., 2017). En cuanto a las definiciones necesarias para estimar la temperatura, se utilizan los escenarios climáticos RCP 8,5 (calentamiento global acelerado) y RCP 2,6 (calentamiento global moderado) (Rojas, Gallardo, directora, et al., 2018). Estos dos escenarios son proyecciones de crecimiento de la temperatura debido a la actividad o cuidado humano del planeta, que llevarán a un aumento aproximado de 1,5°C o 1°C respectivamente en el promedio nacional (Rojas, et al., 2018). El escenario energético está definido según la producción eléctrica anual, mayor para los escenarios definidos en el informe de Planificación Energética a Largo Plazo del ministerio de Energía (Lorenzo & Ramos, 2025). Estos escenarios representan una transición acelerada a la energía renovable, una transición enfocada en el carbono neutralidad y una transición más lenta, la capacidad energética y renovable está resumida en la Tabla 8.

Parámetro	Escenario sustentable	Escenario conservador	Escenario no sustentable	
Subsidio de compra	25%	12%	0%	
Subsidios de uso	Gasolina	Crecimiento histórico + Impuesto máximo 50% extra	Crecimiento histórico	Crecimiento histórico - Impuesto mínimo 25% menos
	Electricidad	Crecimiento histórico mínimo	Crecimiento histórico medio	Crecimiento histórico máximo
Instalación de cargadores	Cargadores máximos por alcanzar	1 cargador por cada 10 habitantes en zonas urbanas	1 cargador por cada 20 habitantes en zonas urbanas	Mínima cantidad de cargadores = 3.000
PIB	En base a escenarios SSP	Crecimiento según SSP1 “El camino verde”	Crecimiento según SSP2 “Mitad del camino”	Crecimiento según SSP3 “Camino rocoso”
Población	En base a escenarios SSP	RCP 2,6 “Muy estricta en emisiones”	RCP 8,5 “Seguir igual en emisiones”	RCP 8,5 “Seguir igual en emisiones”
Temperatura	En base a escenarios climáticos	RCP 2,6 “Muy estricta en emisiones”	RCP 8,5 “Seguir igual en emisiones”	RCP 8,5 “Seguir igual en emisiones”
Mix energético	En base a escenarios energéticos	Transición acelerada	Carbono neutralidad	Recuperación lenta

Tabla 8: Resumen de escenarios analizados, Sustentable, Conservador y No Sustentable

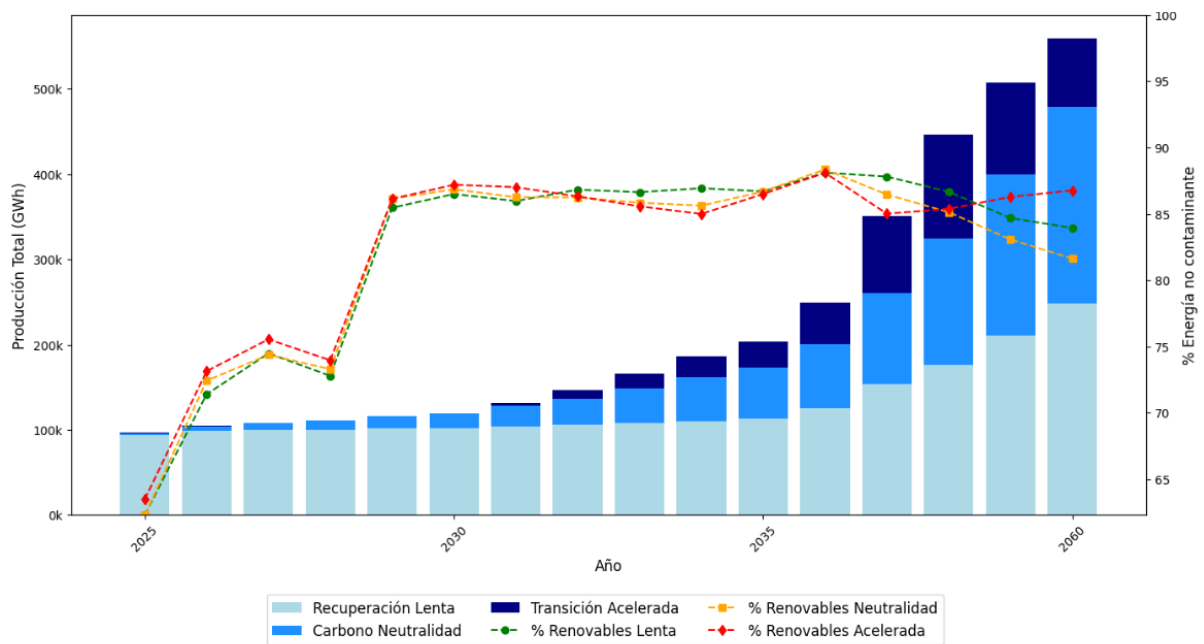


Figura 4: Resumen de los escenarios energéticos presentes en el PELP (2022)

5. Resultados

Esta sección presenta los resultados de los modelos de electrificación vehicular aplicados a Chile, proyectando la evolución del parque automotor eléctrico entre 2025 y 2050 en función de esquemas de subsidio. Se analiza el impacto sobre la demanda energética nacional y las emisiones contaminantes, detallando efectos diferenciados a nivel regional y patrones de consumo de vehículos de nueva energía, junto con los costos asociados para los consumidores. Adicionalmente, se evalúan las emisiones derivadas de la extracción de litio para baterías y se comparan los costos operativos entre tecnologías bajo distintos marcos regulatorios.

5.1. Vehículos

5.1.1. Venta de vehículos nuevos

En el escenario menos sustentable, basado en la proyección SSP3 (caracterizada por un crecimiento económico con baja preocupación por los impactos ambientales), el parque automotriz alcanzaría un máximo de 7,3 millones de vehículos livianos y medianos en circulación, como se muestra en la Figura 5. Esto representa un aumento del 72 % en un período de 25 años, con un parque vehicular 40 % más amplio que en el escenario más sustentable. Este crecimiento refleja una mayor disposición de la población a adquirir vehículos particulares, incluso si estos no operan con tecnologías limpias. El escenario también contempla un estancamiento del PIB per cápita y un crecimiento demográfico más pronunciado, lo que incrementa la demanda por vehículos económicos. En particular, la población crecería un 6,4 % más que en el escenario más sustentable.

Por su parte, el escenario conservador, que adopta una perspectiva más realista respecto de las actuales políticas públicas y su implementación futura, proyecta un parque automotor de 6,7 millones de unidades, con una participación de vehículos eléctricos del 85 %. Aunque esta cifra es inferior al 100 % previsto en el escenario más sustentable, representa un avance considerable en comparación con el escenario menos sustentable, donde la electrificación del parque no supera el 10 %.

El escenario más sustentable demuestra crecimiento del parque automotriz con el contexto ambiental y económico implícito de la trayectoria SSP1 “Elegir el camino verde”. Por lo que se asume que, con el crecimiento menos pronunciado de la población, esta también creció con mayor conciencia climática y menor disposición a sacrificar el bienestar ambiental.

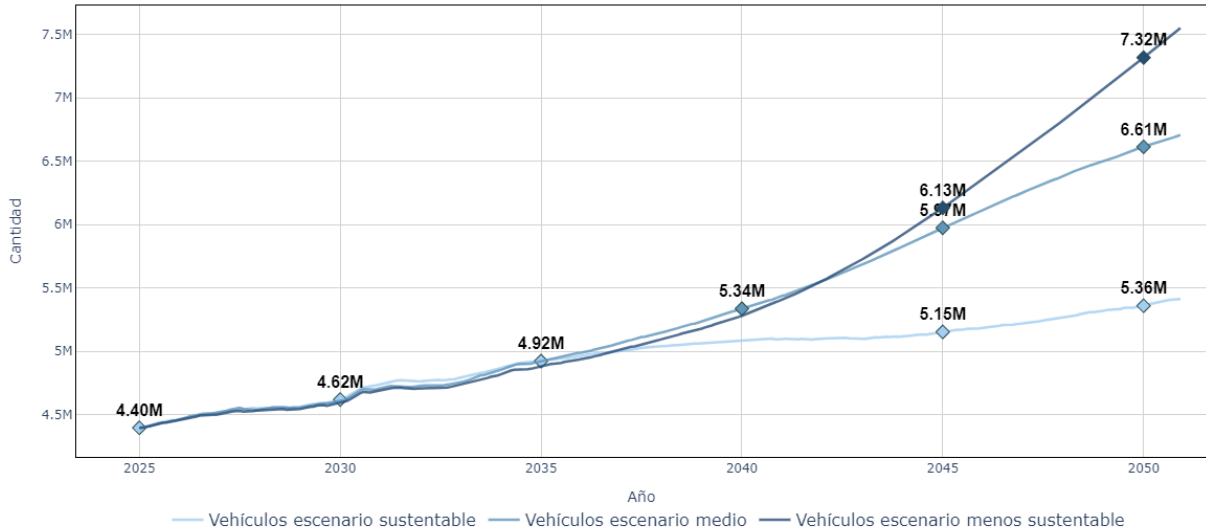


Figura 5: Parque vehicular estimado segmento livianos y medianos no comerciales entre los años 2025 y 20250

5.1.2. Venta de vehículos eléctricos

El escenario sustentable alcanza rápidamente el 100% de ventas de autos eléctricos el año 2035 como se puede ver en la Figura 6, panel escenario sustentable. Gracias a los incentivos internacionales de cantidad de estaciones de carga, el descuento al costo de compra y los impuestos/subsidios a los combustibles. En el caso del escenario sustentable, se alcanza una cantidad de 2.58 millones de VE. Los escenarios medio (Figura 6 panel escenario conservador) y menos sustentable (Figura 6 panel escenario menos sustentable) son 35% y 2.295% menores en cantidad. En el escenario medio, con políticas más conservadoras y subsidios similares a los ya presentes en Chile, no es posible alcanzar el 100% de ventas eléctricas, sino que se alcanza un máximo del 80% hacia el 2050.

En el escenario menos sustentable, los incentivos base no son suficientes para aumentar las ventas de autos eléctricos sobre el 2,8% ni en medio ni largo plazo. Este último escenario no solo se define por la ausencia de apoyo en el costo de compra del vehículo, sino que también por incrementar intensamente el costo de la electricidad. El escenario sustentable destaca por un crecimiento de hasta 164 mil cargadores hacia 2050 (Figura 7), similar al valor actual de Países Bajos (Figura 3). Mientras que la Figura 8 y la Figura 9 enseñan un impacto estimado de los subsidios de compra y uso. Se puede observar un impacto inicial que afecta desde el mes inicial el cómo la población podría reaccionar (según los estudios internacionales) al cambio en los costos descritos.

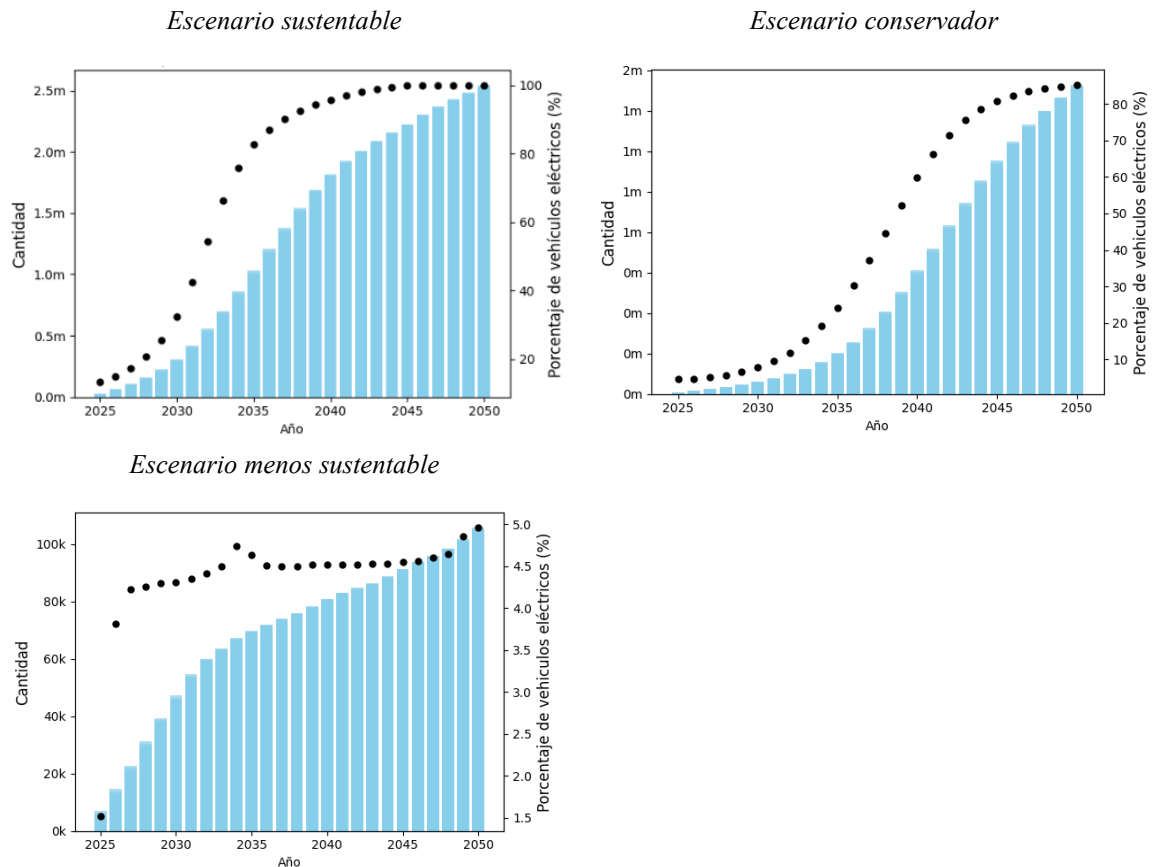


Figura 6: Cantidad (barras) y porcentaje de participación de mercado (línea punteada) vehículos eléctricos 2025 - 2050 por escenario

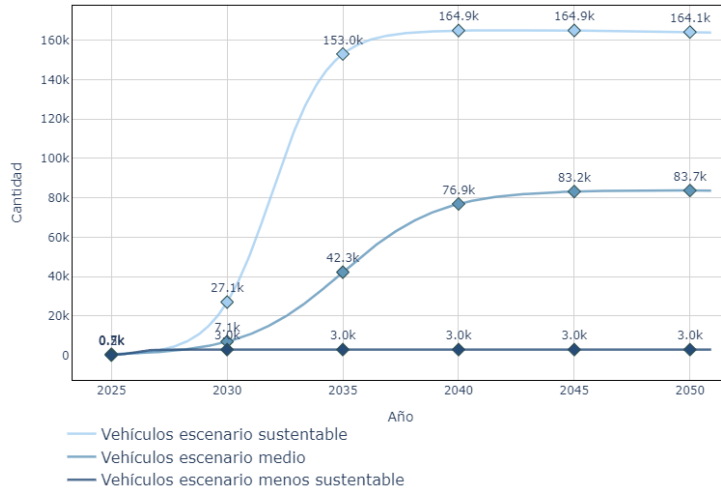


Figura 7: Cantidad de cargadores públicos y semipúblicos estimados para los años 2025- 2050 en cada escenario

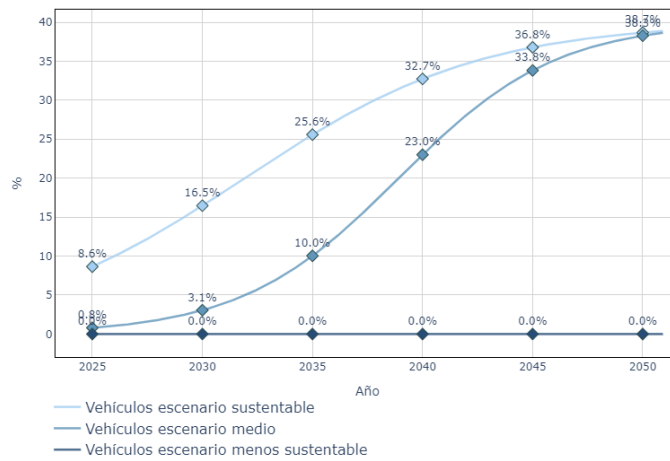


Figura 8: Porcentaje de participación de mercado de vehículos eléctricos estimado por descuento aplicado en precio del vehículo en cada escenario entre los años 2025 - 2050

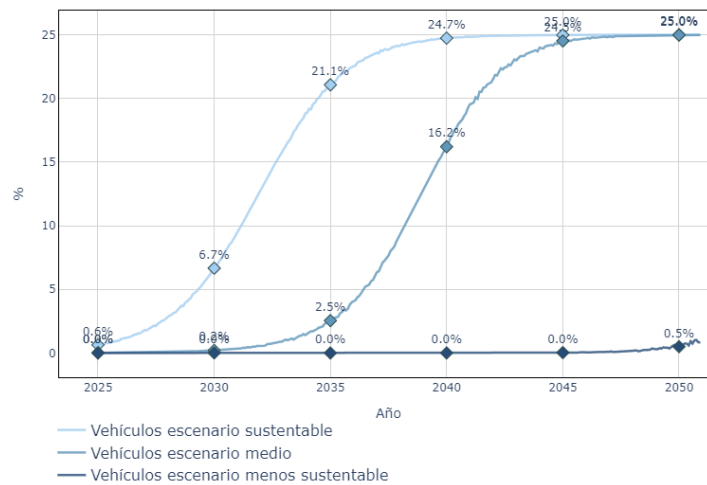


Figura 9: Porcentaje de participación de vehículos eléctricos estimado por descuento aplicado en el combustible (energía eléctrica o combustible fósil) en cada escenario entre los años 2025 a 2050

5.2.Energía

5.2.1. Energía de uso

El rendimiento promedio del vehículo eléctrico en Chile, en base a popularidad, es de 13,84 [KWh/100 km], obtenido de la multiplicación de las capacidades tecnológicas de los modelos eléctricos más populares por su participación en las ventas de 2024 (ANAC, 2024). Esto implica que al año el vehículo necesitará un estimado de 2.770[KWh] para movilizarse una distancia de 20.000 km. La Figura 10 muestra el valor total anual que necesitará cada vehículo, tanto para movilizarse como para calefaccionar (cuyos resultados serán evaluados en la siguiente sección). El impacto que tiene cada parque automotriz estimado por escenario en el máximo de generación eléctrica nacional es mínimo, sin superar el 4%, siguiendo las proyecciones de la planificación energética de largo plazo (PELP) como muestra la Figura 11.

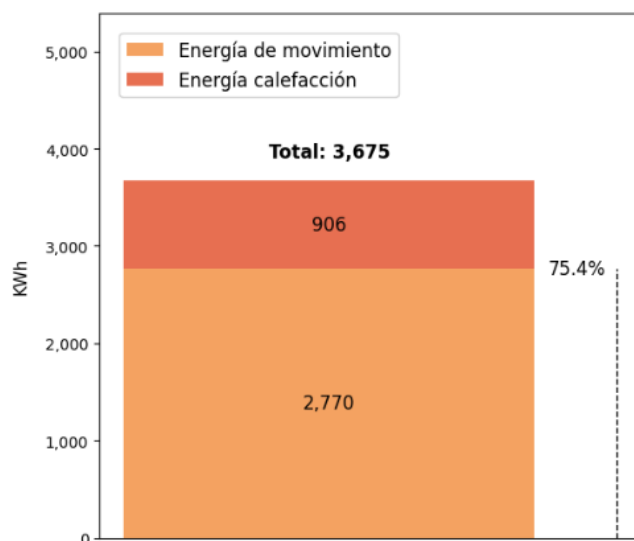


Figura 10: Energía requerida por un vehículo eléctrico promedio anualmente y el porcentaje que ocupan los requerimientos de movimiento en el total

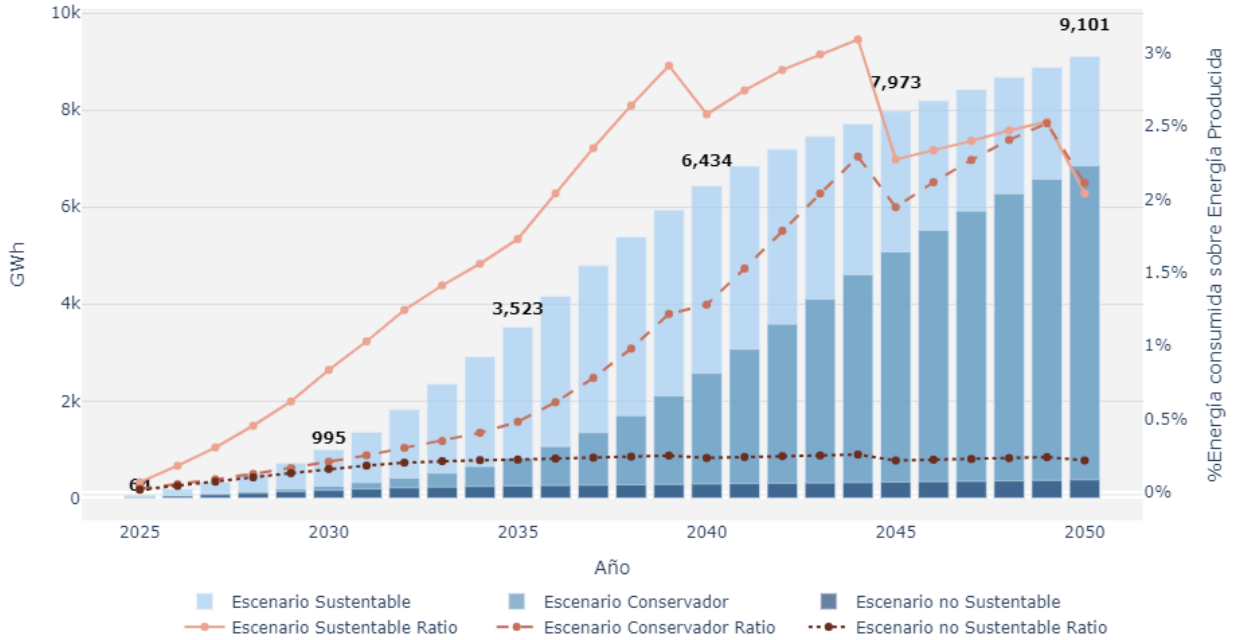


Figura 11: Energía total requerida por el parque vehicular eléctrico y porcentaje de requerimiento sobre el total de la energía generada para cada escenario entre los años 2025 y 2050

5.2.2. Energía de calefacción

Para calcular la energía para calefaccionar el vehículo, se tiene que el volumen promedio de un vehículo es de 2.293 [L] según las características de los diez más populares. Se considera la participación de cada región en el mercado y la temperatura promedio y mínima media mensual. Necesitando mayor energía para calefaccionar durante los meses más fríos del año, como se muestra en Figura 12. Se alcanzan los *peaks* de energía extra en Julio, donde la temperatura mínima cae hasta el mínimo de 2,5°C, en promedio nacional según participación en demanda automotriz. Al obtener el volumen modelo por popularidad y las temperaturas según la participación regional, cada vehículo requerirá al año 906 KWh. El rendimiento total del vehículo se reduce en un 25% aproximadamente, o en este contexto, implicaría que se requeriría ese extra total de energía en el consumo. En la Figura 12 se observa el requerimiento mensual promedio en un año únicamente para calefaccionar el vehículo conduciendo una hora al día todos los días del respectivo mes, notando la amplia diferencia entre los requerimientos de los meses más fríos. Este valor es consistente con el calculado por Milev et al. (2021), que considera en Escocia una temperatura ideal de 21°C y una real de 1°C, reduciendo en un 28% el rendimiento energético individual del vehículo. Al ampliar el análisis al total de vehículos eléctricos en cada escenario implicaría que durante el año 2025 se requerirán 2.231[KWh] para el escenario sustentable. El requerimiento individual presenta variaciones de menos del 2% en los tres escenarios. Esto último ya que

la variación de temperatura en cada escenario (1°C a 1,5°C), numéricamente en este caso, no implica mayores variaciones en las necesidades energéticas.

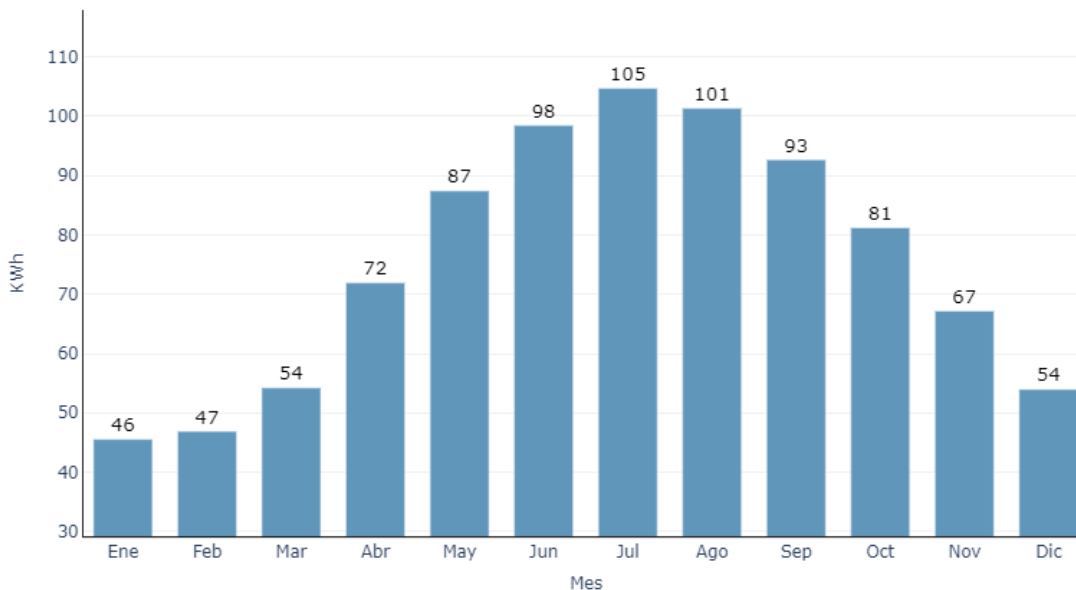


Figura 12: Energía requerida para calefaccionar vehículo anualmente aproximado

5.3. Emisión de gases de efecto invernadero

5.3.1. Contaminación por uso

En el caso de las emisiones de CO₂eq por la producción de energía necesaria para el uso de cada vehículo, estas comienzan siendo de ~250 [kgCO₂eq/KWh] en el mejor escenario, y a medida que se implementan los cambios descritos en los escenarios se reducen a 32 [kgCO₂eq/KWh] en 2050. Con estos valores, se detallan las emisiones por uso de energía individual, por año en la Figura 13, donde la comparación demuestra que la contaminación total eléctrica es 184% menor que el vehículo tradicional. Esta figura representa las emisiones de CO₂ que emiten los vehículos promedios eléctricos y convencionales al recorrer la misma distancia durante un año. Mientras que la Figura 14 muestra como el escenario sustentable es capaz de contaminar, por *mix* energético, un máximo de ~300 mil toneladas de CO₂eq.

Comparando con las emisiones de motores de combustión interna, cada vehículo emite en promedio 149 [gCO₂eq/km], considerando las emisiones del vehículo modelo según popularidad. El parque automotriz completo con estos valores teóricos emite 1,35 millones [tCO₂eq] actualmente, y podría aumentar en un 56% en el escenario menos sustentable o disminuir 28% en el escenario más sustentable ilustrado en la Figura 15. Directamente

relacionado al parque automotriz y participación de mercado de los vehículos eléctricos estimados.

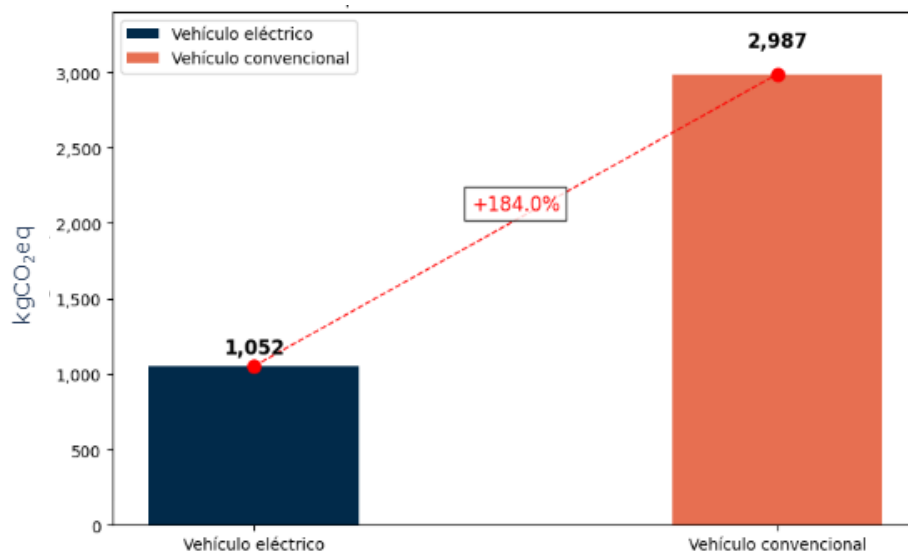


Figura 13: Contaminación individual anual promedio para los vehículos eléctricos y convencionales para la misma distancia en el año 2025.

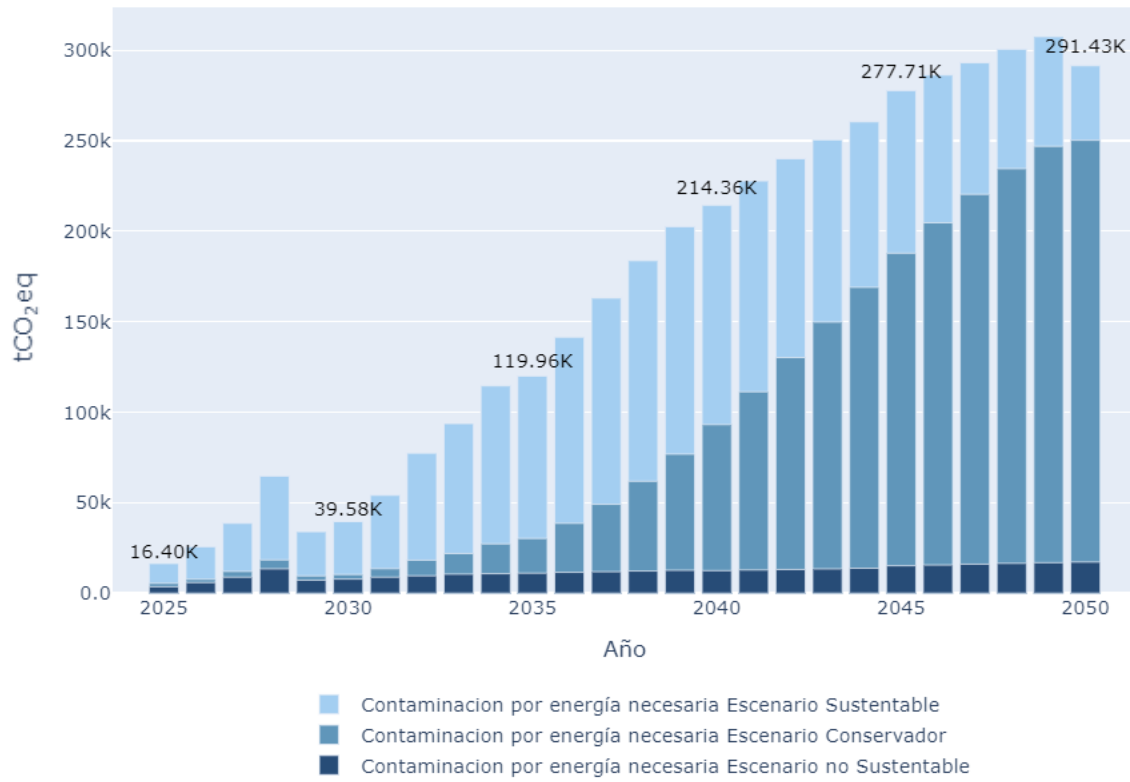


Figura 14: Contaminación total del parque automotriz eléctrico en los tres escenarios para los años 2025 a 2050

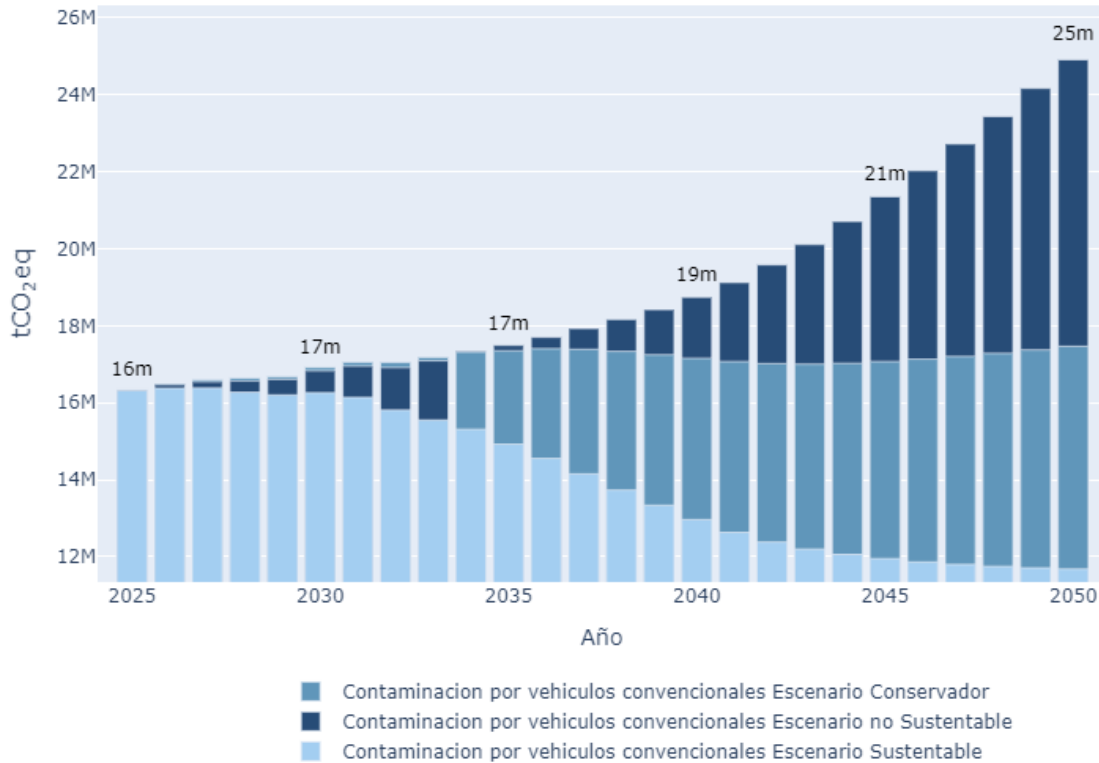


Figura 15: Emisiones contaminantes estimadas de parque automotriz vehicular convencional en los tres escenarios para los años 2025 a 2050

5.3.2. Contaminación por extracción de Litio

En promedio, el vehículo eléctrico posee 7,94 kg de Litio en su batería, que según Guzmán et al. (2022) emitiría 33,9 kgCO₂eq extraer por método de Salmuera en Chile, si todo el litio necesario fuese del país. Considerando las exportaciones nacionales a China, el Litio teórico utilizado haría que en verdad las emisiones se redujesen a 15,6 kgCO₂eq por el mismo vehículo. Entonces, se puede asumir que por cada **nuevo** vehículo añadido al parque automotriz esta fue la contaminación en CO₂eq emitida al ambiente. Adicionalmente, el mismo estudio de Guzmán et al. (2022), asumiría que por cada uno de estos nuevos vehículos se contaminarán 11.696 Litros de agua. Para el último mes del año 2050, 30 mil millones de litros de agua deberían ser utilizados para extraer el litio necesario en la fabricación automotriz del escenario sustentable, 8 mil millones adicionales al escenario conservador y 1,2 mil millones en el escenario menos sustentable. Las emisiones al ambiente llevadas a las estimaciones del parque automotriz eléctrico por los próximos 25 años, resulta en emisiones teóricas por Litio máxima de 4.274 toneladas de CO₂eq, presentadas en la Figura 16. En esta figura se observa cómo cada uno de los escenarios aportaría a las emisiones de contaminantes según el parque electromotriz único para Chile. Este análisis considera únicamente los vehículos que serán comercializados en Chile, excluyendo aquellos vehículos eléctricos que, aunque contienen litio de origen nacional, no forman parte del mercado chileno. Se observa en la Figura 16 como el escenario sustentable es aquel que lleva la ventaja en este tipo de

contaminación. Aún con lo anterior, la suma de la contaminación por extracción de Litio y la contaminación por emisiones en la producción de energía eléctrica son significativamente menores a la contaminación máxima producida por vehículos convencionales en el escenario menos sustentable.

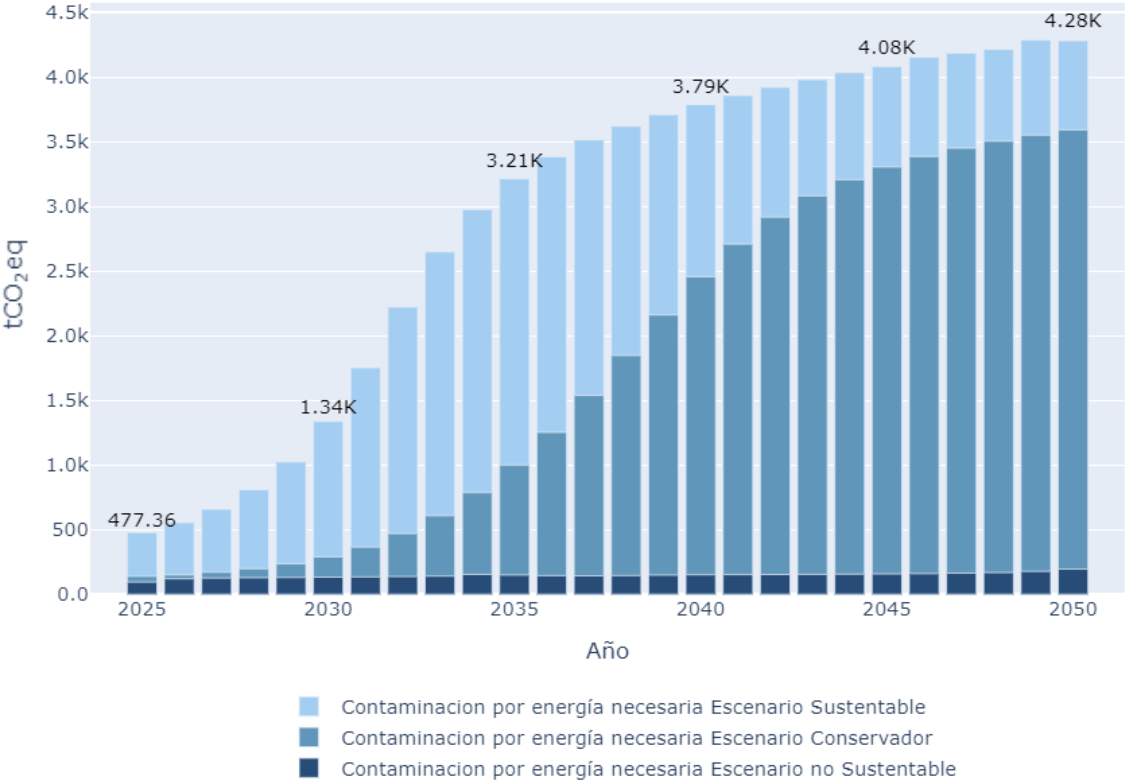


Figura 16: Contaminación por extracción de Litio necesario para parque electromotriz nuevo

5.4. Costos

Un vehículo eléctrico, en comparación a un vehículo tradicional promedio, representa un desembolso del cliente en la compra de más del doble del precio. Aun incluyendo un descuento en el precio de compra del 25% (excepción del VAT noruego utilizado), el precio sería el doble en un vehículo eléctrico promedio que uno tradicional promedio (Figura 18).

Si comparamos el costo de uso de un vehículo con los estándares actuales, los eléctricos son menos costosos por 800 mil CLP, aún con el costo de compra incluido, anualizado según la vida útil del vehículo. El costo de las reparaciones y revisiones anuales entre los tipos de vehículos también es considerado en el “costo de mantención”, aunque sólo se han considerado los costos que no se comparten entre los dos tipos. El cambio de neumáticos y

revisión de frenos son iguales y del mismo costo, sin embargo, el vehículo tradicional considera el cambio de aceites, lubricantes y revisiones específicas relacionadas a los motores de combustión interna. El costo total anual de un vehículo eléctrico, incluyendo el costo de compra (repartido según cada año de vida útil) es de 1,26 millones CLP en el escenario sustentable al año 2025, 6,6% menos costoso que el escenario conservador y 18% en el escenario menos sustentable. En el caso de los vehículos de combustión interna, el combustible, las reparaciones anuales y el costo de compra, en el escenario sustentable consideran un costo total anual de CLP 2,99 millones en el año 2025, 13% más caro que el escenario conservador y 24% más que el escenario menos sustentable. Consistente con la idea de que el escenario sustentable no solo subsidia el precio del VE, sino que castiga al consumidor del vehículo tradicional. En los tres paneles de la Figura 18 se distingue la evolución en los costos asociados al vehículo de batería eléctrica, considerando tanto los gastos de mantenimiento anual, como los costos de uso y costos de adquisición, para cada uno de los escenarios. Es evidente la conveniencia superior del vehículo eléctrico, siempre y cuando existan las condiciones para su uso, en los escenarios sustentable y conservador. El costo no se iguala al de un vehículo convencional a menos de que se tomen medidas para que esto ocurra. El escenario menos sustentable, indica cómo el impuesto a la energía eléctrica logra equiparar los costos de uso a los vehículos convencionales en el año 2045. Para facilitar la comprensión respecto a la proporción de costos de mantenimiento y uso, se añade en la figura el porcentaje que representa el uso en el costo total del vehículo. Se observa como el vehículo convencional debe elevados costos al combustible fósil, que se ve bajo impuestos generalmente algo a nivel global (Global Petrol Prices, 2025).

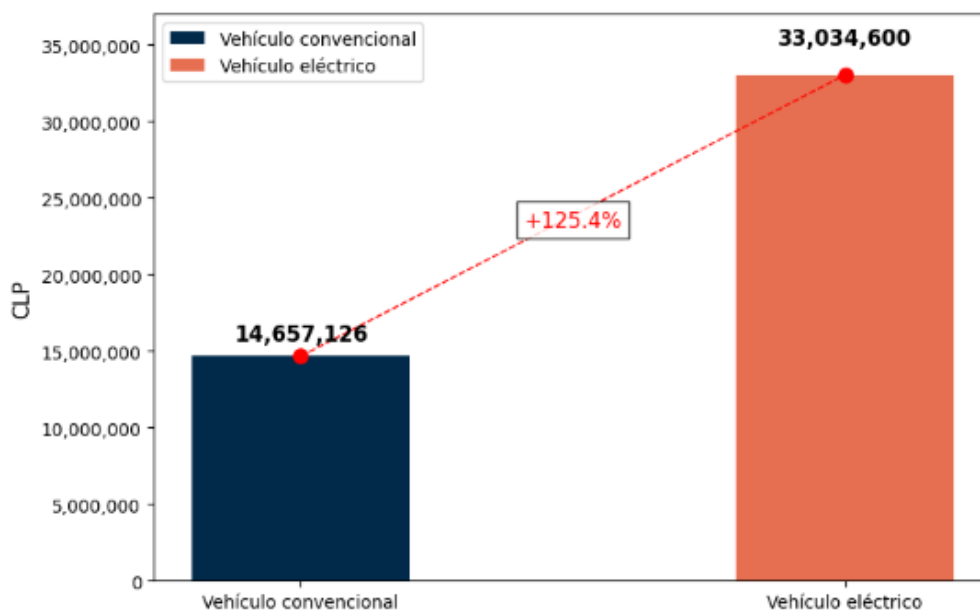
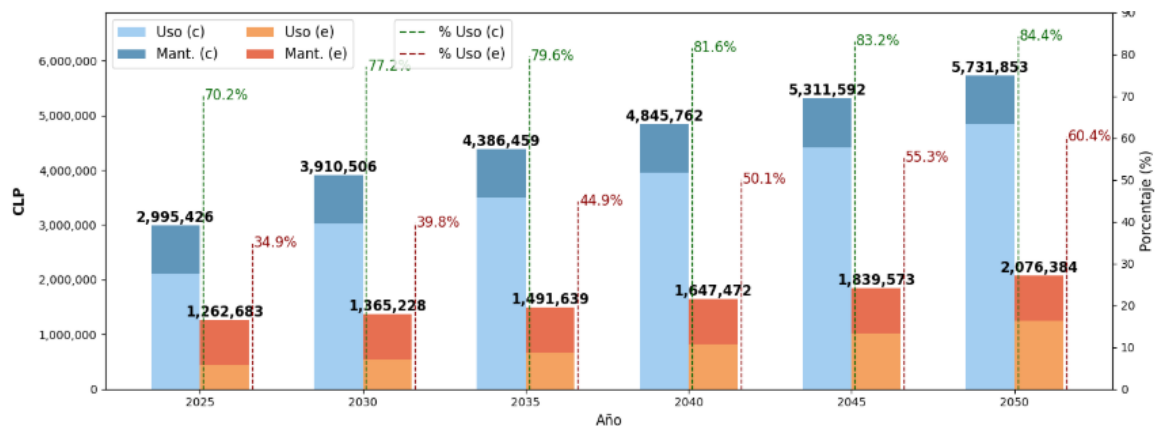
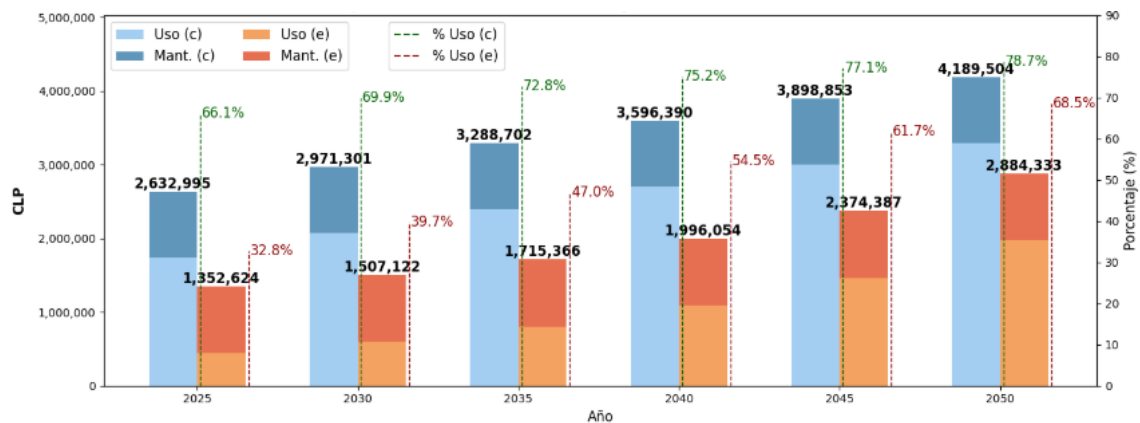


Figura 17: Costo promedio de adquisición de un vehículo convencional versus uno eléctrico

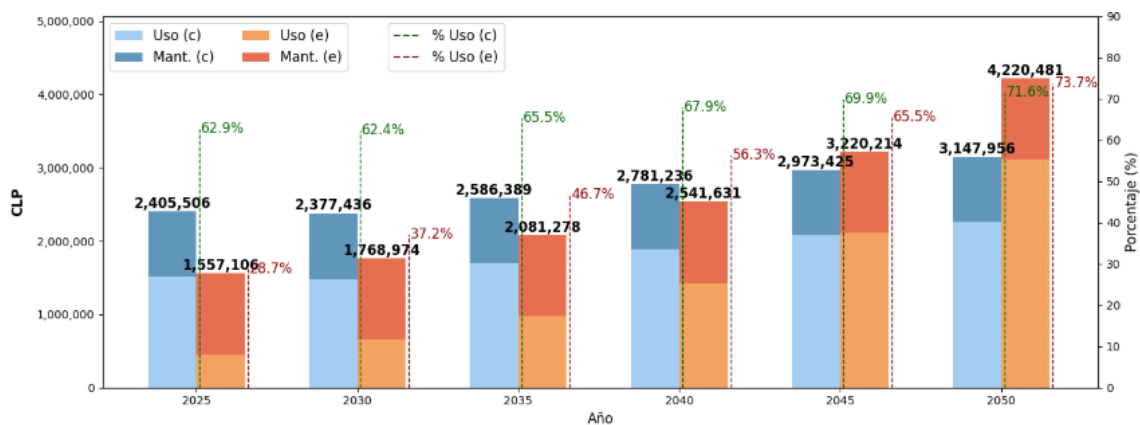
Escenario sustentable



Escenario conservador



Escenario no sustentable



Fuente 1: Elaboración propia

Figura 18: Comparación de costos convencionales (c) y eléctricos (e), uso y mantenimiento

6. Discusión

La sección de discusión interpreta y contextualiza los hallazgos presentados, comparándolos con la literatura internacional y las particularidades nacionales del sector transporte y energético. Se abordan los efectos a largo plazo de las políticas públicas en la adopción tecnológica y se evalúan las implicancias socioeconómicas y ambientales de los distintos escenarios planteados, incluyendo las dinámicas de mercado y las desigualdades estructurales que podrían surgir en la electrificación vehicular

6.1. Energía

Al analizar los impactos ambientales y económicos, es crucial reiterar que este estudio se centra exclusivamente en vehículos livianos y medianos particulares, excluyendo camiones, camionetas y vehículos comerciales, tanto a gasolina como diésel. también se excluyen vehículos intermedios en la electrificación del transporte, como vehículos híbridos (HEV por sus siglas en inglés). Todo lo anterior por las dinámicas de mercado tan disímiles y tipos de análisis específicos requeridos en cada sector.

Los resultados revelan que las condiciones climáticas chilenas reducen el rendimiento energético de los EV en aproximadamente 25% anual (Figura 10), principalmente por demanda de calefacción en meses fríos (más de 105 kWh/mes más frío, Figura 12), lo que incrementa su consumo real a 3,676 kWh/año por unidad. No obstante, incluso en el escenario más exigente (100% electrificación en 2035), la energía requerida por el parque eléctrico nacional sería marginal frente a la capacidad instalada: solo 4% del total generado (Figura 11), contrastando con estudios internacionales donde este consumo supera la matriz instalada en el país (Milev et al., 2021). Chile posee una ventaja en su estructura energética: en 2024 generó 83 mil GWh (CNE, 2025), suficiente para alimentar 22 millones de BEV (consumo promedio: 3,600 kWh/año), con una matriz renovable del 64%. Esta robustez energética, que además mantiene proyecciones optimistas de 85% de renovables al 2050 en los tres escenarios minimiza riesgos de desabastecimiento reportados en países con matrices fósiles dependientes como Escocia (Milev et al., 2021), regiones de Estados Unidos (Prival, 2023) o China (Rafaella et al., 2022).

6.2. Demanda vehicular

La proyección de los tres escenarios revela divergencias críticas en la escala del parque automotor. Bajo el escenario sustentable (SSP1), caracterizado por políticas ambientales estrictas y menor crecimiento poblacional, el parque vehicular se mantiene un 40% inferior (4,4 millones de unidades) frente al escenario menos sustentable (7,3 millones) y un 34% menor que el conservador (6,7 millones) para 2050. Esta reducción no solo responde a variables demográficas (con un crecimiento poblacional 6,4% menor que en SSP3), sino a un cambio estructural en la movilidad: la priorización de modos de transporte colectivos y no motorizados, junto a una racionalización del uso del vehículo privado. En contraste, el escenario no sustentable (SSP3) refleja un aumento del 72% en la flota total, impulsado por la accesibilidad de vehículos convencionales y la ausencia de incentivos para la sostenibilidad. Además del crecimiento poblacional con estancamiento en variables de salud económica nacional, que llevaría implícitamente a la población a elegir vehículos de menor

costos aún a costa de consecuencias medioambientales graves. Estas diferencias cuantitativas subrayan que la transición energética no es únicamente tecnológica, sino socioeconómica: la reducción del parque vehicular en SSP1 es un indicador de éxito en la desvinculación entre crecimiento económico y posesión de automóviles, un fenómeno documentado en economías avanzadas (OECD, 2024; Bjerkan et al., 2016). Futuras investigaciones deberán explorar cómo políticas integradas podrían consolidar esta tendencia en Chile.

6.3. Subsidios

Los resultados de este estudio revelan que los subsidios son un pilar crítico para la adopción masiva de vehículos eléctricos en Chile, pero su diseño actual presenta limitaciones significativas. Aunque el país dispone de incentivos como descuentos de hasta el 20% en la compra y exenciones del permiso de circulación (SII, 2021), estos se orientan predominantemente al segmento comercial, excluyendo al consumidor residencial estudiado en el presente estudio. Además, la ausencia de una infraestructura de carga descentralizada y accesible reduce drásticamente su efectividad, como evidencian los escenarios simulados: sin políticas integradas, la penetración de VE no supera el 5% a largo plazo. La experiencia internacional confirma que subsidios aislados solo incrementan la participación de mercado como máximo hasta en un 40% cuando no se combinan con redes de carga robustas y regulación coherente (Sheldon et al., 2023a). En Chile, la concentración del 80% de los cargadores en zonas de alto ingreso de la Región Metropolitana (Gerlach, 2025) no solo limita el alcance de los incentivos, sino que amplía brechas socioeconómicas. Esto relega la electromovilidad a un privilegio, y consumo de lujo, desaprovechando su potencial ambiental.

6.4. Costos

El análisis de costos revela una dicotomía crítica en la estructura económica de los vehículos eléctricos versus los de combustión interna. Aunque la inversión inicial de un EV sigue siendo un 125% superior en promedio (33,0 vs. 14,7 millones de CLP, Figura 18), incluso con subsidios del 25%, los costos operativos y de mantenimiento favorecen decisivamente a la electromovilidad. La simplicidad mecánica de los BEV reduce los gastos anuales de mantenimiento en un 46% (337 mil vs. 727 mil CLP/año para convencionales), mientras que las exenciones fiscales (permiso de circulación e impuesto verde) compensan parcialmente la brecha inicial. No obstante, el elevado precio de adquisición, hasta en modelos de gama baja como el Renault E-Kwid (~CLP 15 millones), perpetúa su percepción como bien de lujo, limitando el acceso a sectores socioeconómicos con capacidad de adquisición alta. La ventaja económica clave radica en el costo energético: incluso bajo escenarios extremos de alza tarifaria eléctrica (hasta 6 veces su valor en 25 años), el EV mantiene su competitividad frente a un convencional solo si la gasolina experimenta incrementos moderados (40%) y recibe subsidios altos (~25%). Como muestra la figura 19, en el escenario sustentable el costo anualizado total de un EV es un 18% menor que en el escenario no sustentable, reforzando que la barrera principal no es el uso, sino la adquisición.

Adicionalmente, desde un punto de vista macroeconómico la demanda de litio asociada a 2.53 millones de BEV en 2050 (escenario sustentable) generaría ingresos por 200 millones

de USD aproximadamente, un 95% más que en el escenario menos sustentable, subrayando el valor estratégico de este recurso para Chile (Catsaros, 2024; X. Zhang et al., 2024) Futuros estudios podrían integrar la volatilidad tecnológica (ej. reducción de costos de baterías) y externalidades ambientales de la cadena de valor del litio para una evaluación costo-beneficio de la extracción del metal.

6.5. Contaminación

Los resultados confirman que los vehículos eléctricos reducen sustancialmente las emisiones operativas frente a los convencionales, con una ventaja del 184% en eficiencia de CO₂eq por vehículo/año (Figura 14). No obstante, su impacto ambiental total está condicionado por la producción de electricidad y la cadena de extracción de litio, donde una matriz energética con alta participación renovable (en Chile aproximadamente 87% en 2050, Figura 4) minimiza las emisiones de generación. Mientras que en matrices fósiles los beneficios se diluyen al trasladar la contaminación a centrales térmicas (Rafaella et al., 2022). La extracción chilena de litio implica 33,9 kgCO₂eq (considerando 100% de Litio chileno en fabricación, Figura 17), un impacto local crítico, aunque marginal (~3%) frente a las emisiones evitadas en el escenario sustentable, que logra reducir un 28% las emisiones acumuladas del parque (Figura 16) mediante la coordinación entre electrificación masiva (~47% del parque en 2050, Figura 6) y energías limpias. Por otro lado, el escenario no sustentable (<5% VE) incrementa las emisiones un 56% por el dominio de vehículos convencionales y matrices fósiles. La electromovilidad chilena solo maximiza sus beneficios ambientales mediante políticas integradas que aceleren la expansión renovable, planificación que ya es parte de los objetivos nacionales (PELP, 2022). Adicionalmente se debe incentivar la adopción accesible de los VE y promover una minería de litio sostenible, transformando así la transición vehicular en una oportunidad estratégica para mitigar la contaminación atmosférica (OECD, 2024; SINIA, 2023) bajo un enfoque sistémico que vincule energía, minería y transporte.

El impacto de la extracción del litio no se limita únicamente a las emisiones al ambiente, sino que afecta a las fuentes hídricas, siendo el método de extracción por salmuera capaz de contaminar hasta 25 L de agua por vehículo (Guzmán et al., 2022). Como la participación de Chile (actual) se limita a la producción de la materia prima más importante del VE, sin ocupar un lugar en la fabricación ni el deshecho. Considerar no sólo el impacto de su extracción, sino que la capacidad de los yacimientos chilenos en función de cuántas baterías se puede fabricar, da paso a un nuevo análisis. Considerando que Chile posee actualmente unas reservas de aproximadamente 11 millones de toneladas (Cabello, 2022; Revista Economía, 2025) y es capaz de extraer 44 mil toneladas métricas (a 2023) mediante salmuera. Cada vehículo que requerirá aproximadamente 7,94 kg de Litio podría llegar a producir un total de 1,38 mil millones de VE, aproximadamente 5,54 millones al año. Este valor excede ampliamente el parque eléctrico mundial actual de aproximadamente 17 millones en 2024, con un *market share* global del 20% (IEA, 2025). Teniendo la capacidad nuevamente para soportar el total del mercado chileno en cualquiera de los escenarios, desde los más sustentables hasta los menos ambientalmente responsables. El problema ambiental para enfrentar sería la necesidad de los recursos hídricos, los cuales, sin tecnologías de circulación

óptimas, la extracción traería consecuencias graves en el medio ambiente. Con lo que, seguramente, no se lograría cubrir las necesidades del mercado automotriz eléctrico consolidado.

7. Conclusión

La electrificación del parque automotor en Chile representa una oportunidad concreta para reducir las emisiones contaminantes asociadas al transporte, pero su éxito depende de la aplicación coherente de políticas públicas integradas. Los resultados del presente estudio indican que, bajo un escenario de fuerte intervención con subsidios significativos, impuestos correctivos y un despliegue masivo de infraestructura de carga, es posible alcanzar una penetración de mercado de vehículos eléctricos cercana al 100% hacia el año 2035, con una reducción significativa en emisiones y costos operacionales.

No obstante, la transición no es neutra: sin una estrategia de subsidios al consumidor final, una red de carga descentralizada y una regulación fiscal progresiva, el vehículo eléctrico podría consolidarse como un bien exclusivo para sectores de alto ingreso, reproduciendo brechas existentes. A esto se suma la necesidad de una matriz energética limpia, ya que el impacto ambiental del BEV depende directamente del origen de la electricidad y de las condiciones de extracción del litio, recurso clave en el cual Chile posee ventajas competitivas, pero también grandes desafíos ambientales. Adicionalmente, el impulso de esta tecnología no solo traería beneficios al consumidor, sino que potenciaría las exportaciones de Litio. Un estudio futuro podría comparar el verdadero efecto costo-beneficio de la extracción de Litio sin utilizar consideraciones aproximadas como en el presente informe.

El anterior mencionado estudio del Litio es sólo uno de los posibles aspectos a considerar a la hora de evaluar la electromovilidad en el país. El presente estudio se ve limitado por la falta de información específica sobre la tecnología de los vehículos eléctricos y el efecto que estos tienen en la población chilena. Este tipo de energía recién emergiendo el mercado realmente no logra producir en los datos impactos claros en la demanda vehicular total. En relación con lo anterior, tampoco existen estudios claros sobre preferencias del consumidor a nivel automotriz que puedan servir como base en la efectividad de los subsidios. Otra limitación enfrentada es la volatilidad en los mercados nacionales e internacionales respecto a economía y comercio internacional que forma parte de la importación y exportación de materiales y productos. El futuro pronosticado se ve limitado a la mantención o alineación con los parámetros actuales, sin lograr considerar impactos importantes del mercado imposibles de pronosticarse. Como es el caso de la anterior pandemia global que forjó un periodo de incertidumbre en muchas de las variables, parámetros y consideraciones tomadas para la proyección del desarrollo nacional.

Estudios futuros como la evaluación beneficio-costos del Litio, dan claridad respecto a si verdaderamente el impacto en el medio ambiente sigue teniendo una diferencia positiva. Lograrán dilucidar si, aún con el ahorro de emisiones en su uso, la producción electromotriz

podría contaminar más que el parque automotriz convencional en el mismo periodo de tiempo. Estudios futuros también podrían dar claridad respecto a las verdaderas preferencias y tendencias del consumidor, aplicar una encuesta como en estudios internacionales sería clave. Al limitar este escrito utilizando la experiencia y variabilidad internacional, se ignoran las preferencias y creencias culturales que afectan a la adopción de esta tecnología.

En síntesis, la electromovilidad en Chile es viable tanto económica como medioambientalmente en el mediano plazo, siempre que se acompañe de planificación estatal coordinada, integrando incentivos financieros, mejoras estructurales y consideraciones sociales. Este estudio sienta una base técnica y analítica robusta para futuros desarrollos regulatorios y de investigación, considerando que, con el crecimiento del mercado descrito la cantidad de información respecto a las respuestas del público ante los incentivos crecerá. Formar una base de datos coherente con el país es necesario para evaluar efectivamente el impacto ambiental y económico de los subsidios, así, se puede abandonar la necesidad de la comparación internacional que pueda no explicar realmente al mercado chileno.

8. Bibliografía

- ACEA. (2024). Charging ahead: accelerating the roll-out of EU electric vehicle charging infrastructure . *Driving Mobility for Europe*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-charging-infrastructure#>
- Al-Habaibeh, A., Anderson, G., Damji, K., Jones, G., & Lam, K. (2010, July 29). *Using infrared thermography for monitoring thermal efficiency of buildings - case studies from Nottingham Trent University*. JIMEC.
- ANAC. (2022). *Parque automotriz 2021*.
- ANAC. (2024). Informe del Mercado Automotor Diciembre 2024. In *ANAC*.
- ANAC. (2025). *Informe de ventas de vehículos cero y bajas emisiones*. <https://www.anac.cl/wp-content/uploads/2024/12/12-ANAC-Informe-Cero-y-Bajas-Emisiones-Diciembre-2024.pdf>
- ASE. (2025). *Taxis Eléctricos – Mi Taxi Eléctrico*. <https://www.mitaxielectrico.cl/>
- Asghar, U., Rafiq, S., Anwar, A., Iqbal, T., Ahmed, A., Jamil, F., Khurram, M. S., Akbar, M. M., Farooq, A., Shah, N. S., & Park, Y. K. (2021). Review on the progress in emission control technologies for the abatement of CO₂, SO_x and NO_x from fuel combustion. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106064. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.106064>
- Bebo, A., & Simpson, P. (2014). *The method and the heating system of the vehicle cabin*.
- Bentéjac, C., Csörg, A., & Martínez-Muñoz, G. (2019). *A Comparative Analysis of XGBoost*.
- Bjerkkan, K. Y., Nørbech, T. E., & Nordtømme, M. E. (2016). Incentives for promoting Battery Electric Vehicle (BEV) adoption in Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 43, 169–180. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2015.12.002>
- Bretz, H. L., & Salon, D. (2018). Do electric vehicles need subsidies? Ownership costs for conventional, hybrid, and electric vehicles in 14 U.S. cities. *Energy Policy*, 120, 238–249. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2018.05.038>
- BTS. (2022). *National Household Travel Survey*. <https://www.bts.gov/topics/national-household-travel-survey>
- Bushnell, J. P., Muehlegger, E. P., & Rapson, D. P. (2021a). *UC Office of the President ITS reports Title Do Electricity Prices Affect Electric Vehicle Adoption? Publication Date*. <https://doi.org/10.7922/G2DJ5CX3>

- Bushnell, J. P., Muehlegger, E. P., & Rapson, D. P. (2021b). *UC Office of the President ITS reports Title Do Electricity Prices Affect Electric Vehicle Adoption? Publication Date*. <https://doi.org/10.7922/G2DJ5CX3>
- Cabello, J. (2022). Reserves, resources and lithium exploration in the salt flats of northern Chile. *Andean Geology*, 49(2), 297–306. <https://doi.org/10.5027/ANDGEOV49N2-3444>
- Catsaros, O. (2024, December 10). *Lithium-Ion Battery Pack Prices See Largest Drop Since 2017, Falling to \$115 per Kilowatt-Hour: BloombergNEF | BloombergNEF*. <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilowatt-hour-bloombergnef/>
- CGE. (2025). *Tarifa de Suministro – CGE*. <https://www.cge.cl/informacion-comercial/tarifas-y-procesos-tarifarios/tarifa-de-suministro/>
- Cheng, A. L., Fuchs, E. R. H., Karplus, V. J., & Michalek, J. J. (2024). Electric vehicle battery chemistry affects supply chain disruption vulnerabilities. *Nature Communications*, 15(1), 2143. <https://doi.org/10.1038/S41467-024-46418-1>
- CNE. (2024a). *Informe mensual sector energético*. https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2024/12/RMensual_v202412.pdf
- CNE. (2024b). *Reporte mensual sector energético Diciembre 2024*.
- Coordinador eléctrico nacional. (2025). *Información de Instalaciones eléctricas*. <https://infotecnica.coordinador.cl/instalaciones/centrales>
- Dabush, I., Battat, I., Cohen, C., & Lavee, D. (2025). Navigating the electric vehicle revolution: Optimal subsidy allocation for electric vehicles and charging infrastructure. *Journal of Cleaner Production*, 486, 144586. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.144586>
- De Santis, M., Silvestri, L., & Forcina, A. (2022). Promoting electric vehicle demand in Europe: Design of innovative electricity consumption simulator and subsidy strategies based on well-to-wheel analysis. *Energy Conversion and Management*, 270, 116279. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.116279>
- DeShazo, J. R., Sheldon, T. L., & Carson, R. T. (2017). Designing policy incentives for cleaner technologies: Lessons from California’s plug-in electric vehicle rebate program. *Journal of Environmental Economics and Management*, 84, 18–43. <https://doi.org/10.1016/J.JEEM.2017.01.002>
- Deuten, S., Gómez Vilchez, J. J., & Thiel, C. (2020). Analysis and testing of electric car incentive scenarios in the Netherlands and Norway.

- Technological Forecasting and Social Change*, 151, 119847.
<https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2019.119847>
- Dote, S. (2025, July 2). Subsidio eléctrico 2025 en Chile. *El País*.
<https://elpais.com/chile/2025-07-02/subsidio-electrico-2025-en-chile-como-postular-y-quienes-pueden-acceder-al-nuevo-proceso.html>
- EDGAR. (2023). *The Emissions Database for Global Atmospheric Research*.
https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023
- Elbil. (2025). *Norwegian EV policy - Norsk elbilforening*. The Norwegian EV Association. <https://elbil.no/english/norwegian-ev-policy/>
- Epa. (2021). *The Effects of New-Vehicle Price Changes on New- and Used-Vehicle Markets and Scrappage*.
- Funke, S. Á., Sprei, F., Gnann, T., & Plötz, P. (2019). How much charging infrastructure do electric vehicles need? A review of the evidence and international comparison. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 224–242. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2019.10.024>
- Galelli, S., & Castelletti, A. (2013). Extra-Trees for streamflow modelling Assessing the predictive capability of randomized tree-based ensembles in streamflow modelling. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 10, 1617–1655.
<https://doi.org/10.5194/hessd-10-1617-2013>
- Gerlach, N. (2025, January 27). ¿Cuántos cargadores hay para vehículos eléctricos en Chile? <https://www.rutamotor.com/infraestructura-en-chile-descubre-cuantos-cargadores-hay-para-autos-electricos/>
- Global Petrol Prices. (2025). *Energy prices around the world | GlobalPetrolPrices.com*. <https://www.globalpetrolprices.com/>
- Guzmán, J. I., Faúndez, P., Jara, J. J., & Retamal, C. (2022). On the source of metals and the environmental sustainability of battery electric vehicles versus internal combustion engine vehicles: The lithium production case study. *Journal of Cleaner Production*, 376, 133588.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133588>
- Honda. (2018, June). *Drivemode Data Report: Where And When Commuting Takes The Longest | Drivemode*. DriveMode.
<https://www.drivemode.com/blog/engineering/drivemode-data-report-commuting-durations/>
- IEA. (2008). *Energy technology perspectives: Scenarios & strategies to 2050*. International Energy Agency (IEA).
- IEA. (2025). *Global EV Outlook 2025* . <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/trends-in-electric-car-markets-2>

- INE. (2024). *Permiso de circulación*.
<https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/transporte-y-comunicaciones/permiso-de-circulacion>
- Jaskula, B. (2023). Lithium. *U.S. Geological Survey*.
- Kimia, E., & Tehranchian, A. M. (2016). Elaheh Kimia, Amir Mansour Tehranchian. The Impact of Macroeconomic Indexes on Automobile demand: a Panel Data Econometric Analysis. *Report and Opinion*, 8(11).
<https://doi.org/10.7537/marsroj081116.08>
- Kuki, Á., Lakatos, C., Nagy, L., Nagy, T., & Kéki, S. (2025). Energy Use and Environmental Impact of Three Lithium-Ion Battery Factories with a Total Annual Capacity of 100 GWh. *Environments*, 12(1).
<https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS12010024>
- López, F. (2024, August). *Chile sigue liderando la producción de litio en Sudamérica a la vez que cae valor de las exportaciones*. BioBio.
<https://www.biobiochile.cl/noticias/economia/actualidad-economica/2024/08/20/chile-sigue-liderando-la-produccion-de-litio-en-sudamerica-mientras-cae-el-valor-de-las-exportaciones.shtml>
- Lorenzo, D., & Ramos, L. (2025). Planificación energética de largo Plazo. In *Ministerio de Energía*.
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1116938&idVersion=2018-04->
- Lu, T., Yao, E., Jin, F., & Pan, L. (2020). Alternative Incentive Policies against Purchase Subsidy Decrease for Battery Electric Vehicle (BEV) Adoption. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 1645, 13(7), 1645.
<https://doi.org/10.3390/EN13071645>
- Ma, H., Yueshuai He, B., Kaljevic, T., & Ma, J. (2024). *A Two-sided Model for EV Market Dynamics and Policy Implications*. 9.
- Mao, Y., Wang, J., & Li, J. (2018). Experimental and numerical study of air flow and temperature variations in an electric vehicle cabin during cooling and heating. *Applied Thermal Engineering*, 137, 356–367.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.03.099>
- Milev, G., Hastings, A., & Al-Habaibeh, A. (2021). The environmental and financial implications of expanding the use of electric cars - A Case study of Scotland. *Energy and Built Environment*, 2(2), 204–213.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2020.07.005>
- Ministerio del medio Ambiente. (2020). *Explorador de emergencias climáticas*.
<https://arclim.mma.gob.cl/amenazas/>

- Monroy, M. (2022, October). Los autos eléctricos e híbridos enchufables quedarán eximidos del permiso de circulación. *La Tercera*. <https://www.latercera.com/mtonline/noticia/los-autos-electricos-e-hibridos-enchufables-quedaran-eximidos-del-permiso-de-circulacion/VMHXVV7KLBBQXPGTNPKEFOP6A2U/>
- MTT. (2025). *Homologación de Vehículos Livianos-Medianos y Motocicletas* | Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. <https://mtt.gob.cl/archivos/5609>
- Muehlegger, E., Bushnell, J. B., & Rapson, D. S. (2022). *Energy Prices and Electric Vehicle Adoption*. <https://doi.org/10.3386/W29842>
- Muñoz, J. (2025, February 27). *Kilometraje: ¿Cuántos kilómetros debe tener un auto por año? - Autofact*. AUTOFACT. <https://www.autofact.cl/blog/comprar-auto/antecedentes/kilometraje-promedio-auto>
- Nazari, F., Mohammadian, A. (Kouros), & Stephens, T. (2019). Modeling electric vehicle adoption considering a latent travel pattern construct and charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 72, 65–82. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2019.04.010>
- NCCARF. (2016). *What are the RCPs?* National Climate Change Adaptation Research Facility. <https://nccarf.edu.au/what-are-rcps/>
- OECD. (2024). *OECD Environmental Performance Reviews: Chile 2024* (OECD Environmental Performance Reviews). OECD. <https://doi.org/10.1787/5BC65D36-EN>
- Olabi, A. G., & Abdelkareem, M. A. (2022). Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112111. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112111>
- Olabi, A. G., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., Alkhalidi, A., Salameh, T., Abo-Khalil, A. G., Hassan, M. M., & Sayed, E. T. (2022). Battery electric vehicles: Progress, power electronic converters, strength (S), weakness (W), opportunity (O), and threats (T). *International Journal of Thermofluids*, 16, 100212. <https://doi.org/10.1016/J.IJFT.2022.100212>
- OMS. (2024, June 25). *Health consequences of air pollution*. <https://www.who.int/news/item/25-06-2024-what-are-health-consequences-of-air-pollution-on-populations>
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century.

- Global Environmental Change*, 42, 169–180.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- Ostro, B. D., Eskeland, G. S., Sanchez, J. M., & Feyzioglu, T. (1999). Air pollution and health effects: A study of medical visits among children in Santiago, Chile. *Environmental Health Perspectives*, 107(1), 69–73.
<https://doi.org/10.1289/EHP.9910769>; WEBSITE: WEBSITE: EHP-SITE
- Özçam, A., & Özçam, D. S. (2012). *A Review Of Econometric Estimation Of Consumer Demand For Automobiles And The Country Of Origin (COO) Effects*. 97–132.
- Pamidimukkala, A., Kermanshachi, S., Rosenberger, J. M., & Hladik, G. (2023). Evaluation of barriers to electric vehicle adoption: A study of technological, environmental, financial, and infrastructure factors. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 22, 100962.
<https://doi.org/10.1016/J.TRIP.2023.100962>
- Pirottais, F., Bellettre, J., Lecorre, O., Tazerout, M., De Pelsemaeker, G., & Guyonvarch, G. (2002). A Model of Energetic Interactions Between a Car Engine, the Cabin Heating System and the Electrical System. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2002-01-2224>
- Prival, M. J. (2023). The Carbon Footprint of Electric Vehicles in the United States. *Low Carbon Economy*, 14(02), 17–26.
<https://doi.org/10.4236/LCE.2023.142002>
- Rafaella, E. P., Sotiropoulou, I., Sempos, S., Tonokura, K., Tang, B., Xu, Y., & Wang, M. (2022). Life Cycle Assessment of Battery Electric and Internal Combustion Engine Vehicles Considering the Impact of Electricity Generation Mix: A Case Study in China. *Atmosphere 2022, Vol. 13, Page 252, 13(2)*, 252. <https://doi.org/10.3390/ATMOS13020252>
- Rentschler, J., & Leonova, N. (2023). Global air pollution exposure and poverty. *Nature Communications*, 14(1), 1–11.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41467-023-39797-4>
- Revista Economía. (2025, May 8). *Chile descubre un 28% más de reservas de litio: implicaciones para la economía y el mercado global*. <https://www.revistaeconomia.com/chile-descubre-un-28-mas-de-reservas-de-litio-implicaciones-para-la-economia-y-el-mercado-global/>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O’Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental*

Change, 42, 153–168.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

Rojas, M., Gallardo, L., Directora, (, Mandante,), Proyecto, D., Bozkurt, D., Urquiza, A., Billi, M., Falvey, M., Muñoz, F., Valdebenito, N., Meneses, M., Saveedra, F., Tondreau, N., & Ogaz, M. G. (2018). Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación de la vulnerabilidad. In *FONDAP*.

Rojas, M., Gallardo, L., Proyecto, D., Bozkurt, D., Urquiza, A., Billi, M., Falvey, M., Muñoz, F., Valdebenito, N., Meneses, M., Saveedra, F., Tondreau, N., & Ogaz, M. G. (2018). *SIMULACIONES CLIMÁTICAS REGIONALES*.

Sheldon, T. L., & Dua, R. (2022). The Dynamic Role of Subsidies in Promoting Global Electric Vehicle Sales. *SSRN Electronic Journal*.
<https://doi.org/10.2139/SSRN.4300126>

Sheldon, T. L., Dua, R., & Alharbi, O. A. (2023a). Electric vehicle subsidies: Time to accelerate or pump the brakes? *Energy Economics*, 120, 106641.
<https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2023.106641>

SINIA, & Ministerio del medio ambiente. (2023). *Reporte del Estado del Medio Ambiente 2023*. <https://sinia.mma.gob.cl/estado-del-medio-ambiente/reporte-del-estado-del-medio-ambiente-2023/>

SNI. (2022). *Informe de emisiones - Sector energía*.
<https://snichile.mma.gob.cl/sector-energia/>

Statista. (2024). *Participación de Chile en la producción mundial de litio 2012-2023* | Statista. <https://es.statista.com/estadisticas/1448884/participacion-de-chile-en-la-produccion-mundial-de-litio/>

Stolwijk, A. M., Straatman, H., & Zielhuis, G. A. (1999). Studying seasonality by using sine and cosine functions in regression analysis. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 53(4), 235. <https://doi.org/10.1136/JECH.53.4.235>

UNEP. (2017, August 10). *Chile takes action on air pollution*.
<https://www.unep.org/news-and-stories/story/chile-takes-action-air-pollution>

USDT. (2017, May). *National Household Travel Survey Daily Travel Quick Facts* | Bureau of Transportation Statistics. Bureau of Transportation Statistics. <https://www.bts.gov/statistical-products/surveys/national-household-travel-survey-daily-travel-quick-facts>

WorldData. (2024). *Country comparison: Chile / Netherlands*. WorldData.
<https://www.worlddata.info/country-comparison.php?country1=CHL&country2=NLD>

- Yahel, A., & Campos, G. (2023). *Análisis de la evolución del mercado automotriz en Chile*.
- Yan, S. (2018). The economic and environmental impacts of tax incentives for battery electric vehicles in Europe. *Energy Policy*, *123*, 53–63. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2018.08.032>
- Zaino, R., Ahmed, V., Alhammadi, A. M., & Alghoush, M. (2024). Electric Vehicle Adoption: A Comprehensive Systematic Review of Technological, Environmental, Organizational and Policy Impacts. *World Electric Vehicle Journal*, *15*(8). <https://doi.org/10.3390/WEVJ15080375>
- Zhang, Q., Huang, Z., Liu, B., & Ma, T. (2025). Sustainable lithium supply for electric vehicle development in China towards carbon neutrality. *Energy*, *320*, 135243. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2025.135243>
- Zhang, X., Chang, H. L., Su, C. W., Qin, M., & Umar, M. (2024). Exploring the dynamic interaction between geopolitical risks and lithium prices: A time-varying analysis. *Resources Policy*, *90*, 104840. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2024.104840>
- Zheng, Y., Liu, D., An, F., Wang, J., Gao, X., & Jia, N. (2025). Impact of charging infrastructure construction on electric vehicle diffusion based on a multi-agent model. *IScience*, *28*(4), 112257. <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2025.112257>