

Comparative life cycle analysis for the carbon footprint of a gasoline vehicle and an electric vehicle

Omar Alexis UNOCC GODOY Ing., Brayan Sergio DURAND ANGELES Ing., Fernando SILVA MsC. ,
Juan Pablo GÓMEZ MONTOYA PhD. ^{*}
Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú, *jgomezmo@utp.edu.pe

Abstract-- This work presents the results of a comparative analysis of the carbon footprint between an electric vehicle (EV) and a gasoline vehicle (ICEV) from the manufacturing stage to the recycling process. Various variables were considered, such as the electrical energy generation matrix in South Korea for the manufacturing of vehicles and the energy matrix of Peru for operation in different mileage scenarios. As a case study, two Hyundai brand vehicles were analyzed, collecting information on their technical characteristics provided by the manufacturer. CO₂ emissions were calculated, taking into account the carbon footprint coefficients of the various variables in each stage of the life cycle. The results obtained in different mileage scenarios show that, for shorter distances, the difference in average gCO₂ emissions between the gasoline vehicle and the electric vehicle is minimal. However, in higher mileage scenarios, the gCO₂ difference is significantly larger for gasoline vehicles. These results indicate a positive impact on the reduction of greenhouse gases in Peru, highlighting the importance of these findings for making decisions that favor the environment. In addition, the need to create social awareness about the levels of greenhouse gases is highlighted to accelerate the change in the country's energy grid.

Keyword Life cycle, carbon footprint, Comparative analysis, electric vehicle and gasoline.

Análisis comparativo del ciclo de vida para la huella de carbono de un vehículo a gasolina y un vehículo eléctrico

Omar Alexis UNOCC GODOY Ing., Brayan Sergio DURAND ANGELES Ing., Fernando SILVA MsC. ,
Juan Pablo GÓMEZ MONTOYA PhD. ^{*}
Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú, *jgomezmo@utp.edu.pe

Resumen– Se presentan los resultados de un análisis comparativo de la huella de carbono entre un vehículo eléctrico (EV) y uno a gasolina (ICEV) desde la etapa de fabricación hasta el proceso de reciclaje. Se consideraron diversas variables, como la matriz de generación de energía eléctrica en Corea del Sur para la fabricación de los vehículos y la matriz energética del Perú para la operación en distintos escenarios de kilometraje. Como caso de estudio, se analizaron dos vehículos de la marca Hyundai, recopilando información sobre sus características técnicas. Se calcularon las emisiones de CO₂, tomando en cuenta los coeficientes de huella de carbono de las diversas variables en cada etapa del ciclo de vida. Los resultados obtenidos en diferentes escenarios de kilometraje muestran que, para distancias menores, la diferencia en emisiones de gCO₂ entre el vehículo a gasolina y el eléctrico es mínima. En escenarios de mayor kilometraje, la diferencia de gCO₂ es mayor para los vehículos a gasolina. Estos resultados indican un impacto positivo en la reducción de gases de efecto invernadero en Perú, destacando la importancia de estos hallazgos para tomar decisiones que favorezcan al medio ambiente.

Palabras clave– Ciclo de vida, huella de carbono, Análisis comparativo, vehículo eléctrico, gasolina.

I. INTRODUCCIÓN

El uso excesivo de combustibles fósiles como el petróleo y el carbón es un problema global que contribuye significativamente al cambio climático debido a la emisión de gases de efecto invernadero. Los vehículos a combustión interna y eléctricos tienen diferentes impactos ambientales. Los vehículos eléctricos generan menos emisiones locales durante la conducción, pero su huella de carbono total depende de su fabricación, la fuente de electricidad y el manejo de residuos al final de su ciclo de vida. Por ejemplo, fabricar un Volvo XC40 genera 14 toneladas de CO₂, mientras que el C40 Recharge genera 25 toneladas [1], aunque esto se equilibra durante la vida útil del vehículo. Los vehículos a gasolina producen emisiones significativas de CO₂ durante su operación y mantenimiento, con un promedio de 240 g de CO₂/km [2]. Este texto plantea la pregunta: ¿Cuál es el impacto real de la huella de carbono de un vehículo a gasolina versus un vehículo eléctrico en las etapas de fabricación, operación y fin de vida en Lima?

Este estudio recopila diversas investigaciones para comparar y validar un análisis del ciclo de vida de los vehículos y sus fuentes de energía. Utilizando datos de ventas y estadísticas de vehículos eléctricos y de combustión interna en Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú, se encontró que los vehículos de combustión interna emiten más gases de efecto invernadero que los eléctricos, destacando la necesidad de una matriz energética más limpia. Además, se sugiere que los vehículos eléctricos podrían mejorar la calidad del aire al reducir las emisiones de partículas. El análisis de ciclo de vida subraya la importancia de la generación de electricidad en las emisiones de los vehículos eléctricos [6,7,8,9]. Se examina la eficiencia y el impacto ambiental de los vehículos eléctricos en diferentes contextos, comparando las emisiones de gases de efecto invernadero entre los vehículos eléctricos de batería (BEV) y los de combustión interna (ICV) en condiciones reales. También se presenta un modelo de transición hacia el uso de vehículos eléctricos en Tailandia, evaluando posibles reducciones de emisiones de CO₂ y costos asociados [4,5,12]. Por otro lado, las pruebas en ruta mostraron menor eficiencia con gasolina Súper y se realizaron mediciones de emisiones de CO, CO₂, HC y NO_x en el ciclo ASM 2525 para evaluar vehículos de combustión interna y eléctricos. El estudio también evaluó las emisiones de escape y no escape de diferentes tipos de vehículos y desarrolló una metodología para cuantificar las emisiones de CO₂ [3,10,11].

En cuanto a la producción de vehículos, se utilizó datos locales para estimar el impacto ambiental de materiales como acero, aluminio y plásticos, identificando que la batería de iones de litio y la carrocería son los principales contribuyentes al impacto ambiental. La producción de vehículos eléctricos genera un impacto ambiental mayor debido a la fabricación de baterías, carrocerías y chasis, con emisiones combinadas de fabricación y eliminación para BEV, FCEV e ICEV siendo 77, 72 y 60 gCO₂-eq/km, respectivamente, en una vida útil de 200,000 km. En Asia, los BEV mostraron mayores emisiones de CO₂ por kilómetro que los ICEV y HEV en 2017 debido al alto consumo eléctrico y la dependencia del carbón [13, 16, 14, 20, 22]. Finalmente, se indica que los vehículos híbridos enchufables (PHEV) reducen las emisiones de gases de efecto

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LEIRD).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LEIRD).
DO NOT REMOVE

invernadero en un 29% en comparación con los vehículos de combustión interna. Las emisiones derivadas de la fabricación de vehículos representan entre el 11% y el 23% de las emisiones totales del ciclo de vida, siendo mayores para los vehículos eléctricos [21,17,19,15].

El marco teórico de toda investigación ofrece el contexto y la base conceptual esencial para entender el problema de estudio desde distintas perspectivas disciplinarias. En este proceso, se examinan y evalúan las teorías, modelos y estudios anteriores pertinentes que sustentan el estudio en curso.

1.1. Huella de Carbono

La huella de carbono es un indicador ambiental que refleja la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI), expresada como CO₂ equivalente, que es emitida directa o indirectamente como consecuencia de una actividad determinada [23].

1.2. Estimación de huella de carbono para la producción de vehículos eléctrico y a combustión.

La estimación de la huella de carbono en la producción de vehículos es esencial para mitigar su impacto ambiental. Este análisis incluye desde la extracción de materias primas hasta la fabricación y distribución. En vehículos eléctricos, se destaca la producción de baterías y su impacto en las emisiones. En vehículos de combustión interna, se examina la extracción y refinación de combustibles fósiles [24].

1.3. Estimación de la huella de carbono para la operación de un vehículo eléctrico y de combustión.

La estimación de la huella de carbono es crucial para evaluar el impacto ambiental de diferentes tipos de vehículos. Este proceso implica calcular las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono (CO₂), durante la operación de vehículos eléctricos y de combustión. Los vehículos eléctricos destacan por generar emisiones mínimas o nulas al utilizar electricidad en lugar de combustibles fósiles, mientras que los vehículos de combustión interna emiten cantidades significativas de CO₂ y otros gases de efecto invernadero al quemar combustibles fósiles [2].

1.4. Fuentes de energía para el funcionamiento de un vehículo.

1.4.1. Energía química para el funcionamiento de un vehículo a combustión interna.

Los vehículos de combustión interna utilizan energía almacenada en combustibles fósiles como gasolina y diésel. Al quemarse, liberan energía en forma de calor que impulsa el motor, pero también generan emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos.

1.4.2. Energía renovable para el funcionamiento de un vehículo eléctrico.

Los vehículos eléctricos se alimentan de fuentes eléctricas que pueden ser convencionales (como la red eléctrica) o renovables, como la solar, eólica e hidroeléctrica, dependiendo de la infraestructura energética de cada país. Esta electrificación ofrece flexibilidad en la elección de la fuente de

energía, lo cual puede significar una reducción en la huella de carbono si se priorizan las fuentes renovables. [30].

1.5. Matriz Energética en América Latina

La matriz energética de América Latina se basa principalmente en fuentes fósiles como el petróleo, el gas natural y en menor medida, el carbón. En el año 2020, estas fuentes representaron aproximadamente el 60% de la producción total de energía, con el petróleo y el gas natural ocupando la mayor parte. Las energías renovables, como la hidroeléctrica, la solar y la eólica, constituyeron el 33%, con un crecimiento moderado en comparación con años anteriores. Este panorama subraya la importancia de transitar hacia un sistema energético más diversificado y sostenible en la región. [31].

1.6. Gases contaminantes que emiten los vehículos.

Los vehículos emiten varios gases contaminantes como el dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles (COV) y partículas en suspensión (THC). Estos gases tienen efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente, subrayando la necesidad urgente de reducir estas emisiones. [33].

1.7. Modelo de estimación de la huella de carbono entre autos eléctricos y a gasolina teniendo en cuenta su vida útil.

1.7.1. Tiempo de vida útil.

Al comparar la huella de carbono de vehículos eléctricos y de combustión, es crucial considerar su vida útil, que puede influir en las emisiones totales de gases de efecto invernadero a lo largo del ciclo de vida del vehículo.

1.7.2. Tiempo de vida útil de los vehículos eléctricos.

1.7.2.1. El impacto medioambiental de fabricar un vehículo eléctrico.

Proviene de su proceso de fabricación, algunos cuestionan si los vehículos enchufables son realmente más limpios, argumentando que su proceso de fabricación es más contaminante que el de los modelos de combustión interna. Volvo, por ejemplo, ha informado que la producción de sus coches eléctricos genera más contaminación, pero este impacto se compensa ampliamente a lo largo de toda la vida útil del vehículo [34].

1.7.2.2. Lo que contamina el proceso de recarga

Los autos eléctricos con batería se desplazan utilizando la energía almacenada en sus baterías, que se recargan desde la red eléctrica. Este proceso genera emisiones que dependen de la fuente de energía utilizada. Según investigaciones de Green NCAP, en España se emiten aproximadamente 154 gramos de CO₂ por cada kWh de electricidad producida. Por lo tanto, un automóvil eléctrico con una batería de 50 a 60 kWh podría generar alrededor de 7 millones de toneladas de CO₂ a lo largo de su vida útil. [34].

1.7.3. Tiempo de vida útil de los vehículos a gasolina.

Los vehículos de gasolina suelen tener un kilometraje más bajo debido a su complejidad técnica y mayor cantidad de piezas móviles, lo que aumenta la probabilidad de fallos mecánicos frecuentes. La duración del vehículo depende de las condiciones de conducción, el mantenimiento y la calidad de

las piezas. En promedio, pueden durar alrededor de 250,000 kilómetros, equivalente a unos 10 años con un uso de 20,000 kilómetros anuales [35].

Esta investigación tiene como objetivo realizar un análisis comparativo del ciclo de vida para la huella de carbono entre un vehículo a gasolina y un vehículo eléctrico en su fabricación, operación y el fin del ciclo de vida en la ciudad de Lima. Por ello, se divide en dos objetivos específicos que son comparar la huella de carbono de un vehículo eléctrico y uno a gasolina a lo largo de su ciclo de vida, incluyendo la fabricación, operación y gestión de residuos finales, en 4 diferentes escenarios de kilometraje. Y Comparar los gastos ejercidos en los precios de los vehículos y para la energía/combustible dentro de la ciudad de Lima.

El alcance de este estudio se sitúa dentro de un enfoque correccional donde se evaluará la huella de carbono en vehículos eléctricos y de gasolina mediante diversos métodos de cálculo y una revisión exhaustiva de estudios automotrices. Además de comparar los niveles de contaminación, se analizarán los costos de adquisición y operación de ambos tipos de vehículos a lo largo de su vida útil. La comparativa, basada en diferentes rangos de kilometraje, proporcionará una visión detallada de las implicaciones ambientales y económicas, facilitando decisiones informadas en el ámbito del transporte sostenible.

II. METODOLOGIA DE ANALISIS DEL CICLO DE VIDA

2.1. Enfoque de la investigación.

Esta investigación utilizará un enfoque mixto que combina métodos cuantitativos y cualitativos. En el ámbito cuantitativo, se aplicarán fórmulas de un estudio estadounidense para medir y graficar los niveles de CO₂ asociados con la fabricación, operación y desecho de vehículos, comparando estos datos. En el enfoque cualitativo, se recogerán datos sobre la matriz energética de Perú y Corea del Sur, así como información de estudios en Oceanía, Asia y América, para interpretar los resultados y elaborar conclusiones integradas con la investigación.

2.2. Metodología de investigación.

Se recopila información sobre los factores que influyen en la huella de carbono de vehículos de combustibles fósiles, híbridos y eléctricos. Se introducen y explican detalladamente las variables consideradas y su relevancia en el análisis. Utilizando como referencia un estudio estadounidense, se adaptarán variables y se seleccionarán modelos de vehículos pertinentes a las condiciones de Perú, garantizando que los resultados sean representativos y aplicables a la realidad local. Esto permitirá una comprensión precisa de la huella de carbono de los diferentes tipos de vehículos en el país.

De este modo, se incluye calcular la huella de carbono en la fabricación de ambos tipos de vehículos, considerando materiales y baterías de litio; comparar la huella de carbono durante su operación a lo largo de 150,000; 200,000; 250,000

y 300,000 kilómetros en Lima; evaluar la huella de carbono de los residuos al final de su vida útil; y analizar los costos de adquisición y energía/combustible para los mismos rangos de kilometraje. Los resultados se presentarán en gráficos estadísticos y comparativos para extraer conclusiones significativas.

2.3. Cálculos de la huella de carbono.

Los modelos de vehículos enfocados en esta investigación son el Hyundai Kona eléctrico de 39 kWh y el Hyundai Kona a gasolina de 2.0. En la tabla 1 se realizó algunas recopilaciones de materia prima para su fabricación según Hyundai [38].

TABLA 1
CANTIDAD DE MATERIALES [38].

MATERIA	EV (Kg)	ICEV (Kg)
Vidrio	84	70
Metales ferrosos	800	770
Goma	84	70
Plástico	240	210
Cobre	84	70
Níquel	50	0
Aluminio	230	140
Plomo	0	20
Otros	20	50
TOTAL	1592	1400

Según Hyundai, el vehículo Hyundai Kona eléctrico de 39 kWh tiene un peso aproximado de 1610 Kg. Mientras que el opuesto a gasolina tiene un peso aproximado de 1455 Kg.

A continuación, en la Tabla 2 se presenta los datos de energía consumida por cada material de ambos vehículos, cabe mencionar que los datos de la intensidad de energética fueron recopilados de un estudio para lograr calcular la energía consumida en cada modelo [14].

TABLA 2
ENERGÍA CONSUMIDA POR CADA MATERIAL [14].

MATERIA	INTENSIDAD ENERGETICA	EV Energía (MJ)	ICEV Energía (MJ)
Vidrio	30	2520	2100
Metales ferrosos	40	32000	30800
Goma	70	5880	4900
Plástico	90	21600	18900
Cobre	100	8400	7000
Níquel	110	5500	0
Aluminio	220	50600	30800
Plomo	40	0	800
TOTAL		126500	95300

Seguendo con el análisis, se determina el coeficiente de la huella de carbono utilizando la matriz energética de Corea del Sur correspondiente al año 2023, Tabla 3, país donde se fabrican los vehículos modelos. Las fuentes de energía utilizadas se obtuvieron de un estudio realizado en el 2023 [36].

TABLA 3.
COEFICIENTE DE LA HUELLA DE CARBONO EN COREA DEL SUR.

FUENTES DE ENERGIA	PROPORCION (%)	EMISION (g de CO ₂ /kWh)	COEFICIENTE H.C.CS (gCO ₂ eq/kWh)
Carbón	0.40	820	328
Gas natural	0.25	490	122.5
Nuclear	0.30	24	7.2
Renovables	0.05	20	1
TOTAL	1.00		458.70

Del mismo modo, se calculará el coeficiente de la huella de carbono para Perú, donde los datos extraídos de las fuentes de energía son de un informe del 2020 [37], Tabla 4.

TABLA 4.
COEFICIENTE DE LA HUELLA DE CARBONO EN EL PERÚ.

FUENTES DE ENERGIA	PROPORCION (%)	EMISION (g de CO ₂ /kWh)	COEFICIENTE H.C.P (gCO ₂ eq/kWh)
Termoeléctrica	0.56	450.00	252.41
Hidroeléctrica	0.39	15.00	5.81
Eólica y solar	0.05	20.00	1.04
TOTAL	1.00		259.25

Según los datos del estudio [14], la fabricación de automóviles requiere 41.8 MJ/kg de energía. De esta cantidad, el 68% se destina a la producción de materiales. Por lo tanto, se necesitan 13.38 MJ/kg de energía específicamente para el proceso de fabricación, Tabla 5.

TABLA 5.
CÁLCULO PARA LA ENERGÍA POR MASA [14]

Energía para la fabricación de un vehículo (MJ/Kg)	41.8
Uso total de energía para la fabricación (%)	0.32
Energía por masa (MJ/Kg)	13.38

El estudio [14] establece que el coeficiente de la huella de carbono para las baterías es de 73,000 gCO₂eq/kWh y para el combustible es de 8,887 gCO₂eq/gal, representando las emisiones de dióxido de carbono por kilovatio-hora de energía almacenada y por galón de combustible consumido, respectivamente. Estos coeficientes son esenciales para

evaluar el impacto ambiental en la fabricación de diferentes modelos de vehículos.

Según Hyundai, el consumo por 1 litro de gasolina realiza un recorrido aproximado de 13 km en los vehículos Kona a gasolina con un motor de 2.0 [38]. Por otro lado, para el Hyundai Kona eléctrico, recorre un aproximado de 300 km con la batería de 39 kWh [39], Tabla 6. En la Tabla 7 aparece el recorrido en km por la capacidad de batería

TABLA 6
CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN LITROS EN LOS 150 000 KM.

VARIABLES	ICEV
Recorrido por capacidad (Km/Lt)	13
Kilometraje pretendido (Km)	150,000
Consumo de combustible (Lt)	11538.46

TABLA 7
RECORRIDO EN KM POR LA CAPACIDAD DE BATERÍA

VARIABLES	EV
Capacidad de batería (kWh)	39
Recorrido por capacidad (Km)	300

Por último, el artículo [14] menciona que las variables para el desmantelamiento, es la trituración de energía por masa siendo 0.43 MJ/Kg y el reciclaje de energía por capacidad de la batería que tienen como dato 469 MJ/kWh.

2.3.1. Producción de materia prima.

Para los vehículos ICEV, se considera la energía utilizada en la extracción de minerales de 95300 MJ (Tabla 2), el coeficiente de la huella de carbono en Perú de 259.25 gCO₂eq/kWh (Tabla 4), donde se lleva a cabo dicha extracción y el factor de conversión de energía de 0.278. Para el primer escenario, se calcula con un tiempo de vida útil de 150,000 km.

$$\frac{\text{Energía} \times \text{Coeficiente de la huella de carbono}}{\text{Vida Útil del vehículo}} = \frac{95,300 \times 259.25 \times 0.278}{150,000} = 45.8 \text{ gCO}_2\text{eq/Km} \quad (1)$$

Para los EV se toma los mismos datos variando la energía utilizada en la extracción de minerales de 126,500 MJ.

$$\frac{\text{Energía} \times \text{Coeficiente de la huella de carbono}}{\text{Vida Útil del vehículo}} = \frac{126,500 \times 259.25 \times 0.278}{150,000} = 60.73 \text{ gCO}_2\text{eq/Km} \quad (2)$$

2.3.2. Fabricación.

En el ICEV la energía por masa es de 13.38 MJ/Kg (Tabla 5), el peso del vehículo es de 1,455 Kg y el coeficiente de la

huella de carbono será de Corea del Sur, origen de fabricación de estos vehículos es de 458.70 gCO₂eq/kWh (Tabla 3).

$$\frac{\text{Energía por masa} \times \text{Peso del vehículo} \times \text{Coeficiente de la huella de carbono}}{\text{Vida útil del vehículo}} = \frac{13.38 \times 1455 \times 0.278 \times 458.70}{150,000} = 16.53 \text{ gCO}_2\text{eq/Km} \quad (3)$$

Del mismo modo, para el EV, varía el dato en peso del vehículo siendo de 1,610 Kg.

$$\frac{\text{Energía por masa} \times \text{Peso del vehículo} \times \text{Coeficiente de la huella de carbono}}{\text{Vida útil del vehículo}} = \frac{13.38 \times 1610 \times 0.278 \times 458.70}{150,000} = 18.29 \text{ gCO}_2\text{eq/Km} \quad (4)$$

Además, se considera la fabricación de las baterías de litio del EV. Para ello, la capacidad de la batería es de 39 kWh, el coeficiente de la huella de carbono para las baterías es de 73,000 gCO₂eq/kWh.

$$\frac{\text{Capacidad de batería} \times \text{Coeficiente de la huella de carbono}}{\text{Vida útil del vehículo}} = \frac{39 \times 73,000}{150,000} = 18.98 \text{ gCO}_2\text{eq/Km} \quad (5)$$

2.3.3. Operación.

En el ICEV, el consumo de combustible es de 11,538.46 litros (Tabla 6), el coeficiente de la huella de carbono del combustible es de 8,887 gCO₂eq/gal y la conversión de consumo es de 3.785.

$$\frac{\text{Consumo de combustible} \times \text{Coeficiente de la huella de carbono}}{\text{Vida útil del vehículo}} = \frac{11,538.46 \times \left(\frac{8,887}{3.785}\right)}{150,000} = 180.59 \text{ gCO}_2\text{eq/Km} \quad (6)$$

En el EV, la capacidad de carga es de 39 Kwh, y tiene 300 km de recorrido por carga y el coeficiente de la huella de carbono en el Perú, país donde se operará los vehículos es de 259.25 gCO₂eq/kWh.

$$\frac{\text{Capacidad de batería}}{\text{Km recorrido por carga}} \times \text{Coeficiente de la huella de carbono} = \frac{39}{300} \times 259.25 = 33.70 \text{ gCO}_2\text{eq/Km} \quad (7)$$

2.3.4. Desmantelamiento.

Para el vehículo a gasolina, en esta etapa difiere la trituration de energía por masa teniendo un valor de 0.43 MJ/Kg, el peso del vehículo de 1,455 Kg y el coeficiente de la huella de carbono del Perú 259.25 gCO₂eq/Km.

$$\frac{\text{Trituration de energía por masa} \times \text{Peso del vehículo} \times \text{Coeficiente de la Huella de carbono}}{\text{Vida útil del vehículo}} = \frac{0.43 \times 1,455 \times 259.25}{150,000} = 0.30 \text{ gCO}_2\text{eq/Km} \quad (8)$$

En el vehículo eléctrico, varía los datos del peso del vehículo 1,610 Kg, el valor del reciclaje de energía por capacidad de la batería es de 469 MJ/kWh y la capacidad de batería es de 39 kWh.

$$\frac{\text{Trituration de energía por masa} \times \text{Peso del vehículo} \times \text{Coeficiente de la huella de carbono}}{\text{Vida útil del vehículo}} + \frac{\text{Reciclaje de energía por capacidad de la batería} \times \text{Capacidad de batería} \times \text{C.H.C}}{\text{Vida útil del vehículo}} = \frac{0.43 \times 1,610 \times 259.25}{150,000} + \frac{469 \times 39 \times 259.25}{150,000} = 31.95 \text{ gCO}_2\text{eq/Km} \quad (9)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este proyecto se presentarán de manera detallada los resultados correspondientes a los cuatro escenarios de kilometraje de vida útil. A través de un análisis, utilizando gráficos y datos cuantitativos, se evaluarán las emisiones de CO₂ generadas por cada vehículo en diversas etapas de su ciclo de vida.

3.1. Emisión total de CO₂ durante las fases del ciclo de vida.

Los resultados totales obtenidos a partir de las fórmulas aplicadas en las cuatro etapas, considerando un escenario de 150,000 kilómetros recorridos, revelan que, para los vehículos de combustión interna, el total de emisiones de carbono es de 243.18 gCO₂eq/Km. En contraste, para los vehículos eléctricos, el total de emisiones de carbono asciende a 163.65 gCO₂eq/Km, Tabla 8.

TABLA 8.
GRAMOS DE CO₂ TOTAL DE AMBOS TIPOS DE VEHÍCULOS EN LOS 150,000 KM

ETAPAS	EV (gCO ₂ eq/km)	ICEV (gCO ₂ eq/km)
PRODUCCION	60.73	45.75
FABRICACION	18.29	16.53
FABRICACION DE BATERIA	18.98	-
OPERACIÓN	33.70	180.59
DESMANTELAMIENTO	31.95	0.30
TOTAL DE LA H.C.	163.65	243.18

El Gráfico 1 presenta una comparación de las emisiones totales de CO₂ mediante un diagrama de barras. En este gráfico, se observa que el ICEV genera 243.18 gCO₂eq/Km del total de emisiones. En contraste, el EV tiene un valor de 163.65 gCO₂eq/Km, equivalente al 32.70% más bajas, indicando una menor cantidad de emisiones en comparación con el ICEV. Además, se destaca que, en los vehículos de gasolina, la mayor parte de las emisiones (84.27%) proviene de la fase de operación.

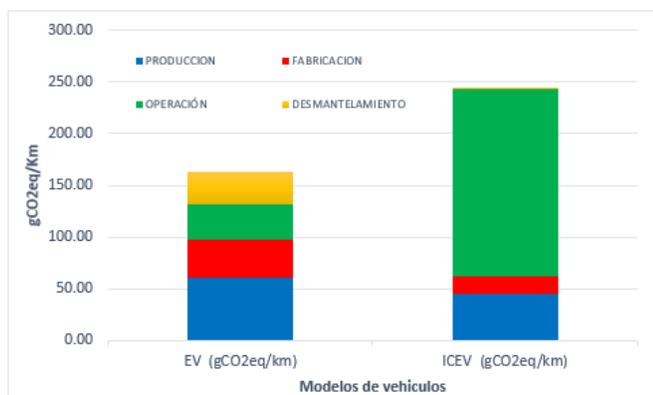


Gráfico 1. Emisiones totales del ciclo de vida de vehículos en los 150,000 km.

3.2. Costos para los 150,000 kilometros.

3.2.1. Costo de vehiculo.

De acuerdo con Hyundai el costo del vehiculo Hyundai Kona a gasolina 2.0 modelo 2024 tiene un valor de 30,000 USD aproximado a 112,500 PEN. Para el vehiculo Hyundai Kona electrico de 39 kWh modelo 2024 tiene un costo promedio de 40,000 USD, 150,000 PEN.

3.2.2. Costo de combustible/energia.

Para el costo del combustible, el precio por galon de gasolina es de 5.33 USD, un promedio de 20.00 PEN a nivel nacional para el Perú [40].

En cuanto al costo de la energía, el precio promedio por kWh es de 0.17 USD, lo que se traduce en aproximadamente 0.65 PEN, según los datos proporcionados por una empresa de suministro eléctrico [41].

Para llevar a cabo una comparación de costos, se consideró la cantidad de energía especificada en la Tabla 7 y el kilometraje determinado. En cuanto a la cantidad de combustible en galones, se utilizó la información de la Tabla 6, realizando la conversión de litros a galones, ya que en el Perú el costo de la gasolina se expresa en galones. Según la tabla 9, el costo total para el modelo EV ronda los 3,402.88 USD un aproximado de 12,760.80 PEN. Y para el modelo ICEV tiene un costo de 16,256.75 USD valor de 60,962.81 PEN.

TABLA 9
COSTOS DE ENERGÍA/COMBUSTIBLE
EN LOS 150 000 KM.

MODELO	KM	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO UNITARIO (PEN)	COSTO TOTAL (PEN)
EV	150,000	19,500	kWh	0.65	12,760.80
ICEV	150,000	3,048.14	Galón	20.00	60,962.81

En los resultados observados en la Tabla 9, se destaca una considerablemente mayor cantidad de costos asociados al vehículo ICEV, lo cual se atribuye al precio por galón de combustible y la cantidad de galones necesarios para recorrer 150,000 km. Estos costos representan más del 82% del total. En contraste, el costo más bajo se encuentra en la energía utilizada por los vehículos eléctricos, debido al menor costo unitario por kWh.

Finalmente, los costos totales se obtienen mediante suma los precios de los vehículos y los costos de energía/combustible, con ello, se tiene una comparativa de precio en los 150,000 km de vida útil de ambos vehículos.

Para la Tabla 10, el costo total para el vehículo eléctrico es de 43,402.88 USD valor aproximado de 162,760.80 PEN. De igual forma, para los vehículos a gasolina el costo total es de 46,256.75 USD, convertidos a 173,462.81 PEN.

TABLA 10
COSTOS TOTALES

MODELO	COSTO TOTAL (PEN)
EV	162,760.80
ICEV	173,462.81

Se establece mediante un análisis comparativo, que los ICEV abarca un 52 % más a comparación de los vehículos eléctricos que es un 48% siendo menor en los costos totales.

3.3. Emisiones totales en efecto de la vida útil del vehículo.

Para obtener datos concretos y mejorar los resultados de la investigación, fue necesario calcular en diversos datos de la vida útil de ambos vehículos, como en los 200,000; 250,000 y 300,000 kilómetros, ya que nos ayuda a dar una mejor comparativa de este análisis.

3.3.1. Emisiones totales en los 200,000 kilómetros.

El Gráfico 2 revela que la mayor contribución a la huella de carbono proviene del ICEV, con una emisión total de 227.53 gCO₂eq/Km, mientras que, para el EV, la emisión es de 131.17 gCO₂eq/Km. Además, el desmantelamiento de los vehículos a gasolina destaca por sus bajas emisiones, solo 0.23 gCO₂eq/km, debido al fácil reciclaje de sus metales.

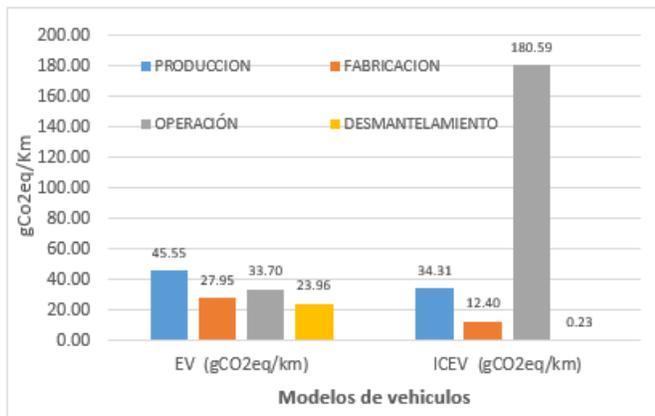


Gráfico 2. Emisiones totales del ciclo de vida de vehículos en los 200 000 Km.

3.3.2. Emisiones totales en los 250,000 kilómetros.

En este escenario, los resultados generales muestran una disminución en comparación con pruebas anteriores. Los datos de operación permanecen constantes, mientras que en las demás etapas se observa una reducción.

En el Gráfico 3, los vehículos eléctricos representan el 33.86% del total de emisiones, lo que indica una huella de carbono menor en comparación con su contraparte.

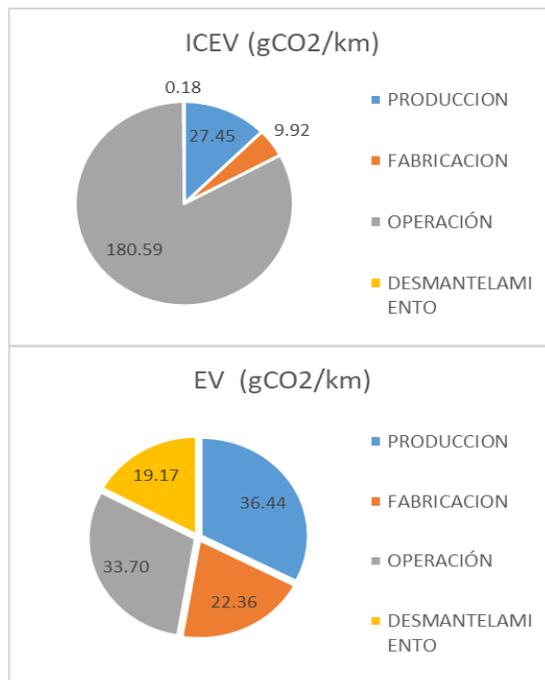


Gráfico 3. Comparación de la huella de carbono de ambos vehículos en los 250,000 Km.

3.3.3. Emisiones totales en los 300,000 kilómetros.

Finalmente, se realizó un análisis considerando 300,000 km, correspondiente a la vida útil promedio en Perú. Los

resultados fueron favorables para los vehículos eléctricos, que generaron el 31.77% de las emisiones en comparación con el 68.23% del ICEV.

El Gráfico 4 muestra que, en términos de producción, no hay una gran diferencia en las emisiones entre ambos tipos de vehículos. Sin embargo, los vehículos eléctricos presentan una mayor huella de carbono en las fases de fabricación y desmantelamiento. En la fase de operación, los vehículos a gasolina compensan esta diferencia, emitiendo más del 80% del CO₂ total.

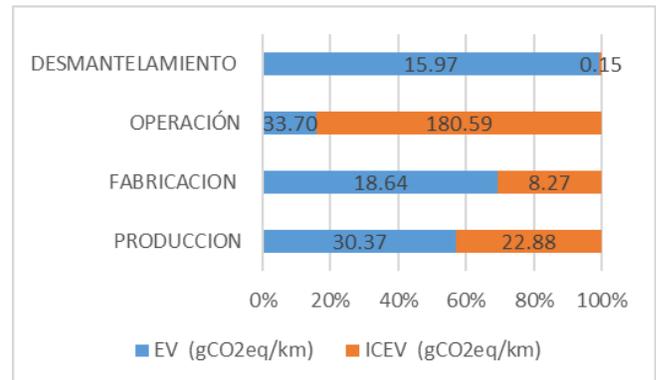


Gráfico 4. Emisiones totales del ciclo de vida de vehículos en los 300,000 Km.

3.3.4. Comparación de la huella de carbono total en los 4 escenarios.

Dentro de los 4 escenarios se optó por realizar un análisis para comparar la huella de carbono totales emitidas en diversos kilometrajes en ambos tipos de modelos. Tabla 11.

TABLA 11.
HUELLA DE CARBONO TOTALES EN LOS 4 ESCENARIOS

KILOMETRAJE	EV (gCO ₂ eq/km)	ICEV (gCO ₂ eq/km)
150,000	163.65	243.18
200,000	131.17	227.53
250,000	111.67	218.14
300,000	98.68	211.88

El Gráfico 5, muestra que las emisiones del ICEV disminuyen continuamente a medida que aumenta el kilometraje de vida útil. En contraste, las emisiones del EV se reducen casi un 40% al pasar de un kilometraje mínimo de 150,000 km a un máximo de 300,000 km. Además, se prolonga que, para menores kilometrajes, las emisiones de ambos vehículos podrían igualarse, mientras que, con un aumento en la vida útil, las emisiones del vehículo a gasolina serían significativamente mayores en comparación con las del vehículo eléctrico.

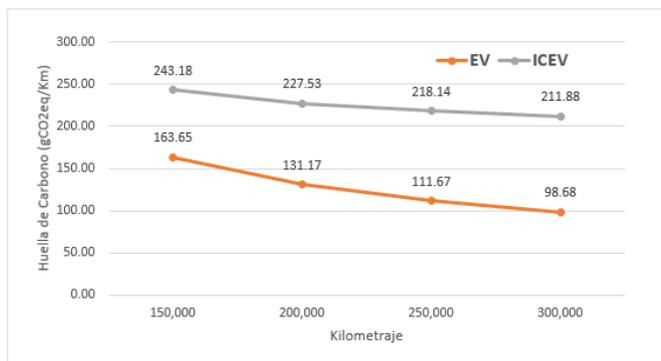


Grafico 5. Resultado total de la huella de carbono en los 4 escenarios.

3.4. Costos totales en los 3 escenarios.

El costo total abarca tanto el precio de los vehículos como el gasto en energía/combustible a lo largo de diferentes rangos de kilometraje. En la Tabla 12, se detallan los costos totales en dólares y soles para cada escenario. Los resultados indican que los costos para los vehículos eléctricos muestran una variación mínima en función del kilometraje, mientras que el ICEV experimenta un aumento significativo, especialmente entre los 200,000 y 300,000 km. En otras palabras, los costos asociados al EV son más estables debido al costo de la energía, lo que contribuye a reducir el costo total y compensar el costo inicial del vehículo.

TABLA 12
COSTOS TOTALES EN LOS 3 ESCENARIOS DE
KILOMETRAJE

MODELO	KILOMETROS	COSTO TOTAL (PEN)	COSTO TOTAL (USD)
EV		167,014.40	44,537.17
ICEV	200,000	193,783.75	51,675.67
EV		171,268.00	45,671.47
ICEV	250,000	214,104.68	57,094.58
EV		175,521.60	46,805.76
ICEV	300,000	234,425.62	62,513.50

IV. CONCLUSIONES

Los vehículos eléctricos representan una alternativa crucial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector automotriz, ya que no generan contaminantes durante su uso. Sin embargo, es importante destacar que existen aspectos donde estos vehículos pueden tener un impacto ambiental significativo, especialmente en los procesos de extracción de minerales necesarios para las baterías y en la fase de fabricación en comparación con los

vehículos a gasolina. Estos factores subrayan la complejidad de evaluar el impacto ambiental total de los vehículos eléctricos, destacando la necesidad de un análisis integral que considere todas las etapas del ciclo de vida de estos vehículos para una evaluación precisa de su sostenibilidad ambiental.

Por lo tanto, se puede concluir que el Hyundai Kona eléctrico presenta una huella de carbono inferior a la de su contraparte a gasolina, principalmente debido a su operación. Aunque el vehículo a gasolina logra reducir la huella de carbono en las fases de extracción, fabricación y gestión de residuos. Sin embargo, durante la operación supera los niveles esperados y contribuye significativamente al aumento total de la huella de carbono. Esto resalta la importancia de considerar el ciclo de vida completo de cada tipo de vehículo para evaluar adecuadamente su impacto ambiental. Esta conclusión es consistente en todos los escenarios donde se observa una disminución de los valores a medida que aumenta el kilometraje.

En lo que respecta a los costos, se nota que los vehículos eléctricos tienen una fluctuación mínima en los gastos totales en comparación con los vehículos de gasolina conforme aumenta el kilometraje. Esto se debe principalmente a los costos operativos más bajos de los vehículos eléctricos, siendo el menor costo de la energía en comparación con el combustible, lo cual juega un papel crucial en mantener una estabilidad económica a lo largo de los diversos escenarios de kilometraje evaluados en Lima.

REFERENCIAS

- [1] Jesús D. (2021). Fabricar un coche eléctrico contamina un 70% más que uno de gasolina. Recuperado de. https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2021-11-23/coche-electrico-co2-contaminacion-gasolina_3329281/
- [2] González D. (2023). Huella de carbono de un coche eléctrico. (España). Recuperado de. <https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/huella-carbono-coche-electrico/>
- [3] Hernández-Ambato, J., Fernández, R., Mora, A., & Alvarado, J. (2022). Evaluación de la huella de carbono de vehículos con motor eléctrico y de combustión interna según la matriz energética de Ecuador: Caso de estudio KIA Soul vs KIA Soul EV. *Revista Digital Novasineria*, 5(2), 58–75. Recuperado de. <https://doi.org/10.37135/ns.01.10.04>
- [4] Onat, N. C., Kucukvar, M., & Tatari, O. (2015). Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States. *Applied Energy*, 150, 36–49. Recuperado de. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.001>
- [5] Ma, H., Balthasar, F., Tait, N., Riera-Palou, X., & Harrison, A. (2012). A new comparison between the life

- cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles. *Energy Policy*, 44, 160–173. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.034>
- [6] Wolfram, P., & Wiedmann, T. (2017). Electrifying Australian transport: Hybrid life cycle analysis of a transition to electric light-duty vehicles and renewable electricity. *Applied Energy*, 206, 531–540. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.219>
- [7] De Souza, L. L. P., Lora, E. E. S., Palacio, J. C. E., Rocha, M. H., Renó, M. L. G., & Venturini, O. J. (2018) Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 203, 444–468. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.236>
- [8] Berlan Rodríguez P. (2021). Evaluación comparativa de la amplia introducción de vehículos eléctricos en el Perú. (Pontificia Universidad Católica del Perú). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S221836202021000100159&lang=es
- [9] Jaime Fernando A., Guillermo Gorky R., Miguel Estuardo G. (2016). Estudio comparativo de gases contaminantes en un vehículo M1, utilizando gasolina de la Comunidad Andina. Universidad Internacional del Ecuador. http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S139065422016000300110&lng=es&nrm=iso
- [10] Alex G., Eduardo C., Alexander P., Milton R., Alexis A. (2018). Estudio del rendimiento dinámico de un motor Otto utilizando mezclas de dos tipos de gasolinas “Extra y Súper”. Universidad UTE. http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S139065422018000400208&lang=es
- [11] Sang-Hee W., Hyungjoon J., Seung B., Seokhwan L. (2022). Comparación del total de emisiones de PM emitidas por vehículos con motor eléctrico y de combustión interna: un análisis experimental. (República de Corea). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156961>
- [12] Witsarut A., Pana S., Sarunnoud P., Yuttana M., Ramnarong W., Panuwat P. (2023). Reducciones potenciales de emisiones de CO₂ gracias a la transición a los vehículos eléctricos: los escenarios de Tailandia hacia 2030. (Tailandia). <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.08.073>
- [13] Shafique, M., Azam, A., Rafiq, M., & Luo, X. (2022). Life cycle assessment of electric vehicles and internal combustion engine vehicles: A case study of Hong Kong. *Research in Transportation Economics*, 91(101112), 101112. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2021.101112>
- [14] Farzaneh, F., & Jung, S. (2023). Lifecycle carbon footprint comparison between internal combustion engine versus electric transit vehicle: A case study in the U.S. *Journal of Cleaner Production*, 390(136111), 136111. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136111>
- [15] Zackrisson, M., Avellán, L., & Orlenius, J. (2010). Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues. *Journal of Cleaner Production*, 18(15), 1519–1529. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.004>
- [16] Onat, N. C., Kucukvar, M., & Tatari, O. (2015). Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States. *Applied Energy*, 150, 36–49. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.001>
- [17] Gan, Y., Lu, Z., Wu, Q., He, X., Dai, Q., Kelly, J. C., Ankathi, S. K., & Wang, M. (2023). Cradle-to-grave mercury emissions of light-duty gasoline and electric vehicles in China. *Resources, Conservation, and Recycling*, 190(106736), 106736. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106736>
- [18] Deng, C., Qian, Y., Song, X., Xie, M., Duan, H., Shen, P., & Qiao, Q. (2024). Are electric vehicles really the optimal option for the transportation sector in China to approach pollution reduction and carbon neutrality goals? *Journal of Environmental Management*, 356(120648), 120648. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120648>
- [19] Hao, H., Qiao, Q., Liu, Z., & Zhao, F. (2017). Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: The China 2025 case. *Resources, Conservation, and Recycling*, 122, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.005>
- [20] Challa, R., Kamath, D., & Anctil, A. (2022). Well-to-wheel greenhouse gas emissions of electric versus combustion vehicles from 2018 to 2030 in the US. *Journal of Environmental Management*, 308(114592), 114592. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114592>
- [21] Archsmith, J., Kendall, A., & Rapson, D. (2015). From cradle to junkyard: Assessing the life cycle greenhouse gas benefits of electric vehicles. *Research in Transportation Economics*, 52, 72–90. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2015.10.007>
- [22] Zackrisson, M., Avellán, L., & Orlenius, J. (2010). Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues. *Journal of Cleaner Production*, 18(15), 1519–1529. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.004>
- [23] *¿Qué es la huella de carbono y por qué es importante?* (2023, noviembre 16). REPSOL. <https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/ejes-sostenibilidad/cambio-climatico/reduccion-huella-carbono/index.cshtml>
- [24] Qiao, Q., Zhao, F., Liu, Z., Jiang, S., & Hao, H. (2017). Comparative study on life cycle CO₂ emissions from the production of electric and conventional vehicles in China. *Energy Procedia*, 105, 3584–6595. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.827>
- [25] *Motores: qué son, características y tipos.* (s/f). Ferrovial. Recuperado el 6 de junio de 2024, de <https://www.ferrovial.com/es/stem/motores/>

- [26] Mercedes, Y. Morales, R. Hernandez, A. (2014). *Caracterización de un motor de combustion interna con dos tipos de combustible*. Imt.mx.
- [27] Nacho Soluciones. (2023). Ciclo Otto Motor 4 tiempos – Termodinámica (Ejercicio resuelto + explicación completa) Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=4HRRm19ctdI>
- [28] Anónimo. (2012). Ciclo Diésel. Recuperado de: https://navarrof.orgfree.com/Docencia/Termodinamica/CiclosGeneracion/ciclo_diesel.htm
- [29] Pérez A. (2018). ¿Cómo funciona un motor eléctrico? Recuperado de: <https://www.autobild.es/noticias/como-funciona-motor-electrico-186528>
- [30] *Energías renovables*. (s/f). Enelgreenpower.com. Recuperado el 11 de junio de 2024, de <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables>
- [31] *La matriz energética de América Latina en el contexto actual y la transición energética*. (2022, octubre 4). Revista Común. <https://revistacomun.com/blog/la-matriz-energetica-de-america-latina-en-el-contexto-actual-y-la-transicion-energetica/>
- [32] *Carros, camiones, buses y la contaminación del aire*. (s/f). Unión de Científicos Conscientes. Recuperado el 11 de junio de 2024, de <https://es.ucsusa.org/recursos/carros-camiones-buses-contaminacion>
- [33] El Comercio. (2012). EDITORES ECUATORIANOS. Los niveles de contaminación en Quito. Recuperado de: <https://especiales.elcomercio.com/2012/06/contaminacion/>
- [34] López, N. (2023, febrero 7). *¿Cuál es el impacto ambiental real de los coches eléctricos?* Auto Bild España. <https://www.autobild.es/noticias/cual-impacto-ambiental-real-coches-electricos-1194132>
- [35] Clicars. (2023, junio 7). *¿Sabes cuántos kilómetros dura un coche?* <https://www.clicars.com/blog/curiosidades/cuantos-kilometros-dura-un-coche/>
- [36] LowCarbonPower, (2023). Electricidad en Corea del Sur en 2023. [https://lowcarbonpower.org/es/region/Corea del Sur](https://lowcarbonpower.org/es/region/Corea%20del%20Sur)
- H2lac, (2020). Matriz energética del Perú. <https://h2lac.org/atlas-h2lac/peru/>
- [37] Hyundai, Especificaciones del nuevo KONA Gasolina. <https://www.hyundaicr.com/nuevokonaice-comparar-2024.php>
- [38] Hyundai, The new Kona Electric. <https://hyundai.pe/wp-content/uploads/2022/10/catalogo-KONA-Electricov6-1.pdf>
- [39] El Peruano. (2024). *Minem: precio de la gasolina regular bajó a 13.8 soles por galón en Lima Metropolitana*. [https://www.elperuano.pe/noticia/233192-minem-precio-](https://www.elperuano.pe/noticia/233192-minem-precio-de-la-gasolina-regular-bajo-a-138-soles-por-galon-en-lima-metropolitana)
- [40] Luz del Sur. (2023). <https://luzdelsurrecibo.com/de-la-gasolina-regular-bajo-a-138-soles-por-galon-en-lima-metropolitana>