



Centro de Estudios para la Sostenibilidad  
Ambiental en Guatemala

[www.cesa-gt.com](http://www.cesa-gt.com)

## Análisis de los impactos ambientales de ciclo de vida por el uso de mezclas de etanol (E10) en Guatemala.

Análisis independiente para la creación de una política de biocombustibles sostenible.



Guatemala, Mayo 2026



**Editor**

Centro de Estudios para la Sostenibilidad Ambiental en Guatemala  
3 Calle 20-02 Zona 15 Vista Hermosa 1  
Guatemala, C.A.  
Tel: 30624899  
[www.cesa-gt.com](http://www.cesa-gt.com)

**Autor**

M.Sc. Edgar E. Sacayón

**Revisión**

Ph.D. Ana Belén Guerrero

*Versión 1.0*

*Last versión 2026-05-08*

## Índice

Resumen Ejecutivo	5
Introducción y contexto	6
Marco conceptual y metodológico	8
Definición de los objetivos y alcances	8
Definición del objetivo del estudio	8
Aplicación prevista	8
Razones para realizar el estudio	8
Público esperado	8
Definición del Alcance	9
Sistema de análisis	9
Unidad funcional	9
Procedimiento de asignación	10
Metodología de evaluación de impacto y categorías analizadas	10
Requisitos de calidad de los datos	11
Supuestos y limitaciones	11
Revisión crítica	12
Software	12
Inventarios de Ciclo de Vida	13
Importación de etanol a Guatemala	13
Producción de etanol a partir de Maíz	13
Producción de etanol a partir de caña de azúcar	14
Etapa agrícola para la producción de caña de azúcar en Guatemala	14
Procesamiento de azúcar y producción de etanol	14
Transporte marítimo	15
Producción de gasolina	15
Vehículos de pasajeros	15
Derivación del factor de emisiones del vehículo E10	16
Generación de electricidad en Guatemala	16
Resultados: Evaluación de impacto e Interpretación	18
Método ReCiPe 2016	18
Emisiones de carbono	18
Uso del suelo	19

Huella de agua	20
Discusión de resultados	21
Conclusiones	23
Hallazgos principales	23
Riesgos y oportunidades	23
Recomendaciones	24
Referencias bibliográficas	25
Anexo 1. ¿Que es Ecoinvent?	28
Anexo 2. Documentación de los modelos de ciclo de vida de Ecoinvent 3.11 utilizados para el análisis.	31
Anexo 3. Perfil de emisiones del vehículo de gasolina y derivación del perfil para la mezcla E10.	32
Anexo 4. Resultados del Análisis de Ciclo de Vida	35
Anexo 5. Parámetros utilizados para el modelo de Ciclo de Vida	37

## Índice de tablas

Tabla 1 Parámetros técnicos de los vehículos que se analizan. Fuente: Ecoinvent 3.11	15
Tabla 2 Mix de energía eléctrica reportado para el año 2025 por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica	17
Tabla 3 Documentación completa de los modelos de Ecoinvent 3.11 utilizados para realizar el análisis.	31
Tabla 4 Perfil de emisiones para el proceso de combustión del vehículo de gasolina pura	32
Tabla 5 Modelo de ciclo de vida para el vehículo con Mezcla E10 ajustado en base a la densidad y poder calorífico	33
Tabla 6 Resultados del ACV por kilómetro recorrido. Comparación de cuatro escenarios de combustible: gasolina, mezcla E10 con etanol de maíz (EE.UU.), mezcla E10 con etanol de caña de azúcar (Guatemala) y vehículo eléctrico (red eléctrica 2025).	35
Tabla 7 Impactos ambientales de ciclo de vida considerando el consumo anual de combustible del parque vehicular guatemalteco.	36
Tabla 8 Parámetros del modelo de ciclo de vida para los cuatro escenarios analizados.	37

## Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de flujo de los cuatro escenarios considerados en este análisis.	10
Figura 2 Impactos de cambio climático (M tCO <sub>2</sub> e) y reducción de impactos (%) asociados a los cuatro escenarios evaluados.	19
Figura 3 Impactos por uso del suelo para los cuatro escenarios evaluados en km <sup>2</sup> equivalentes por año.	20
Figura 4 Impactos a los recursos hídricos para los cuatro escenarios evaluados.	21

## Resumen Ejecutivo

Este reporte presenta un análisis de ciclo de vida (ACV) del uso de mezclas de etanol en el parque vehicular guatemalteco para proporcionar evidencia cuantitativa sobre los impactos ambientales de la nueva política de biocombustibles y el acuerdo comercial suscrito recientemente con los Estados Unidos para importar 50 millones de galones de etanol, los cuales entraran en vigencia en junio del 2026.

El ACV se realizó de acuerdo con las normas ISO 14040 y 14044 con un enfoque del “pozo a la rueda” (well-to-wheel), utilizando 18 categorías de impacto del método ReCiPe midpoint H, de los cuales se discuten únicamente tres: cambio climático, uso del suelo y huella de agua. El modelo ambiental utilizó la base de datos Ecoinvent v.3.11 con el software de código abierto openLCA. La unidad funcional es un kilómetro recorrido por un vehículo mediano con tecnología Euro 3 para los escenarios de combustión, y un kilómetro recorrido por un vehículo eléctrico mediano alimentado por la red nacional de para el escenario de movilidad eléctrica.

En total se comparan cuatro escenarios independientes: gasolina (línea base), mezcla E10 con etanol de maíz importado de los Estados Unidos (E10-USA), mezcla E10 con etanol de caña de azúcar producido localmente (E10-GTM) y un vehículo eléctrico usando electricidad de la red interconectada guatemalteca. Los resultados se presentan por km recorrido y se dimensionan al volumen de consumo anual de gasolina (520 M galones) reportado por el MEM para el 2025.

Los resultados del análisis indican que:

- El beneficio climático de la mezcla E10 con etanol de maíz el cual será importada de los EE. UU. proporciona una reducción de 2% de emisiones de GEI en comparación con el escenario actual de gasolina. El etanol producido localmente a partir de caña de azúcar tiene una reducción GEI del 10%. En contraste un vehículo eléctrico tiene una reducción >70% en comparación con los vehículos de combustible. Si lo dimensionamos al consumo anual de combustible del parque vehicular la movilidad eléctrica tiene el potencial de eliminar >4 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e en comparación con 138 mil toneladas del etanol de maíz importado de los EE. UU.
- Los impactos por uso del suelo para la mezcla E10 con etanol de maíz son 30 veces mayores que la gasolina y 12 veces mayores usando etanol de caña de azúcar. Se necesitarían entre 200-485 km<sup>2</sup> de tierras agrícolas para la producción de la mezcla E10.
- El consumo de agua por el uso mezclas E10 incrementa entre 5 - 7 veces más en comparación con la gasolina. Si lo dimensionamos al consumo anual del parque vehicular (esto representa un incremento neto de 20 millones de m<sup>3</sup> de agua lo cual equivale a usar el 5.8% del volumen del lago de Amatitlán (290 M m<sup>3</sup>).

### ¿Cuáles son las implicaciones para la política actual?

Un beneficio del 2% de reducción de emisiones GEI por la importación de etanol de los Estados Unidos no justifica el efecto negativo a otras áreas ambientales como uso del suelo y consumo de agua. En todo caso el etanol producido localmente presenta una mejor alternativa en cuanto a cambio climático. Se sugiere revisar el carácter obligatorio de la política de etanol carburante, considerando una transición gradual o voluntaria. A largo plazo se sugiere la optimización de la red de electricidad con un incremento de energías solar, eólica e hidroeléctrica de tal manera que la movilidad eléctrica obtenga los beneficios ambientales para una transición energética totalmente renovable.

## Introducción y contexto

Según los datos del Ministerio de Energía y Minas (MEM, 2025) Guatemala tiene una demanda anual de 520 millones de galones de gasolina para satisfacer la demanda del parque vehicular que usa este combustible. Como estrategia de descarbonización el gobierno implementará el uso de mezcla de etanol al 10% a partir de junio del 2026 según Acuerdo Gubernativo Número 257-2025” y el cual está basado en la Ley del Alcohol Carburante, Decreto Número 17-85 del Congreso de la República. Para satisfacer la demanda de etanol el Gobierno de Guatemala ha suscrito un acuerdo comercial los Estados Unidos para importar 50 millones de galones de etanol (U.S grains & bioproducts Council, enero 2026)<sup>1</sup> operación valorada en aproximadamente \$150 millones de dólares para los productores estadounidenses (RFA, 2026)<sup>2</sup>.

Sin embargo, Guatemala cuenta con la capacidad instalada para satisfacer la demanda nacional de etanol. De acuerdo con la Asociación de Combustibles Renovables de Guatemala (ACR)<sup>3</sup>, el país cuenta con una capacidad instalada de producción de etanol de aproximadamente 65 millones de galones anuales, de los cuales el 90% se destina a la exportación y únicamente el 10% abastece el mercado local de bebidas alcohólicas.

Las mezclas combustibles que combinan gasolina con bioetanol han sido adoptadas progresivamente por distintos países como mecanismo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al transporte vehicular y para diversificar las fuentes de energía utilizadas en el sector. El uso de mezclas E10 en vehículos de combustión es técnicamente viable desde finales de la década de 1970, cuando Brasil y los Estados Unidos iniciaron su expansión (Hira & de Oliveira, 2009), y actualmente no representa un riesgo operativo para los vehículos modernos, particularmente los fabricados con posterioridad al año 2000.

La mayoría de los estudios científicos relacionados con el desempeño ambiental de los biocombustibles de primera generación ha reconocido que el beneficio ambiental depende de múltiples variables como el tipo de cultivo, la intensidad de producción, la distancia y el modo de transporte así como la matriz energética utilizada y los co-productos obtenidos (Farrell et al., 2006; Hill et al., 2006).

En Guatemala se desconocen cuáles son los “trade-offs” ambientales por lo que el Centro de Estudios para la Sostenibilidad Ambiental ha realizado un análisis del ciclo de vida del uso de los biocombustibles E10 y se compara con el escenario actual de consumo de gasolina para proporcionar evidencia científica sobre los Impactos ambientales del uso de alcohol carburante en Guatemala. Adicionalmente se realiza un análisis del uso de vehículos eléctricos de tal manera que se pueda entender las ventajas de la adopción de esta nueva tecnología con el objetivo de brindar información estratégica a los tomadores de decisiones.

Este análisis compara toda la cadena de suministro tanto del etanol como de la gasolina, incluyendo el transporte marítimo desde los Estados Unidos, que es el lugar donde proviene la gasolina que se consume en Guatemala y también donde vendrá el etanol que se utilizará en las mezclas E10. Adicionalmente se presenta un escenario donde el total de etanol se produce en Guatemala a partir de

---

<sup>1</sup> <https://grains.org/u-s-grains-bioproducts-council-reacts-to-reciprocal-trade-agreement-with-guatemala/>

<sup>2</sup> <https://ethanolrfa.org/media-and-news/category/news-releases/article/2026/01/rfa-thanks-trump-administration-for-guatemala-agreement-boosting-ethanol-exports>

<sup>3</sup> <https://acrguatemala.com/etanol/>

caña de azúcar. Por último, se realizará una comparación con un vehículo eléctrico usando energía de la red eléctrica guatemalteca.

# Marco conceptual y metodológico

El estudio se realiza conforme a las normas ISO 14040 e ISO 14044, que establecen los principios, requisitos y directrices para la realización de un análisis de ciclo de vida (ACV). El análisis se estructura en las cuatro fases definidas por la norma:

1. Definición del objetivo y el alcance,
2. Inventario de ciclo de vida (ICV),
3. La evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) y
4. La interpretación de resultados.

## Definición de los objetivos y alcances

### Definición del objetivo del estudio

El objetivo del estudio es comparar el desempeño ambiental del uso de la mezcla E10 en el parque vehicular guatemalteco frente al escenario actual de consumo de gasolina, considerando las cadenas de suministro involucradas para dos orígenes de etanol: importado desde los Estados Unidos a partir de maíz y producido localmente a partir de caña de azúcar. Adicionalmente, se incorpora un escenario de referencia basado en un vehículo eléctrico alimentado por la red eléctrica nacional, con el propósito de contextualizar los resultados dentro de un horizonte de transición energética más amplio.

### Aplicación prevista

Los resultados del presente estudio están destinados a informar sobre el diseño de la política pública de biocombustibles en Guatemala, particularmente en el marco de la implementación del Acuerdo Gubernativo 257-2025 y de la Ley del Alcohol Carburante (Decreto 17-85). El estudio proporciona evidencia cuantitativa sobre el perfil ambiental de las distintas fuentes de etanol disponibles para el país, de manera que los tomadores de decisión dispongan de información técnica para evaluar los trade-offs asociados a la política de mezcla obligatoria.

### Razones para realizar el estudio

El estudio se realiza en respuesta a la necesidad de contar con un análisis ambiental cuantitativo adaptado a Guatemala, considerando que (a) la evidencia internacional disponible proviene mayoritariamente de Brasil, Estados Unidos y la Unión Europea); (b) la cadena de suministro del etanol que abastecerá el mercado local involucra tanto producción nacional de caña de azúcar como importación desde los Estados Unidos (etanol de maíz) (c) la matriz eléctrica guatemalteca presenta características específicas que deben ser consideradas al evaluar alternativas de transición energética.

### Público esperado

Este documento está dirigido a los tomadores de decisión de entidades públicas con competencia en la materia, principalmente el Ministerio de Energía y Minas (MEM), el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), así como a actores del sector

agroindustrial, académico y organizaciones de la sociedad civil interesadas en la sostenibilidad del sector energético nacional.

## **Definición del Alcance**

### **Sistema de análisis**

El sistema comprende la producción, transporte y uso de combustibles para el transporte vehicular en Guatemala con cuatro escenarios distintos: gasolina convencional importada desde los Estados Unidos, mezcla E10 con etanol de maíz importado, mezcla E10 con etanol de caña de azúcar producido localmente, y electricidad de la red nacional para un vehículo eléctrico. La función del sistema es el transporte de pasajeros en un vehículo representativo del parque vehicular guatemalteco.

### **Unidad funcional**

La unidad funcional se define como un kilómetro recorrido por un vehículo mediano equipado con tecnología de control de emisiones Euro 3 para los escenarios de combustión interna, y un kilómetro recorrido por un vehículo eléctrico mediano alimentado por la red nacional para el escenario de referencia.

### **Límites del sistema**

El análisis adopta un enfoque *well-to-wheel* (de pozo a la rueda). Para la gasolina se incluye la extracción y procesamiento del crudo, la refinación, el transporte marítimo desde los Estados Unidos hasta Puerto Barrios y la combustión en el vehículo. Para el etanol importado se incluye el cultivo del maíz en los Estados Unidos, el procesamiento en destilería hasta 95 % en solución acuosa, la deshidratación a 99,7 %, el transporte marítimo a Puerto Barrios y la combustión en el vehículo. Para el etanol de producción local se incluye el cultivo de caña de azúcar en Guatemala, el procesamiento en un ingenio azucarero tradicional hasta 99,7 % en peso y la combustión en el vehículo. Para el vehículo eléctrico se incluye la generación de electricidad de la red nacional a partir de sus distintas fuentes, así como su transmisión y distribución hasta el vehículo. La Figura 1 muestra el diagrama de flujo de los cuatro escenarios considerados

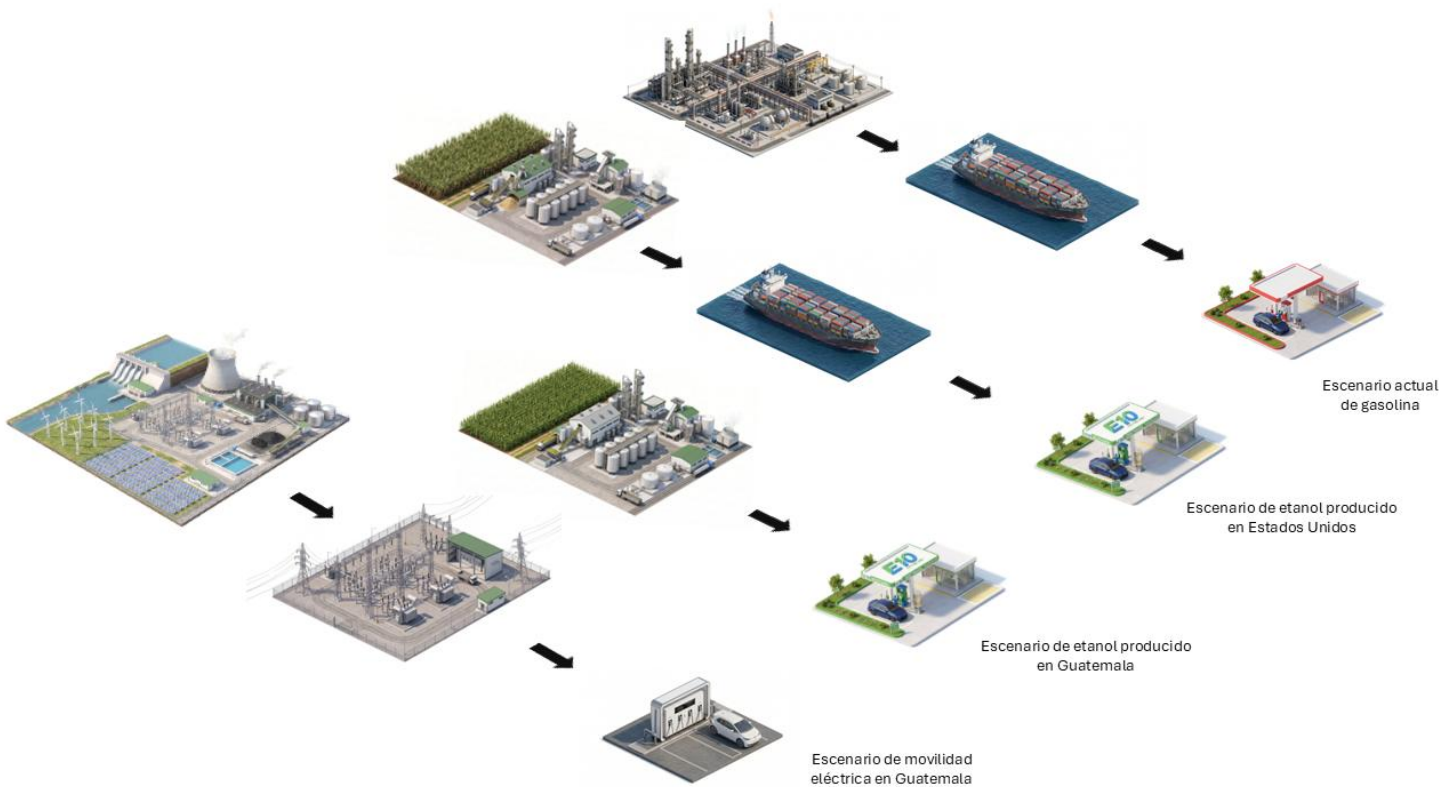


Figura 1 Diagrama de flujo de los cuatro escenarios considerados en este análisis.

### Procedimiento de asignación

Para los sistemas con múltiples productos se aplica el procedimiento de asignación económica, en concordancia con el sistema de corte (cut-off) utilizado por Ecoinvent v3.11. En el escenario de etanol de maíz se asigna una fracción de los impactos del sistema al co-producto de harina de maíz mediante el factor económico de la base de datos (sección Inventarios de Ciclo de Vida). En el escenario de etanol de caña de azúcar se distribuyen los impactos del ingenio entre el azúcar, el etanol y la electricidad excedentaria entregada a la red, todos considerados como co-productos con mercado propio en Guatemala. El bagazo no se trata como un co-producto, mas bien se modela como flujo intermedio combustionado internamente para abastecer la demanda térmica y eléctrica del ingenio.

### Metodología de evaluación de impacto y categorías analizadas

La evaluación de impacto del ciclo de vida se realiza con el método ReCiPe 2016 en perspectiva jerárquica a nivel de punto medio, utilizando los dieciocho indicadores definidos por Huijbregts et al. (2017). En este documento se discuten en detalle las tres categorías con mayor relevancia para la política pública guatemalteca: cambio climático, uso del suelo y consumo de agua. Los resultados completos de los dieciocho indicadores se presentan en el Anexo 3.

## Requisitos de calidad de los datos

Los inventarios de ciclo de vida se obtienen de la base de datos Ecoinvent v3.11 en su sistema de corte (Cut-off), versión vigente a la fecha del estudio. La regionalización para Guatemala se aplica al consumo de agua en la etapa agrícola de la caña de azúcar, tomando los valores reportados por Tax Marroquín y Guerra (2019) y por ASAZGUA (2023). La matriz de generación eléctrica corresponde al año 2025 reportado por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. El perfil de emisiones de combustión del vehículo Euro 3 se adapta a la mezcla E10 mediante ajuste por densidad y poder calorífico inferior; el procedimiento completo está documentado en el Anexo 2.

## Supuestos y limitaciones

A continuación, se describen algunos supuestos para realizar el análisis:

- **Modelo del vehículo:** Se modela un vehículo mediano de pasajeros con tecnología Euro 3, representativo del parque vehicular guatemalteco actual, con un consumo de combustible promedio equivalente a 40,3 km por galón.
- **Tipo de gasolina:** Se utiliza una denominación común de gasolina de bajo contenido en azufre (super) tanto para la gasolina super como regular y no se consideran diferencias en cuanto a los volúmenes de producción de tal manera que la comparación de gasolina sea constante.
- **Distancia de importación:** La gasolina es un producto importado desde los Estados Unidos. Se asume una distancia promedio de transporte marítimo de 1,800 km entre los puertos del Golfo de México y Puerto Barrios.
- **Escenario de consumo de etanol local:** Se modelan dos escenarios de abastecimiento de etanol de manera independiente: (a) etanol producido a partir de maíz cultivado en los Estados Unidos, transportado por vía marítima a Puerto Barrios, y (b) etanol producido a partir de caña de azúcar cultivada en Guatemala. No se modela un escenario de consumo mixto.
- **Conversión de la unidad funcional:** Se presentan los resultados evaluados por unidad funcional (por cada km recorrido) pero se dimensionan los resultados al consumo de gasolina anual en Guatemala que de acuerdo con el Ministerio de Energía y Minas en el 2025 fue de 520 millones de galones con una eficiencia de 40.3 km/gal, para evaluar los beneficios y los impactos asociados
- **Carbono biogénico:** El modelo no considera los flujos de carbono biogénico al sistema de producción agrícola debido a que para contabilizarlo deberíamos de mantener el carbono del cultivo fijo durante 100 años<sup>4</sup>, lo cual no ocurre y como segundo punto, todo el carbono que se almacena en el cultivo se libera cuando se combustiona en el motor, por lo tanto, regresa al ciclo natural de carbono (no hay un crédito positivo).
- **Matriz de electricidad:** La matriz eléctrica utilizada para el escenario del vehículo eléctrico corresponde a la composición reportada por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) para el año 2025, que incluye fuentes hídricas, geotérmicas, solares, eólicas, de biomasa y fósiles.

---

<sup>4</sup> Por definición el indicador de carbono “Potencial de Calentamiento Global (GWP por sus siglas en inglés)” utiliza un tiempo de residencia de 100 años para cada unidad de gases de efecto invernadero que se liberan al ambiente. En otras palabras, el indicador mide el efecto que tienen un gas de incrementar un grado la temperatura del planeta con un tiempo de residencia en la atmosfera de 100 años.

A continuación, se enumeran las limitaciones del modelo:

- **Emisiones indirectas por uso del suelo:** no se incluyen las emisiones indirectas por cambio de uso del suelo (iLUC), dada la alta incertidumbre metodológica y la necesidad de escenarios de mercado específicos;
- **Heterogeneidad del parque vehicular:** El perfil de emisiones del vehículo se basa en la tecnología Euro 3 representativa del parque actual y no refleja la heterogeneidad entre modelos ni las condiciones reales de manejo;
- **Manufactura y mantenimiento de vehículos:** la manufactura del vehículo, el mantenimiento y el fin de vida de sus componentes, incluida la batería en el caso del vehículo eléctrico, quedan fuera del alcance. Esta exclusión se aplica de forma simétrica a los cuatro escenarios comparados para preservar la equivalencia funcional. El análisis se concentra, por tanto, en el ciclo de vida del combustible y de la electricidad de tracción necesarios para recorrer un kilómetro. Los impactos asociados a la fabricación y al fin de vida del vehículo eléctrico, en particular los relacionados con la batería, constituyen un componente relevante del perfil ambiental completo y se deben considerar para otras aplicaciones.
- **Transporte y distribución de los combustibles líquidos:** Para los tres escenarios de combustible líquido (gasolina importada, etanol importado y etanol de producción local), el transporte terrestre entre el punto de descarga o de salida de planta y la terminal de mezcla, así como la distribución secundaria hacia estaciones de servicio, se excluye del presente alcance. La exclusión se justifica por dos razones: (a) representa una fracción menor del impacto total well-to-wheel y (b) aplica de forma idéntica a los tres escenarios de combustión, lo que mantiene la comparabilidad entre ellos. Esta exclusión se identifica como limitación del estudio y se recomienda su incorporación en un análisis de sensibilidad posterior.
- **Análisis de sensibilidad de balance hídrico:** La fracción de evapotranspiración (43%) se basa en la base de datos Ecoinvent debido a ausencia de datos específicos para Guatemala. Un análisis de sensibilidad aumentaría la precisión del modelo.

### Revisión crítica

El presente estudio se somete a revisión crítica interna. La conformidad con los requisitos de la norma ISO 14044 para afirmaciones comparativas divulgadas al público requerirá, en su caso, revisión por panel externo independiente.

### Software

El software utilizado para el análisis es openLCA<sup>5</sup>, en su versión 2.6.1, el cual es de código abierto y puede ser utilizado por cualquier individuo o institución. El software es desarrollado por la empresa Alemana GREENDELTA, el cual cuenta con un portal de datos para adquirir los modelos de ciclo de vida para evaluar una gran variedad de sistemas de producción, así como también se pueden modelar diferentes escenarios.

---

<sup>5</sup> [www.openlca.org](http://www.openlca.org)

## **Inventarios de Ciclo de Vida**

En esta sección se describen los modelos utilizados para realizar el análisis de ciclo de vida. El principio fundamental utilizado en este análisis fue utilizar a Ecoinvent como bloques que permiten regionalizar la información y adecuarla al contexto local. Se describen los procesos y etapas de los cuatro escenarios que se modelaron, así como los parámetros que se ajustaron. Uno de los requisitos de la norma ISO 14040/44 es que el análisis pueda ser replicado, por lo que se presentan acá cada uno de los procesos con el objetivo de comunicar de una forma transparente trazable para que pueda ser replicado por cualquier investigador. La documentación completa de cada uno de los procesos se presenta en el Anexo 2. En esta sección se realiza una presentación descriptiva.

### **Importación de etanol a Guatemala**

El presente modelo contempla dos escenarios de abastecimiento de etanol: uno en el que la totalidad del volumen requerido se importa desde los Estados Unidos, y otro en el que la demanda se cubre mediante la producción local proveniente de los ingenios azucareros guatemaltecos. La decisión de construir un modelo de esta manera responde a los siguientes factores:

- a) La ley del Alcohol Carburante, Decreto Número 17-85 del Congreso de la República, que habilita la incorporación de etanol a la gasolina;
- b) El Acuerdo Gubernativo Número 257-2025, que aprueba el Reglamento General de la Ley del Alcohol Carburante y fija la mezcla obligatoria del 10 % a partir de junio de 2026 (República de Guatemala, 2025); y
- c) El Acuerdo de Comercio Recíproco entre Guatemala y los Estados Unidos suscrito en enero de 2026, que incorpora el compromiso de importación anual mínima de cincuenta millones de galones de etanol de origen estadounidense.

La participación efectiva de cada tipo de etanol en el abastecimiento del mercado nacional dependerá de variables comerciales que al momento de realizar el presente estudio no están determinadas. Por este motivo, se optan por dos escenarios de abastecimiento uno en el que el 100 % de etanol es importado de los Estados Unidos y otro en el que el 100 % es producido localmente. De tal manera que se puedan evaluar independientemente cada uno de los escenarios de consumo.

### **Producción de etanol a partir de Maíz**

El modelo de producción de etanol a partir de maíz incluye: la etapa agrícola del maíz, uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos, herbicidas, energía, riego y todas las actividades agrícolas necesarias como enmiendas del suelo y labranzas. El proceso de producción de etanol incluye el procesamiento del maíz, cuyo almidón se convierte en azúcares fermentables mediante un proceso enzimático y el proceso de destilación que involucra insumos químicos, energía, así como sus emisiones al aire y al agua. La documentación completa del modelo se encuentra disponible en la tabla del Anexo 2.

## **Producción de etanol a partir de caña de azúcar**

Para la producción local de etanol se utilizan los modelos de producción de caña de azúcar de ecoinvent los cuales han sido regionalizados para reflejar las condiciones del sector azucarero guatemalteco. El sistema productivo modelado corresponde al esquema integrado de un ingenio tradicional con producción agrícola de caña de azúcar, una destilería anexa, en el que la caña de azúcar se procesa para producir azúcar cruda, etanol, energía térmica y electricidad que se entrega a la red nacional interconectada.

### **Etapas agrícolas para la producción de caña de azúcar en Guatemala**

Para la etapa agrícola se consideran las actividades como enmiendas del suelo, aplicación de fertilizantes y pesticidas, irrigación, energía y combustibles. El consumo de agua asociado a la producción de caña de azúcar se regionalizó para reflejar las condiciones del contexto guatemalteco. La literatura nacional proporciona dos referencias relevantes. Tax Marroquín y Guerra (2019) reportan una huella hídrica de 129 m<sup>3</sup> por tonelada de caña de azúcar para Guatemala, usando la metodología del Water Footprint Network (Hoekstra et al., 2011). Esta metodología considera los tres componentes de la huella hídrica: agua verde (precipitación evapotranspirada por el cultivo), agua azul (extraída de fuentes superficiales y subterráneas para riego) y agua gris (volumen teórico requerido para diluir cargas contaminantes). Según el informe, el 22 % de la huella hídrica corresponde a la fracción azul, equivalente a aproximadamente 28 m<sup>3</sup> por tonelada de caña. La información más reciente, reportada por ASAZGUA (2023), actualiza la huella total a 115 m<sup>3</sup> por tonelada de caña y la fracción azul al 18 %, equivalente a 22 m<sup>3</sup> por tonelada de caña. Esta reducción respecto al dato de Tax Marroquín y Guerra (2019) se atribuye a mejoras en la eficiencia de riego y en las prácticas de manejo del cultivo. En este análisis se utiliza el valor de mayor eficiencia de 22 m<sup>3</sup> de agua por tonelada de caña.

### **Procesamiento de azúcar y producción de etanol**

El proceso de destilación de etanol a partir de caña de azúcar corresponde a un ingenio típico tradicional que procesa 2 millones de toneladas métricas de caña de azúcar por zafra, con una operación de 200 días por temporada. El jugo de caña se utiliza en dos procesos: la mitad se destina a producción de azúcar, y la otra mitad junto con la melaza resultante de la cristalización alimenta la línea de fermentación para la obtención de etanol.

La conversión de azúcares a etanol ocurre con una eficiencia del 90%, y el producto se purifica mediante destilación hasta alcanzar una concentración del 99.7% en peso, que es la especificación requerida para las mezclas E10. La energía proviene principalmente de la combustión del bagazo de caña en calderas de alta presión, lo que hace que el sistema sea en gran medida autosuficiente energéticamente. Por cada 1,000 kg de caña procesada, el sistema produce 51.3 kg de azúcar cruda, 23 litros de etanol y genera además electricidad y energía térmica como co-productos.

## Transporte marítimo

El transporte marítimo tanto para la gasolina como el etanol de maíz se modela mediante un barco de carga general que opera con fueloil pesado (heavy fuel oil) a lo largo de una ruta estimada de 1,800 km desde los puertos del Golfo de México desde Texas hasta Puerto Barrios, en el Atlántico guatemalteco. El modelo de transporte marítimo se basa en el modelo de Ecoinvent (Anexo 2) el cual representa la operación completa de la embarcación, tanto en alta mar como en maniobras portuarias. Los parámetros técnicos considerados son: capacidad de carga de 1,200 toneladas con un factor de utilización del 50% y un consumo de combustible de 0.0295 kg por tonelada-kilómetro (t·km).

## Producción de gasolina

Para modelar la producción de gasolina se utiliza modelo de producción global de gasolina sin plomo (tecnología promedio de refinerías de petróleo). No obstante, el modelo incorpora el consumo energético adicional asociado a la desulfuración. La gasolina resultante es equivalente a la gasolina súper utilizada en Guatemala. Este modelo considera la energía requerida para reducir el contenido de azufre de una gasolina convencional a menos de 50 partes por millón (ppm), en comparación con los 150 ppm típicos de la gasolina estándar sin plomo. Así, para producir 1 kg de gasolina de bajo contenido de azufre, el sistema requiere 1 kg de gasolina sin plomo, además de energía térmica industrial (0.224 MJ) y electricidad (0.00333 kWh), lo que equivale aproximadamente a un 6% de consumo energético adicional respecto del proceso de refinación convencional.

## Vehículos de pasajeros

Para los cuatro escenarios se usa un vehículo de combustión de gasolina, un vehículo de combustión para mezcla E10 y un vehículo eléctrico. Para el vehículo de combustión se utilizó el modelo de un vehículo de pasajeros de tamaño mediano con tecnología de emisión EURO 3 como representativo del parque vehicular guatemalteco. A continuación, se presentan los parámetros de los vehículos que se incluyen en el análisis y los cálculos realizados para crear el perfil de emisiones del vehículo con combustible E10.

*Tabla 1 Parámetros técnicos de los vehículos que se analizan. Fuente: Ecoinvent 3.11*

Parámetro	Vehículo Gasolina	Vehículo E10	Vehículo Eléctrico
<b>Descripción tecnológica</b>	Automóviles de pasajeros con un tamaño de motor de hasta 2 litros. El peso promedio es 1,600 kg con tecnología de emisión EURO 3	Automóviles de pasajeros con un tamaño de motor de hasta 2 litros. El peso promedio es 1,600 kg con tecnología de emisión EURO 3	Automóvil compacto pequeño con un peso 918kg + 262kg de la batería. Con una autonomía de 120km por carga.
<b>Eficiencia</b>	40.3 km/gal	38.9 km/gal	5 km/kWh
<b>Combustible</b>	Gasolina 100%	Gasolina 90% + Etanol 10%	Electricidad de la red guatemalteca
<b>Vida útil</b>	150,000 km	150,000 km	150,000 km

El anexo 2 muestra los modelos de ecoinvent utilizados para los vehículos de pasajeros y el anexo 3, muestra el perfil de emisiones del vehículo de gasolina y el vehículo con mezcla E10 el cual se determinó mediante el ajuste de la densidad del combustible y el cambio en el poder calorífico. La derivación completa de las emisiones del vehículo con Mezcla E10 se describe a continuación.

## Derivación del factor de emisiones del vehículo E10

Las emisiones de combustión del vehículo E10 se estimaron a partir del perfil del vehículo de gasolina aplicando un factor de corrección derivado de la diferencia en contenido energético entre la gasolina pura y la mezcla E10. El procedimiento se resume en cuatro pasos:

1. **Densidad de la mezcla E10:** La densidad de la mezcla se calculó como la media promedio por volumen de sus componentes:  $\rho_{E10} = 0.9 \times 0.74 + 0.1 \times 0.789 = 0.7449$  kg/l.
2. **Poder calorífico inferior (LHV) de la mezcla:** Las fracciones másicas resultantes de la composición volumétrica son 89.4% gasolina y 10.6% etanol. El LHV de la mezcla es:  $LHV_{E10} = 0.8941 \times 43.5 + 0.1059 \times 26.8 = 41.73$  MJ/kg.
3. **Factor de ajuste energético:** Para recorrer 1 km con la misma energía disponible, el vehículo requiere una masa de mezcla E10 mayor a la de gasolina pura:  $LHV_{gasolina} / LHV_{E10} = 43.5 / 41.73 = 1.0424\times$ .
4. **Factor de corrección de emisiones de combustión:** Dado que las emisiones asociadas a la combustión de gasolina son proporcionales a la masa de gasolina quemada, el factor de reducción de emisiones se obtiene dividiendo la masa de gasolina presente en la mezcla E10 por km entre el consumo de gasolina pura por km:  $0.06479 / 0.06952 = 0.932\times$ . Este es el factor aplicado a todas las emisiones fósiles del perfil de gasolina para obtener el perfil del vehículo E10.

**Parámetros de entrada:**  $\rho_{gasolina} = 0.74$  kg/l;  $\rho_{etanol} = 0.789$  kg/l;  $LHV_{gasolina} = 43.5$  MJ/kg;  $LHV_{etanol} = 26.8$  MJ/kg.

## Generación de electricidad en Guatemala

Para realizar una comparación con los vehículos eléctricos se utilizó la matriz de generación de energía eléctrica (año 2025) que reporta el MEM y la CNEE. La matriz de energía eléctrica tiene una mezcla de fuentes de generación en la que se incluyen, fuentes fósiles (carbón mineral, bunker, gas natural), energía importada de México, y fuentes renovables (energía solar, eólica, y geotérmica). Los ingenios azucareros producen energía térmica y eléctrica a partir de los residuos de caña de azúcar por lo que la biomasa se considera una fuente renovable al alimentar una porción de electricidad a la red guatemalteca. Sin embargo, en su cadena de suministro se utiliza el cultivo de caña por lo que hay una porción de la etapa agrícola que se le atribuye y por consiguiente los impactos asociados a la producción de electricidad. A continuación, se presenta el mix de generación de electricidad que se considera para un vehículo eléctrico.

*Tabla 2 Mix de energía eléctrica reportado para el año 2025 por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.*

<b>Fuente de generación</b>	<b>Contribución a la red interconectada</b>
Cogeneración con biomasa	12%
Energía geotérmica	2%
Carbón mineral	29%
Hidroeléctricas	36%
Importación México	11%
Gas natural	1%
Fueloil	5%
Energía solar	3%
Energía eólica	2%

# Resultados: Evaluación de impacto e Interpretación

## Método ReCiPe 2016

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación de impacto. El método utilizado es ReCiPe 2016, con una perspectiva jerárquica, lo cual representa el consenso científico en estudios de ciclo de vida (Huijbregts et al., 2017). Este método ofrece factores de caracterización tanto a nivel de punto intermedio (*midpoint*) como a nivel de punto final (*endpoint*), de la cadena causa-efecto. Por lo general estos factores disminuyen su precisión conforme se van acercando a los puntos finales de la cadena por lo que en este caso se han seleccionado factores de punto medio para presentar la evaluación de impactos.

En total se evalúan los impactos en 18 categorías ambientales que se presentan en el anexo 4, pero en el cuerpo del documento se discuten únicamente tres categorías con mayor relevancia para la política pública guatemalteca: a) cambio climático, b) uso del suelo y c) consumo de agua. Esta selección responde a tres criterios:

- Relevancia para la política pública guatemalteca, dado que son las tres dimensiones que estructuran el debate sobre mezcla obligatoria E10 tanto a nivel nacional como en los marcos regulatorios internacionales de referencia.
- Facilidad de comunicación ya que son categorías con equivalentes físicos directamente interpretables (toneladas de CO<sub>2</sub>-equivalente, kilómetros cuadrados de tierra agrícola, metros cúbicos de agua), lo que permite el diálogo con audiencias no especializadas; y
- Cobertura de los trade-offs ambientales que giran alrededor de las emisiones evitadas y la presión sobre recursos agrícolas e hídricos.

## Emisiones de carbono

Los resultados del análisis de ciclo de vida apuntan a que el uso de la mezcla E10 importada no representa un beneficio significativo en comparación con el escenario actual de consumo de gasolina. En términos de emisiones de carbono los beneficios por el consumo de la mezcla E10 con etanol producido a partir de maíz en Estados Unidos es de apenas del -2%. El beneficio se incrementa a un -10% en reducción de emisiones de carbono si la demanda de etanol se satisface mediante etanol producido localmente.

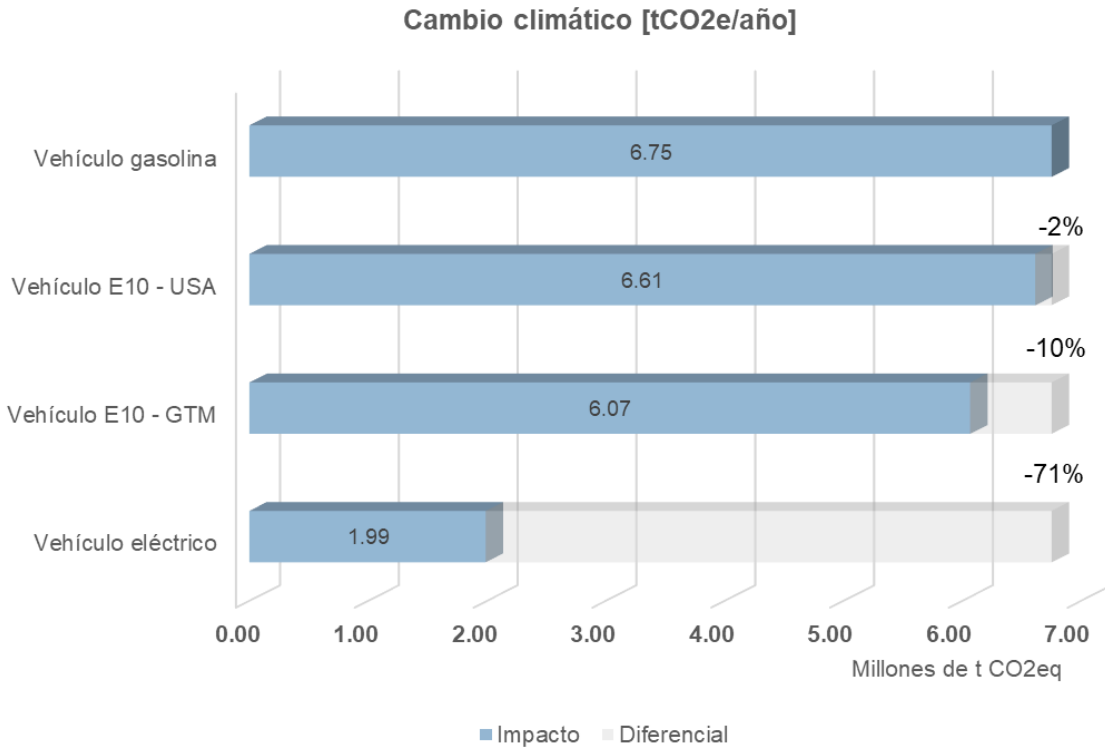


Figura 2 Impactos de cambio climático (M tCO2e) y reducción de impactos (%) asociados a los cuatro escenarios evaluados.

La Figura 2, muestra los efectos si consideramos el consumo anual del parque vehicular que es 520 millones de galones de gasolina. Los beneficios se traducen en 138 mil toneladas de CO2e reducidos usando etanol importado lo que equivale a eliminar 4,100 vehículos del parque vehicular. En contraste el beneficio es 5 veces más alto (690 mil toneladas de carbono reducidas) usando etanol producido localmente o lo que equivale a eliminar 20,338 vehículos<sup>6</sup> del parque vehicular de Guatemala en un año.

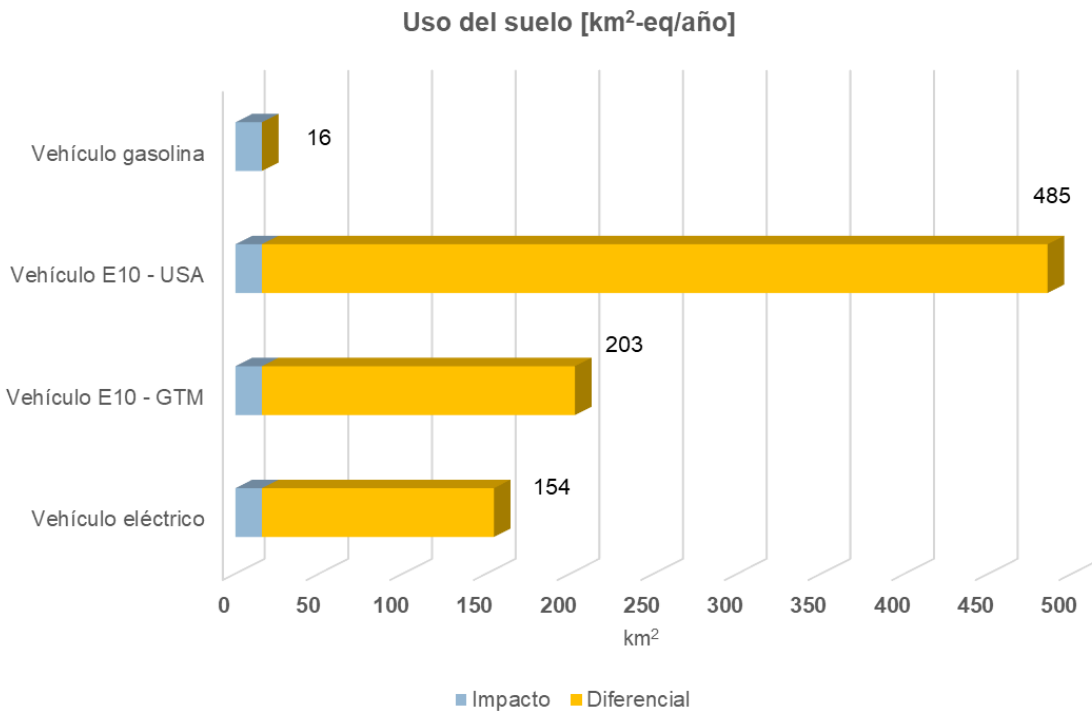
Ahora bien, si evaluamos el rendimiento del vehículo eléctrico podemos observar que se reduce las emisiones de carbono en un 71% lo cual es mucho mejor. Considerando el consumo anual de gasolina del parque vehicular se tendría un potencial de reducción de 4.76 millones de toneladas de carbono lo que equivale a eliminar 141,200 vehículos del parque vehicular.

## Uso del suelo

En contraste con lo que sucede con la huella de carbono, los impactos por uso del suelo de la mezcla E10 son diametralmente opuestos y son de un orden de magnitud mayor que el de gasolina. Usando etanol importado los impactos por uso del suelo son 30 veces mayores y 12 veces más grandes usando etanol producido en Guatemala.

<sup>6</sup> Esta comparación se realizó usando el factor de emisión de combustión (anexo 2) para el vehículo de gasolina mediano EURO 3 de ecoinvent equivalente a 0.225 kgCO2e/km recorrido.

Esto significa que para satisfacer la demanda local necesitaríamos 485 km<sup>2</sup> de tierras cultivadas de maíz y 203 km<sup>2</sup> de tierras cultivadas con caña de azúcar. Es importante mencionar que estas cifras están expresadas en km<sup>2</sup> equivalentes de tierra agrícola y muestra que el etanol de caña de azúcar posee un mejor perfil en cuanto a uso del suelo en comparación con el maíz.



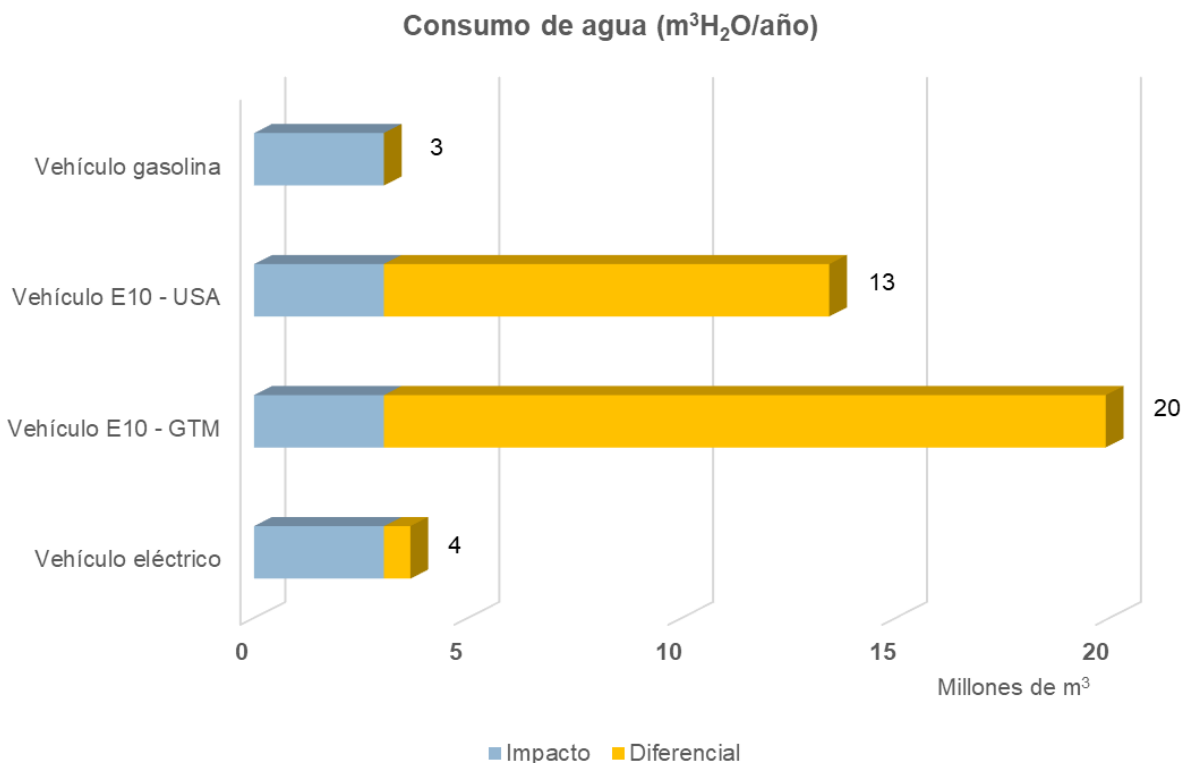
*Figura 3 Impactos por uso del suelo para los cuatro escenarios evaluados en km<sup>2</sup> equivalentes por año.*

El vehículo eléctrico siempre posee un mayor impacto en uso del suelo dado que tanto los parques eólicos, solares y la biomasa requieren de mayor cantidad de uso del suelo que en toda la cadena de valor de la gasolina.

## Huella de agua

El impacto en los recursos hídricos por el uso de mezcla E10, se incrementará 6.6 veces más cuando se utiliza etanol de caña de azúcar<sup>7</sup> y 4 veces más con etanol de maíz. En base al consumo anual del parque vehicular esto representa un incremento neto de 20 millones de m<sup>3</sup> de agua para la mezcla E10 de caña de azúcar y 13.5 millones m<sup>3</sup> si usamos etanol de maíz, en comparación con 3 millones de m<sup>3</sup> que se consumen con vehículos de gasolina. Para contextualizarlo, el incremento proyectado de E10 equivaldría a usar el 5.8% del volumen del lago de Amatitlán (290 M m<sup>3</sup>) anualmente.

<sup>7</sup> Para el estimar la huella de agua por consumo únicamente se consideró el agua evapotranspirada que en el modelo de cultivo de caña es de 43% del volumen usado para irrigación. Las fracciones de agua infiltrada al suelo 46% y escorrentía 11% no se consideran como un uso consuntivo ya que regresan a la misma cuenca hidrográfica.



*Figura 4 Impactos a los recursos hídricos para los cuatro escenarios evaluados.*

## Discusión de resultados

Los resultados del ACV indican que el beneficio climático es limitado (2% para etanol de maíz importado, 10% para etanol de caña de azúcar producido localmente) y no compensan los impactos adicionales al uso del suelo y los recursos hídricos. Este problema de los trade-offs ambientales de los biocombustibles de primera generación ha sido documentado extensivamente en estudios y análisis científicos.

De hecho, La Union Europea ha identificado este problema por lo que la directiva 2023/2413 de energía renovable RED III, propone el uso moderado de los biocombustibles de primera generación y ha reconocido los riesgos asociados a las emisiones indirectas por cambio del uso del suelo, la presión sobre los recursos hídricos y su competencia con los alimentos. Como resultado ha limitado a un 7% su participación en la matriz energética y ha colocado estrictos estándares de producción sostenible para todas las materias primas agrícolas destinada a la producción de biocombustibles.

La diferencia entre los dos escenarios de mezcla E10 se explica por las características particulares de cada cultivo. En algunas categorías de impacto como carbono y uso del suelo la caña de azúcar presenta un rendimiento de etanol por hectárea entre dos y tres veces superior al del maíz y requiere una menor intensidad de fertilizantes nitrogenados, lo que reduce las emisiones de óxido nítrico asociadas a la etapa agrícola (Hill et al., 2006). Adicionalmente, el proceso de destilación en el ingenio azucarero utiliza

energía térmica y eléctrica proveniente de la combustión interna del bagazo, lo que reduce la dependencia de combustibles fósiles en la destilación.

El etanol de maíz por el contrario tiene un menor rendimiento de etanol por hectárea y por lo tanto depende en mayor cantidad de insumos agrícolas y de energía externa en el proceso de destilación. Adicionalmente se incorpora el impacto por el transporte marítimo de 1,800 km desde los puertos del Golfo de México hasta Guatemala. Por lo que en total el etanol de caña de azúcar tiene un menor impacto de cambio climático.

Con respecto al consumo de agua el maíz es mucho más eficiente que la caña de azúcar ya que se necesitan 22 m<sup>3</sup> de agua para la producción de una tonelada de caña de azúcar (ASAZGUA, 2023) y 18 m<sup>3</sup> para cultivar una tonelada de maíz (Ecoinvent Association, 2026). Aún así es superior al consumo de agua por km de un vehículo que utiliza gasolina o que un vehículo eléctrico.

El vehículo eléctrico presenta el mejor desempeño ambiental en cuanto a carbono, uso del suelo y huella de agua, sin embargo, aún presenta un mayor impacto en otras categorías de impacto como acidificación y material particulado. Esto se debe principalmente a que el mix de electricidad presenta aún un alto porcentaje de fuentes fósiles. Esto evidencia que es necesario optimizar la red de electricidad con fuentes más limpias, principalmente energía hidroeléctrica, solar y eólica. El presente análisis no pretende profundizar en todas las categorías de impacto, y más bien solo pone sobre la mesa que debemos ampliar el perfil ambiental para la toma de decisiones en lugar de tener una visión de túnel de carbono.

Un escenario altamente probable y que ya comienza a observarse en Guatemala, impulsado por la creciente rentabilidad de los vehículos eléctricos, es la integración de paneles solares en los hogares. Esta solución permite compensar una parte importante del consumo eléctrico doméstico asociado a la recarga, reduciendo de forma sustancial el costo de la energía. Además, el impacto por uso del suelo es mínimo, ya que la instalación en techos de viviendas y edificios no compite con superficies destinadas a cultivos agroalimentarios.

Por último, las emisiones indirectas por cambio de uso del suelo (iLUC) no se cuantifican debido a la alta incertidumbre, pero se reconocen como un riesgo potencial en escenarios de expansión de la demanda que superen la capacidad instalada actual (Searchinger et al., 2008; Fargione et al., 2008).

# Conclusiones

## Hallazgos principales

- Los resultados del análisis de ciclo de vida apuntan a que el uso de Etanol importado de los Estados Unidos no representa un beneficio climático significativo en comparación con el escenario actual por consumo de gasolina. El mayor beneficio de cambio climático se obtiene con el uso de un vehículo eléctrico. En todo caso el etanol producido localmente es una mejor alternativa que importarlo desde otro país.
- Los impactos de uso del suelo con mezclas E10 oscilan en un rango de magnitud de 12-30 veces mayor en comparación con el vehículo de gasolina. Los impactos por consumo de agua son de 4-7 veces mayores que el vehículo de gasolina. Estos impactos ponen en evidencia que desarrollar una estrategia basada en un solo indicador (visión de túnel de carbono) puede generar impactos críticos a otros recursos, si no se considera una perspectiva de ciclo de vida.
- A pesar de que los vehículos eléctricos presentan un mejor desempeño ambiental en cuanto a carbono, uso del suelo y consumo de agua, aún presentan un mayor impacto en cuanto a acidificación y material particulado, esto se debe principalmente al alto porcentaje de combustibles fósiles en la red de electricidad.

## Riesgos y oportunidades

- Este reporte evidencia que el uso de mezclas E10 podría generar una mayor presión en los recursos por uso del suelo y consumo de agua, los cuales pueden ocurrir en el territorio nacional o en el extranjero. En este momento tienen un alto nivel de incertidumbre debido a las características variables del comportamiento del mercado.
- Los vehículos eléctricos presentan una de las mayores oportunidades de descarbonización y para otros impactos ambientales en comparación con vehículos con mezclas de etanol. El efecto positivo de un vehículo eléctrico solo podrá ser maximizado en el futuro si se optimiza la red de electricidad con energía hidroeléctrica, solar y eólica.
- Un escenario altamente probable y que ya comienza a observarse en Guatemala, impulsado por la creciente rentabilidad de los vehículos eléctricos, es la integración de paneles solares en los hogares. Esta solución permite compensar una parte importante del consumo eléctrico doméstico asociado a la recarga, reduciendo de forma sustancial el costo de la energía. Además, el impacto por uso del suelo es mínimo, ya que la instalación en techos de viviendas y edificios no compite con superficies destinadas a cultivos agroalimentarios.

## Recomendaciones

- El problema de los trade-offs ambientales de los biocombustibles de primera generación ha sido ampliamente documentado en otros estudios y deben ser considerados para generar políticas de desarrollo sostenible a largo plazo que consideren todos los impactos ambientales. Este análisis demuestra la aplicabilidad del ACV como metodología científica para la ayuda de toma de decisiones con criterios técnicos y cuantitativos que permiten evitar el traslado de un problema hacia otra parte de la cadena de suministro, por lo que en el futuro se sugiere su uso para la generación de políticas ambientales que promuevan un desarrollo sostenible.
- Este reporte sugiere reconsiderar la política de biocombustibles actual y cambiar su prescripción obligatoria a un uso opcional lo cual permitiría una transición gradual usando la experiencia de otros países latinoamericanos que han logrado la adaptación de infraestructura y el parque vehicular a mezclas E10 y más elevadas.
- Es sumamente importante que se tomen las medidas necesarias para mitigar la expansión de la frontera agrícola y escasez hídrica que serán ocasionados por el incremento en la demanda de etanol en el país. Algunas estrategias que se pueden implementar para garantizar la sostenibilidad de las materias primas es la implementación de certificaciones, declaraciones ambientales de producto y procesos de auditoría ambiental para mantener la trazabilidad y transparencia de los procesos de producción sostenible.
- A largo plazo y como estrategia energética se sugiere la optimización de la red eléctrica con visión de futuro, en la cual se contemple que el incremento en la demanda de electricidad para la movilidad eléctrica garantice que se utilizaran fuentes limpias (solar, hidro y eólica).

# Referencias bibliográficas

- Asociación de Azucareros de Guatemala (ASAZGUA). (2023). Estudio de caso: Actividades de la agroindustria azucarera de Guatemala apoyando la implementación del ODS 6. ASAZGUA.
- Asociación de Combustibles Renovables de Guatemala (ACR). (2026). Etanol. Retrieved from <https://acrguatemala.com/etanol/>
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) & Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). (2025). BIOETHANOL: Fast track to mobility decarbonisation. BNDES/CGEE.
- Cavalett, O., Chagas, M. F., Seabra, J. E. A., & Bonomi, A. (2013). Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(3), 647–658. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0465-0>
- Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE). (2025). Estadísticas del sector eléctrico guatemalteco, año 2025. CNEE, Gobierno de Guatemala. <https://www.cnee.gob.gt>
- Curran, M. A. (Ed.). (2012). *Life cycle assessment handbook: A guide for environmentally sustainable products*. Wiley-Scrivener. <https://doi.org/10.1002/9781118528372>
- Cutz, L., Tomei, J., & Nogueira, L. A. H. (2020). Understanding the failures in developing domestic ethanol markets: Unpacking the ethanol paradox in Guatemala. *Energy Policy*, 145, 111769. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111769>
- Donner, S. D., & Kucharik, C. J. (2008). Corn-based ethanol production compromises goal of reducing nitrogen export by the Mississippi River. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(11), 4513–4518. <https://doi.org/10.1073/pnas.0708300105>
- Ecoinvent Association. (2026). Ecoinvent v3.11 Database. Retrieved from <https://www.ecoinvent.org/>
- European Parliament & Council of the European Union. (2023). Directive (EU) 2023/2413 amending Directive (EU) 2018/2001, Directive 98/70/EC and Regulation (EU) 2018/1999 as regards the promotion of energy from renewable sources [RED III]. *Official Journal of the European Union*, L 280, 1–54.
- Farrell, A. E., Plevin, R. J., Turner, B. T., Jones, A. D., O'Hare, M., & Kammen, D. M. (2006). Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science*, 311(5760), 506–508. <https://doi.org/10.1126/science.1121416>
- Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., & Hawthorne, P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, 319(5867), 1235–1238. <https://doi.org/10.1126/science.1152747>
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. Y., & van der Meer, T. H. (2009). The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(25), 10219–10223. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812619106>
- Hawkes, A. D. (2010). Estimating marginal CO<sub>2</sub> emissions rates for national electricity systems. *Energy Policy*, 38(10), 5977–5987. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.053>

- Hill, J., Nelson, E., Tilman, D., Polasky, S., & Tiffany, D. (2006). Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(30), 11206–11210. <https://doi.org/10.1073/pnas.0604600103>
- Hira, A., & de Oliveira, L. G. (2009). No substitute for oil? How Brazil developed its ethanol industry. *Energy Policy*, 37(6), 2450–2456. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.037>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe 2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Iodice, P., & Cardone, M. (2021). Ethanol/gasoline blends as alternative fuel in last generation spark-ignition engines: A review on CO and HC engine out emissions. *Energies*, 14(13), 3853. <https://doi.org/10.3390/en14133853>
- International Organization for Standardization. (2006a). Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO Standard No. 14040). ISO. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- International Organization for Standardization. (2006b). Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (ISO Standard No. 14044). ISO. <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- McCormick, R. L., Fioroni, G., Fouts, L., Christensen, E., Yanowitz, J., Polikarpov, E., Albrecht, K., Gaspar, D. J., Gladden, J., & George, A. (2022). Global ethanol-blended-fuel vehicle compatibility study (Technical Report NREL/TP-5400-81252). National Renewable Energy Laboratory (NREL). <https://docs.nrel.gov/docs/fy22osti/81252.pdf>
- Ministerio de Energía y Minas (MEM). (2025). Módulo estadístico del parque vehicular guatemalteco. Gobierno de Guatemala. <https://mem.gob.gt/modulos-estadisticos-2/modulo-estadistico-energia-2/>
- Motola, V., Rejtharova, J., Buffi, M., Hurtig, O., & Scarlat, N. (2026). Clean Energy Technology Observatory: Advanced biofuels in the European Union — 2025 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets. European Commission, Joint Research Centre. <https://doi.org/10.2760/1570541>
- Pal, A. (2011). Blending of ethanol in gasoline: Impact on SI engine performance and emissions. *International Journal of Thermal Technologies*, 4(1), 1–5.
- República de Guatemala. (2025). Acuerdo Gubernativo Número 257-2025. Diario de Centroamérica. Recuperado el 25 de diciembre del 2025. Disponible en: <https://dca.gob.gt/noticias-guatemala-diario-centro-america/aprobado-el-reglamento-general-de-la-ley-de-alcohol-carburante/>
- Renewable Fuels Association (RFA). (2026, enero). RFA thanks Trump Administration for Guatemala agreement boosting ethanol exports [Comunicado de prensa]. <https://ethanolrfa.org/media-and-news/category/news-releases/article/2026/01/rfa-thanks-trump-administration-for-guatemala-agreement-boosting-ethanol-exports>

Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., & Yu, T. H. (2008). Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 319(5867), 1238–1240. <https://doi.org/10.1126/science.1151861>

Superintendencia de Administración Tributaria (SAT). (2016). Análisis estadístico del parque vehicular registrado. SAT, Guatemala.

Tay, K. (2024,). Sugar annual: Guatemala (GAIN Report No. GT2024-0003). U.S. Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. <https://fas.usda.gov/data/guatemala-sugar-annual-9>

Tax Marroquín, M., & Guerra, A. (2019). La huella hídrica de la caña de azúcar de Guatemala. *Revista ATAGUA*, 4–11. Asociación de Técnicos Azucareros de Guatemala (ATAGUA).

Torroba, A., Chiara, A., & Arredondo, A. (2025). Estado de los biocombustibles líquidos en las Américas. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). <https://repositorio.iica.int>

Universidad Rafael Landívar (URL), Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad (IARNA). (2018). Perfil energético de Guatemala: Bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía. URL. <https://www.url.edu.gt/publicacionesurl/pPublicacion.aspx?pb=1084>

U.S. Grains & Bioproducts Council. (2026, enero). U.S. Grains & Bioproducts Council reacts to reciprocal trade agreement with Guatemala [Comunicado de prensa]. <https://grains.org/u-s-grains-bioproducts-council-reacts-to-reciprocal-trade-agreement-with-guatemala/>

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, [online] 21(9), pp.1218–1230. Available at:<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>

# Anexo 1. ¿Que es Ecoinvent?

## Sobre Ecoinvent 3.11

Ecoinvent es una base de datos científica desarrollada y mantenida por el Centro Ecoinvent, una asociación sin fines de lucro con sede en Suiza, conformada por institutos de investigación de reconocimiento internacional, entre ellos el Instituto Federal de Tecnología de Zúrich (ETH Zurich) y organismos gubernamentales de ciencia y tecnología de Suiza. Su desarrollo comenzó en la década de 1990 y desde entonces se ha convertido en el estándar de facto para los estudios de ACV en todo el mundo. En la actualidad, miles de investigadores, empresas, agencias reguladoras y organismos internacionales la utilizan como base común para evaluar el desempeño ambiental de productos y procesos.

La razón fundamental por la que Ecoinvent es tan ampliamente adoptada es que resuelve uno de los mayores desafíos del ACV: la necesidad de datos sobre cientos de procesos industriales, agrícolas y energéticos que ningún investigador podría recopilar de forma individual. Para producir un litro de etanol, por ejemplo, no basta con conocer cuánta caña de azúcar se necesita; también hay que saber cuánta energía se usó para fabricar el fertilizante, cuántas emisiones produjo el transporte del combustible, o qué impacto tuvo la generación de la electricidad que alimenta el ingenio. Ecoinvent contiene información sistematizada y revisada para todos estos procesos de fondo, lo que permite al investigador concentrarse en modelar los procesos específicos del sistema que estudia, apoyándose en una base de datos robusta para todo lo demás.

Los datos contenidos en Ecoinvent provienen de mediciones industriales reales, estadísticas de producción nacionales e internacionales, literatura científica revisada por pares y reportes técnicos de agencias especializadas. Antes de ser incorporados a la base de datos, cada conjunto de datos pasa por un proceso formal de revisión por parte de expertos independientes, lo que garantiza su consistencia metodológica y su trazabilidad. Esto la distingue de otras fuentes de datos disponibles en internet, cuya procedencia y rigor metodológico no siempre pueden verificarse.

Un aspecto importante que el lector debe tener presente es que los datos de Ecoinvent representan, en su mayoría, promedios de producción a escala global o regional, contruidos a partir de información de múltiples países y tecnologías. Esto significa que, por ejemplo, el proceso de refinación de petróleo utilizado en este análisis refleja el comportamiento promedio de la industria refinadora mundial, no necesariamente el de una refinería específica en los Estados Unidos. Asimismo, los datos sobre producción de fertilizantes nitrogenados representan la tecnología promedio global, no la de un fabricante en particular.

Esta característica tiene una consecuencia directa para la interpretación de los resultados: los impactos calculados deben entenderse como estimaciones representativas de las condiciones promedio de producción a nivel global, no como valores exactos para un proveedor o instalación específica. En tal sentido, los resultados de este estudio permiten comparar los perfiles ambientales de los diferentes escenarios de combustible en términos relativos, lo cual es precisamente el objetivo del análisis.

## Sobre el "Cut-off" de Ecoinvent 3.11

Para comprender qué significa el "sistema cut-off", es útil partir de una pregunta sencilla: cuando una fábrica produce varios productos al mismo tiempo, ¿cómo se reparte la carga ambiental entre ellos? Esta pregunta, aparentemente simple, está en el centro de uno de los debates metodológicos más importantes del análisis de ciclo de vida.

Ecoinvent ofrece distintas formas de responder a esa pregunta, a las que denomina "modelos de sistema". El modelo utilizado en este análisis es el sistema cut-off, cuyo nombre en español puede traducirse aproximadamente como "sistema de corte". Es el modelo más utilizado en el mundo y el que recomienda Ecoinvent para usuarios que se inician con la base de datos, por su coherencia y facilidad de interpretación.

La lógica central del sistema cut-off se basa en el principio de que quien genera un residuo es responsable de gestionarlo. Si durante un proceso industrial se produce un material de desecho, el costo ambiental de tratarlo o disponerlo corresponde al proceso que lo generó, no a quien eventualmente lo recicle o reutilice. Por el contrario, quien recibe ese material para darle un segundo uso lo obtiene, desde el punto de vista del modelo, sin cargas ambientales heredadas: el ciclo anterior queda "cortado". Esto incentiva el uso de materiales reciclados, ya que al no cargar con los impactos de su producción original, tienen un perfil ambiental más favorable.

En la práctica, esto tiene una consecuencia importante para este estudio: los co-productos con valor económico, como el bagazo de caña o el jarabe de maíz derivado de la producción de etanol, se tratan como productos ordinarios del sistema y reciben una fracción de los impactos ambientales en proporción a su valor en el mercado. Los residuos sin valor comercial, en cambio, se contabilizan íntegramente como carga del proceso que los produce.

Este enfoque es consistente con la forma en que Ecoinvent versiones 1 y 2 modelaban los sistemas productivos, lo que lo convierte también en la opción preferida cuando se busca comparabilidad con estudios anteriores. El sistema cut-off fue aplicado en su versión 3.11.

### **Asignación de cargas en coproductos**

En muchos procesos industriales, una misma materia prima produce más de un resultado útil al mismo tiempo. Un ingenio azucarero, por ejemplo, procesa caña de azúcar y obtiene simultáneamente azúcar, etanol y bagazo. Una planta de etanol de maíz produce alcohol carburante y también harina de destilería con solubles (DDGS por sus siglas en inglés), que se utiliza como alimento para ganado. Esta situación, en la que un mismo proceso genera varios productos con valor comercial, se denomina en el análisis de ciclo de vida un sistema de co-productos, y plantea una pregunta metodológica fundamental: ¿a qué producto se le atribuyen los impactos ambientales del proceso?

Imagínese que una panadería usa harina, electricidad y agua para producir pan y también vende la levadura sobrante. Si queremos calcular la huella ambiental del pan, ¿debemos asignarle el 100% de los impactos de la panadería, o debemos distribuirlos entre el pan y la levadura? La decisión no es trivial, porque el resultado final cambia según el método que se elija.

Ecoinvent resuelve esta situación aplicando, como regla general, una asignación basada en el valor económico de cada co-producto, es decir, en su precio de mercado. El razonamiento es el siguiente: si el azúcar representa el 80% del valor económico de lo que produce un ingenio y el etanol el 20%, entonces el azúcar cargará con el 80% de los impactos ambientales del proceso y el etanol con el 20%. Este criterio, denominado asignación económica, es el que establece la norma ISO 14044 como método preferente cuando no es posible subdividir el proceso (ISO, 2006).

En el presente análisis, este principio se aplica de la siguiente manera en cada cadena de suministro. Para el etanol de maíz producido en Estados Unidos, el co-producto principal es el DDGS. De acuerdo con la documentación del conjunto de datos de Ecoinvent (dataset 4035), el factor de asignación económica del DDGS es de 0.0117, lo que significa que este subproducto absorbe únicamente el 1.17% de la carga ambiental total del proceso. El etanol, como producto principal con un precio de mercado significativamente mayor, carga con el 98.83% restante. Para el etanol de caña de azúcar producido en Guatemala, los co-productos del ingenio —azúcar, etanol y bagazo— reciben cada uno una fracción de los impactos en función de su precio de mercado relativo, siguiendo el mismo principio.

Es importante señalar que el método de asignación adoptado influye en los resultados finales. Si se hubiera elegido un criterio de asignación por masa, es decir, distribuir los impactos en proporción al peso de cada co-producto, los resultados serían diferentes. Existe literatura científica que demuestra que la elección del método de asignación puede modificar de manera sustancial el perfil ambiental de los biocombustibles (Cavalett et al., 2013). La decisión de utilizar asignación económica en este estudio se justifica por su coherencia con el sistema cut-off de Ecoinvent y con los requisitos metodológicos de ISO 14044, y se declara explícitamente como supuesto del modelo para garantizar la transparencia y reproducibilidad del análisis.

## Anexo 2. Documentación de los modelos de ciclo de vida de Ecoinvent 3.11 utilizados para el análisis.

Tabla 3 Documentación completa de los modelos de Ecoinvent 3.11 utilizados para realizar el análisis.

Etapa de ciclo de vida	Dataset de Ecoinvent	Documentación
Producción agrícola de etanol de maíz	ethanol production from maize   ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation   Cutoff, U   US	ecoQuery: <a href="https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/4035/documentatio">https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/4035/documentatio</a>
Producción agrícola de etanol de caña de azúcar	sugarcane processing, traditional annexed plant   ethanol, without water, in 99.7% solution state, from fermentation   Cutoff, U   RoW	ecoQuery: <a href="https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/20798/documentatio">https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/20798/documentatio</a> <a href="#">n</a>
Producción de gasolina	market for petrol, low-sulfur   Cutoff, U   RoW	ecoQuery: <a href="https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/963/documentation">https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/963/documentation</a>
Transporte de etanol USA-GT	transport, freight, sea, ferry, heavy fuel oil   Cutoff, U   GLO	ecoQuery: <a href="https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/21323/documentatio">https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/21323/documentatio</a> <a href="#">n</a>
Transporte gasolina USA-GT	transport, freight, sea, ferry, heavy fuel oil   Cutoff, U   GLO	ecoQuery: <a href="https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/21323/documentatio">https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/21323/documentatio</a> <a href="#">n</a>
Vehículo de gasolina	transport, passenger, car, petrol, medium size, EURO 3   RoW	ecoQuery: <a href="https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/501/documentation">https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/501/documentation</a>
Vehículo E10	transport, passenger, car, E10 Blend, medium size, EURO 3   RoW	Anexo 1. Perfil de emisiones de vehículo E10
Vehículo eléctrico	transport, passenger, car, electric   GLO	<a href="https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/3265/documentation">https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/3265/documentation</a>

## Anexo 3. Perfil de emisiones del vehículo de gasolina y derivación del perfil para la mezcla E10.

Esta sección presenta el perfil de emisiones del vehículo de gasolina que se utilizó para estimar el perfil de emisiones del vehículo que utiliza la mezcla E10.

*Tabla 4 Perfil de emisiones para el proceso de combustión del vehículo de gasolina pura*

<b>Inputs</b>	<b>Amount</b>	<b>Unit</b>
petrol, low-sulfur	6.95E-02	kg
transport, freight, sea, ferry, heavy fuel oil	1.25E-01	t*km

<b>Outputs</b>	<b>Amount</b>	<b>Unit</b>
<b>transport, passenger, car, petrol, medium size, EURO 3</b>	<b>1.00E+00</b>	<b>km</b>
brake wear emissions, passenger car	7.55E-06	kg
road wear emissions, passenger car	1.66E-05	kg
tyre wear emissions, passenger car	9.72E-05	kg
1-Pentene	2.95E-08	kg
Acetaldehyde	2.01E-07	kg
Acetone	1.64E-07	kg
Acrolein	5.10E-08	kg
Ammonia	2.09E-06	kg
Benzaldehyde	5.90E-08	kg
Benzene	4.04E-06	kg
Butane	7.61E-06	kg
Cadmium II	6.95E-10	kg
Carbon dioxide, fossil	2.21E-01	kg
Carbon monoxide, fossil	1.47E-03	kg
Chromium III	3.48E-09	kg
Chromium VI	6.95E-12	kg
Copper ion	1.18E-07	kg
Dinitrogen monoxide	9.04E-06	kg
Ethane	1.17E-06	kg
Ethylene	2.65E-08	kg
Ethylene oxide	1.96E-06	kg
Formaldehyde	4.56E-07	kg
Heptane	1.99E-07	kg
Hexane	4.32E-07	kg
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, cyclic	3.06E-07	kg
Isohexane	7.42E-06	kg
Lead II	1.04E-10	kg
m-Xylene	3.27E-06	kg

Mercury II	4.87E-12	kg
Methane, fossil	3.18E-05	kg
Methyl ethyl ketone	1.34E-08	kg
Nickel II	4.87E-09	kg
Nitrogen oxides	7.48E-05	kg
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	6.86E-05	kg
o-Xylene	7.84E-07	kg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	2.42E-09	kg
Particulate Matter, < 2.5 um	1.03E-06	kg
Pentane	8.75E-06	kg
Propane	5.62E-06	kg
Propylene	1.48E-07	kg
Propylene oxide	1.03E-06	kg
Selenium IV	6.95E-10	kg
Styrene	2.71E-07	kg
Sulfur dioxide	1.39E-06	kg
Toluene	7.58E-06	kg
Zinc II	6.95E-08	kg

**Fuente:** Ecoinvent 3.11 <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/501/documentation>

*Tabla 5 Modelo de ciclo de vida para el vehículo con Mezcla E10 ajustado en base a la densidad y poder calorífico.*

<b>Inputs</b>	<b>Amount</b>	<b>Unit</b>
ethanol, without water, in 99.7% solution state, from fermentation	7.68E-03	kg
petrol, low-sulfur	6.48E-02	kg
transport, freight, sea, ferry, heavy fuel oil, petrol	1.17E-01	t*km
transport, freight, sea, ferry, heavy fuel oil, ethanol	1.38E-02	t*km

<b>Flow</b>	<b>Amount</b>	<b>Unit</b>
transport, passenger, car, petrol, medium size, EURO 3	1.00E+00	km
brake wear emissions, passenger car	7.55E-06	kg
road wear emissions, passenger car	1.66E-05	kg
tyre wear emissions, passenger car	9.72E-05	kg
1-Pentene	2.95E-08	kg
Acetaldehyde	2.01E-07	kg
Acetone	1.64E-07	kg
Acrolein	5.10E-08	kg
Ammonia	1.94E-06	kg
Benzaldehyde	5.90E-08	kg
Benzene	4.04E-06	kg
Butane	7.61E-06	kg
Cadmium II	6.48E-10	kg
Carbon dioxide, fossil	2.06E-01	kg

Carbon dioxide, from soil or biomass stock	1.47E-02	kg
Carbon monoxide, fossil	1.47E-03	kg
Chromium III	3.24E-09	kg
Chromium VI	6.48E-12	kg
Copper ion	1.10E-07	kg
Dinitrogen monoxide	8.42E-06	kg
Ethane	1.17E-06	kg
Ethylene	2.65E-08	kg
Ethylene oxide	1.96E-06	kg
Formaldehyde	4.56E-07	kg
Heptane	1.99E-07	kg
Hexane	4.32E-07	kg
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, cyclic	3.06E-07	kg
Isohexane	7.42E-06	kg
Lead II	9.72E-11	kg
m-Xylene	3.27E-06	kg
Mercury II	4.54E-12	kg
Methane, fossil	3.18E-05	kg
Methyl ethyl ketone	1.34E-08	kg
Nickel II	4.54E-09	kg
Nitrogen oxides	7.48E-05	kg
NMVOOC, non-methane volatile organic compounds	6.86E-05	kg
o-Xylene	7.84E-07	kg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	2.25E-09	kg
Particulate Matter, < 2.5 um	1.03E-06	kg
Pentane	8.75E-06	kg
Propane	5.62E-06	kg
Propylene	1.48E-07	kg
Propylene oxide	1.03E-06	kg
Selenium IV	6.48E-10	kg
Styrene	2.71E-07	kg
Sulfur dioxide	1.30E-06	kg
Toluene	7.58E-06	kg
Zinc II	6.48E-08	kg

## Anexo 4. Resultados del Análisis de Ciclo de Vida

Tabla 6 Resultados del ACV por kilómetro recorrido. Comparación de cuatro escenarios de combustible: gasolina, mezcla E10 con etanol de maíz (EE.UU.), mezcla E10 con etanol de caña de azúcar (Guatemala) y vehículo eléctrico (red eléctrica 2025).

Impact categories	Unit	Vehículo E10 - GTM	Vehículo E10 - USA	Vehículo eléctrico	Vehículo gasolina
Acidification: terrestrial no LT	kg SO <sub>2</sub> -Eq	3.30E-04	6.90E-04	6.10E-04	5.80E-04
Climate change no LT	kg CO <sub>2</sub> -Eq	2.89E-01	3.16E-01	9.49E-02	3.22E-01
Ecotoxicity: freshwater no LT	kg 1,4-DCB-Eq	5.06E-05	2.50E-04	3.11E-05	3.64E-05
Ecotoxicity: marine no LT	kg 1,4-DCB-Eq	3.20E-04	5.80E-04	3.00E-04	3.40E-04
Ecotoxicity: terrestrial no LT	kg 1,4-DCB-Eq	3.44E-01	4.03E-01	2.92E-01	3.89E-01
Energy resources: non-renewable, fossil no LT	kg oil-Eq	8.05E-02	8.77E-02	2.20E-02	9.00E-02
Eutrophication: freshwater no LT	kg P-Eq	9.20E-07	1.21E-06	3.83E-06	5.83E-07
Eutrophication: marine no LT	kg N-Eq	1.26E-05	2.60E-05	9.72E-06	2.65E-06
Human toxicity: carcinogenic no LT	kg 1,4-DCB-Eq	3.20E-04	3.20E-04	1.40E-04	2.90E-04
Human toxicity: non-carcinogenic no LT <sup>8</sup>	kg 1,4-DCB-Eq	1.62E-02	-5.05E-05	5.05E-03	6.49E-03
Ionizing radiation no LT	kBq Co-60-Eq	6.59E-05	1.20E-04	1.20E-04	7.10E-05
Land use no LT	m <sup>2</sup> *a crop-Eq	8.92E-03	2.24E-02	6.61E-03	7.50E-04
Material resources: metals/minerals no LT	kg Cu-Eq	1.70E-03	2.18E-03	3.10E-04	2.03E-03
Ozone depletion no LT	kg CFC-11-Eq	1.38E-07	2.48E-07	6.87E-08	1.28E-07
Particulate matter formation no LT	kg PM <sub>2.5</sub> -Eq	1.10E-04	2.20E-04	2.10E-04	2.00E-04
Photochemical oxidant formation: human health no LT	kg NO <sub>x</sub> -Eq	3.00E-04	6.30E-04	2.90E-04	6.00E-04
Photochemical oxidant formation: terrestrial ecosystems no LT	kg NO <sub>x</sub> -Eq	3.60E-04	6.90E-04	2.90E-04	6.70E-04
Water use no LT	m <sup>3</sup>	9.50E-04	6.40E-04	1.70E-04	1.40E-04

<sup>8</sup> El escenario E10-USA presenta un valor negativo en la categoría de toxicidad humana no carcinogénica. Bajo el modelo de USEtox este resultado refleja que la cadena de producción agrícola de maíz en Estados Unidos genera, un beneficio neto en esta categoría que se debe a las enmiendas al suelo y flujos elementales relacionados con Zinc que reducen la biodisponibilidad de otras sustancias tóxicas.

Tabla 7 Impactos ambientales de ciclo de vida considerando el consumo anual de combustible del parque vehicular guatemalteco.

Impact categories	Unit	Vehículo E10 - GTM	Vehículo E10 - USA	Vehículo eléctrico	Vehículo gasolina
Acidification: terrestrial no LT	kg SO2-Eq	7.00E+06	1.46E+07	1.27E+07	1.22E+07
Climate change no LT	kg CO2-Eq	6.07E+09	6.61E+09	1.99E+09	6.75E+09
Ecotoxicity: freshwater no LT	kg 1,4-DCB-Eq	1.06E+06	5.24E+06	6.52E+05	7.63E+05
Ecotoxicity: marine no LT	kg 1,4-DCB-Eq	6.75E+06	1.22E+07	6.36E+06	7.17E+06
Ecotoxicity: terrestrial no LT	kg 1,4-DCB-Eq	7.21E+09	8.45E+09	6.11E+09	8.16E+09
Energy resources: non-renewable, fossil no LT	kg oil-Eq	1.69E+09	1.84E+09	4.62E+08	1.89E+09
Eutrophication: freshwater no LT	kg P-Eq	1.93E+04	2.54E+04	8.02E+04	1.22E+04
Eutrophication: marine no LT	kg N-Eq	2.64E+05	5.46E+05	2.04E+05	5.56E+04
Human toxicity: carcinogenic no LT	kg 1,4-DCB-Eq	6.78E+06	6.70E+06	2.97E+06	6.13E+06
Human toxicity: non-carcinogenic no LT <sup>9</sup>	kg 1,4-DCB-Eq	3.39E+08	-1.06E+06	1.06E+08	1.36E+08
Ionising radiation no LT	kBq Co-60-Eq	1.38E+06	2.41E+06	2.56E+06	1.49E+06
Land use no LT	m2*a crop-Eq	1.87E+08	4.70E+08	1.39E+08	1.58E+07
Material resources: metals/minerals no LT	kg Cu-Eq	3.56E+07	4.58E+07	6.42E+06	4.26E+07
Ozone depletion no LT	kg CFC-11-Eq	2.90E+03	5.21E+03	1.44E+03	2.67E+03
Particulate matter formation no LT	kg PM2.5-Eq	2.37E+06	4.60E+06	4.45E+06	4.14E+06
Photochemical oxidant formation: human health no LT	kg NOx-Eq	6.28E+06	1.32E+07	6.08E+06	1.26E+07
Photochemical oxidant formation: terrestrial ecosystems no LT	kg NOx-Eq	7.49E+06	1.45E+07	6.17E+06	1.39E+07
Water use no LT	m3	1.99E+07	1.34E+07	3.65E+06	3.03E+06

Nota: Base de escalamiento, 520 millones de galones de gasolina anuales equivalentes a  $2.096 \times 10^{10}$  km/año (MEM,2025).

<sup>9</sup> El escenario E10-USA presenta un valor negativo en la categoría de toxicidad humana no carcinogénica. Bajo el modelo de USEtox este resultado refleja que la cadena de producción agrícola de maíz en Estados Unidos genera, un beneficio neto en esta categoría que se debe a las enmiendas al suelo y flujos elementales relacionados con Zinc que reducen la biodisponibilidad de otras sustancias tóxicas.

## Anexo 5. Parámetros utilizados para el modelo de Ciclo de Vida

Tabla 8 Parámetros del modelo de ciclo de vida para los cuatro escenarios analizados.

Parámetro	Cantidad	Unidad	Fuente
kg a toneladas	1000	kg/t	Universal
1 Barril (bbl)	42	Galones	mem.gob.gt
1 Galon	0.024	bbl	mem.gob.gt
1 Galon	3.785	litros	
<b>Escenario   Línea base</b>			
Volumen de Gasolina	520,249,856	Galones/año	
<b>Escenario   Mezcla E10</b>			
Porcentaje de etanol	10%	%	mem.gob.gt
Volumen de Gasolina	468,224,870	Galones/año	
Volumen de etanol	52,024,986	Galones	
Densidad de gasolina	0.740	kg/l	
LHV gasolina	43.5	MJ/kg	
Densidad del etanol	0.789	kg/l	
LHV etanol	26.8	MJ/kg	
<b>Distancias de transporte</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Fuente</b>

Houston, TX - Guatemala	1,800	km	Google maps
Masa de gasolina transportada	1,457,326	t gasolina	Estimado
Unidad funcional gasolina	2,623,187,434	tkm	Estimado
Masa de etanol transportado	155,382	t etanol	Estimado
Unidad funcional etanol	279,688,498	tkm	Estimado
<b>Modelo del vehiculo de Gasolina: transport, passenger, car, petrol, medium size, EURO 3   transport, passenger, car, petrol, medium size, EURO 3   Cutoff, U</b>			
Consumo de gasolina [kg]	0.070	kg/km	Ecoinvent 3.11
Consumo de gasolina [l]	0.094	l/km	
Consumo de gasolina [gal]	0.025	gal/km	
Eficiencia [kg]	14.4	km/kg	Ecoinvent 3.11
Eficiencia [litros]	10.6	km/litro	
Eficiencia [galones]	40.3	km/gal	
Energía necesaria	3.02	MJ	
Distancia total	20,963,658,948	km	

**Modelo del vehiculo E10: transport, passenger, car, petrol E10 Blend, medium size, EURO 3 | transport, passenger, car, petrol, medium size, EURO 3 | Cutoff, U**

Volumen de gasolina	90%	%	Estimación
Volumen de etanol	10%	%	Estimación
Densidad Mezcla E10	0.745	kg/l	Estimación
<b>Masa de combustibles en Mezcla E10</b>			
Gasolina	0.894	kg gasolina/kg E10	Estimación
Etanol	0.106	kg etanol/kgE10	Estimación
Energía en Mezcla E10	41.7	MJ	Estimación
Factor de ajuste por energía	104%	%	Estimación
Cantidad de combustible E10	0.0725	kg E10	Estimación
Cantidad de gasolina	0.065	kg gasolina	Estimación
Cantidad de etanol	0.008	kg etanol	Estimación
Efficiencia Vehículo E10 [kg]	13.8	km/kg	Estimación
Efficiencia Vehículo E10 [litros]	10.3	km/l	Estimación
Efficiencia Vehículo E10 [galones]	38.9	km/gal	Estimación
Factor de corrección para gasolina	93%	Factor	Estimación

**Factor de emision Etanol  $\text{CH}_2\text{H}_5\text{OH} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$**

Peso molecular CH <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46.1	g/mol	Quimica general
Peso molecular CO <sub>2</sub>	44.0	g/mol	Quimica general
Factor de emisión	1.91	kg CO <sub>2</sub> /kg etanol	
Factor de emision de carbono biogénico	1.47E-02	kg CO <sub>2</sub>	
<b>Estimación de tiempo de vida de un vehículo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Fuente</b>
Masa del Vehículo	8.00E-03	kg/km	Dataset Ecoinvent 3.11 transport, passenger, car, petrol, medium size, EURO 3 - RoW -
Peso promedio del vehículo	1,600	kg	Dataset Ecoinvent 3.11 transport, passenger, car, petrol, medium size, EURO 3 - RoW -
Vida útil del vehículo	150,000	km	Estimación
Factor de emisión	0.225	kg CO <sub>2</sub> e/km	Dataset Ecoinvent 3.11 transport, passenger, car, petrol, medium size, EURO 3 - RoW -
Emisiones totales por vehículo	33,735	kg CO <sub>2</sub> e/vehículo	Estimación
<b>Parametros para estimar la huella de agua ISO14046</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Fuente</b>
Huella de agua caña de azucar	115	m <sup>3</sup> /t caña de azucar	<a href="https://guatecana.com/wp-content/uploads/2024/10/Estudio-de-caso-AIA-ODS06.pdf">https://guatecana.com/wp-content/uploads/2024/10/Estudio-de-caso-AIA-ODS06.pdf</a>
% de agua usada irrigación	19%	%	<a href="https://guatecana.com/wp-content/uploads/2024/10/Estudio-de-caso-AIA-ODS06.pdf">https://guatecana.com/wp-content/uploads/2024/10/Estudio-de-caso-AIA-ODS06.pdf</a>
Agua de irrigación	21.7	m <sup>3</sup> /t caña de azucar	Estimado
Agua de irrigación para dataset	0.022	m <sup>3</sup> /kg	Estimado
Tasa de Evapotranspiración (emission to air)	43%	%	Basado en dataset de ecoinvent para Colombia
Tasa de Agua infiltrada (groundwater)	46%	%	Basado en dataset de ecoinvent para Colombia
Tasa de Agua de escorrentia (surface water)	11%	%	Basado en dataset de ecoinvent para Colombia
Evapotranspiración (emission to air)	9.32E-03	m <sup>3</sup> /kg	Estimado
Agua infiltrada (groundwater)	9.88E-03	m <sup>3</sup> /kg	Estimado

Agua de escorrentia (surface water)	2.47E-03	m3/kg	Estimado
<b>Parametros del vehículo eléctrico - transport, passenger, car, electric GLO</b>			
	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Fuente</b>
Eficiencia	0.1999	kWh/km	<a href="https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/3265/documentation">https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/3265/documentation</a>