

Trabajo Fin de Máster

# **Cuantificación y localización de impactos ambientales del transporte en automóvil**

**Iñaki Sasia**

(Curso 2020/2021)



Universidad del País Vasco  
Euskal Herriko Unibertsitatea

Tutor/a

Gorka Bueno e Iker Etxano

---

Hegoa. Trabajos Fin de Máster, n.º 52

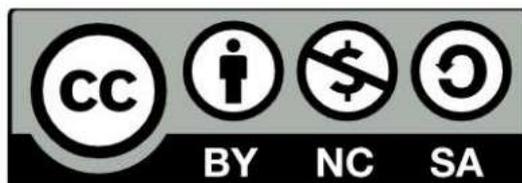
---

Hegoa  
[www.hegoa.ehu.es](http://www.hegoa.ehu.es)  
✉ [hegoa@ehu.es](mailto:hegoa@ehu.es)

UPV/EHU. Edificio Zubiria Etxea  
Avenida Lehendakari Agirre, 81  
48015 Bilbao  
Tel.: (34) 94 601 70 91 --- Fax.: (34) 94 601 70 40

UPV/EHU. Biblioteca del Campus de Álava.  
Nieves Cano, 33  
01006 Vitoria-Gasteiz  
Tfno. / Fax: (34) 945 01 42 87

UPV/EHU. Centro Carlos Santamaría.  
Plaza Elhuyar, 2  
20018 Donostia-San Sebastián  
Tfno.: (34) 943 01 74 64



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-Compartirigual 3.0 Unported](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/)

**Trabajo Fin de Máster en Globalización y Desarrollo**

# **Cuantificación y Localización de Impactos Ambientales del Transporte en Automóvil**

Autor: Iñaki Sasia

Directores: Gorka Bueno e Iker Etxano

Bilbao, 10 de septiembre de 2021



*Extensión del trabajo: 77 páginas (24.386 palabras)*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN Y RELEVANCIA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTO ACTUAL Y ESTADO DEL ARTE.....	1
1.2. PROBLEMÁTICA DETECTADA: JUSTIFICACIÓN Y RETOS DE LA INVESTIGACIÓN ...	4
1.3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....	6
1.3.1. OBJETIVOS PRINCIPALES .....	6
1.3.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS .....	6
1.3.3. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN .....	6
1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO .....	6
1.5. METODOLOGÍA UTILIZADA .....	7
<b>2. DEL PEAK OIL AL PEAK ALL DEL TRANSPORTE EN AUTOMÓVIL.....</b>	<b>8</b>
2.1. CRISIS ENERGÉTICA GLOBAL Y AGOTAMIENTO DE RECURSOS MATERIALES .....	9
2.1.1. CONCEPTO DE DESARROLLO .....	9
2.1.2. PICO DE EXTRACCIÓN .....	10
2.1.3. TASA DE RETORNO ENERGÉTICO .....	13
2.2. USO DE RECURSOS E IMPACTOS DEL TRANSPORTE EN AUTOMÓVIL .....	15
2.2.1. ENERGÍA, RECURSOS MATERIALES E IMPACTOS GLOBALES .....	16
2.2.2. DEUDA ECOLÓGICA Y CONFLICTOS SOCIOECOLÓGICOS.....	18
<b>3. ESTUDIO DE IMPACTOS DEL TRANSPORTE EN AUTOMÓVIL MEDIANTE LCA .....</b>	<b>20</b>
3.1. ALCANCE .....	20
3.1.1. DEFINICIÓN DEL SISTEMA DEL PRODUCTO .....	20
3.1.2. ETAPAS DE LCA CONTEMPLADAS.....	21
3.1.3. MÉTODO DE LCIA UTILIZADO .....	22
3.1.4. CATEGORÍAS DE IMPACTO CONSIDERADAS .....	22
3.1.5. SISTEMAS DE PRODUCTO ECOINVENT ELEGIDOS PARA EL CASO DE ESTUDIO .....	24
3.2. ANÁLISIS DE IMPACTOS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE SU CUANTIFICACIÓN ....	26
3.2.1. PRESENTACIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS .....	26
3.2.2. ANÁLISIS DETALLADO POR CATEGORÍAS DE IMPACTO Y ASPECTOS.....	31
3.2.2.1. CATEGORÍA DE CAMBIO CLIMÁTICO .....	32

3.2.2.2. CATEGORÍA DE TOXICIDAD HUMANA .....	33
3.2.2.3. CATEGORÍA DE AGOTAMIENTO DE FÓSILES .....	35
3.2.2.4. CATEGORÍA DE AGOTAMIENTO DE METALES .....	36
3.2.2.5. CATEGORÍA DE AGOTAMIENTO DE AGUA.....	37
3.2.2.6. CATEGORÍA DE OCUPACIÓN DE TIERRAS AGRÍCOLAS.....	39
3.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO FINAL DE LOS IMPACTOS OBTENIDOS.....	40
3.2.3.1. COMPARATIVA DE IMPACTOS POR TIPO DE VEHÍCULO .....	40
3.2.3.2. COMPARATIVA DE IMPACTOS POR ASPECTO .....	41
3.3. ANÁLISIS DE IMPACTOS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE SU LOCALIZACIÓN.....	43
3.3.1. PRESENTACIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS .....	43
3.3.2. ANÁLISIS DETALLADO POR PROCESOS .....	49
3.3.2.1. PROCESOS RELACIONADOS CON EL URANIO.....	49
3.3.2.2. PROCESOS RELACIONADOS CON LOS METALES DEL GRUPO DEL PLATINO .....	51
3.3.2.3. PROCESOS RELACIONADOS CON EL COBALTO.....	52
3.3.2.4. PROCESOS RELACIONADOS CON EL PETRÓLEO.....	53
3.3.3. ANÁLISIS DETALLADO POR ASPECTOS.....	54
<b>4. ESTUDIO DE IMPACTOS DEL TRANSPORTE EN AUTOMÓVIL DESDE UNA PERSPECTIVA GLOBAL .....</b>	<b>56</b>
4.1. SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA .....	56
4.2. AGOTAMIENTO DE RECURSOS.....	58
4.3. DEUDA ECOLÓGICA .....	60
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>62</b>
5.1. GRADO DE CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS .....	63
5.2. CONTRASTE DE HIPÓTESIS .....	63
5.3. REFLEXIONES FINALES .....	64
<b>6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>68</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Impactos del automóvil a lo largo de su ciclo de vida. ....	4
Tabla 2. TRE de las principales energías renovables. ....	14
Tabla 3. Coches de pasajeros en uso en Europa (2015-2019). ....	15
Tabla 4. Etapas del ciclo de vida de un producto. ....	21
Tabla 5. Impactos del transporte en automóvil para desplazamientos de 1 km. ....	26
Tabla 6. Factores de normalización de impactos per cápita anuales. ....	28
Tabla 7. Impactos del transporte en automóvil normalizados respecto a los valores de referencia per cápita calculados por ReCiPe para el año 2008 a nivel mundial. ....	29
Tabla 8. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de cambio climático (kg CO <sub>2</sub> eq en un desplazamiento de 10.000 km). ....	32
Tabla 9. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de toxicidad humana (kg 1,4-DB eq en un desplazamiento de 10.000 km). ....	34
Tabla 10. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de agotamiento de fósiles (kg petróleo eq en un desplazamiento de 10.000 km). ....	36
Tabla 11. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de agotamiento de metales (kg Fe eq en un desplazamiento de 10.000 km). ....	37
Tabla 12. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de agotamiento de agua (m <sup>3</sup> en un desplazamiento de 10.000 km). ....	38
Tabla 13. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de ocupación de tierras agrícolas (m <sup>2</sup> a en un desplazamiento de 10.000 km). ....	39
Tabla 14. Resumen de impactos relativos por vehículo y categoría en escala adimensional de 0 a 10. ....	41
Tabla 15. Localización de impactos por región y categoría. ....	46
Tabla 16. Localización de impactos por categorías en el Norte y Sur Globales. ....	48
Tabla 17. Mercado de cotización de metales preciosos. ....	51

Tabla 18. Localización de procesos relacionados con los metales del grupo del platino. .....	52
Tabla 19. Localización del proceso de producción de petróleo en tierra firme.....	53
Tabla 20. Localización de impactos por aspecto y tipo de vehículo. ....	54
Tabla 21. Coches de pasajeros en uso en Europa por tipo de motor (2019). ....	55
Tabla 22. Listado de algunos de los procesos que intervienen en el ciclo de vida del automóvil.....	57

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Países del Sur Global.....	1
Ilustración 2. Emisiones de CO <sub>2</sub> en toneladas per cápita. ....	2
Ilustración 3. Estimaciones de extracción de petróleo y proyección futura .....	11
Ilustración 4. Estimaciones de extracción de gas y proyección futura.....	11
Ilustración 5. Estimaciones de extracción de carbón y proyección futura. ....	11
Ilustración 6. El Pico de Hubbert aplicado a minerales en función de la disponibilidad de recursos. ....	12
Ilustración 7. Relación entre la TRE y la energía neta. ....	13
Ilustración 8. TRE del carbón, gas y petróleo. ....	14
Ilustración 9. Emisión de gases de efecto invernadero por sectores en la UE-27 (2018). .....	16
Ilustración 10. Consumo de energía por sectores en la UE-27 (2018). ....	17
Ilustración 11. Principales países proveedores de materias primas fundamentales a la UE.....	18
Ilustración 12. Categorías de impacto <i>midpoint</i> y áreas de protección <i>endpoint</i> . ....	24
Ilustración 13. Impactos del transporte en automóvil en escala adimensional de 0 a 10. .....	27
Ilustración 14. Categorías del transporte en automóvil con mayor impacto (> 1x) que los valores de referencia per cápita calculados por ReCiPe para el año 2008 a nivel mundial. ....	30
Ilustración 15. Categorías del transporte en automóvil con menor impacto (< 1x) que los valores de referencia per cápita calculados por ReCiPe para el año 2008 a nivel mundial. ....	30
Ilustración 16. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de cambio climático (kg CO <sub>2</sub> eq en un desplazamiento de 10.000 km). ....	32
Ilustración 17. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de toxicidad	

humana (kg 1,4-DB eq en un desplazamiento de 10.000 km).....	34
Ilustración 18. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de agotamiento de fósiles (kg petróleo eq en un desplazamiento de 10.000 km). .....	35
Ilustración 19. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de agotamiento de metales (kg Fe eq en un desplazamiento de 10.000 km). .....	37
Ilustración 20. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de agotamiento de agua (m <sup>3</sup> en un desplazamiento de 10.000 km). .....	38
Ilustración 21. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de ocupación de tierras agrícolas (m <sup>2</sup> a en un desplazamiento de 10.000 km). .....	39
Ilustración 22. Resumen de impactos relativos por vehículo y categoría en escala adimensional de 0 a 10. ....	40
Ilustración 23. Resumen de impactos por categoría desglosados por vehículo y aspecto. ....	42
Ilustración 24. Distribución de las localizaciones por defecto de los procesos deecoinvent.....	45
Ilustración 25. Localizaciones por defecto de los procesos deecoinvent a nivel de país. ....	45
Ilustración 26. Localización geográfica de impactos en la categoría de agotamiento de metales. ....	50
Ilustración 27. Evolución del consumo mundial de energía primaria por fuentes (1800-2016). ....	57
Ilustración 28. Evolución de la explotación mundial de recursos naturales (1900-2008). ....	58
Ilustración 29. Materiales utilizados en las diferentes tecnologías del sector de la <i>e-mobility</i> . ....	59
Ilustración 30. Variaciones de masa en los elementos contenidos en un vehículo eléctrico con respecto a un vehículo de combustión. ....	60
Ilustración 31. Emisiones de CO <sub>2</sub> por medio de transporte en la UE-27 (2016). ....	61
Ilustración 32. Evolución de las emisiones de CO <sub>2</sub> por sector en la UE-27 (2016). ....	61

## 1. INTRODUCCIÓN Y RELEVANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

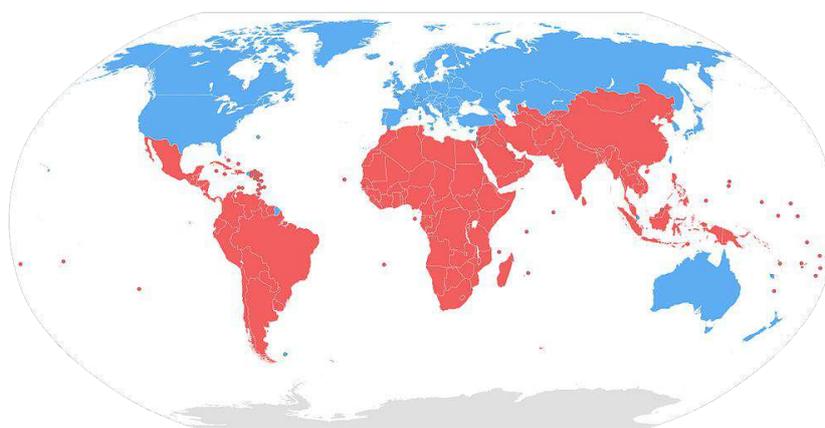
Se describe a continuación el marco contextual en el que se desarrolla el presente trabajo incidiendo en los principales aspectos que lo justifican y hacen relevante, así como en los retos que plantea la investigación realizada.

### 1.1. CONTEXTO ACTUAL Y ESTADO DEL ARTE

La creciente preocupación por los efectos que desde un punto de vista medioambiental tiene la actividad humana, empezó a adquirir una dimensión global en los años 70 del siglo XX. Comenzó entonces a tomar forma un movimiento de carácter político y social denominado ecologismo que defendía la necesidad de proteger el medio ambiente, incorporando a los discursos clásicos sobre sostenibilidad vinculados al crecimiento y desarrollo humanos, elementos relacionados con un enfoque no solo económico y social en términos equitativos, sino también ecológico en términos viables y soportables.

En la misma época en la que surge el movimiento ecologista, comienza también a utilizarse el concepto de *Sur* para referirse a los países que tienen una historia interconectada de colonialismo, neocolonialismo y una estructura social y económica con grandes desigualdades en calidad de vida o acceso a recursos. Posteriormente, entrado ya el siglo XXI, comienza a afianzarse el uso de la terminología *Sur Global* para referirse a estos países, aunque continúa siendo frecuente encontrar la utilización de otras etiquetas tradicionalmente valorativas como *tercer mundo*, *países subdesarrollados* o *países en vías de desarrollo*.

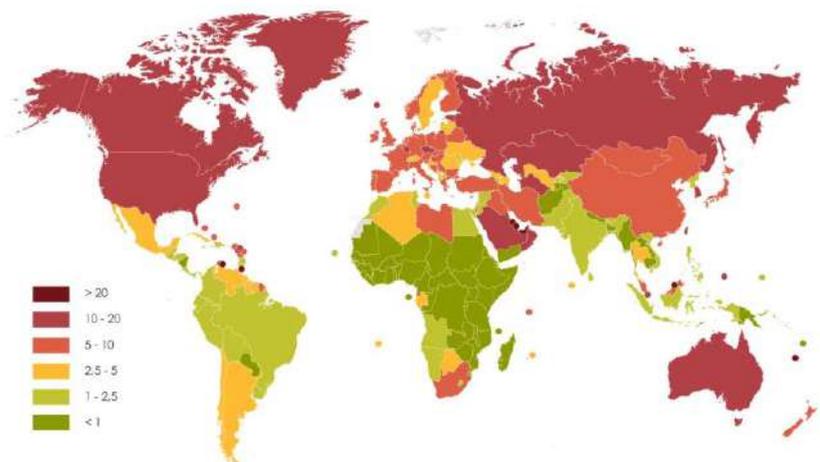
Ilustración 1. Países del Sur Global.



Fuente: Wikipedia, 2021.

A principios de los años 90 del siglo XX, organizaciones ecologistas de todo el mundo comienzan a denunciar la existencia de una deuda ecológica desde la que se pretende invertir definitivamente el papel históricamente asignado a los países del mundo en función de su deuda externa. De este modo, los países del Sur Global reclaman su papel de acreedores en contraposición a los del Norte Global, cuyo enriquecimiento a lo largo de la historia se ha fundamentado en un constante saqueo de los países del Sur Global con el objetivo de mantener un modelo de vida totalmente insostenible que les sitúa inequívocamente en el papel de deudores. Esta dinámica de relación entre Norte y Sur Globales ha provocado graves consecuencias como la crisis energética global o el agotamiento de los recursos materiales, aspectos directamente relacionados, a su vez, con la agudización de conflictos socioecológicos por todo el mundo que de nuevo tienen una desigual incidencia entre los diferentes países de ambos bloques.

**Ilustración 2. Emisiones de CO<sub>2</sub> en toneladas per cápita.**



Fuente: Global Carbon Atlas, 2017.

Tal y como pone de manifiesto la Ilustración 2, tomando como referencia las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita a nivel planetario resulta evidente el desequilibrio existente entre Norte y Sur Globales, observable en el contraste que ofrecen la realidad reflejada por América del Sur, África y Asia del Sur frente a la ofrecida por América del Norte, Europa, Asia del Norte y Australia. Las emisiones de CO<sub>2</sub> son solo un ejemplo del impacto que provoca la actividad humana en el medio ambiente, en este caso directamente relacionado con el problema del cambio climático, pero existen muchos otros vinculados a la contaminación de ecosistemas o el agotamiento de recursos naturales igualmente preocupantes para la conservación del medio ambiente. Esta situación genera numerosos conflictos socioecológicos a lo largo y ancho del planeta, muchos de los cuales se producen de nuevo en los países del Sur Global. El Atlas de Justicia Ambiental (<https://ejatlas.org>) recogía en agosto de 2021 más de 3.300 incidentes específicos a nivel mundial. Por citar solo algunos de los casos más

relevantes, cabrían destacar:

- ✓ La masiva extracción de crudo en el delta del río Níger desde su descubrimiento en 1957, que ha tenido como consecuencia unos enormes impactos ambientales y sociales, así como un altísimo nivel de violencia que ha convertido la región en una de las zonas más pobres, contaminadas y militarizadas de África.
- ✓ El débil marco legal que comporta la Convención de Basilea (1989) sobre el control de los movimientos transfronterizos y eliminación de desechos peligrosos, que ha propiciado la existencia de un nuevo “colonialismo tóxico” que tiene su máximo exponente en casos como el de Somalia, en cuya costa se vierten anualmente toneladas de residuos tóxicos procedentes de la UE y otros países del Norte Global (Common Community Care, 2006).
- ✓ El caso de la deforestación del Amazonas, que probablemente constituye el ejemplo más emblemático y conocido del irreparable daño que causa la actividad humana cuando se rige por criterios capitalistas orientados exclusivamente a la obtención de un beneficio económico a corto plazo, sin considerar aspectos relacionados con la sostenibilidad o la justicia ecológica y social.

Retomando el contexto histórico descrito inicialmente, es relevante señalar que en la época en la que comenzaron a tomar forma las primeras reflexiones de carácter ecologista empezaron también a diseñarse diversas metodologías cuyo objetivo era calificar y cuantificar los impactos ambientales derivados de la actividad productiva. Una de las que ha tenido un gran desarrollo e implantación a nivel mundial a lo largo de los últimos cincuenta años ha sido LCA (*Life Cycle Assessment* - Análisis de Ciclo de Vida), que hoy en día constituye una metodología muy asentada que permite estimar con rigor los impactos ambientales derivados de la actividad humana, cumpliendo así su principal objetivo. No obstante, en la actualidad, muchos de los análisis realizados con LCA continúan sin incidir de forma precisa en la dimensión geográfica. En este sentido, si bien es cierto que LCA es capaz de ofrecer como resultado complementario la localización de los impactos ambientales identificados a lo largo del ciclo de vida de un producto o servicio, es igualmente cierto que la información que ofrecen la mayoría de los estudios basados en LCA en relación con este aspecto es, normalmente, mucho más limitada que la proporcionada en sus dimensiones cualitativa y cuantitativa.

El escenario descrito presenta así el hilo conductor de la temática fundamental del presente trabajo, que estará centrado en el análisis de la problemática generada por los impactos medioambientales provocados por la actividad humana desde la doble perspectiva de su valoración cuantitativa, por un lado, y de su dimensión geográfica, por otro.

## 1.2. PROBLEMÁTICA DETECTADA: JUSTIFICACIÓN Y RETOS DE LA INVESTIGACIÓN

El contexto descrito pone por tanto de manifiesto que la geográfica es una dimensión de análisis absolutamente esencial en cualquier estudio sobre desarrollo y sostenibilidad en el marco de la globalización. Se identifica así la primera de las necesidades que justifica la realización de este trabajo, como es descubrir las deficiencias existentes en la utilización práctica de LCA como metodología útil y aplicable en estudios relacionados con las temáticas señaladas (deuda ecológica, deuda social, justicia ambiental, etc.) en los que es esencial localizar con precisión los impactos ambientales derivados de la actividad productiva de industrias y empresas transnacionales del Norte Global que afectan a los países del Sur Global.

El segundo aspecto que justifica el desarrollo de este trabajo se deriva igualmente del contexto descrito inicialmente e incide sobre la necesidad de cuantificar los impactos ambientales derivados de la actividad productiva humana. Desde esta perspectiva se ha elegido el transporte en automóvil como caso de estudio, ya que resulta sumamente significativo por el hecho de ser un servicio habitual de uso muy extendido que a la vez conlleva un gran impacto medioambiental a lo largo de las seis etapas de su ciclo de vida: adquisición de materias primas, fabricación, distribución, consumo, gestión de residuos y reciclado (ver Tabla 4).

**Tabla 1. Impactos del automóvil a lo largo de su ciclo de vida.**

Branch levels Environmental Dimensions	Raw materials extraction, production			Use phase		End of life
	Raw materials	Pre-assembly	Assembly	Driving	Infra-structure	Disposal
Use of resources	High	Moderate	Low	Low	High	Low
Energy use and CO <sub>2</sub> emissions	High	Moderate	Low	High	Moderate	Low
Land use and impact on soil and water	High	Moderate	Low	Low	High	Low
Solid waste	High	Moderate	Low	Low	High	Moderate
Air pollutants	High	Moderate	Low	High	Moderate	Low
Noise pollution	Low	Low	Low	High	Moderate	Low
Direct harm on humans (e.g., accidents)	Low	Low	Low	High	Moderate	Low

 High environmental impacts

 Moderate environmental impacts

 Low environmental impacts

Fuente: Bolli, A., 2000.

La Tabla 1 refleja de forma cualitativa que los principales impactos del automóvil se producen fundamentalmente en la fase de adquisición de materias primas, así como en la de su consumo o utilización. Con relación a este segundo aspecto no debe olvidarse el enorme impacto que tienen la construcción y el mantenimiento de las infraestructuras viarias necesarias para el uso de vehículos que, además, tan llamativamente alteran el paisaje.

Por otra parte, es un servicio para el que existen múltiples alternativas y que se presta también a un análisis segmentado por tipo de vehículo, ya que sus impactos varían notablemente en función del motor (gasolina, diésel o eléctrico), tanto en su vertiente cualitativa y cuantitativa como geográfica. Estas características convierten así el transporte en automóvil en una elección de especial interés para el trabajo, teniendo particularmente en cuenta la clara apuesta que gobiernos y multinacionales vinculadas al sector vienen realizando desde hace años por una transición ecológica en el transporte basada fundamentalmente en la promoción del vehículo eléctrico como alternativa al de combustión. La investigación realizada se aproxima con espíritu crítico a esta propuesta de transición hacia la movilidad eléctrica o *e-mobility*, pues identifica de antemano algunas problemáticas recurrentes en estrategias pseudoecológicas similares a la planteada, que enlazan de lleno, además, con el doble hilo conductor del trabajo.

Por un lado, la estrategia planteada omite desde la perspectiva cuantitativa el incuestionable hecho de que el planeta tiene unos límites biofísicos. En primer lugar, la tecnología de motor eléctrico es altamente intensiva en el consumo de recursos escasos como el litio, el níquel o el cobalto (Iglesias-Émbil, M. et al., 2020). Este hecho perpetúa prácticas extractivistas que no dejan de sustituir determinados impactos, como la emisión de los gases de efecto invernadero provocada por el uso de vehículos de combustión, por otros, como el agotamiento de metales propiciado por los eléctricos. En segundo lugar, resulta razonable presumir que la propia generación de la energía eléctrica necesaria para la recarga de las baterías de los vehículos eléctricos no resulte inocua desde un punto de vista de impacto medioambiental, ni siquiera en el caso de que el mix energético utilizado para su producción provenga fundamentalmente de energías renovables.

Por otro lado, desde una perspectiva geográfica, se anticipa que la transición hacia la *e-mobility* tendrá de nuevo un impacto desigual entre el Norte y Sur Globales. Con relación a los tres metales mencionados anteriormente, Bolivia, Argentina y Chile se configuran como el conocido Triángulo del Litio, mientras que Indonesia y Filipinas concentran las mayores reservas de níquel del planeta y la República Democrática del Congo las de cobalto (Comisión Europea, 2020d). Además, China se constituye como la gran reserva mundial de las denominadas tierras raras (Comisión Europea, 2020d), elementos químicos igualmente necesarios en la fabricación de motores eléctricos:

- ✓ Escandio.
- ✓ Itrio.
- ✓ Lantánidos ligeros (tierras raras ligeras o TRL): lantano, cerio, praseodimio, neodimio, promecio y samario.
- ✓ Lantánidos pesados (tierras raras pesadas o TRP): europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio.

Como ejemplo del impacto medioambiental que la extracción de este tipo de minerales

está provocando en China, cabe citar el caso de la mina de Bayan Obo, situada en el oeste de Mongolia Interior, que concentra el 62% de la producción mundial de estos minerales (United States Geological Survey, 2021) y cuya explotación ha convertido el cercano lago Baotou en un vertedero de desechos tóxicos, muchos de ellos radiactivos.

### 1.3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Una vez justificadas la relevancia e interés de la investigación se presentan a continuación sus objetivos fundamentales, así como las hipótesis de partida que deberán ser confirmadas o refutadas a lo largo de su desarrollo.

#### 1.3.1. OBJETIVOS PRINCIPALES

[O1] Estudiar la localización de los impactos ambientales en el caso concreto del transporte en automóvil a través de la metodología LCA y analizar de forma crítica su idoneidad a la hora de ser aplicada a estudios sobre desarrollo y sostenibilidad en el ámbito de la globalización.

[O2] Comparar desde un punto de vista cuantitativo los impactos ambientales obtenidos en el estudio para vehículos gasolina, diésel y eléctrico y analizar de forma crítica los resultados obtenidos.

#### 1.3.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

[O3] Señalar la utilidad de la metodología LCA, así como sus límites, de cara a su aplicación en estudios sobre desarrollo y sostenibilidad en el ámbito de la globalización.

[O4] Identificar procesos concretos en los que las localizaciones por defecto asignadas por las fuentes de datos utilizadas en el estudio de caso no reflejan la realidad de los impactos a nivel global.

#### 1.3.3. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

[H1] Las asignaciones de localización propuestas por defecto para los procesos en el caso de estudio son específicas y reflejan el especial impacto que la industria del automóvil tiene en el Sur Global en términos de deuda ecológica.

[H2] El vehículo eléctrico no constituye una alternativa de movilidad medioambientalmente sostenible frente al uso del vehículo de combustión.

### 1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El trabajo se estructura en cinco capítulos principales:

- ✓ El capítulo 1.- “Introducción y relevancia de la investigación” enmarca el

contexto actual y estado del arte con relación a la temática elegida e identifica la problemática que justifica la investigación y sus retos. Tras plantear los objetivos e hipótesis del estudio, en el último apartado del capítulo se detallan las especificidades de la metodología utilizada a lo largo del trabajo.

- ✓ El capítulo 2.- “Del *peak oil* al *peak all* del transporte en automóvil” aborda en primera instancia la problemática de crisis energética global y agotamiento de recursos materiales desde una perspectiva general, para centrarse a continuación de forma más concreta en el caso de estudio del transporte en automóvil.
- ✓ El capítulo 3.- “Estudio de impactos del transporte en automóvil mediante LCA” aborda propiamente el estudio de caso, acotando en primer lugar el alcance de este y presentando a continuación los resultados obtenidos desde las dos perspectivas de estudio escogidas:
  - Análisis de impactos desde el punto de vista de su cuantificación (desarrollado en el capítulo 3.2).
  - Análisis de impactos desde el punto de vista de su localización (desarrollado en el capítulo 3.3).
- ✓ El capítulo 4.- “Estudio de impactos del transporte en automóvil desde una perspectiva global” concluye el estudio de caso completando las perspectivas cuantitativa y geográfica trabajadas previamente a través de la metodología LCA con un enfoque más global que profundiza en tres cuestiones fundamentales:
  - Sostenibilidad energética (desarrollado en el capítulo 4.1).
  - Agotamiento de recursos (desarrollado en el capítulo 4.2).
  - Deuda ecológica (desarrollado en el capítulo 4.3).
- ✓ El capítulo 5.- “Conclusiones” cierra el trabajo resumiendo las principales conclusiones del estudio de caso y realizando una evaluación crítica de todo el proceso realizado para poder calificar su interés y utilidad prácticos, así como identificar los problemas detectados y las limitaciones de uso en estudios sobre desarrollo y sostenibilidad en el ámbito de la globalización. En este capítulo se valora también el grado de cumplimiento de los objetivos planteados al comienzo del estudio y se contrastan las hipótesis de la investigación.

Finalmente, se incorpora un último capítulo 6.- “Bibliografía” que ofrece una relación de las principales fuentes de datos, artículos, estudios y documentos de referencia utilizados en el desarrollo del trabajo.

## 1.5. METODOLOGÍA UTILIZADA

La metodología utilizada para el estudio se basa en LCA, si bien mantiene en todo momento una perspectiva crítica con respecto a su aportación de valor como posible herramienta de apoyo generalizable en estudios sobre desarrollo y sostenibilidad en el marco de la globalización.

La investigación está guiada por un estudio de caso centrado en el transporte en automóvil y se ha realizado mediante la herramienta software OpenLCA v1.10.3, con ecoinvent v371\_cutoff\_unit\_lcia\_20210104 como base de datos de LCI (*Life Cycle Inventory* - Inventario de Ciclo de Vida) y ReCiPe 2014 v1.1 para la LCIA (*Life Cycle Impact Assessment* - Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida). En el capítulo 3.1.- “Alcance” se ofrecen aspectos metodológicos más detallados con relación a los límites establecidos para el sistema del producto, las etapas de LCA contempladas, el método de LCIA utilizado y las categorías de impacto ambiental consideradas en el estudio.

Aunque OpenLCA ya incorpora potentes herramientas de filtrado, procesado y postprocesado de datos, se ha aprovechado también la funcionalidad de exportación de resultados a archivos de intercambio CSV para utilizar complementariamente las potencialidades de Microsoft Excel, tanto a nivel de visualización como de filtrado y postprocesado de segundo nivel. La complementación de ambas herramientas ha sido fundamental a la hora de poder visualizar, interpretar y obtener conclusiones durante el estudio.

Los pasos seguidos para la obtención de resultados utilizando las herramientas software señaladas, son los siguientes:

- ✓ Definir los cuatro sistemas de producto objeto del estudio que se detallan en el capítulo 3.1.5.- “Sistemas de producto ecoinvent elegidos para el caso de estudio”.
- ✓ Calcular el impacto de cada uno de ellos en las diferentes categorías señaladas en el capítulo 3.1.4.- “Categorías de impacto consideradas”.
- ✓ Presentar visualmente los datos.
- ✓ Analizar los datos desde el punto de vista de su geolocalización.
- ✓ Analizar los datos desde el punto de vista cuantitativo.
- ✓ Realizar la discusión del análisis.
- ✓ Extraer conclusiones de la discusión.

La metodología descrita se adapta perfectamente al objetivo de contrastar las hipótesis planteadas para el estudio, ya que el análisis de localización permitirá confirmar o refutar la hipótesis [H1] y el cuantitativo hacer lo propio con la [H2].

## **2. DEL PEAK OIL AL PEAK ALL DEL TRANSPORTE EN AUTOMÓVIL**

Partiendo del concepto de desarrollo, a lo largo del presente capítulo se aborda la problemática de crisis energética global y agotamiento de recursos materiales, aportando datos concretos sobre los picos de extracción de combustibles fósiles y otros recursos naturales no renovables. Posteriormente, se analiza de forma más específica el

uso de recursos en el transporte en automóvil, así como sus impactos a nivel medioambiental y socioecológico.

## **2.1. CRISIS ENERGÉTICA GLOBAL Y AGOTAMIENTO DE RECURSOS MATERIALES**

### **2.1.1. CONCEPTO DE DESARROLLO**

La problemática de crisis energética global y agotamiento de recursos materiales está íntimamente relacionada con la propia idea de desarrollo como medida de las condiciones de vida de un país. La primera aproximación a este concepto se remonta a la década los años 40 del siglo XX (Rosenstein-Rodan, P.N., 1943) y vino de la mano de la rama de la economía denominada Teoría Económica del Desarrollo. Esta visión clásica se centró básicamente en el análisis de diversos índices relacionados con el concepto de producto agregado, fundamentalmente el PIB per cápita, y daba por hecho que un mayor valor de tales indicadores reflejaría directamente el alto grado de bienestar general de la población de un país. Este enfoque urgía a los países del mundo a mantener un constante crecimiento económico que les exigía aumentar la renta o valor de los bienes y servicios finales producidos por sus economías año tras año.

Esta asociación biunívoca entre desarrollo y crecimiento económico aún subyace en muchas dinámicas de la economía global de nuestros días y tiene mucha relación con la actual crisis energética global y el problema de agotamiento de los recursos materiales, a pesar de no ser cierta ni mucho menos inocua, fundamentalmente por dos motivos. En primer lugar, porque la realidad de muchos países demuestra que el crecimiento económico no siempre implica un mayor grado de desarrollo o bienestar social en términos, por ejemplo, de aumento del empleo, mayor cohesión social, cuidado del medio ambiente, mejora de los servicios públicos o disminución de la desigualdad (Arto, I. et al., 2014, 2016). En segundo lugar, porque plantear que el camino para mejorar la calidad de vida de la población de un país es garantizar su crecimiento económico es, en cualquier caso, sencillamente insostenible en el tiempo, dado que nuestro planeta tiene límites.

Teniendo en cuenta que el crecimiento económico está asociado al incremento de ciertos indicadores relacionados con el volumen de producción, el consumo de energía, el ahorro, la inversión, la balanza comercial o el aumento del consumo per cápita, entre otros, resulta tremendamente paradójico que el aspecto que pone de manifiesto de forma más clara los límites de ese crecimiento sea, precisamente, uno de los indicadores mencionados para su propia cuantificación: el consumo de energía. Para crecer económicamente, los países deben aumentar año tras año su producción en términos de PIB, lo que les obliga a incrementar incesantemente el consumo de energía para poder conseguirlo (Fernández Durán, R. y González Reyes, L., 2014).

Esta dinámica ha provocado a lo largo de las últimas décadas una crisis energética global que actualmente no solo imposibilita a un creciente número de países mantener ese pretendido crecimiento económico constante, sino que amenaza además con agotar de forma irreversible los recursos materiales disponibles a nivel mundial, particularmente los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) (Höök, M., 2014). Existen dos indicadores fundamentales que ponen de manifiesto esta crisis energética:

- ✓ Los picos de extracción
- ✓ La tasa de retorno energético o TRE

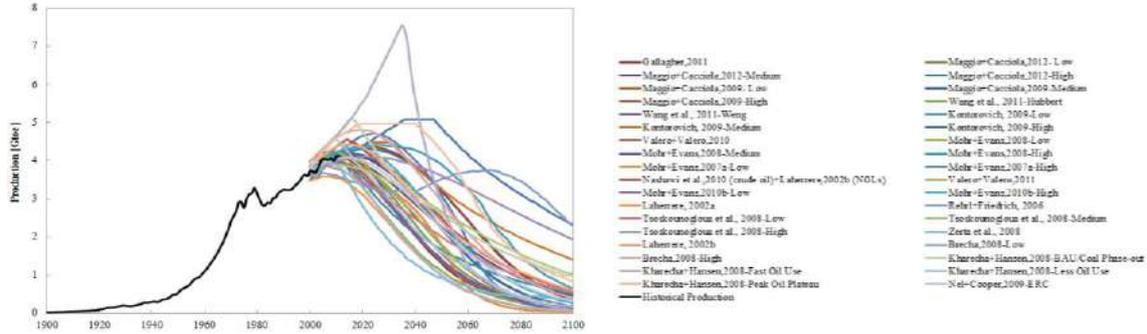
### 2.1.2. PICO DE EXTRACCIÓN

El pico de extracción de una materia prima se define como el momento en el cual se alcanza su tasa máxima de extracción global, tras el cual su pauta de producción entra en un declive terminal en términos de productividad, rentabilidad y precio asumible de mercado. Este concepto fue introducido por el geofísico estadounidense M. King Hubbert en 1956, cuando presentó su curva para el pico del petróleo o *peak oil*, vaticinando que este se alcanzaría en torno al año 2000 con una producción global de unos  $12,5 \times 10^9$  b/año (Hubbert, M.K., 1956). Si bien es cierto que la predicción de Hubbert no se cumplió ni en términos cuantitativos ni tampoco de plazo, el principal valor de su aportación fue el hecho de poner de manifiesto la existencia de límites para un crecimiento económico que es absolutamente dependiente del consumo de energía, muy especialmente de la producida en base al petróleo.

En la actualidad, aunque existen dificultades para analizar datos fiables que permitan proyectar con precisión la disponibilidad del petróleo existente a nivel mundial, un número creciente de autores aseguran que el *peak oil* es un evento que ya se ha producido (ver Ilustración 3). A pesar del aumento en las inversiones, la extracción de petróleo convencional ha disminuido claramente a nivel global y puede asegurarse que, salvo Canadá, Kazajistán e Irak, el resto de los países del mundo hace ya años que superaron su *peak oil* (Patterson, R., 2015).

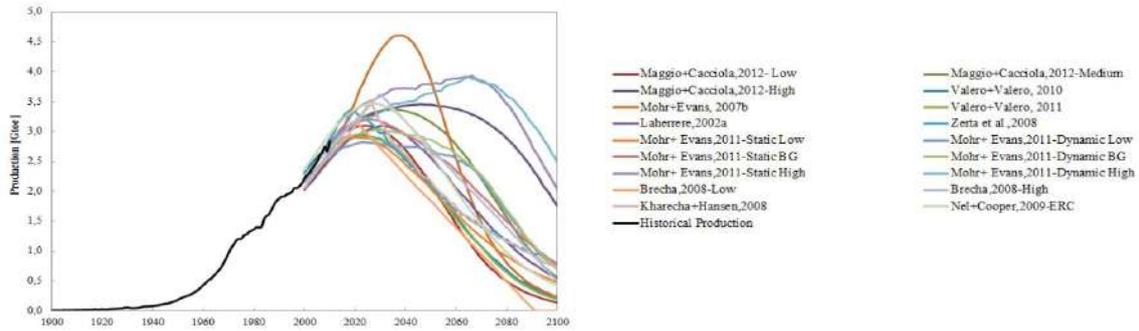
Por lo que respecta a los otros combustibles fósiles, el gas natural ofrece una realidad levemente mejor que la del petróleo, pero igualmente preocupante a muy corto plazo según la mayoría de los autores, que sitúan el *peak natural gas* en torno al año 2030. Por su parte, aunque el carbón es el combustible fósil que apunta un pico de extracción más lejano, la mayoría de los autores coinciden en que el *peak coal* difícilmente superará el año 2050.

**Ilustración 3. Estimaciones de extracción de petróleo y proyección futura**



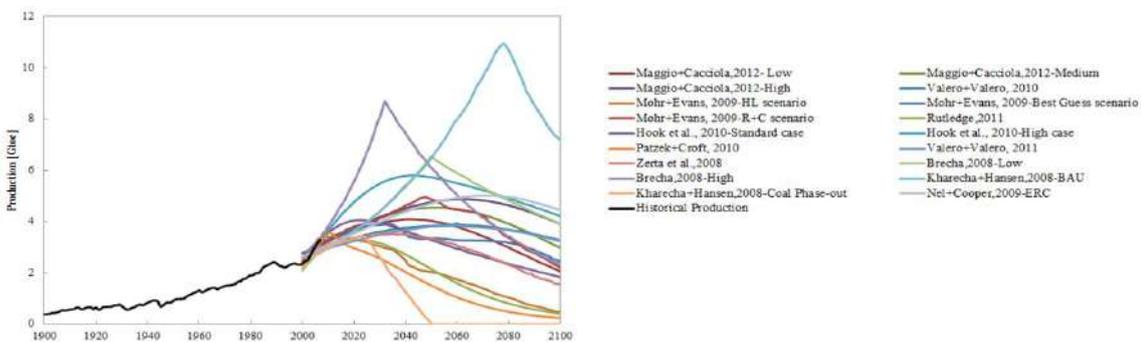
Fuente: Höök, M., 2014.

**Ilustración 4. Estimaciones de extracción de gas y proyección futura.**



Fuente: Höök, M., 2014.

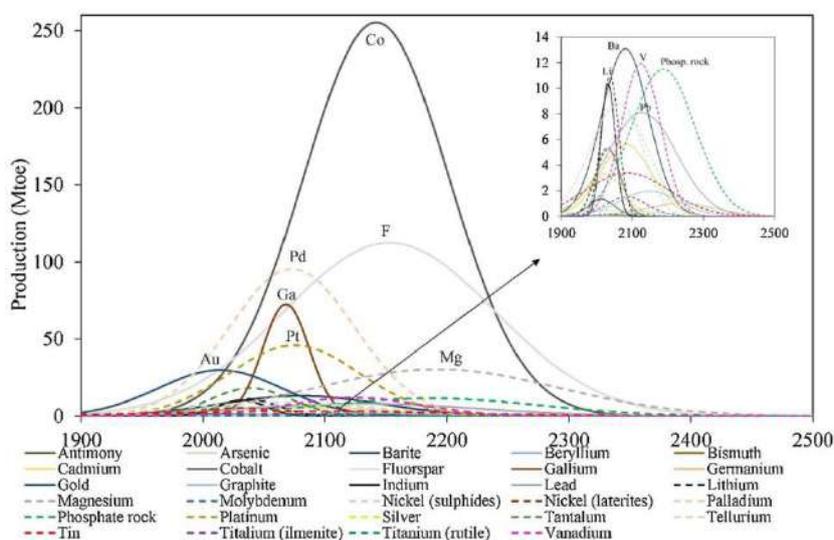
**Ilustración 5. Estimaciones de extracción de carbón y proyección futura.**



Fuente: Höök, M., 2014.

Dada la especial relevancia de los combustibles fósiles en el ámbito de la producción energética mundial, fueron estos recursos los que constituyeron el principal objeto de estudio durante los años que siguieron a la publicación de la curva de Hubbert. Con el paso del tiempo se han venido realizando numerosos estudios de picos de extracción de otros materiales, obteniendo en muchos casos resultados igualmente inquietantes, tal y como recoge la Ilustración 6. A la preocupación por los *peak fossil fuels* se une así una larga lista de amenazas que incluyen no solo innumerables recursos energéticos sino también otros recursos básicos como los minerales, el agua o los alimentos. En este contexto, el discurso del *peak oil* pasa a enmarcarse en un relato global que apunta sin ambages hacia una verdadera crisis mundial provocada por la cercanía del *peak minerals*, *peak water*, *peak food* y, en definitiva, lo que ha venido a llamarse el *peak all* (Heinberg, R., 2007). Este hecho no solo pone en entredicho las tesis que abogan por la necesidad de mantener un crecimiento económico continuado, a todas luces insostenible, como única fórmula para garantizar el desarrollo de las sociedades, sino que compromete además la propia supervivencia de la especie humana en los términos de consumo establecidos actualmente.

Ilustración 6. El Pico de Hubbert aplicado a minerales en función de la disponibilidad de recursos.



Fuente: Calvo, G. et al., 2017.

La Ilustración 6 pone de manifiesto el incuestionable hecho de que los recursos minerales también alcanzarán inevitablemente su pico de extracción, a la vez constata que en muchos de los casos este pico se producirá a corto plazo o incluso ya se ha producido. La gráfica permite avanzar también que algunos minerales de especial relevancia en la fabricación de automóviles, tales como el platino, el litio o la barita, entre otros, alcanzarán su pico de extracción a lo largo de este siglo (ver capítulo 2.2.- “Uso de recursos e impactos del transporte en automóvil”).

### 2.1.3. TASA DE RETORNO ENERGÉTICO

Como ya se ha señalado, junto al pico de extracción, el otro indicador fundamental que pone de manifiesto la crisis energética global imperante actualmente es la TRE.

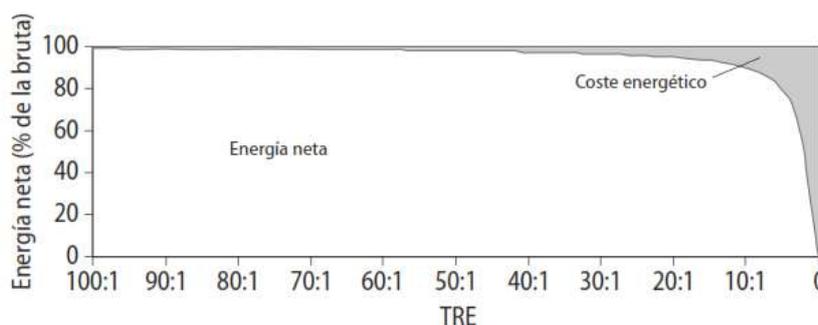
El cálculo de la energía global disponible para un determinado recurso debe considerarse en términos netos como diferencia entre su potencial energético bruto (la energía obtenible de él) y el coste energético necesario para su explotación. En este sentido, se utiliza la TRE como una medida indirecta de la exergía o cantidad de energía que puede ser aprovechada de una fuente para hacer trabajo útil. La fórmula de cálculo de la TRE responde al cociente de la energía bruta que es capaz de producir un recurso y la que es necesario aportar para explotarlo.

$$TRE = \frac{\text{Energía obtenida}}{\text{Energía invertida}}$$

Del mismo modo que se ha señalado para la estimación de los picos de extracción, aunque calcular de forma precisa la TRE de una fuente energética resulta igualmente difícil, autores como Hall y Klitgaard (2012) o De Castro (2015, 2016) aseguran que la trayectoria de este indicador para muchas fuentes es, en cualquier caso, claramente descendente. Advierten, además, de que es muy probable que la mayoría de los estudios publicados se hayan realizado observando un principio de prudencia que arroje valores de TRE sobreestimados en base a cálculos demasiado garantistas o conservadores, dada la dificultad de cálculo de este indicador.

Antes de ofrecer datos específicos sobre combustibles fósiles y otros vectores energéticos concretos, es importante señalar que la relación entre TRE y energía neta obtenida no es lineal, sino exponencial. Así, se observa que para valores de TRE >20:1, las energías neta y bruta obtenidas por la explotación de un recurso son muy similares, mientras que a partir de ese punto la energía neta cae de forma exponencial a la vez que el coste energético aumenta en la misma medida, acusando un declive definitivamente drástico a partir de TRE <10:1.

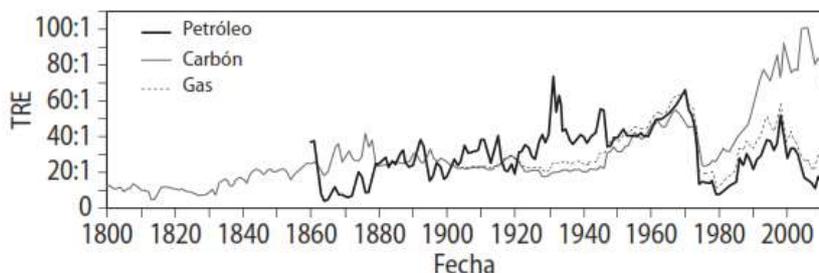
Ilustración 7. Relación entre la TRE y la energía neta.



Fuente: Morgan, T., 2013.

Es esencial no olvidar el comportamiento de esta curva a la hora de valorar cualquier información relativa a TRE, como es el caso de los combustibles fósiles.

**Ilustración 8. TRE del carbón, gas y petróleo.**



Fuente: Court, V. y Fizaine, F., 2016.

La Ilustración 8 refleja que, si bien la TRE del carbón en torno a 70:1 no es aún preocupante en términos absolutos, sí lo son las del gas natural, a punto de sobrepasar el límite 20:1 que dispara el coste energético, y la del petróleo, inmersa ya de lleno en la zona crítica con una tasa cercana a 10:1. En cualquier caso, el aspecto más preocupante no es solo el valor absoluto que reflejan dichas TRE, sino sobre todo la tendencia claramente bajista que apuntan todas ellas a lo largo de los últimos años, incluida la del carbón.

Por otra parte, aunque la transición hacia el uso de energías renovables aporta una solución evidente y necesaria al problema de la crisis energética global en lo referente a los límites marcados por los picos de extracción de combustibles fósiles, no puede decirse que constituya una medida igualmente satisfactoria en términos de TRE.

**Tabla 2. TRE de las principales energías renovables.**

Energías Renovables	TRE	
	Hall, C.A.S. et al. (2009)	Cleveland, C.J. et al. (2000)
Biogás	3 - 8	
Biodiésel de microalgas	1,5 - 3,0	
Eólica	15 - 25	
Etanol de caña de azúcar		0,8 - 1,7
Etanol de maíz	1,0 - 1,5	1,3
Fotovoltaica	10 - 30	1,7 - 10,0
Geotérmica		1,9 - 13,0
Hidroeléctrica	20 - 40	11,2
Metanol de madera		2,6
Térmica		4,2

Fuente: Hall, C.A.S. et al., 2009 y Cleveland, C.J. et al., 2000.

A pesar de las diferencias existentes entre los valores calculados por los diferentes autores, se observa, en cualquier caso, que las TRE que ofrecen hoy en día las renovables no son especialmente altas. Aunque su uso está justificado por el hecho de que el balance de energía neta obtenida resulta finalmente positivo, no puede obviarse que, por otra parte, el coste energético necesario para su producción resulta todavía

excesivamente elevado. De este modo, al margen de constatar que las energías renovables deben enfrentarse al difícil reto de optimizar drásticamente sus TRE, debe asumirse también que la humanidad debe caminar inequívocamente hacia un escenario de bajo consumo de energía, lo que necesariamente obliga a revisar los planteamientos que vinculan el desarrollo social a un crecimiento económico *ad infinitum* que conllevaría un consumo de energía asimismo creciente, claramente insostenible en el tiempo.

## 2.2. USO DE RECURSOS E IMPACTOS DEL TRANSPORTE EN AUTOMÓVIL

Tabla 3. Coches de pasajeros en uso en Europa (2015-2019).

	2015	2016	2017	2018	2019	%change 19/18
Austria	4,740,040	4,821,507	4,890,576	4,976,852	5,039,546	1.2
Belgium	5,587,415	5,669,769	5,735,280	5,782,884	5,813,771	0.5
Croatia	1,476,229	1,528,119	1,567,883	1,665,391	1,728,911	3.8
Czech Republic	5,158,516	5,368,660	5,592,738	5,802,520	5,989,538	3.2
Denmark	1,992,180	2,465,946	2,529,973	2,593,585	2,650,225	2.2
Estonia	676,592	703,151	725,944	746,464	794,926	6.5
Finland	1,612,922	2,629,482	2,668,930	2,696,334	2,729,307	0.9
France	37,458,000	37,934,000	38,371,000	38,336,000	38,215,000	-0.3
Germany	45,071,209	45,803,560	46,474,594	47,095,784	47,715,977	1.3
Greece	5,104,908	5,126,024	5,169,026	5,164,183	5,247,295	1.6
Hungary	1,192,132	3,308,495	3,467,861	3,638,374	3,809,670	4.7
Ireland	2,031,455	2,089,419	2,064,020	2,104,660	2,172,096	3.2
Italy	31,351,233	31,836,138	38,520,391	39,018,170	39,545,232	1.4
Latvia	575,685	594,295	617,797	636,671	655,875	3.2
Lithuania	1,153,859	1,190,149	1,212,154	1,238,119	1,264,084	2.1
Luxembourg	381,105	390,933	403,258	415,128	426,324	2.7
Netherlands	8,336,414	8,439,318	8,594,600	8,787,283	8,938,572	1.7
Poland	26,723,423	21,675,388	22,503,579	23,429,016	24,360,166	4.0
Portugal	4,538,000	4,600,000	4,800,000	5,015,000	5,205,000	3.8
Romania	5,153,182	5,470,579	5,696,377	6,450,750	6,801,234	7.0
Slovakia	2,037,772	2,149,972	2,228,116	2,326,787	2,391,355	2.8
Slovenia	1,116,006	1,143,218	1,192,366	1,220,814	1,245,012	2.0
Spain	25,793,348	23,300,290	23,942,022	24,520,287	25,008,216	2.0
Sweden	4,669,063	4,768,060	4,845,609	4,870,783	4,887,904	0.4
<b>EUROPEAN UNION</b>	<b>224,338,696</b>	<b>229,041,465</b>	<b>234,122,014</b>	<b>238,533,039</b>	<b>242,727,242</b>	<b>1.8</b>
Norway	1,592,324	2,639,245	2,693,021	2,720,013	2,768,990	1.8
Switzerland	4,503,865	4,571,994	4,620,630	4,665,390	4,572,188	-2.0
<b>EFTA</b>	<b>7,096,189</b>	<b>7,211,239</b>	<b>7,313,651</b>	<b>7,385,403</b>	<b>7,341,178</b>	<b>-0.6</b>
Russia	40,849,288	41,606,327	42,376,408	43,525,868	44,529,605	2.3
Turkey	16,589,337	11,317,998	12,035,978	12,398,190	12,503,049	0.8
United Kingdom	33,542,448	34,378,386	34,686,308	34,887,015	35,166,250	0.8
<b>EUROPE</b>	<b>316,415,958</b>	<b>323,555,415</b>	<b>330,534,379</b>	<b>336,730,415</b>	<b>342,264,333</b>	<b>1.6</b>

Fuente: ACEA, 2021.

El transporte representa una de las actividades de mayor impacto medioambiental a nivel mundial. Solo en Europa (UE, EFTA, UK, Rusia y Turquía) el número de vehículos motorizados en uso ronda los 400 millones teniendo en cuenta turismos, autobuses y vehículos comerciales. Los del primer tipo, coches de pasajeros como los

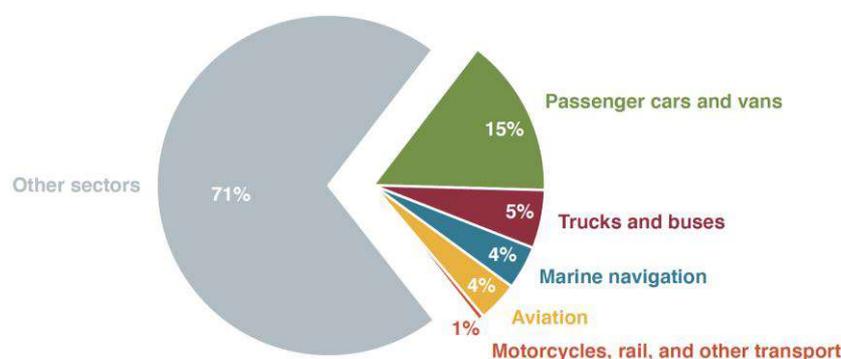
seleccionados para el estudio de caso de este trabajo, suman unos 350 millones de unidades, constituyendo más del 85% del parque móvil total (ACEA, 2021).

Estos datos arrojan un promedio de más de un turismo en circulación por cada dos habitantes europeos, concretamente 569/1.000 en 2019 sobre una población estimada en torno a los 600 millones de personas para los países recogidos en la Tabla 3 (ACEA, 2021). Esta aproximación inicial permite intuir el orden de magnitud de los impactos globales que genera en términos generales el sector del transporte, así como la enorme relevancia que tiene dentro de él la industria del automóvil en particular, referida en concreto a la producción y uso de vehículos de pasajeros de tipo turismo.

### 2.2.1. ENERGÍA, RECURSOS MATERIALES E IMPACTOS GLOBALES

El sector del transporte generó en la UE prácticamente un tercio de las emisiones totales de gases de efecto invernadero recogidas en 2018 y más de la mitad de ellas fueron provocadas concretamente por la industria del automóvil, situando así a los turismos como principales actores contaminantes por delante de otros medios como camiones, barcos o incluso aviones (ICCT, 2021).

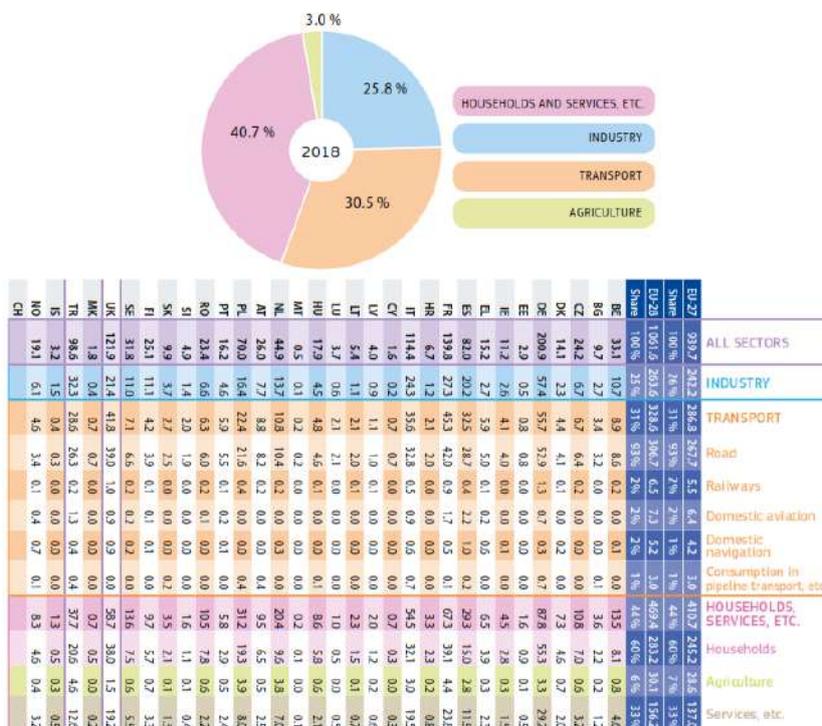
Ilustración 9. Emisión de gases de efecto invernadero por sectores en la UE-27 (2018).



Fuente: ICCT, 2021.

Este indicador es solo un ejemplo que permite señalar al coche como uno de los principales agentes responsables del devastador daño ecológico que la actividad humana provoca en el planeta, pero no hay que olvidar que la lucha contra el cambio climático que provoca la emisión de gases de efecto invernadero, no es sino uno más de los innumerables problemas medioambientales a los que se enfrenta la humanidad actualmente. Como ya se ha mencionado, existen otras cuestiones igualmente relevantes en esta materia, como son la crisis energética global o el agotamiento de los recursos materiales, que apuntan de nuevo de manera inequívoca a la industria del automóvil como uno de los principales causantes de la situación actual.

Ilustración 10. Consumo de energía por sectores en la UE-27 (2018).



Fuente: Comisión Europea, 2020b. Datos: Eurostat, 2020.

Al igual que sucede con la emisión de gases de efecto invernadero, se observa la relevancia que el sector del transporte tiene con respecto a otros en lo concerniente al consumo de energía dentro de la UE, donde en 2018 acaparó de nuevo prácticamente un tercio del contabilizado para el conjunto de actividades productivas. En este caso, la Comisión Europea no ofrece en su informe datos desglosados a nivel de tipo de vehículo, pero es indudable que el consumo de los coches de pasajeros vuelve a tener una considerable relevancia, teniendo en cuenta que se adjudica al transporte por carretera un 93% del consumo total del sector.

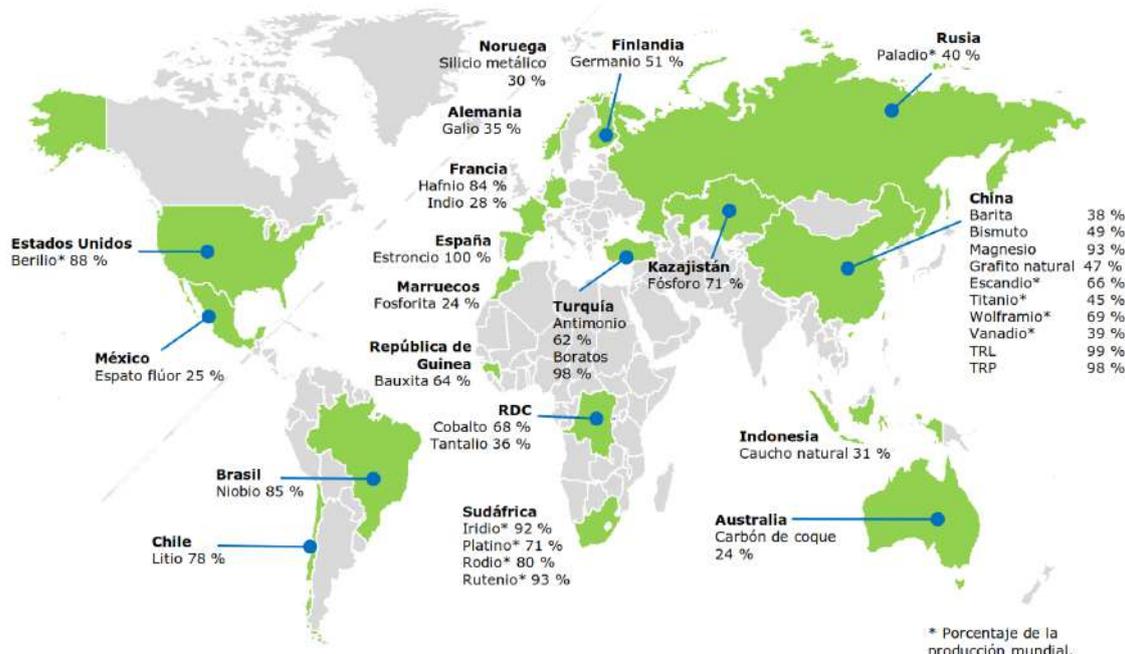
En lo referente al uso de recursos materiales, la industria automovilística se sitúa igualmente como uno de los principales sectores responsables de su agotamiento. La fabricación de vehículos requiere la utilización de una larga lista de recursos naturales: antimonio, barita, bauxita, berilio, borato, carbón de coque, caucho natural, cobalto, escandio, galio, grafito natural, litio, magnesio, niobio, metales del grupo del platino, silicio metálico, titanio, vanadio, wolframio y tierras raras (Comisión Europea, 2020c). Los altos niveles de producción de vehículos a nivel mundial socavan sin cesar las reservas de estos materiales, algunos de los cuales cuentan con unas reservas realmente escasas y se encuentran próximos a culminar su pico de extracción o incluso ya lo han hecho, como es el caso del antimonio que lo alcanzó en 2012 (Calvo, G. et al., 2017) (ver Ilustración 6).

## 2.2.2. DEUDA ECOLÓGICA Y CONFLICTOS SOCIOECOLÓGICOS

Los datos aportados hasta el momento describen los impactos provocados por el transporte en automóvil desde una perspectiva cuantitativa, pero es necesario incidir de nuevo en importancia que tiene su vertiente geográfica.

La Ilustración 2 ya reflejaba el desequilibrio existente entre Norte y Sur Globales en cuanto a las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> per cápita. En este mismo sentido, existe una problemática similar con relación a la voracidad extractivista promovida desde el Norte Global para mantener sus niveles de consumo de recursos naturales, promovidos desde todos los sectores productivos en general, pero muy particularmente desde el del transporte. El enorme ritmo de producción de vehículos exige recabar con denuedo materiales que, además de previsiblemente escasos (o en cualquier caso, indudablemente limitados), no se encuentran homogéneamente distribuidos a lo largo y ancho del planeta. Se produce así de nuevo la circunstancia de que varios de los elementos más utilizados en la industria del automóvil se concentran de forma casi exclusiva en países muy concretos del Sur Global, que se ven así atrapados de nuevo en su histórico papel de proveedores forzosos del Norte Global.

**Ilustración 11. Principales países proveedores de materias primas fundamentales a la UE.**



Fuente: Comisión Europea, 2020c.

La Ilustración 11 refleja que la UE apenas cuenta con proveedores internos que la abastezcan de los recursos naturales necesarios para la fabricación de vehículos, más allá del galio proveniente de Alemania o del silicio metálico noruego (considerando la UE más la EFTA). Salvo estos dos, se comprueba que todos los demás materiales

recogidos en la lista que se detallaba en el epígrafe anterior llegan a la UE provenientes de países del Sur Global, a excepción del caso del berilio (USA) y del carbón de coque (Australia). Esta situación tiene consecuencias automáticas en los países abastecedores de estos recursos, convirtiéndoles en acreedores de una deuda ecológica que el Norte Global jamás saldará y propagando consecuentemente la aparición de innumerables conflictos socioecológicos que impactan directamente en la vida de sus habitantes.

La deuda ecológica proviene de la época colonial y no deja de incrementarse año tras año debido a la constante intensificación de la actividad industrial y extractivista promovida desde los países del Norte Global. Las dimensiones que definen esta deuda son fundamentalmente cuatro (Martínez Alier, J., 1997):

- ✓ La deuda de carbono adquirida por la contaminación atmosférica generada por la industria del Norte Global, responsable directa de los impactos medioambientales relacionados con la disminución de la capa de ozono y el cambio climático provocado por la emisión de gases efecto invernadero.
- ✓ La biopiratería como apropiación intelectual por la que la agroindustria y los laboratorios de los países del Norte Global cobran derechos sobre conocimientos en el uso de semillas y plantas medicinales cuyo origen se sitúa en las tradiciones ancestrales de las sociedades del Sur Global.
- ✓ Los pasivos ambientales o deudas de carácter ecológico y social dejadas por las empresas al no reconocer todos los costos de sus actividades económicas, que deterioran la base para el desarrollo de los países afectados.
- ✓ La exportación a países del Sur Global de residuos tóxicos generados desde el Norte Global.

Por lo que respecta a la industria automovilística es justo señalar, en este caso, que no puede ser acusada de biopiratería de una forma directa, pero es igualmente indudable su implicación directa o indirecta en las otras tres cuestiones mencionadas.

De este modo, las diferentes dimensiones señaladas provocan en los países del Sur Global el surgimiento de conflictos socioecológicos sobre los que el Norte Global no puede declinar su responsabilidad como inductor de situaciones en las que resulta evidente el choque de intereses entre quienes causan el problema medioambiental y aquellos que sufren sus consecuencias. En el capítulo 1.1.- “Contexto actual y estado del arte” se mencionaban algunos ejemplos de este tipo de conflictos y se citaba el Atlas de Justicia Ambiental (<https://ejatlas.org>) como fuente de referencia en la que puede encontrarse información referida a miles de casos más.

Es importante recalcar, por último, que los conflictos sociocológicos no pueden ser explicados, ni por lo tanto resueltos, sin abordar aspectos relacionados con ellos que trascienden a un simple enfoque en clave productiva o netamente económica. De este modo, si bien es cierto que el propio Martínez Alier (2004) establece cierto paralelismo

entre las dimensiones que él mismo aporta para tipificar la deuda ecológica y su propia propuesta de clasificación de los conflictos socioecológicos en base al ciclo de vida de la materia prima a lo largo de las etapas de su cadena de valor (extracción, manufactura, transporte y residuo), tanto él como otros autores insisten en la necesidad de incorporar criterios basados en aspectos como la información, las relaciones, los intereses, los valores o la estructura para poder interpretarlos correctamente (Moore, C.W., 1989). Así, por ejemplo, no es infrecuente encontrarse en el núcleo de muchos de estos conflictos el eterno choque entre los sistemas de valores y creencias vigentes en el Norte y Sur Globales, que impide encontrar un marco de entendimiento común para su posible resolución. En muchas ocasiones el problema va más allá de la mera discrepancia en torno al sistema de valoración, para encontrarse ante una ausencia efectiva de unidad de medida común alguna entre valores, una verdadera *“inconmensurabilidad entre las formas de valoración”* (Martinez Alier, J., 2001) que parte del uso de lenguajes morales, culturales, ambientales y estéticos radicalmente diferentes.

### 3. ESTUDIO DE IMPACTOS DEL TRANSPORTE EN AUTOMÓVIL MEDIANTE LCA

Una vez contextualizada la problemática de crisis energética global y agotamiento de recursos materiales y sus impactos a nivel medioambiental y socioecológico, se procede a continuación a abordar el caso de estudio elegido del transporte en automóvil. Tras acotar su alcance en un primer epígrafe, se exponen posteriormente los resultados obtenidos desde las dos perspectivas de análisis escogidas, en primer lugar la cuantitativa y a continuación la geográfica.

#### 3.1. ALCANCE

El estudio de caso se centra en los automóviles de turismo para el transporte de viajeros por carretera, es decir, coches con capacidad para 2 a 7 personas. Quedan por tanto fuera del alcance del estudio las motocicletas o autobuses, así como las furgonetas o camiones para el transporte de mercancías.

##### 3.1.1. DEFINICIÓN DEL SISTEMA DEL PRODUCTO

Entendiendo el término producto como sinónimo de bien o servicio, la norma UNE-EN ISO14040 define sistema del producto como el conjunto de procesos unitarios con flujos elementales y flujos de producto que desempeña una o más funciones definidas y que sirve de modelo para el ciclo de vida de un producto. La norma precisa, a su vez, el significado de los conceptos esenciales que forman parte de esta definición:

- ✓ Ciclo de vida: Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final.
- ✓ Proceso unitario: Entendiendo el término proceso como el conjunto de actividades mutuamente relacionadas que interactúan para transformar elementos de entrada en resultados, se consideran procesos unitarios los elementos más pequeños identificados en el análisis del inventario del ciclo de vida para los cuales se cuantifican datos de entrada y salida.
- ✓ Flujo elemental: Materia o energía que entra al sistema bajo estudio, que ha sido extraído del medio ambiente sin una transformación previa por el ser humano, o materia o energía que sale del sistema bajo estudio, que es liberado al medio ambiente sin una transformación posterior por el ser humano.
- ✓ Flujo de producto: Productos que entran o salen de un sistema del producto hacia otro.

El estudio de caso analiza cuatro sistemas de producto a lo largo de su ciclo de vida:

- ✓ Transporte en un coche de gasolina
- ✓ Transporte en un coche diésel
- ✓ Transporte en un coche eléctrico recargado con electricidad producida por un mix energético de renovables y no renovables [NOREN+REN]
- ✓ Transporte en un coche eléctrico recargado con electricidad producida exclusivamente con energías renovables [REN].

La caracterización y parametrizaciones generales de estos cuatro sistemas se detallan en el capítulo 3.1.5.- “Sistemas de producto ecoinvent elegidos para el caso de estudio”.

### 3.1.2. ETAPAS DE LCA CONTEMPLADAS

Las etapas de ciclo de vida de un producto son seis:

**Tabla 4. Etapas del ciclo de vida de un producto.**

Etapas del CV de un producto	Adquisición de materias primas	Fabricación	Distribución	Consumo	Gestión de residuos	Reciclado
Gate to Gate						
Cradle to Gate						
Gate to Grave						
Cradle to Grave						
Cradle to Cradle						
Estados del CV de un producto	Cuna (Cradle)	Puerta (Gate)			Tumba (Grave)	Cuna (Cradle)

Fuente: elaboración propia.

El estudio de caso contempla el ciclo de vida *cradle to grave* del vehículo, desde la adquisición de las materias primas necesarias para su fabricación, pasando por las etapas de distribución y uso, hasta la retirada de circulación y gestión de sus residuos.

No se contempla la etapa de reciclado ya que para enfoques *cradle to cradle* la metodología LCA exige un cierre total (100%) de los ciclos de materiales, que en este caso sería irreal puesto que no todos los componentes son finalmente reciclados.

### 3.1.3. MÉTODO DE LCIA UTILIZADO

Para la LCIA existen numerosos métodos que pueden aplicarse con distintos enfoques temporales y diferentes perspectivas de evaluación de efectos:

- ✓ Métodos:
  - CML, CERA, Cumulative Energy Demand, Eco-Indicator 99, Ecological Scarcity, EDIP, EPS, ILCD, IPCC, ReCiPe, TRACI, USETox, etc.
  
- ✓ Enfoque temporal:
  - Individualista: Se basa en el interés a corto plazo (20 años), los tipos de impacto indiscutibles y el optimismo tecnológico respecto a la adaptación humana.
  - Jerárquico: Se basa en el consenso científico con respecto al plazo (100 años) y la plausibilidad de los mecanismos de impacto.
  - Igualitario: Es el enfoque más cauteloso, tiene en cuenta el plazo más largo (más de 1.000 años) y todas las vías de impacto de las que se dispone de datos.
  
- ✓ Perspectivas de evaluación de efectos (ver Ilustración 12):
  - *Midpoint*: Evalúa los efectos ambientales intermedios que indirectamente causan un daño al ser humano y los sistemas naturales en base a categorías como la contaminación de aguas y tierras, la disminución de la capa de ozono, etc.
  - *Endpoint*: Evalúa los efectos finales que directamente causan un daño al ser humano y los sistemas naturales en base a áreas de protección como la salud humana, el deterioro de ecosistemas, etc.

El estudio de caso utiliza el método de LCIA **ReCiPe 2014 v1.1** con un enfoque temporal **jerárquico** y una perspectiva *midpoint* de evaluación de efectos.

### 3.1.4. CATEGORÍAS DE IMPACTO CONSIDERADAS

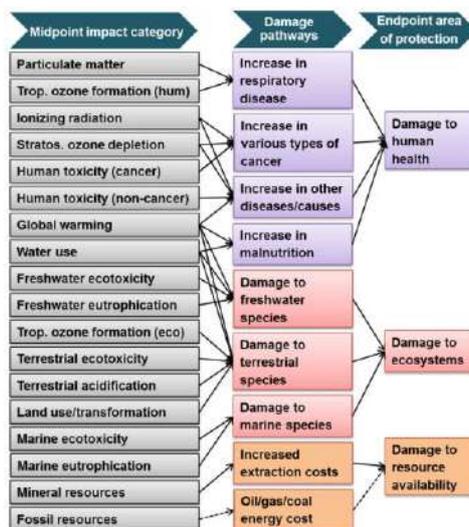
El análisis del LCI es la fase del LCA en la que se recopilan y cuantifican las entradas y salidas para el sistema del producto a través de su ciclo de vida. Las clases que representan asuntos ambientales de interés a los cuales se pueden asignar los resultados del LCI se denominan categorías de impacto.

La metodología ReCiPe establece 18 categorías de impacto *midpoint*:

- ✓ Acidificación terrestre: introducción de sustancias ácidas en el medio ambiente provocado por las emisiones a la atmósfera de óxidos de azufre y de nitrógeno, producidos fundamentalmente por la quema de combustible fósiles, que reaccionan con el vapor de agua presente en el aire y se convierten en compuestos ácidos que se precipitan sobre la superficie terrestre a través de la lluvia.
- ✓ Agotamiento de agua: Estrés hídrico provocado por el consumo de grandes cantidades de agua dulce.
- ✓ Agotamiento de fósiles: Extracción y consumo de combustibles fósiles que provoca su agotamiento progresivo, ya que son recursos energéticos no renovables.
- ✓ Agotamiento de metales: Ídem para minerales metálicos.
- ✓ Cambio climático: Alteración en la composición de la atmósfera mundial que aumenta la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. El cambio climático está íntimamente relacionado con el calentamiento global o aumento gradual de la temperatura de la tierra a consecuencia del incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera provocado por la deforestación y por los procesos de combustión con fines energéticos de carburantes fósiles.
- ✓ Disminución de la capa de ozono: Reducción de la capa de partículas de ozono presente en la estratosfera, tanto en concentración como en grosor, como consecuencia de la alteración del balance atmosférico de oxígeno y ozono, fundamentalmente debido a las emisiones de CFC (clorofluorocarbonos).
- ✓ Ecotoxicidad de aguas dulces: Efecto de la emisión o vertido a la biosfera de compuestos químicos tóxicos para los seres vivos existentes en ecosistemas de agua dulce.
- ✓ Ecotoxicidad de aguas marinas: Ídem para ecosistemas de agua marina.
- ✓ Ecotoxicidad terrestre: Ídem para ecosistemas terrestres.
- ✓ Toxicidad humana: Ídem para los seres humanos.
- ✓ Eutrofización de aguas dulces: Acumulación de nutrientes en las aguas dulces con la consiguiente proliferación de organismos, fundamentalmente algas, que impiden la penetración de la luz solar hasta las capas más inferiores de los ecosistemas acuáticos, provocando la muerte de la vegetación al no poder llevar a cabo la fotosíntesis. Esto multiplica la aparición de bacterias y otros microorganismos que se alimentan de la materia muerta, consumiendo el oxígeno que necesitan para sobrevivir otras especies como peces y moluscos.
- ✓ Eutrofización de aguas marinas: Ídem para las aguas marinas.
- ✓ Formación de oxidantes fotoquímicos: Introducción de sustancias contaminantes en el medio ambiente de fuerte acción oxidante producidas en la baja atmósfera como consecuencia de reacciones fotoquímicas complejas en las que intervienen los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos volátiles.

- ✓ Formación de partículas: Emisión de sustancias contaminantes en forma de material particulado de un tamaño comprendido entre 0,002  $\mu\text{m}$  y 100  $\mu\text{m}$  que permanece suspendido en la atmósfera en estado sólido o líquido bajo condiciones normales.
- ✓ Ocupación de suelo urbano: Ocupación, transformación o cambio de uso de suelos reservados para el asentamiento humano en hábitats urbanos.
- ✓ Ocupación de tierras agrícolas: Ídem para suelos reservados para la agricultura.
- ✓ Transformación de tierra natural: Ídem para suelos naturales.
- ✓ Radiación ionizante: Propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas que al superar determinados niveles puede tener efectos agudos en la salud de las personas, como el cáncer y otras enfermedades.

Ilustración 12. Categorías de impacto *midpoint* y áreas de protección *endpoint*.



Fuente: ReCiPe 2014 v1.1.

Estas 18 categorías se agrupan en 3 áreas de protección *endpoint*:

- ✓ Daños a la salud humana
- ✓ Deterioro de los ecosistemas
- ✓ Disminución de la disponibilidad de recursos

Cada categoría de impacto recoge, a su vez, innumerables impactos ambientales derivados de los distintos procesos que intervienen en el ciclo de vida de un sistema de producto, relacionados con actividades como la obtención de energía, la minería, el transporte, etc.

### 3.1.5. SISTEMAS DE PRODUCTO ECOINVENT ELEGIDOS PARA EL CASO DE ESTUDIO

La base de datos de LCI ecoinvent proporciona numerosos sistemas de producto. Para el estudio de caso se han seleccionados los siguientes:

- ✓ Transporte en un **coche de gasolina** basado en el proceso unitario [*transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 5* | *transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 5* | *Cutoff, U*]:
  - Tamaño del vehículo: Mediano.
  - Motor: Entre 1,4 y 2,0 litros.
  - Peso medio: 1.600 kg.
  - Emisiones de gases de escape: Las causadas por la combustión del combustible estimadas para una clase Euro 5 (normativa europea de septiembre de 2009) y las causadas por la evaporación del combustible del depósito de combustible.
  - Emisiones de gases no de escape: Las causadas por el desgaste de los neumáticos, los frenos y la carretera.
  - Sistemas de entrada: Infraestructura del coche y la red de carreteras, los materiales y esfuerzos necesarios para el mantenimiento de estos y el combustible consumido en el vehículo para el viaje.
  - Ciclo de vida: Construcción, funcionamiento, mantenimiento y eliminación del vehículo y de la infraestructura vial.
  
- ✓ Transporte en un **coche diésel** basado en el proceso unitario [*transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5* | *transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5* | *Cutoff, U*]: Las características básicas del sistema del producto son las mismas que para los vehículos de gasolina.
  
- ✓ Transporte en un **coche eléctrico** basado en el proceso unitario [*transport, passenger car, electric* | *transport, passenger car, electric* | *Cutoff, U*]:
  - Tamaño del vehículo: Compacto.
  - Peso sin batería: 918,22 kg.
  - Peso de la batería: 262 kg.
  - Densidad energética de la batería: 114 Wh/kg (unos 120 km de autonomía).
  - Vida media del coche: 150.000 km.
  - Vida media de la batería: 100.000 km (se estima que aproximadamente una de cada dos baterías requiera ser sustituida; se tiene en cuenta un valor por defecto de (150.000 km / 100.000 km) x 262 kg de baterías incluyendo el mantenimiento).

Tal y como se adelantaba en el capítulo 3.1.1.- “Definición del sistema del producto”, para el caso del transporte en un coche eléctrico se han definido dos sistemas de producto independientes que serán analizados de forma separada a lo largo del estudio caso: el recargado con electricidad producida por un mix energético de renovables y no renovables [NOREN+REN] y el recargado con electricidad producida exclusivamente

por energías renovables [REN]. De este modo, el sistema de producto NOREN+REN está basado enteramente en el proceso unitario genérico [*transport, passenger car, electric | transport, passenger car, electric | Cutoff, U*] que proporciona directamente ecoinvent, mientras que para definir el sistema de producto REN ha sido necesario modificar los subprocesos relacionados con la obtención de energía eléctrica para la recarga, garantizando que provengan exclusivamente de fuentes renovables.

### 3.2. ANÁLISIS DE IMPACTOS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE SU CUANTIFICACIÓN

Las metodologías de LCA identifican los procesos que intervienen en el sistema del producto para cuantificar los impactos ambientales derivados de sus flujos de entrada y salida. Se presentan a continuación los resultados obtenidos tras el estudio de caso desde el punto de vista de su cuantificación.

#### 3.2.1. PRESENTACIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS

La siguiente tabla recoge los resultados obtenidos para cada uno de los coches seleccionados en un desplazamiento de 1 km.

Tabla 5. Impactos del transporte en automóvil para desplazamientos de 1 km.

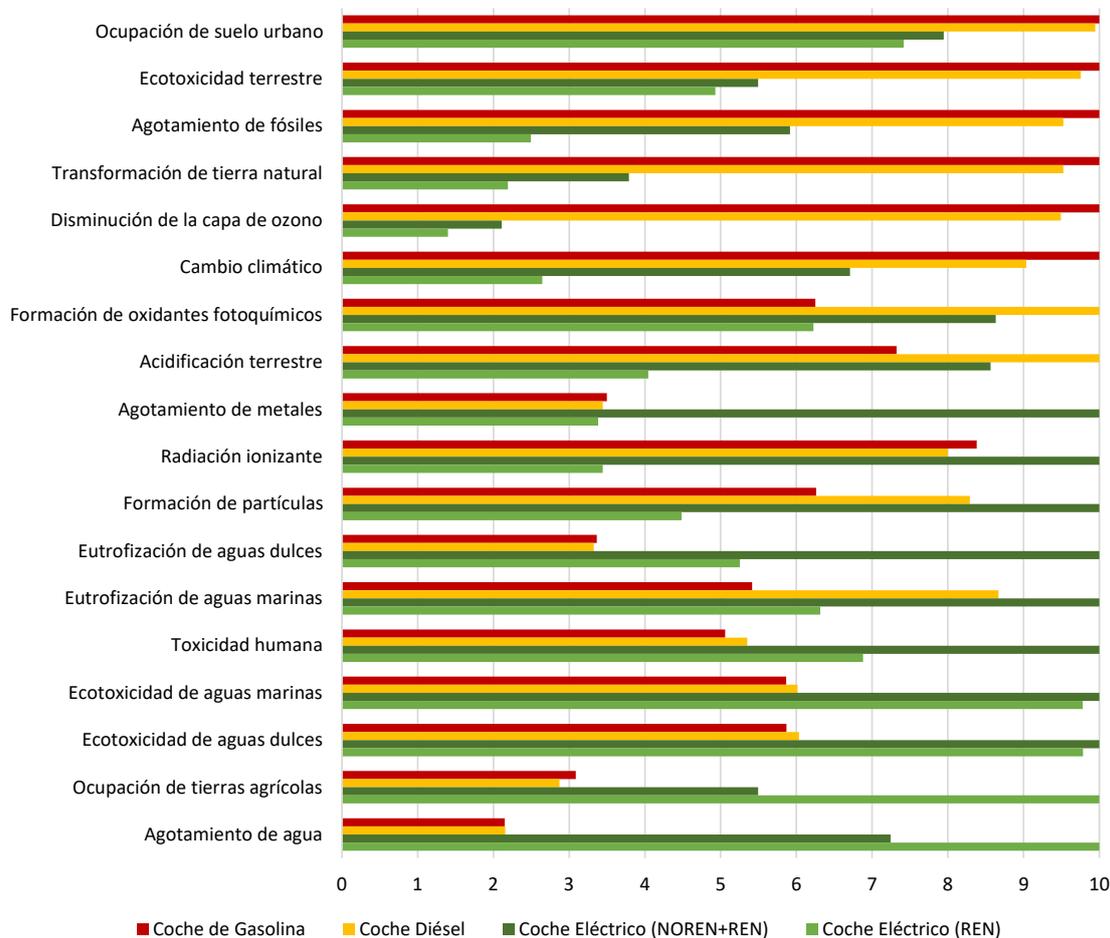
Categorías de impacto	Unidades	Coche de gasolina	Coche diésel	Coche eléctrico NOREN+REN	Coche eléctrico REN
Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	8,20E-04	1,12E-03	9,59E-04	4,53E-04
Agotamiento de agua	m <sup>3</sup>	4,72E-01	4,73E-01	1,59E+00	2,20E+00
Agotamiento de fósiles	kg petróleo eq	1,05E-01	1,00E-01	6,21E-02	2,62E-02
Agotamiento de metales	kg Fe eq	3,36E-05	3,31E-05	9,61E-05	3,25E-05
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> eq	3,31E-01	2,99E-01	2,22E-01	8,76E-02
Disminución de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	4,93E-08	4,68E-08	1,04E-08	6,90E-09
Ecotoxicidad de aguas dulces	kg 1,4-DB eq	1,79E-02	1,84E-02	3,05E-02	2,98E-02
Ecotoxicidad de aguas marinas		1,56E-02	1,60E-02	2,66E-02	2,60E-02
Ecotoxicidad terrestre		5,26E-05	5,13E-05	2,89E-05	2,59E-05
Toxicidad humana		7,64E-02	8,08E-02	1,51E-01	1,04E-01
Eutrofización de aguas dulces	kg P eq	4,78E-05	4,72E-05	1,42E-04	7,46E-05
Eutrofización de aguas marinas	kg N eq	4,03E-05	6,45E-05	7,44E-05	4,70E-05
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg COVDM	8,69E-04	1,39E-03	1,20E-03	8,65E-04
Formación de partículas	kg PS <sub>10</sub> eq	3,92E-04	5,19E-04	6,26E-04	2,81E-04
Ocupación de suelo urbano	m <sup>2</sup> a	9,34E-03	9,29E-03	7,42E-03	6,93E-03
Ocupación de tierras agrícolas	m <sup>2</sup> a	3,99E-03	3,71E-03	7,10E-03	1,29E-02
Radiación ionizante	kg <sup>235</sup> U eq	2,43E-02	2,32E-02	2,90E-02	9,98E-03
Transformación de tierra natural	m <sup>2</sup>	1,05E-04	1,00E-04	3,98E-05	2,30E-05

Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

Para representar estos resultados dentro de una misma gráfica que permita establecer una comparativa apreciable a simple vista es necesario escalarlos, ya que el orden de magnitud de sus unidades es totalmente incomparable (el agotamiento del agua medido en m<sup>3</sup>, por ejemplo, es del orden de E+00, mientras que la disminución de la capa de ozono medida en kg CFC-11 eq es del orden de E-08). En la escala utilizada, el 0 representa un impacto nulo y el 10 se corresponde con el del tipo de vehículo de mayor

impacto de los cuatro analizados en cada categoría.

**Ilustración 13. Impactos del transporte en automóvil en escala adimensional de 0 a 10.**



Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

La Ilustración 13 evidencia aspectos muy relevantes desde el punto de vista del análisis cuantitativo, entre los que cabe destacar los siguientes:

- ✓ Los coches eléctricos disminuyen notablemente el impacto medioambiental con respecto a los de combustión en algunas de las categorías previsibles, como agotamiento de fósiles o cambio climático.
- ✓ El coche eléctrico REN disminuye muy notablemente su impacto con respecto a NOREN+REN, salvo en las categorías de ocupación de tierras agrícolas y agotamiento del agua, en las que por el contrario su impacto es mucho mayor.
- ✓ Resulta especialmente llamativo que el coche eléctrico NOREN+REN presente mayores impactos que el coche diésel en 10 de las 18 categorías analizadas y salga aún peor parado en su comparación con el coche de gasolina, donde sucede en 12 de las 18.

- ✓ Igualmente llamativa es la comparativa en la categoría de agotamiento de metales, en la que se observa que el impacto de los coches de gasolina, diésel y eléctrico REN es muy similar, mientras que el del coche eléctrico NOREN+REN es del orden de tres veces superior al de los otros vehículos.

Así como la transformación de escala permite comparar a simple vista el impacto que tiene cada tipo de vehículo en las diferentes categorías, la conversión de las cantidades calculadas a unidades globales neutras permite establecer el alcance real de estos con respecto valores de referencia normalizados. La normalización es una transformación frecuentemente utilizada a la hora de representar valores físicos. Un ejemplo ilustrativo de ello es el de la aceleración. Así, se puede decir que una aceleración de 20 m/s<sup>2</sup> es equivalente a 2,04 g (adimensional) cuando se toma como referencia el factor de normalización “g” = aceleración de la gravedad = 9,8 m/s<sup>2</sup>. De este modo se refleja que 20 m/s<sup>2</sup> es una aceleración equivalente a 2,04 veces la de la gravedad.

Del mismo modo, en el caso de los impactos ambientales se usan también valores de referencia por categoría que son utilizados como factores de normalización. En el presente caso de estudio se han empleado los que propone la metodología LCIA ReCiPe utilizada, que están referidos al impacto per cápita calculado para el año 2008 a nivel mundial.

**Tabla 6. Factores de normalización de impactos per cápita anuales.**

Categoría de impacto	Factor de normalización	Unidades
Acidificación terrestre	38,187	kg SO <sub>2</sub> eq
Agotamiento de agua	-	m <sup>3</sup>
Agotamiento de fósiles	1.289,601	kg petróleo eq
Agotamiento de metales	445,187	kg Fe eq
Cambio climático	6.891,028	kg CO <sub>2</sub> eq
Disminución de la capa de ozono	0,038	kg CFC-11 eq
Ecotoxicidad de aguas dulces	4,304	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicidad de aguas marinas	2,462	kg 1,4-DB eq
Ecotoxicidad terrestre	5,929	kg 1,4-DB eq
Toxicidad humana	326,307	kg 1,4-DB eq
Eutrofización de aguas dulces	0,290	kg P eq
Eutrofización de aguas marinas	7,339	kg N eq
Formación de oxidantes fotoquímicos	56,737	kg COVDM
Formación de partículas	14,058	kg PS <sub>10</sub> eq
Ocupación de suelo urbano	775,030	m <sup>2</sup> a
Ocupación de tierras agrícolas	5.423,743	m <sup>2</sup> a
Radiación ionizante	1.317,409	kg <sup>235</sup> U eq
Transformación de tierra natural	12,027	m <sup>2</sup>

Fuente: ReCiPe 2008. Datos: <https://www.rivm.nl/documenten/6recipe111>.

A la hora de realizar la normalización los valores presentados en la Tabla 5 se proporcionan a una distancia de 10.000 km, para lo cual se multiplican los desplazamientos calculados para 1 km por dicha cantidad. La razón de esta transformación previa es simplemente asimilar su orden de magnitud al de los valores propuestos en la Tabla 6 antes de proceder a dividirlos por el correspondiente factor de

normalización. Los resultados obtenidos de este modo son los siguientes.

**Tabla 7. Impactos del transporte en automóvil normalizados respecto a los valores de referencia per cápita calculados por ReCiPe para el año 2008 a nivel mundial.**

Categorías de impacto	Unidades	Coche de gasolina	Coche diésel	Coche eléctrico NOREN+REN	Coche eléctrico REN
Acidificación terrestre	-	2,15E-01	2,93E-01	2,51E-01	1,19E-01
Agotamiento de agua	-	-	-	-	-
Agotamiento de fósiles	-	8,14E-01	7,75E-01	4,82E-01	2,03E-01
Agotamiento de metales	-	7,55E-04	7,44E-04	2,16E-03	7,30E-04
Cambio climático	-	4,80E-01	4,34E-01	3,22E-01	1,27E-01
Disminución de la capa de ozono	-	1,31E-02	1,24E-02	2,76E-03	1,83E-03
Ecotoxicidad de aguas dulces	-	4,16E+01	4,28E+01	7,09E+01	6,93E+01
Ecotoxicidad de aguas marinas	-	6,34E+01	6,50E+01	1,08E+02	1,06E+02
Ecotoxicidad terrestre	-	8,87E-02	8,65E-02	4,87E-02	4,37E-02
Toxicidad humana	-	2,34E+00	2,48E+00	4,63E+00	3,18E+00
Eutrofización de aguas dulces	-	1,65E+00	1,63E+00	4,90E+00	2,57E+00
Eutrofización de aguas marinas	-	5,49E-02	8,79E-02	1,01E-01	6,40E-02
Formación de oxidantes fotoquímicos	-	1,53E-01	2,45E-01	2,12E-01	1,52E-01
Formación de partículas	-	2,79E-01	3,69E-01	4,45E-01	2,00E-01
Ocupación de suelo urbano	-	1,21E-01	1,20E-01	9,57E-02	8,94E-02
Ocupación de tierras agrícolas	-	7,36E-03	6,84E-03	1,31E-02	2,38E-02
Radiación ionizante	-	1,84E-01	1,76E-01	2,20E-01	7,58E-02
Transformación de tierra natural	-	8,73E-02	8,31E-02	3,31E-02	1,91E-02

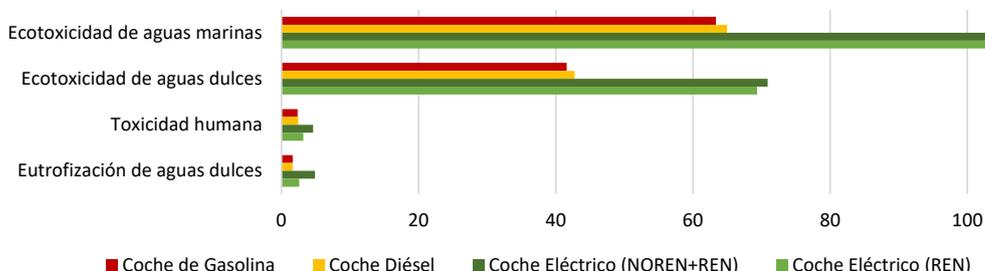
Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

En la línea de lo explicado anteriormente, la interpretación de los resultados de la Tabla 7 se haría del siguiente modo:

- ✓ El impacto anual generado por un coche diésel en la categoría de cambio climático es menos de la mitad del impacto per cápita que se cuantificó en 2008 para esa categoría a nivel mundial (0,434 veces).
- ✓ El impacto anual generado por un coche de gasolina en la categoría de agotamiento de fósiles es relativamente similar al impacto per cápita que se cuantificó en 2008 para esa categoría a nivel mundial (0,814 veces).
- ✓ El impacto anual generado por un coche eléctrico NOREN+REN en la categoría de eutrofización de aguas dulces prácticamente quintuplica el impacto per cápita que se cuantificó en 2008 para esa categoría a nivel mundial (4,9 veces).
- ✓ El impacto anual generado por un coche eléctrico REN en la categoría de ecotoxicidad de aguas marinas es más de cien veces superior al impacto per cápita que se cuantificó en 2008 para esa categoría a nivel mundial (106 veces).
- ✓ Etc.

La representación gráfica de los datos recogidos en la Tabla 7 permite identificar las cuatro categorías de impacto que superan claramente los valores de referencia calculados por ReCiPe para el año 2008 a nivel mundial.

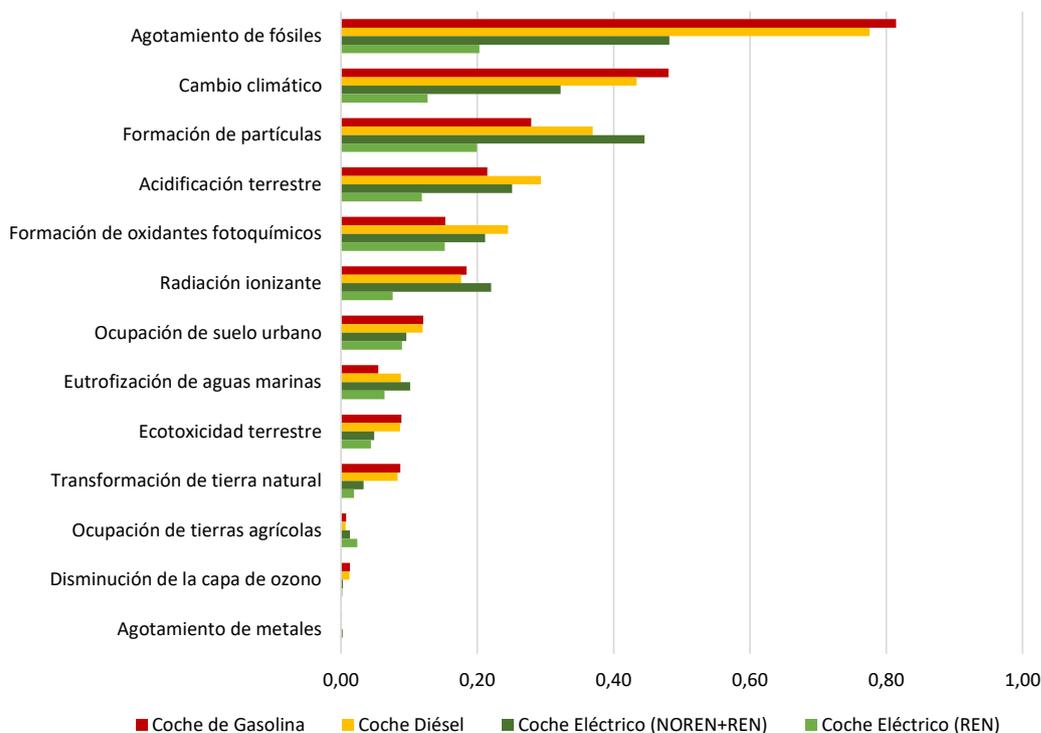
**Ilustración 14. Categorías del transporte en automóvil con mayor impacto (> 1x) que los valores de referencia per cápita calculados por ReCiPe para el año 2008 a nivel mundial.**



Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

El resto de las categorías arrojan valores entre 0 y 1 que son inapreciables en el rango 0-100 utilizado en la Ilustración 14. Para poder apreciarlas visualmente se muestra una representación gráfica en el rango 0-1 que permite comparar en qué medida son menores los impactos con respecto a las referencias utilizadas, siendo mayor la disminución en proporción a los valores de referencia normales cuanto más cercanos son sus valores a 0 (el 1 significaría una proporción equivalente).

**Ilustración 15. Categorías del transporte en automóvil con menor impacto (< 1x) que los valores de referencia per cápita calculados por ReCiPe para el año 2008 a nivel mundial.**



Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

Los datos normalizados recogidos en la Tabla 7 y representados en las gráficas de la Ilustración 14 e Ilustración 15 permiten de este modo estimar orden de magnitud de los resultados obtenidos en la investigación, poniendo de manifiesto de forma muy llamativa el enorme impacto comparativo que genera el transporte en automóvil en las categorías de ecotoxicidad de las aguas.

Hay que señalar, finalmente, que ReCiPe 2008 no aporta factor alguno para la categoría de agotamiento de agua, tal y como refleja la Tabla 6. Para poder tener una idea de un orden de magnitud normalizado en esta categoría para el transporte en automóvil sería necesario recurrir, por tanto, a algún otro valor de referencia, como por ejemplo la huella hídrica per cápita anual a nivel mundial, que indica el volumen de agua dulce utilizado durante un año para la producción de bienes y servicios en proporción a los habitantes del planeta. El dato que ofrece al respecto el IHE Delft Institute for Water Education de la UNESCO es de 1.385 m<sup>3</sup> para el período 1996-2005, lo que supondría que la categoría de agotamiento de agua pasaría a ser la quinta del grupo de aquellas cuyo impacto es mayor que el de su dato de referencia normal, con un valor equivalente a 3,4 en los coches de combustión, 11, 5 en el eléctrico NOREN+REN y 15,8 en el eléctrico REN.

### 3.2.2. ANÁLISIS DETALLADO POR CATEGORÍAS DE IMPACTO Y ASPECTOS

Tras la presentación general de los datos obtenidos a través del LCA, en los siguientes apartados se detallan los resultados de algunas categorías de impacto concretas. A la hora de seleccionar las seis más relevantes de las dieciocho totales se ha tenido en cuenta que cubran aspectos relacionados con las tres áreas de protección *endpoint* existentes.

- ✓ Cambio climático: Afecta tanto a los daños a la salud humana como al deterioro de los ecosistemas.
- ✓ Toxicidad humana: Afecta a los daños a la salud humana.
- ✓ Agotamiento de fósiles: Afecta a la disminución de la disponibilidad de recursos.
- ✓ Agotamiento de metales: Afecta a la disminución de la disponibilidad de recursos.
- ✓ Agotamiento de agua: Afecta tanto a los daños a la salud humana como al deterioro de los ecosistemas.
- ✓ Ocupación de tierras agrícolas: Afecta al deterioro de los ecosistemas.

La cuantificación de los impactos estará siempre referida a desplazamientos de 10.000 km y se presentará desglosada en cinco aspectos diferenciados:

- ✓ Vehículo: Impactos derivados de los procesos de fabricación, mantenimiento y fin de vida del vehículo (en el caso de los vehículos eléctricos no se incluye el impacto de la batería, que se recoge aparte).
- ✓ Batería: Impactos derivados de los procesos de fabricación, mantenimiento y fin

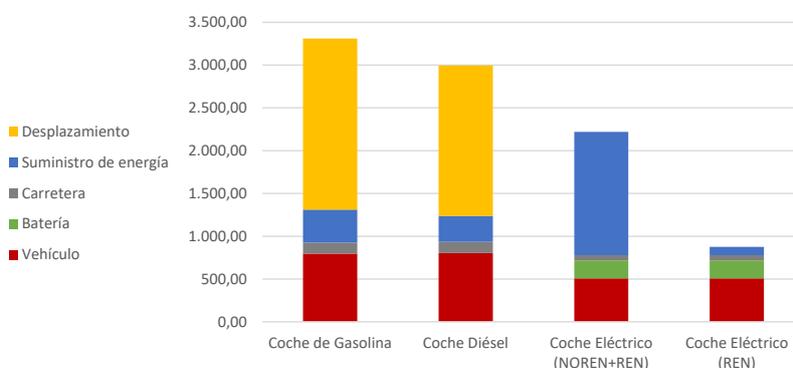
- de vida de la batería (solo para el caso de los vehículos eléctricos).
- ✓ Carretera: Impactos derivados de los procesos de construcción y mantenimiento de la carretera.
- ✓ Suministro de energía: Impactos derivados del uso del vehículo, referidos exclusivamente al consumo de combustible necesario para su utilización (o a la recarga de batería, en el caso de los vehículos eléctricos).
- ✓ Desplazamiento: Impactos derivados del uso del vehículo, referidos a otros aspectos diferentes del consumo de combustible necesario para su utilización (o de la recarga de batería, en el caso de los vehículos eléctricos).

### 3.2.2.1. CATEGORÍA DE CAMBIO CLIMÁTICO

La categoría de cambio climático hace referencia a los impactos relacionados directa o indirectamente con la actividad humana que alteran la composición de la atmósfera mundial y que se suman a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, 1994).

El estudio de caso realizado arroja los siguientes resultados para esta categoría.

**Ilustración 16. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de cambio climático (kg CO<sub>2</sub> eq en un desplazamiento de 10.000 km).**



Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

**Tabla 8. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de cambio climático (kg CO<sub>2</sub> eq en un desplazamiento de 10.000 km).**

Cambio climático (kg CO <sub>2</sub> eq)	Coche de combustión		Coche eléctrico	
	Gasolina	Diésel	NOREN+REN	REN
Vehículo	796,12	805,17		507,80
Batería				210,92
Carretera	129,78		59,82	
Suministro de energía	385,64	303,27	1.441,78	96,98
Desplazamiento	1.997,77	1.755,64		
<b>Total</b>	<b>3.309,31</b>	<b>2.993,86</b>	<b>2.220,32</b>	<b>875,53</b>

Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

Los datos reflejan que dentro de la categoría de cambio climático el impacto

medioambiental que conllevan los procesos de fabricación, mantenimiento y fin de vida de un coche de combustión es muy similar al del coche eléctrico, considerando en este caso el vehículo más la batería. Este es un hecho que se produce en todas las categorías analizadas excepto en la de toxicidad humana, por lo que no se volverá a incidir en este aspecto salvo en dicha categoría.

Por otra parte, el coche eléctrico reduce notablemente los impactos relacionados con los procesos de construcción y mantenimiento de la carretera con respecto al coche de combustión, si bien es cierto que este aspecto tiene un escaso peso dentro de la cuantificación total por vehículo. Esta circunstancia se produce igualmente en todas las categorías analizadas por lo que tampoco se volverá a incidir sobre ella.

En lo referente a la utilización del vehículo al margen del suministro de energía necesaria para su uso (combustible o electricidad), se observa que el desplazamiento de los coches eléctricos no genera ningún impacto y que, por el contrario, en los coches de combustión este sumando contribuye a la cuantificación total en más de la mitad, constituyéndose claramente como el aspecto más crítico.

Pero sin duda el aspecto más relevante del análisis realizado para la categoría de cambio climático es el relativo al suministro de energía. La Ilustración 16 refleja claramente que el coche eléctrico resulta ser el que mayor impacto ambiental genera en este aspecto cuando su batería es recargada con una electricidad que no haya sido producida exclusivamente por energías renovables. En este caso, el valor calculado para la recarga supera con creces al del consumo de combustible de los coches de combustión, incrementándose un 274% con respecto a la del coche de gasolina y hasta un 375% con respecto al diésel. Para un mismo vehículo eléctrico, la diferencia de impacto existente a efectos de cambio climático entre un tipo de recarga y otra resulta absolutamente abrumadora, siendo NOREN+REN del orden de 15 veces superior a REN con un incremento de impacto del 1.387%.

**Conclusión:** A efectos de cambio climático el coche gasolina es el que peores resultados ofrece de todos. En relación con este, el coche diésel impacta un 10% menos, el eléctrico NOREN+REN un 33% menos y el eléctrico REN un 74% menos. Se concluye por tanto que los coches eléctricos sí constituyen una alternativa de menor impacto a efectos de cambio climático que los coches de combustión, pero la disminución solo es claramente significativa si la recarga de la batería se realiza con una electricidad que haya sido producida exclusivamente por energías renovables, siendo el único caso en el que la cantidad CO<sub>2</sub> eq anual emitida por vehículo se sitúa por debajo de 1 tonelada.

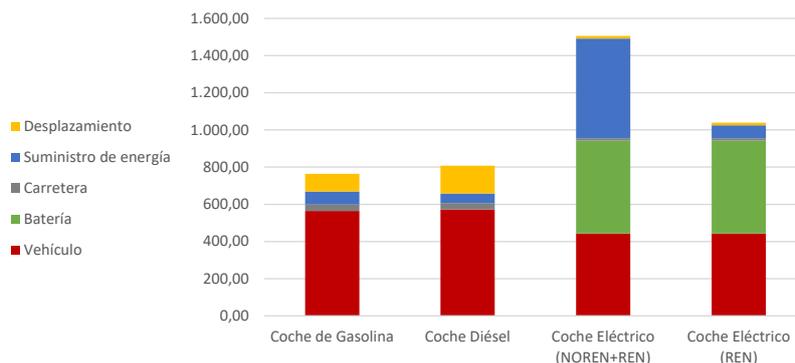
### 3.2.2.2. CATEGORÍA DE TOXICIDAD HUMANA

La categoría de toxicidad humana hace referencia a los impactos relacionados directa o indirectamente con la actividad humana que afectan a la salud de las personas y

aumentan la mortalidad o morbilidad de la población por causas vinculadas al desarrollo de enfermedades como el cáncer, afecciones respiratorias, malnutrición y otras.

El estudio de caso realizado arroja los siguientes resultados para esta categoría.

**Ilustración 17. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de toxicidad humana (kg 1,4-DB eq en un desplazamiento de 10.000 km).**



Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

**Tabla 9. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de toxicidad humana (kg 1,4-DB eq en un desplazamiento de 10.000 km).**

Toxicidad humana (kg 1,4-DB eq)	Coche de combustión		Coche eléctrico	
	Gasolina	Diésel	NOREN+REN	REN
Vehículo	564,04	572,06	442,80	
Batería			499,34	
Carretera	35,02		12,69	
Suministro de energía	70,04	51,01	536,72	70,20
Desplazamiento	94,68	149,89	14,00	
<b>Total</b>	<b>763,77</b>	<b>807,98</b>	<b>1.505,55</b>	<b>1.039,03</b>

Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

El aspecto más relevante que hay que destacar en el análisis de esta categoría es que el impacto total generado por los coches eléctricos es claramente superior al de los de combustión, en torno a 1,3 veces más en el caso del coche eléctrico REN y hasta el doble en el coche eléctrico NOREN+REN.

Además, se produce un hecho que no se da en ninguna de las otras categorías y es que el alto coste medioambiental que tiene la fabricación de baterías para el coche eléctrico hace que el impacto debido a su fabricación, incluyendo la batería, supere en este caso claramente al de los vehículos de combustión, siendo del orden de 1,7 veces mayor (942 frente a 570 kg 1,4-DB eq aprox., lo que supone un incremento de impacto de en torno al 65%).

En lo concerniente a la energía necesaria para el uso del vehículo, se observa claramente que el impacto del coche eléctrico NOREN+REN es muy superior al de los otros tres (unas 8 veces superior al de gasolina y eléctrico REN, unas 11 veces en el caso del diésel).

Finalmente, con respecto a la utilización del vehículo al margen del suministro de energía necesaria para su uso, se observa que el desplazamiento de los coches eléctricos tiene un impacto no nulo. Este es un hecho que no se produce en ninguna de las otras categorías analizadas y en este caso está provocado por las emisiones de gases no de escape producidas por el desgaste de frenos y neumáticos. A pesar de ello, dicho impacto sigue siendo claramente inferior al de los coches de gasolina (casi 7 veces menor) o diésel (casi 11 veces menor).

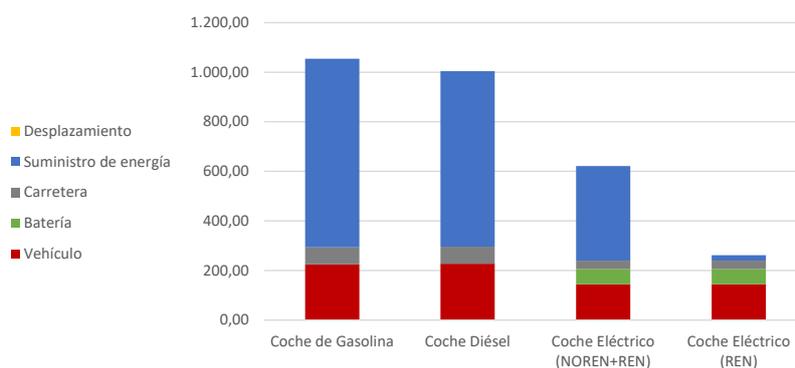
**Conclusión:** A efectos de toxicidad humana los vehículos eléctricos no suponen una alternativa a los de combustión, debido fundamentalmente al elevado coste ecológico de fabricación de sus baterías. Además, vuelve a ponerse de manifiesto que la recarga de estas con una electricidad que no haya sido producida exclusivamente por energías renovables dispara el impacto de este aspecto, suponiendo un incremento de más del 650% con respecto a cualquiera de los otros tres casos.

### 3.2.2.3. CATEGORÍA DE AGOTAMIENTO DE FÓSILES

La categoría de agotamiento de fósiles hace referencia a los impactos relacionados directa o indirectamente con la actividad humana que están relacionados con la extracción y consumo de combustibles con gran contenido energético procedentes de los recursos fósiles producidos en eras pasadas, como el carbón, el petróleo o el gas natural.

El estudio de caso realizado arroja los siguientes resultados para esta categoría.

**Ilustración 18. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de agotamiento de fósiles (kg petróleo eq en un desplazamiento de 10.000 km).**



Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

**Tabla 10. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de agotamiento de fósiles (kg petróleo eq en un desplazamiento de 10.000 km).**

Agotamiento de fósiles (kg petróleo eq)	Coche de combustión		Coche eléctrico	
	Gasolina	Diésel	NOREN+REN	REN
Vehículo	225,01	227,29	144,65	
Batería			61,33	
Carretera	68,84		34,17	
Suministro de energía	760,73	708,06	381,04	21,66
Desplazamiento				
<b>Total</b>	<b>1.054,58</b>	<b>1.004,20</b>	<b>621,19</b>	<b>261,81</b>

Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

En lo referente al uso del vehículo se aprecia que todos los impactos están relacionados con el suministro de energía y que el aspecto de desplazamiento no recoge fuera de este ningún otro impacto vinculado a dicho uso. Este hecho se produce también en las siguientes categorías analizadas (agotamiento de metales y agua y ocupación de tierras agrícolas), por lo que no se incidirá de nuevo en esta circunstancia.

El aspecto más relevante desde el punto de vista de agotamiento de fósiles es claramente el correspondiente al suministro de energía. Como era previsible, los coches de combustión tienen mucho más impacto en este aspecto que los eléctricos, pero de nuevo existe una gran diferencia entre el tipo de recarga NOREN+REN y solo REN, que resulta ser del orden de 17 veces superior en el primer caso con respecto al segundo, lo que supone un incremento de impacto comparativo del 1.659%.

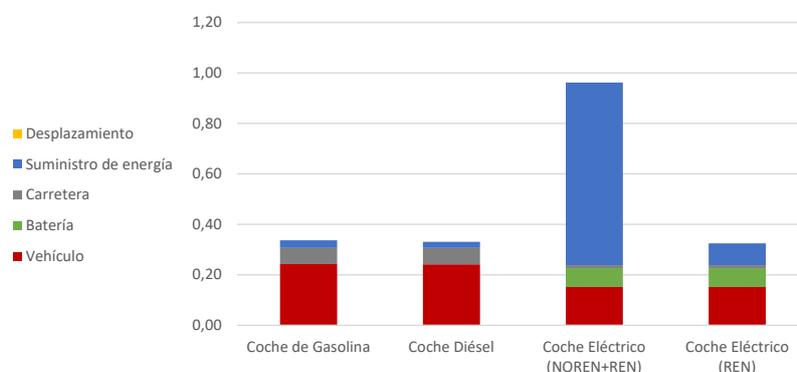
**Conclusión:** A efectos de agotamiento de fósiles el coche gasolina es el que peores resultados ofrece de todos. En relación con este, el coche diésel impacta un 5% menos, el eléctrico NOREN+REN un 41% menos y el eléctrico REN un 75% menos. Se concluye de nuevo por tanto que los coches eléctricos constituyen una alternativa de menor impacto a efectos de agotamiento de fósiles que los coches de combustión, pero igualmente se observa que la disminución solo es claramente significativa si la recarga de la batería se realiza con una electricidad que haya sido producida exclusivamente por energías renovables, siendo el único caso en el que la cantidad de petróleo eq emitida se sitúa por debajo de 300 kg.

#### 3.2.2.4. CATEGORÍA DE AGOTAMIENTO DE METALES

La categoría de agotamiento de metales hace referencia a los impactos relacionados directa o indirectamente con la actividad humana que están relacionados con la extracción y consumo de minerales metálicos.

El estudio de caso realizado arroja los siguientes resultados para esta categoría.

**Ilustración 19. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de agotamiento de metales (kg Fe eq en un desplazamiento de 10.000 km).**



Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

**Tabla 11. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de agotamiento de metales (kg Fe eq en un desplazamiento de 10.000 km).**

Agotamiento de metales (kg Fe eq)	Coche de combustión		Coche eléctrico	
	Gasolina	Diésel	NOREN+REN	REN
Vehículo	0,24		0,15	
Batería			0,07	
Carretera	0,06		0,01	
Suministro de energía	0,03	0,02	0,72	0,09
Desplazamiento				
<b>Total</b>	<b>0,34</b>	<b>0,33</b>	<b>0,96</b>	<b>0,32</b>

Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

En la categoría de agotamiento de metales se produce una circunstancia especialmente singular que no se da en ninguna otra de las analizadas, como es el hecho de que los coches de combustión y eléctrico REN generan prácticamente el mismo impacto ambiental (en torno a 0,33 kg Fe eq). Esto significa que el coche eléctrico no solo no supone una alternativa a los de combustión ni siquiera en el mejor de los casos (con recarga REN), sino que además resulta ser una opción que ofrece mucho peores resultados en el caso de la recarga NOREN+REN, llegando a incrementar el impacto de los otros prácticamente un 300%.

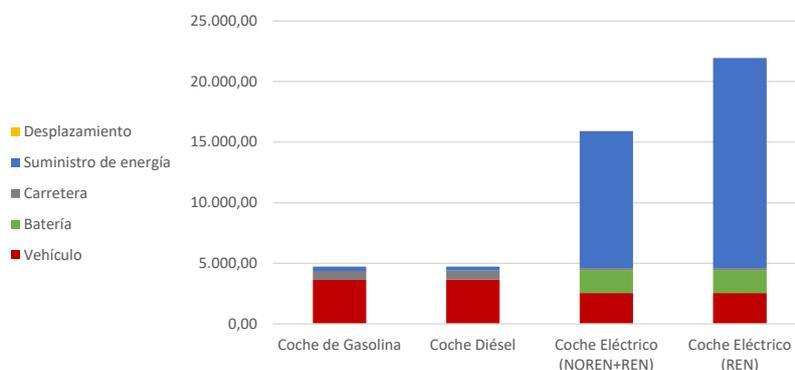
**Conclusión:** La categoría de agotamiento de metales pone de manifiesto más que ninguna otra que la tecnología de motor eléctrico no supone en sí misma una alternativa a la de combustión y mucho menos aún si la recarga de las baterías se realiza con electricidad producida por un mix energético de renovables y no renovables.

### 3.2.2.5. CATEGORÍA DE AGOTAMIENTO DE AGUA

La categoría de agotamiento de agua hace referencia a los impactos relacionados directa o indirectamente con la actividad humana que provocan estrés hídrico por el consumo de grandes cantidades de agua dulce.

El estudio de caso realizado arroja los siguientes resultados para esta categoría.

**Ilustración 20. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de agotamiento de agua (m<sup>3</sup> en un desplazamiento de 10.000 km).**



Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

**Tabla 12. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de agotamiento de agua (m<sup>3</sup> en un desplazamiento de 10.000 km).**

Agotamiento de agua (m <sup>3</sup> )	Coche de combustión		Coche eléctrico	
	Gasolina	Diésel	NOREN+REN	REN
Vehículo	3.621,59	3.667,84	2.535,77	
Batería			1.902,25	
Carretera	739,49		161,73	
Suministro de energía	360,42	325,06	11.306,20	17.351,50
Desplazamiento				
<b>Total</b>	<b>4.721,50</b>	<b>4.732,38</b>	<b>15.906,00</b>	<b>21.951,20</b>

Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

El aspecto más relevante que hay que destacar en el análisis de esta categoría es que de nuevo el impacto total generado por los coches eléctricos es claramente superior al de los de combustión, en torno a 3,4 veces más en el caso del coche eléctrico NOREN+REN y hasta 4,6 veces en el coche eléctrico REN.

Por otra parte, el suministro de energía constituye un aspecto absolutamente crítico en la cuantificación del impacto de los coches eléctricos, siendo en torno a 33 veces superior a la de los coches de combustión en el caso de la recarga NOREN+REN y unas 50 veces en la REN.

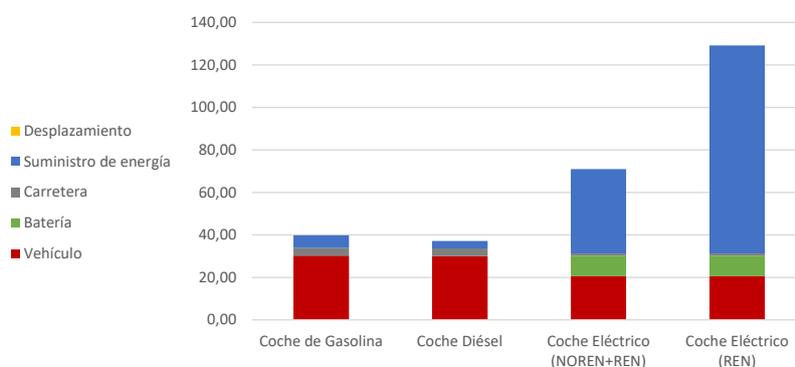
**Conclusión:** El impacto ecológico de los coches eléctricos desde el punto de vista de agotamiento del agua es muy superior al de los coches de combustión. Se produce la circunstancia de que el coche eléctrico REN tiene un comportamiento aún peor que el NOREN+REN, siendo la causa de esta supuesta “anomalía” el hecho de que la producción de electricidad a través de energías renovables como la hidroeléctrica requiere el consumo de gran cantidad de recursos hídricos.

### 3.2.2.6. CATEGORÍA DE OCUPACIÓN DE TIERRAS AGRÍCOLAS

La categoría de ocupación de tierras agrícolas hace referencia a los impactos relacionados directa o indirectamente con la actividad humana que provocan la ocupación, transformación o cambio de uso de suelos reservados para la agricultura.

El estudio de caso realizado arroja los siguientes resultados para esta categoría.

**Ilustración 21. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de ocupación de tierras agrícolas (m<sup>2</sup>a en un desplazamiento de 10.000 km).**



Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

**Tabla 13. Impactos desglosados por vehículo y aspecto en la categoría de ocupación de tierras agrícolas (m<sup>2</sup>a en un desplazamiento de 10.000 km).**

Ocupación de tierras agrícolas (m <sup>2</sup> a)	Coche de combustión		Coche eléctrico	
	Gasolina	Diésel	NOREN+REN	REN
Vehículo	30,26	30,07	20,62	
Batería			9,61	
Carretera	3,58		1,01	
Suministro de energía	6,02	3,46	39,73	97,98
Desplazamiento				
<b>Total</b>	<b>39,86</b>	<b>37,12</b>	<b>70,96</b>	<b>129,22</b>

Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

La Ilustración 21 presenta para la ocupación de tierras agrícolas un aspecto muy similar al que ofrece la Ilustración 20 para agotamiento de agua, por lo que se puede extrapolar el mismo análisis que se ha realizado en el apartado anterior. En este caso, la proporción de impacto total con respecto a los coches de combustión está en torno a 1,8 veces más en el caso del coche eléctrico NOREN+REN y hasta 3,3 veces en el coche eléctrico REN. En cuanto al suministro de energía, la recarga NOREN+REN tiene un impacto en torno a 7 veces superior al del repostaje del coche de gasolina y llega a ser de unas 16 veces más en el caso de la recarga REN. La comparativa con el coche diésel resulta aún más llamativa, siendo la NOREN+REN unas 11 veces superior y la REN unas 28 veces superior.

**Conclusión:** Al igual que sucede para la categoría de agotamiento del agua, el impacto ecológico de los coches eléctricos desde el punto de vista de ocupación de tierras agrícolas es muy superior al de los coches de combustión. También se produce la circunstancia de que el coche eléctrico REN tiene un comportamiento aún peor que el NOREN+REN, siendo en este caso la causa de tal “anomalía” el hecho de que la producción de electricidad a través de energías renovables como la eólica o la fotovoltaica requiere la ocupación de grandes extensiones de terreno que en muchos casos son de uso agrícola.

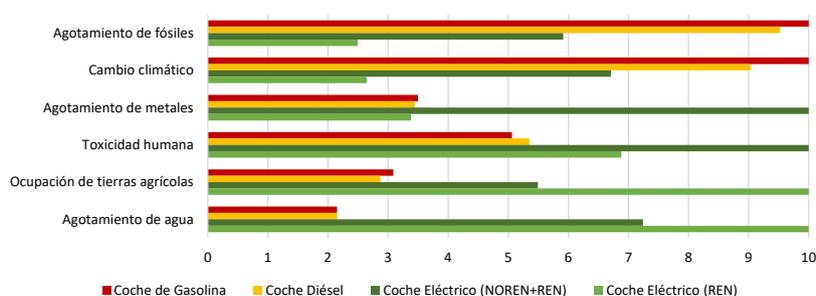
### 3.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO FINAL DE LOS IMPACTOS OBTENIDOS

Para finalizar el estudio de detalle se ofrecen a continuación las principales conclusiones a las que apuntan los resultados obtenidos a nivel comparativo. En primer lugar, se realizará una comparación guiada por el tipo de vehículo y posteriormente se abordará desde el punto de vista de los aspectos.

#### 3.2.3.1. COMPARATIVA DE IMPACTOS POR TIPO DE VEHÍCULO

Para facilitar el análisis comparativo final de los impactos de cada tipo de vehículo se parte de un extracto de la Ilustración 13 centrado solamente en las seis categorías desarrolladas en el estudio de detalle.

**Ilustración 22. Resumen de impactos relativos por vehículo y categoría en escala adimensional de 0 a 10.**



Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

Tal y como se avanzaba en el capítulo 3.2.1.- “Presentación general de los resultados”, la representación de los impactos por vehículo en una escala adimensional de 0 a 10 evidencia que en la mayoría de las categorías el coche eléctrico no supone una alternativa a los coches de combustión, ni aun recargándose con electricidad producida exclusivamente por energías renovables. Asimilando los valores recogidos en la Ilustración 22 a una especie de “calificación ecológica” en la que el suspenso estuviera por encima de 5 puntos, el aprobado entre 3 y 5, el notable entre 1 y 3 y el sobresaliente entre 0 y 1, la siguiente tabla refleja cómo los coches eléctricos “suspenden” con claridad, no solo en su calificación promedio final, sino también en la mayoría de las

categorías individuales.

**Tabla 14. Resumen de impactos relativos por vehículo y categoría en escala adimensional de 0 a 10.**

Categorías de impacto	Coche de gasolina	Coche diésel	Coche eléctrico NOREN+REN	Coche eléctrico REN
<b>Promedio de impactos</b>	<b>5,6</b>	<b>5,4</b>	<b>7,6</b>	<b>5,9</b>
Agotamiento de fósiles	10,0	9,0	6,7	2,6
Cambio climático	5,1	5,4	10,0	6,9
Agotamiento de metales	10,0	9,5	5,9	2,5
Toxicidad humana	3,5	3,4	10,0	3,4
Ocupación de tierras agrícolas	2,2	2,2	7,2	10,0
Agotamiento de agua	3,1	2,9	5,5	10,0

Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

Los resultados colocan así modo al coche eléctrico NOREN+REN como el peor clasificado de este “ranking ecológico” con un impacto promedio de 7,6 que supera en más de punto y medio al de los otros vehículos. El coche eléctrico REN tampoco consigue superar a los de combustión, si bien es cierto que su impacto promedio de 5,9 lo acerca más a los valores ofrecidos por los coches de combustión, que mejoran su nota solo en unas décimas. Se puede asegurar con rigor, por tanto, que para las categorías evaluadas en la Tabla 14 el coche diésel resulta ser el más ecológico de todos, seguido muy de cerca por el de gasolina y a más distancia por el eléctrico REN, mientras que el coche eléctrico NOREN+REN ofrece resultados significativamente peores que el resto.

Es importante recalcar que las conclusiones presentadas a nivel de ranking se circunscriben exclusivamente al ámbito de las seis categorías analizadas en el estudio de detalle, ya que un análisis global de las dieciocho en base a los valores reflejados en Ilustración 13 alteraría dicha clasificación, posicionando claramente al coche eléctrico REN como la alternativa más ecológica con un impacto promedio de 5,6 puntos sobre 10. El coche de gasolina puntuaría 6,8 en dicha escala y el diésel 7,3. En cualquier caso, el eléctrico NOREN+REN se volvería a revelar definitivamente como la peor de las opciones, con un impacto promedio de 7,9 puntos.

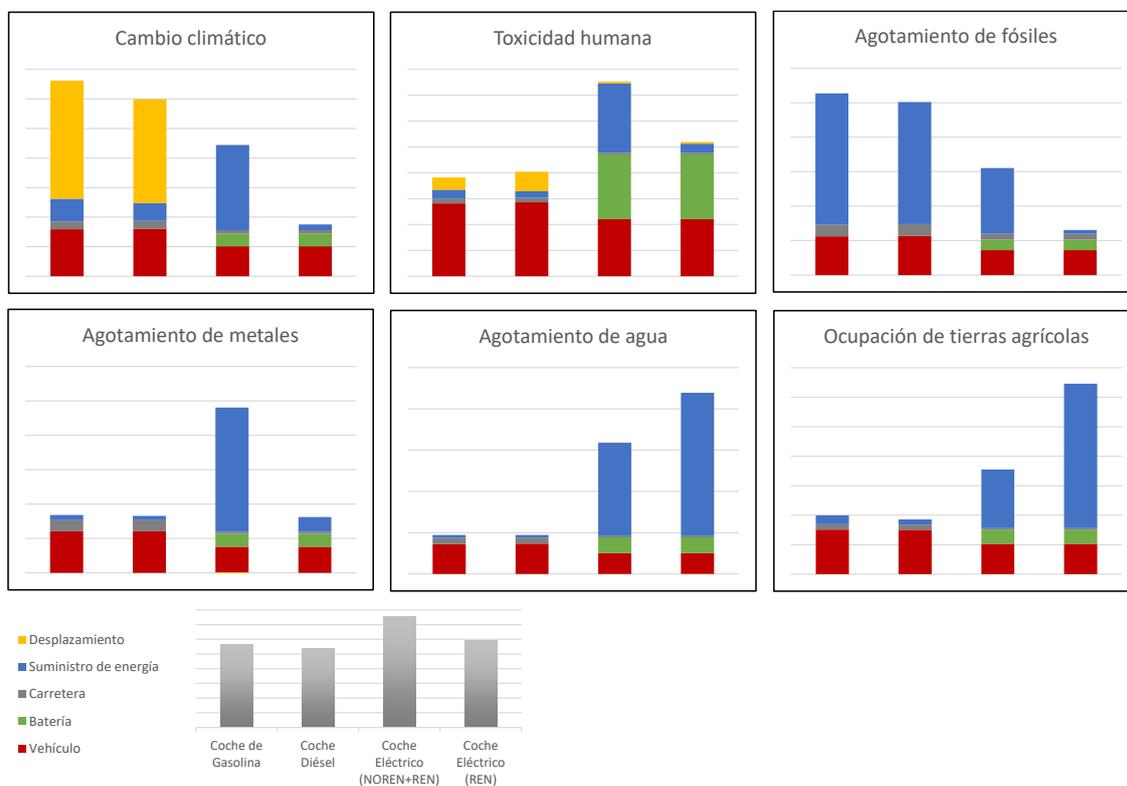
Hecha esta puntualización, se puede concluir ya sin ambages que el coche eléctrico no constituye por sí mismo una alternativa al de combustión. Por una parte, adquirir un coche eléctrico y recargar su batería con electricidad NOREN+REN resulta ser una pésima opción desde el punto de vista ecológico, ya que esta práctica aumenta su nivel de impacto hasta llegar a empeorar notablemente el comportamiento de los coches de combustión. Por otra parte, si bien es cierto que los impactos del transporte en un vehículo eléctrico REN son cualitativamente diferentes a los de uno de combustión, no por ello dejan de ser muy importantes.

### 3.2.3.2. COMPARATIVA DE IMPACTOS POR ASPECTO

Para facilitar el análisis comparativo final de los impactos de cada aspecto se presentan a continuación de forma conjunta las gráficas correspondientes a las seis categorías

desarrolladas en el estudio de detalle.

**Ilustración 23. Resumen de impactos por categoría desglosados por vehículo y aspecto.**



Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

La Ilustración 23 refleja de forma manifiesta que la **fabricación del vehículo**, cuya magnitud de impacto se representa a través de la suma de alturas de las franjas roja (vehículo) y verde (batería), no es un aspecto diferenciador significativo a la hora de comparar las tecnologías eléctrica y de combustión, salvo en el estudio de la toxicidad humana. Justamente en esta categoría sucede, además, que el coche eléctrico obtiene peores resultados que los de combustión, debido fundamentalmente al elevado coste ecológico de la fabricación de su batería, tal y como refleja claramente la magnitud de la franja verde.

Con relación al **suministro de energía** se observa que tiene en general un escaso peso dentro de la cuantificación total del impacto en los vehículos de combustión, aparte de la obvia excepción a esta norma que constituye la categoría de agotamiento de fósiles. Asimismo, en los coches eléctricos REN este aspecto tampoco tiene una especial relevancia, salvo en las categorías de agotamiento de agua y ocupación de tierras agrícolas, en las que su impacto se dispara. Por el contrario, los resultados evidencian con igual claridad que la recarga de la batería supone precisamente el principal factor de impacto en el coche eléctrico NOREN+REN, con la relativa salvedad de la categoría de

toxicidad humana en la que, en cualquier caso, dicho aspecto continúa siendo sumamente relevante con un peso superior al 35% de la cuantificación total.

En lo concerniente al **desplazamiento** o uso del vehículo al margen del consumo de combustible o electricidad necesarios para su utilización, los vehículos presentan siempre valores nulos o prácticamente nulos, a excepción de los coches de combustión en las categorías de toxicidad humana y cambio climático. En esta última, además, este aspecto constituye precisamente el principal factor de impacto.

Finalmente, hay que destacar de nuevo que el aspecto de construcción y mantenimiento de la **carretera** tiene en todos los casos un impacto muy menor en la cuantificación total de los impactos del transporte, tal y como ya se mencionaba en el análisis individualizado de las seis categorías.

### 3.3. ANÁLISIS DE IMPACTOS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE SU LOCALIZACIÓN

Una vez presentado el estudio de caso desde un enfoque cuantitativo, se ofrecen a continuación los resultados obtenidos desde el punto de vista de la localización de impactos.

A la hora de realizar el análisis desde esta perspectiva se ha utilizado solo el coche eléctrico NOREN+REN ya que, tal y como se señala en el capítulo 3.1.5.- “Sistemas de producto ecoinvent elegidos para el caso de estudio”, los subprocesos relacionados con la obtención de energía eléctrica del proceso unitario genérico [*transport, passenger car, electric* | *transport, passenger car, electric* | *Cutoff, U*] que proporciona por defecto ecoinvent han sido modificados manualmente en el sistema de producto REN para garantizar que provengan exclusivamente de fuentes renovables y propiciar así la comparativa desarrollada en el capítulo 3.2.- “Análisis de impactos desde el punto de vista de su cuantificación”.

Esta manipulación del proceso no solo provoca las alteraciones de impacto que ya han sido analizadas a nivel cuantitativo, sino que también influye en su localización, ya que en la reasignación manual se han escogido subprocesos vinculados al mercado eléctrico español, concretamente. Teniendo en cuenta que el objetivo de este capítulo es analizar el grado de idoneidad de las localizaciones proporcionadas por defecto en ecoinvent, no se incorpora el sistema de producto REN en esta perspectiva geográfica del estudio, ya que invalidaría totalmente los resultados otorgando a España una relevancia que no es la que el modelo asigna por defecto.

#### 3.3.1. PRESENTACIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS

El estudio realizado demuestra con rotundidad que ecoinvent asigna la gran mayoría de

los impactos a las siguientes localizaciones geográficas genéricas:

- ✓ [GLO] Global (= Mundo)
- ✓ [RoW] Resto del Mundo (= Global excepto Suiza)
- ✓ [RER] Europa
- ✓ Europa excepto Suiza
- ✓ Suiza

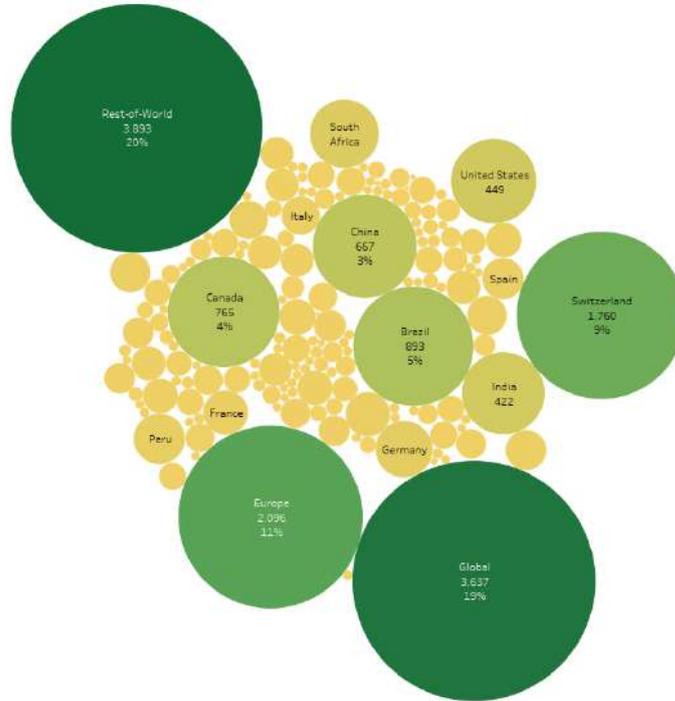
Hay que señalar que ecoinvent es de origen suizo, lo que explica la extraordinaria anomalía que supone utilizar con tanta frecuencia dicho país como referencia directa o indirecta a la hora de asignar localizaciones a los impactos del modelo (“Suiza”, “Europa excepto Suiza” o “Global excepto Suiza”). Esto implica que si se realiza un estudio de LCA utilizando los procesos proporcionados por ecoinvent con las localizaciones de impacto que propone por defecto, los resultados estarán referidos en la mayoría de los casos a ámbitos geográficos asignados de forma totalmente genérica mediante etiquetas como RoW (queriendo significar que un determinado impacto afecta a un país inespecífico diferente de Suiza) o incluso directamente GLO (considerando que el impacto simplemente tiene un efecto a escala planetaria).

La aserción realizada, que se confirma también en el caso de estudio realizado, no está solo referida a los procesos implicados en los tres vehículos elegidos, sino que aplica en general al conjunto de los 19.128 procesos proporcionados por la base de datos ecoinvent en su totalidad.

En la Ilustración 24 se observa que un 39% de los procesos de ecoinvent vienen asignados por defecto a GLO y RoW. Además, muchos otros se vinculan a ámbitos geográficos igualmente inespecíficos a nivel de país, como “Europa” (11%) y otros más que no se aprecian en la gráfica como “África Oriental”, “Asia Occidental”, etc., o el ya mencionado “Europa excepto Suiza”.

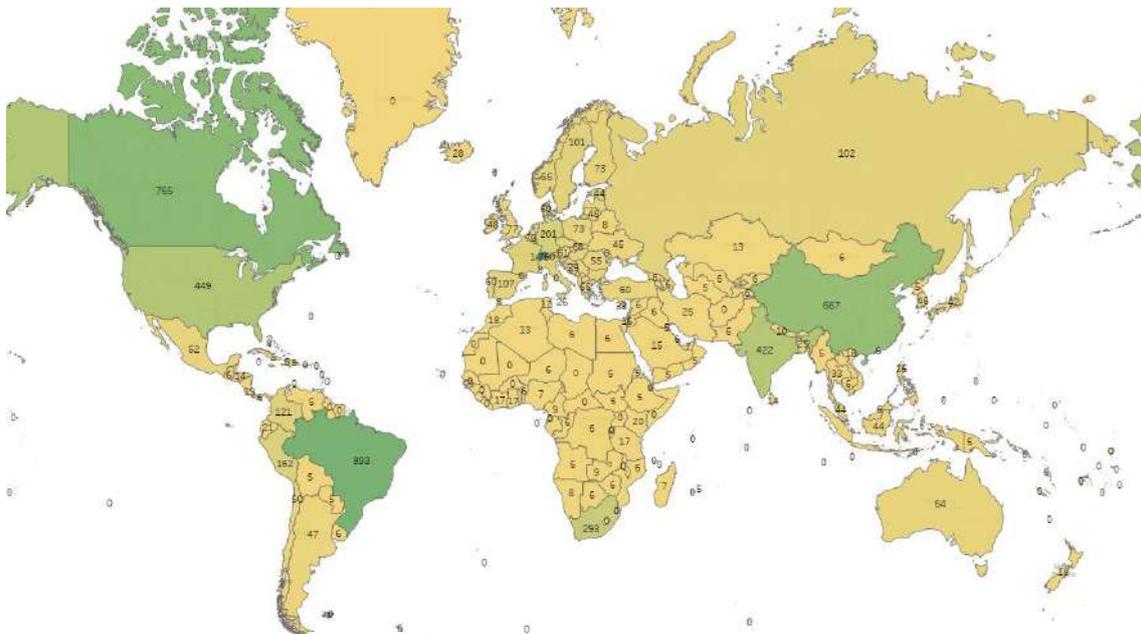
Por su parte, el mapa de la Ilustración 25 recoge el número de procesos localizados específicamente en países concretos y pone de manifiesto la escasa proporción que representan estos sobre el conjunto de los 19.128. Se observa, además, el extraordinario peso que tiene Suiza, siendo el país del mundo con más procesos asignados (1.760), así como otras cuestiones ciertamente significativas que pueden descubrirse si se analiza el mapa con detalle, como por ejemplo el hecho de que la República de Guinea no tenga localizado específicamente ni uno solo de los nueve procesos relacionados con la bauxita recogidos en ecoinvent. Estos aparecen asignados una vez más a GLO, RoW o Suiza en lugar de al país africano que es, sin embargo, uno de los principales productores mundiales de este mineral de aluminio (ver Ilustración 11), un metal esencial, por otra parte, para la actividad industrial en general y muy particularmente para la del automóvil.

Ilustración 24. Distribución de las localizaciones por defecto de los procesos deecoinvent.



Fuente: elaboración propia. Datos: ecoinvent v371\_cutoff\_unit\_lcia\_20210104.

Ilustración 25. Localizaciones por defecto de los procesos deecoinvent a nivel de país.



Fuente: elaboración propia. Datos: ecoinvent v371\_cutoff\_unit\_lcia\_20210104.

Entrando ya en el ámbito exclusivo del caso de estudio, la Tabla 15 presenta las 25 localizaciones más utilizadas en la asignación de los impactos de los tres coches analizados. El dato de % con barra azul representa el peso aportado al total de impacto cuantificado por categoría (enfoque de columna) y la intensidad del fondo amarillo representa la relevancia del impacto dentro de la localización (enfoque de fila). Así, por ejemplo, se observa que el 27,58% del impacto cuantificado en la categoría de agotamiento de metales para el coche de gasolina (9,28E-06 de 3,36E-05 kg Fe eq) está localizado en América Septentrional (Northern America, [NA]), lo que supone menos de un tercio del impacto global calculado, fundamentalmente asimilado a GLO y RoW (71,03%). La alta intensidad del fondo amarillo de la celda significa que la relevancia de la aportación realizada por esta región al agotamiento de metales es muy alta en comparación a su aportación a otras categorías de impacto.

Tabla 15. Localización de impactos por región y categoría.

Localizaciones	Acidificación terrestre			Agotamiento de agua			Agotamiento de fósiles			Agotamiento de metales		
	Gasolina	Diésel	Eléctrico	Gasolina	Diésel	Eléctrico	Gasolina	Diésel	Eléctrico	Gasolina	Diésel	Eléctrico
Rest-of-World	15,87%	11,59%	20,39%	25,15%	24,65%	27,99%	45,31%	44,96%	24,39%	32,81%	32,79%	31,06%
Global	29,83%	20,87%	8,02%	0,02%	0,02%	0,01%	1,82%	1,80%	3,07%	38,22%	38,23%	39,90%
Europe	5,97%	36,21%	3,19%	0,05%	0,05%	0,02%	1,87%	1,93%	3,53%	1,34%	1,33%	0,33%
Switzerland	0,08%	0,08%	0,07%	5,81%	5,83%	0,82%						
Russia	7,05%	5,53%	5,82%	6,43%	6,91%	6,04%	11,28%	11,21%	7,72%			
Europe without Switzerland	18,17%	8,58%	1,01%	0,17%	0,13%		4,23%	4,55%	21,54%			
China	2,18%	1,69%	4,48%	0,02%	0,02%	0,02%	22,62%	22,38%	4,04%			
Middle East							0,81%	0,84%	4,36%	27,58%	27,61%	28,69%
Northern America	0,02%	0,02%	0,03%									
Chile	0,13%	0,09%	0,54%	0,79%	0,78%	1,15%						
United States	0,47%	0,33%	0,99%	0,01%	0,01%	0,01%	1,53%	1,53%	5,24%	0,01%	0,01%	
Australia	0,39%	0,29%	1,04%	0,81%	0,84%	0,70%	0,69%	0,72%	2,96%			
Sweden	0,01%	0,01%	0,01%	3,77%	3,68%	2,22%						
Germany	0,22%	0,15%	0,35%	1,27%	1,24%	0,75%	0,02%	0,03%	0,07%			
Peru	0,02%	0,01%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%						
Indonesia	0,24%	0,17%	0,97%	0,06%	0,06%	0,09%	0,58%	0,61%	2,76%			
South Africa	3,33%	2,54%	3,91%	0,03%	0,03%	0,01%	0,94%	1,01%	2,83%			
India	0,70%	0,52%	1,49%	0,02%	0,02%	0,01%	1,29%	1,36%	7,88%			
Canada, Québec	0,08%	0,06%	0,07%	1,33%	1,42%	1,12%				0,04%	0,04%	0,02%
Canada	0,06%	0,05%	0,04%									
China, Sichuan (四川)	0,13%	0,10%	0,42%	6,55%	6,60%	9,01%						
Mexico	0,16%	0,12%	0,61%	0,93%	0,92%	1,19%						
Western Electricity Coordinating Council, US part only	0,11%	0,08%	0,41%	3,75%	3,70%	5,09%						
SERC Reliability Corporation	0,34%	0,25%	1,36%	0,94%	0,93%	1,31%						
Japan	0,47%	0,34%	2,07%	1,67%	1,67%	2,34%						

Localizaciones	Cambio climático			Disminución de la capa de ozono			Eutrofización de aguas dulces			Eutrofización de aguas marinas		
	Gasolina	Diésel	Eléctrico	Gasolina	Diésel	Eléctrico	Gasolina	Diésel	Eléctrico	Gasolina	Diésel	Eléctrico
Rest-of-World	11,29%	12,32%	18,00%	43,76%	43,89%	43,67%	7,57%	7,72%	6,91%	23,21%	14,34%	17,79%
Global	4,64%	4,93%	3,25%	0,15%	0,15%	1,86%	72,40%	72,63%	67,78%	52,40%	52,23%	45,94%
Europe	61,52%	59,89%	1,18%	1,03%	1,15%	3,06%	0,17%	0,16%	0,13%	6,92%	43,27%	2,48%
Switzerland	0,22%	0,28%	0,35%				0,07%	0,07%	0,02%	0,23%	0,18%	0,12%
Russia	0,75%	0,82%	4,01%	14,76%	14,71%	16,37%	1,00%	0,98%	1,36%	0,71%	0,43%	0,74%
Europe without Switzerland	7,32%	5,86%	0,92%				0,35%	0,34%	0,07%	4,48%	2,15%	0,61%
China	1,41%	1,62%	5,49%			0,03%	2,27%	2,26%	2,71%	1,34%	0,68%	12,40%
Middle East	0,01%	0,01%										
Northern America	0,05%	0,06%	0,22%			0,01%				0,06%	0,04%	0,08%
Chile	0,04%	0,05%	0,31%				3,33%	3,35%	6,20%	0,19%	0,12%	0,55%
United States	0,17%	0,18%	0,54%	1,43%	1,42%	6,82%	2,94%	2,85%	3,05%	0,55%	0,34%	0,62%
Australia	0,31%	0,35%	1,39%			0,01%	3,73%	3,60%	3,60%	0,29%	0,18%	0,48%
Sweden	0,01%	0,01%	0,02%							0,01%		0,01%
Germany	0,57%	0,60%	1,63%	0,10%	0,11%	0,77%	0,03%	0,03%	0,03%	0,14%	0,08%	0,14%
Peru	0,02%	0,02%	0,06%				1,62%	1,62%	2,58%	0,06%	0,04%	0,13%
Indonesia	0,16%	0,17%	1,09%				0,44%	0,44%	0,83%	0,16%	0,10%	0,42%
South Africa	0,77%	0,87%	1,75%		0,01%	0,04%				1,07%	0,69%	0,85%
India	0,51%	0,57%	1,11%				0,04%	0,04%	0,01%	0,17%	0,10%	0,11%
Canada, Québec	0,06%	0,06%	0,10%			0,01%	0,23%	0,22%	0,21%	0,22%	0,13%	0,24%
Canada	0,02%	0,02%	0,02%				1,19%	1,17%	1,79%	0,05%	0,03%	0,12%
China, Sichuan (四川)	0,06%	0,06%	0,32%			0,01%				0,06%	0,04%	0,12%
Mexico	0,12%	0,13%	0,74%				1,34%	1,29%	1,10%	0,12%	0,07%	0,24%
Western Electricity Coordinating Council, US part only	0,22%	0,24%	1,45%			0,02%				0,07%	0,05%	0,18%
SERC Reliability Corporation	0,47%	0,51%	2,23%			0,09%				0,11%	0,07%	0,27%
Japan	0,35%	0,39%	2,71%							0,19%	0,12%	0,52%

Localizaciones	Ecotoxicidad de aguas dulces			Ecotoxicidad de aguas marinas			Ecotoxicidad terrestre			Toxicidad humana		
	Gasolina	Diésel	Eléctrico	Gasolina	Diésel	Eléctrico	Gasolina	Diésel	Eléctrico	Gasolina	Diésel	Eléctrico
	Rest-of-World	61,20%	61,87%	26,34%	60,52%	61,27%	26,61%	52,29%	53,43%	45,94%	27,72%	26,27%
Global	7,42%	7,27%	6,35%	7,69%	7,55%	6,88%	13,55%	13,68%	27,86%	42,11%	39,94%	48,71%
Europe	0,08%	0,08%	0,01%	0,53%	0,52%	0,05%	21,42%	23,31%	7,95%	4,16%	10,76%	0,47%
Switzerland	1,08%	1,08%	0,85%	1,05%	1,06%	0,82%	0,23%	0,25%	0,90%	0,91%	0,89%	1,03%
Russia	1,18%	1,12%	3,04%	1,17%	1,11%	3,01%	0,03%	0,04%	0,23%	0,07%	0,71%	1,58%
Europe without Switzerland	7,94%	8,57%	11,11%	8,15%	8,66%	10,94%	8,96%	5,77%	0,33%	3,67%	2,21%	0,18%
China	2,51%	2,40%	5,99%	2,51%	2,40%	5,98%	0,42%	0,44%	2,86%	2,80%	2,65%	4,11%
Middle East												
Northern America									0,06%	0,01%	0,01%	0,01%
Chile	4,67%	4,51%	15,18%	4,62%	4,47%	15,00%	0,03%	0,03%	0,32%	2,08%	1,95%	5,83%
United States	3,20%	2,99%	6,38%	3,09%	2,89%	6,15%	0,70%	0,69%	4,17%	2,95%	2,66%	4,23%
Australia	3,79%	3,53%	6,99%	3,75%	3,50%	6,91%	0,09%	0,09%	0,42%	3,36%	3,04%	4,51%
Sweden									0,01%	0,01%	0,01%	0,01%
Germany	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,06%	0,09%	0,08%	0,15%
Peru	2,09%	2,00%	6,15%	2,06%	1,99%	6,08%	0,01%	0,01%	0,02%	3,34%	3,24%	3,42%
Indonesia	0,62%	0,60%	2,04%	0,62%	0,60%	2,02%	0,17%	0,17%	0,52%	0,45%	0,42%	1,26%
South Africa									0,08%	0,09%	0,07%	0,05%
India	0,03%	0,03%	0,01%	0,03%	0,03%	0,02%	0,23%	0,23%	0,40%	0,78%	0,74%	0,63%
Canada, Québec							0,02%	0,02%	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%
Canada	1,50%	1,43%	4,17%	1,49%	1,42%	4,12%			0,02%	1,19%	1,09%	2,63%
China, Sichuan (四川)							0,01%	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%
Mexico	1,28%	1,18%	1,85%	1,27%	1,17%	1,83%	0,02%	0,03%	0,19%	1,40%	1,26%	1,69%
Western Electricity Coordinating Council, US part only							0,01%	0,01%	0,07%	0,01%	0,01%	0,01%
SERC Reliability Corporation							0,02%	0,02%	0,17%	0,02%	0,02%	0,04%
Japan							0,02%	0,05%	0,47%	0,05%	0,05%	0,14%

Localizaciones	Formación de oxidantes fotoquímicos			Formación de partículas			Ocupación de suelo urbano			Ocupación de tierras agrícolas		
	Gasolina	Diésel	Eléctrico	Gasolina	Diésel	Eléctrico	Gasolina	Diésel	Eléctrico	Gasolina	Diésel	Eléctrico
	Rest-of-World	24,61%	15,28%	17,60%	24,97%	18,80%	16,56%	84,61%	84,90%	63,29%	52,71%	55,76%
Global	30,73%	18,61%	45,45%	25,02%	18,21%	8,31%	6,23%	6,05%	15,55%			
Europe	21,80%	53,13%	3,05%	5,59%	31,63%	1,88%	2,01%	1,87%	1,29%	0,01%	0,01%	0,01%
Switzerland	0,20%	0,15%	0,09%	0,12%	0,11%	0,06%	0,71%	0,58%	0,71%	5,65%	5,15%	3,41%
Russia	0,98%	0,63%	1,41%	3,70%	2,95%	4,36%	0,11%	0,10%	0,37%			
Europe without Switzerland	7,55%	3,24%	0,32%	10,27%	5,11%	0,42%	0,07%	0,07%	0,08%	0,02%	0,02%	0,01%
China	1,23%	0,80%	2,07%	3,40%	2,65%	5,49%	2,18%	2,23%	8,23%	0,03%	0,03%	0,10%
Middle East	0,20%	0,12%	0,02%									
Northern America	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,33%	0,32%	1,30%			0,02%
Chile	0,07%	0,05%	0,26%	0,78%	0,59%	2,48%	0,15%	0,14%	0,77%			
United States	0,62%	0,38%	0,85%	0,40%	0,30%	0,64%	0,17%	0,16%	0,55%	0,19%	0,20%	0,07%
Australia	0,22%	0,14%	0,49%	0,30%	0,23%	0,65%	0,23%	0,22%	0,74%			
Sweden	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,04%	0,03%	0,07%	19,86%	17,53%	13,70%
Germany	0,19%	0,11%	0,25%	0,16%	0,11%	0,18%	0,13%	0,11%	0,31%	13,47%	12,87%	14,47%
Peru	0,02%	0,01%	0,02%	0,11%	0,09%	0,02%	0,27%	0,27%	0,71%			
Indonesia	0,16%	0,10%	0,56%	3,18%	2,43%	9,33%	0,28%	0,28%	1,03%			
South Africa	1,49%	0,96%	1,55%	1,76%	1,38%	1,53%	0,64%	0,68%	0,85%			
India	0,33%	0,21%	0,30%	1,44%	1,08%	0,96%	0,95%	0,95%	2,34%	0,11%	0,11%	0,04%
Canada, Québec	0,04%	0,02%	0,04%	0,05%	0,04%	0,03%	0,20%	0,20%	0,34%	7,17%	7,48%	5,80%
Canada	0,02%	0,01%	0,01%	0,11%	0,08%	0,24%	0,09%	0,08%	0,32%			
China, Sichuan (四川)	0,08%	0,05%	0,21%	0,11%	0,09%	0,26%						
Mexico	0,08%	0,05%	0,26%	0,20%	0,15%	0,55%	0,03%	0,03%	0,10%			
Western Electricity Coordinating Council, US part only	0,09%	0,06%	0,31%	0,71%	0,53%	2,03%						
SERC Reliability Corporation	0,15%	0,09%	0,50%	0,88%	0,66%	2,58%						
Japan	0,23%	0,14%	0,85%	0,29%	0,21%	0,93%						

Localizaciones	Radiación ionizante			Transformación de tierra natural		
	Gasolina	Diésel	Eléctrico	Gasolina	Diésel	Eléctrico
	Rest-of-World	5,35%	5,50%	14,23%	3,59%	3,65%
Global	23,18%	23,82%	57,59%	87,59%	87,13%	44,42%
Europe			0,01%	2,43%	2,35%	2,23%
Switzerland	65,82%	64,86%	11,48%	0,02%	0,02%	-0,05%
Russia	0,46%	0,48%	2,16%	0,05%	0,05%	0,39%
Europe without Switzerland				-0,06%	-0,07%	-0,01%
China			0,01%	0,86%	0,93%	6,85%
Middle East						
Northern America	0,33%	0,34%	0,82%	0,09%	0,10%	0,79%
Chile				0,02%	0,02%	0,35%
United States			0,01%	0,03%	0,03%	0,20%
Australia				0,11%	0,11%	0,60%
Sweden	0,65%	0,67%	1,09%	0,01%	0,01%	0,04%
Germany				0,01%	0,01%	0,03%
Peru				0,03%	0,03%	0,23%
Indonesia				0,09%	0,10%	0,74%
South Africa	0,04%	0,05%	0,06%	1,12%	1,28%	0,15%
India				1,40%	1,47%	3,70%
Canada, Québec				0,68%	0,74%	4,14%
Canada				0,02%	0,02%	0,17%
China, Sichuan (四川)						
Mexico	0,06%	0,06%	0,22%	0,01%	0,01%	0,06%
Western Electricity Coordinating Council, US part only	0,14%	0,14%	0,53%			0,01%
SERC Reliability Corporation	0,67%	0,70%	2,63%			
Japan	0,09%	0,10%	0,40%			0,03%

Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

Los datos reflejan claramente la imprecisión geográfica que por defecto proporciona ecoinvent a la hora de localizar los impactos, comprobándose que en todos los casos las cinco localizaciones genéricas señaladas inicialmente se encuentran siempre a la cabeza del ranking. A la hora de realizar un posible estudio de desarrollo y sostenibilidad en el marco de la globalización, este hecho impide totalmente poder analizar con rigor la repercusión que tiene en las diferentes regiones del planeta el uso generalizado del

transporte en automóvil.

Desde una perspectiva de Norte y Sur Globales, el análisis del peso aportado por cada bloque geográfico al total de impacto cuantificado ofrece unos resultados particularmente desconcertantes para algunas de las categorías.

Tabla 16. Localización de impactos por categorías en el Norte y Sur Globales.

Categorías de impacto	Tipos de coche	Norte Global	América del Norte	Asia	Europa	Oceanía	Asia + Europa	Sur Global	África	América del Sur	Asia	Asia + África	Inespecífico
Acidificación terrestre	Gasolina	38,25%	1,96%	7,70%	28,08%	0,46%	0,05%	16,05%	3,37%	0,66%	12,02%		45,70%
	Diésel	55,40%	1,43%	6,00%	47,57%	0,36%	0,04%	12,16%	2,58%	0,49%	9,09%		32,46%
	Eléctrico	27,29%	6,32%	8,68%	11,17%	1,09%	0,03%	44,30%	3,97%	2,45%	37,88%		28,41%
Agotamiento de agua	Gasolina	46,01%	8,55%	8,17%	28,48%	0,81%		28,83%	0,04%	2,87%	25,90%	0,02%	25,17%
	Diésel	46,13%	8,55%	8,65%	28,09%	0,84%		29,20%	0,04%	2,86%	26,28%	0,02%	24,67%
	Eléctrico	39,11%	10,93%	8,49%	12,99%	0,70%		38,90%	0,03%	4,23%	34,64%		27,99%
Agotamiento de fósiles	Gasolina	19,62%	3,75%	11,28%	3,90%	0,69%		33,25%	4,35%	0,18%	6,10%	22,62%	47,13%
	Diésel	19,69%	3,76%	11,21%	4,00%	0,72%		33,54%	4,45%	0,19%	6,52%	22,38%	46,76%
	Eléctrico	27,30%	10,19%	7,72%	6,43%	2,96%		45,24%	8,29%	0,72%	32,19%	4,04%	27,47%
Agotamiento de metales	Gasolina	28,96%			1,34%								71,03%
	Diésel	28,98%			1,33%								71,01%
	Eléctrico	29,03%			0,33%								70,96%
Cambio climático	Gasolina	75,20%	1,91%	1,34%	71,60%	0,32%	0,03%	8,89%	0,83%	0,38%	7,67%	0,01%	15,92%
	Diésel	72,66%	2,09%	1,46%	68,72%	0,36%	0,03%	10,08%	0,94%	0,42%	8,71%	0,01%	17,25%
	Eléctrico	31,97%	11,92%	8,43%	10,18%	1,41%	0,03%	46,78%	1,98%	2,43%	42,37%		21,26%
Disminución de la capa de ozono	Gasolina	19,65%	3,35%	14,76%	1,54%			36,42%	3,88%		0,04%	32,50%	43,92%
	Diésel	19,75%	3,34%	14,71%	1,70%			36,21%	3,87%		0,05%	32,29%	44,04%
	Eléctrico	31,82%	8,40%	16,40%	7,01%	0,01%		22,64%	5,56%	0,01%	0,88%	16,19%	45,53%
Ecotoxicidad de aguas dulces	Gasolina	19,31%	4,70%	1,67%	9,15%	3,79%		12,07%	0,51%	8,28%	3,28%		68,62%
	Diésel	19,32%	4,42%	1,58%	9,79%	3,53%		11,53%	0,49%	7,91%	3,13%		69,14%
	Eléctrico	39,96%	10,56%	4,38%	12,03%	6,99%		33,36%	1,66%	23,50%	8,20%		32,69%
Ecotoxicidad de aguas marinas	Gasolina	19,79%	4,58%	1,65%	9,81%	3,75%		12,00%	0,51%	8,19%	3,30%		68,21%
	Diésel	19,70%	4,32%	1,58%	10,30%	3,50%		11,49%	0,49%	7,84%	3,16%		68,82%
	Eléctrico	33,42%	10,28%	4,35%	11,88%	6,91%		33,09%	1,64%	23,22%	8,23%		33,49%
Ecotoxicidad terrestre	Gasolina	31,88%	0,79%	0,10%	30,89%	0,10%		2,28%	0,09%	0,40%	1,79%		65,84%
	Diésel	30,59%	0,79%	0,10%	29,60%	0,10%		2,30%	0,09%	0,41%	1,80%		67,11%
	Eléctrico	16,15%	4,87%	0,84%	10,02%	0,42%		10,03%	0,23%	1,24%	8,56%		73,80%
Toxicidad humana	Gasolina	17,95%	4,21%	1,12%	9,24%	3,37%	0,01%	12,23%	0,43%	7,15%	4,65%		69,83%
	Diésel	22,24%	3,83%	1,03%	14,31%	3,06%	0,01%	11,55%	0,41%	6,74%	4,40%		66,22%
	Eléctrico	16,10%	7,01%	2,32%	2,24%	4,52%	0,01%	19,55%	1,06%	11,33%	7,16%		64,37%
Eutrofización de aguas dulces	Gasolina	10,12%	4,37%	1,39%	0,63%	3,73%		9,90%	0,36%	6,67%	2,87%		79,97%
	Diésel	9,82%	4,24%	1,37%	0,61%	3,60%		9,82%	0,36%	6,60%	2,86%		80,35%
	Eléctrico	10,84%	5,04%	1,93%	0,27%	3,60%		14,46%	0,67%	10,15%	3,64%		74,69%
Eutrofización de aguas marinas	Gasolina	15,69%	1,33%	1,06%	13,00%	0,30%		8,68%	1,11%	0,86%	6,71%		75,61%
	Diésel	48,05%	0,82%	0,64%	46,40%	0,19%		5,37%	0,71%	0,53%	4,13%		46,57%
	Eléctrico	9,08%	2,15%	1,71%	4,73%	0,49%		27,20%	0,92%	2,23%	24,05%		63,73%
Formación de oxidantes fotoquímicos	Gasolina	34,44%	1,30%	1,40%	31,48%	0,24%	0,02%	10,23%	1,56%	0,35%	8,12%	0,20%	55,34%
	Diésel	59,54%	0,80%	0,89%	57,67%	0,16%	0,02%	6,57%	1,00%	0,22%	5,23%	0,12%	33,89%
	Eléctrico	12,55%	2,92%	2,94%	6,17%	0,51%	0,01%	24,40%	1,64%	1,01%	21,73%	0,02%	63,06%
Formación de partículas	Gasolina	28,56%	4,53%	4,24%	19,41%	0,34%	0,04%	21,45%	1,81%	1,37%	18,27%		49,99%
	Diésel	46,41%	3,39%	3,36%	39,36%	0,27%	0,03%	16,58%	1,42%	1,04%	14,12%		37,01%
	Eléctrico	27,31%	12,44%	6,11%	8,06%	0,68%	0,02%	47,83%	1,62%	3,74%	42,47%		24,87%
Ocupación de suelo urbano	Gasolina	4,16%	0,79%	0,12%	3,02%	0,23%		5,02%	0,65%	0,90%	3,47%		90,83%
	Diésel	3,95%	0,77%	0,11%	2,85%	0,22%		5,11%	0,69%	0,89%	3,53%		90,95%
	Eléctrico	6,14%	2,51%	0,43%	2,46%	0,74%		15,02%	0,92%	2,28%	11,82%		78,84%
Ocupación de tierras agrícolas	Gasolina	46,37%	7,36%		39,01%			0,91%		0,68%	0,23%		52,72%
	Diésel	43,27%	7,68%		35,59%			0,96%		0,72%	0,24%		55,76%
	Eléctrico	37,49%	5,89%		31,60%			2,17%		1,98%	0,19%		60,34%
Radiación ionizante	Gasolina	71,07%	2,22%	0,65%	68,20%			0,41%	0,04%	0,08%	0,29%		28,52%
	Diésel	70,25%	2,29%	0,67%	67,29%			0,44%	0,05%	0,08%	0,31%		29,31%
	Eléctrico	26,61%	8,18%	2,96%	15,47%			1,56%	0,06%	0,30%	1,20%		71,82%
Transformación de tierra natural	Gasolina	3,49%	0,85%	0,06%	2,47%	0,11%		5,33%	1,12%	1,74%	2,47%		91,17%
	Diésel	3,49%	0,92%	0,06%	2,40%	0,11%		5,73%	1,29%	1,82%	2,62%		90,78%
	Eléctrico	9,41%	5,70%	0,46%	2,65%	0,60%		34,12%	0,20%	21,20%	12,72%		56,47%

Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

En las categorías resaltadas en color amarillo se observa que ecoinvent apenas localiza procesos en los países del Sur Global para la ocupación de tierras agrícolas y la radiación ionizante y que no localiza ninguno en absoluto para el agotamiento de metales, distribuyendo el impacto calculado entre el Norte Global y otras regiones inespecíficas (GLO y RoW) en una proporción aproximada de 5/5, 7/3 (3/7 para el coche eléctrico en el segundo caso) y 3/7, respectivamente. Por otro lado, en las categorías resaltadas en color verde se aprecia que en la cuantificación de los impactos

relacionados con la ocupación de suelo urbano y la transformación de tierra natural, el peso relativo asimilable a localizaciones del Norte y Sur Globales es mínimo frente al localizado en GLO y RoW, distribuyendo el impacto calculado en una proporción aproximada de 1/9 para los coches de combustión en ambos casos y de 2/8 y 4/6 para el coche eléctrico en ocupación de suelo urbano y transformación de tierra natural, respectivamente.

De entre los aspectos reseñados, llama particularmente la atención la ausencia total de localización de impactos en el Sur Global dentro de la categoría de agotamiento de metales, teniendo en cuenta que algunos países de África y Sudamérica son los principales productores mundiales de varios de los metales más utilizados en la fabricación de vehículos, tal y como reflejaba la Ilustración 11. Partiendo de esta apreciación se ha profundizado en el análisis de los resultados obtenidos para comprobar siecoinvent localiza en cierta medida los impactos derivados de la adquisición de materias primas como metales o petróleo en los países en los que se desarrolla la correspondiente actividad extractiva. En el apartado siguiente se detallan las conclusiones obtenidas tras el análisis.

### 3.3.2. ANÁLISIS DETALLADO POR PROCESOS

Para realizar una valoración del grado de idoneidad de los criterios de asignación de localizaciones utilizados porecoinvent se han escogido algunos procesos especialmente significativos:

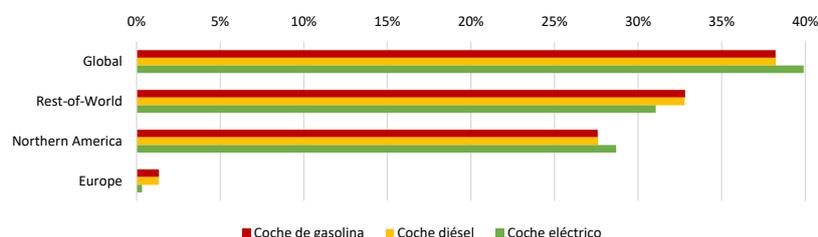
- ✓ Procesos relacionados con el uranio
- ✓ Procesos relacionados con los metales del grupo del platino
- ✓ Procesos relacionados con el cobalto
- ✓ Procesos relacionados con el petróleo

Se presentan a continuación las conclusiones del análisis realizado.

#### 3.3.2.1. PROCESOS RELACIONADOS CON EL URANIO

Tal y como se señalaba en el ejemplo explicativo de la Tabla 15, al analizar la categoría de agotamiento de metales se observa que los impactos se asignan geográficamente de forma genérica sin proporcionar ninguna localización específica a nivel de país. En relación con su peso aportado al total de impacto cuantificado para la categoría, se veía que un 71% es adjudicado a GLO o RoW, un 28% a NA y un 1% a Europa (un 0,3% en el caso del coche eléctrico).

### Ilustración 26. Localización geográfica de impactos en la categoría de agotamiento de metales.



Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

Un análisis aún más detallado de los datos permite observar que los impactos atribuidos a NA están relacionados con la minería de uranio, que localizan en dicha región un 48,90% del impacto total cuantificado para estas operaciones y asignan a RoW el 51,10%. La atribución a NA de la mitad del peso de los procesos de explotación de minas de uranio está probablemente relacionado con el hecho de que la mina de McArthur River en Canadá constituye el mayor yacimiento del mundo de este metal, pero aun así este criterio de asignación suscita algunas cuestiones:

- ✓ En lo referente a la localización, si tal ha sido el criterio utilizado en ecoinvent, no tiene sentido asignar el proceso genéricamente a NA en vez de localizarlo directamente Canadá. El uranio estadounidense apenas alcanza el 0,1% de la producción mundial (World Nuclear Association, 2020), por lo que no aporta nada englobar a ambos países bajo la etiqueta NA siendo Canadá la responsable de un 99,9% de la producción de uranio de esa región.
- ✓ En lo referente al peso asignado dentro de la cuantificación del impacto del proceso, bajo un criterio de producción no tiene sentido adjudicar a NA en torno al 50% del mismo pues, a pesar de contar con la mayor mina del mundo, lo cierto es que en 2019 Canadá solo generó un 12% de producción mundial, muy por detrás de Kazajistán con un 40% (World Nuclear Association, 2020).
- ✓ Dado que ecoinvent es una base de datos europea, pudiera ser que el criterio utilizado hubiera sido el de considerar solo los países de los que Europa importa uranio y no simplemente los grandes productores a nivel mundial, pero en este caso tampoco tendría mucho sentido vincular explícitamente la mitad del proceso a Canadá y dejar la otra mitad localizada genéricamente en RoW, pudiendo asignar esa parte a otros proveedores conocidos como Australia, que además de tener una producción muy similar a la canadiense, es el segundo gran suministrador de uranio de la UE, (World Nuclear Association, 2020).

**Conclusión:** En el caso de los procesos extractivos del uranio, ecoinvent aplica un criterio relacionado con el papel que juega Canadá en el contexto mundial como segundo productor de uranio del planeta, pero omite las referencias a Kazajistán como primer productor mundial o a Australia como tercero. Además, la utilización de la

etiqueta NA incluye innecesariamente a USA, cuya aportación a la producción mundial de uranio es mínima.

### 3.3.2.2. PROCESOS RELACIONADOS CON LOS METALES DEL GRUPO DEL PLATINO

Los metales del grupo del platino resultan especialmente relevantes en la fabricación de automóviles, particularmente en el caso del rodio, el paladio y el platino, que se utilizan como convertidores catalíticos de los sistemas de escape de los coches para reducir la contaminación. Su gran demanda y escasez los ha convertido en los metales más preciosos del planeta, especialmente el rodio, cuyo precio en el mercado supera hasta en 15 veces el precio del oro.

Tabla 17. Mercado de cotización de metales preciosos.

New York Spot Price								
Euro		gram	MARKET IS OPEN (Closes in 2 hrs. 7 mins)			Market Alerts		
Metals	Date	Time (EST)	Bid	Ask	Change		Low	High
 GOLD	04/07/2021	14:54	47.10	47.12	-0.09	-0.20%	46.82	47.21
 SILVER	04/07/2021	14:53	0.68	0.68	-0.00	-0.09%	0.67	0.69
 PLATINUM	04/07/2021	14:53	33.11	33.38	-0.32	-0.94%	32.86	33.84
 PALLADIUM	04/07/2021	14:51	68.74	72.80	-1.63	-2.32%	68.28	73.30
 RHODIUM	04/07/2021	09:05	717.42	771.57	+13.74	+1.95%	702.59	772.62

Fuente: Kitco, 2021.

Tal y como se recogía en la Ilustración 11, los principales productores mundiales de estos metales son Sudáfrica, con un 80% de la producción mundial de rodio y un 71% de la de platino, y Rusia, con un 40% de la de paladio. La Tabla 18 recoge la localización de los procesos relacionados con los metales del grupo del platino y su aportación respectiva a las 12 categorías de impacto en las que intervienen. Los datos se corresponden específicamente con el caso de coche de gasolina, si bien son muy similares a los que arrojan los coches diésel y eléctrico desde el punto de vista de las localizaciones establecidas.

Se observa que en este casoecoinvent localiza correctamente en Sudáfrica los procesos relacionados con las operaciones de extracción y refinería para la obtención de platino, así como en Rusia los correspondientes a las operaciones de minería de minerales con alto contenido de paladio. Por lo que respecta a las operaciones de minería y concentración de minerales, que son aquellas mediante las que se aumenta el porcentaje de concentración de un mineral determinado para producir la segregación de dos o más especies mineralógicas y generar una corriente enriquecida en un mineral de interés, se observa que no están desglosadas por metales y que son imputadas al 100% genéricamente a Sudáfrica. Por último,ecoinvent asigna una vez más a regiones globales los procesos de tratamiento de catalizadores de automóvil (dos terceras partes

del impacto a RoW y un tercio a Europa), si bien es cierto que el peso de estos procesos en la cuantificación total de cada categoría es nulo o muy menor en todos los casos.

**Tabla 18. Localización de procesos relacionados con los metales del grupo del platino.**

Localización de procesos en el coche de gasolina	Cambio climático	Ecotoxicidad de aguas dulces	Toxicidad humana	Ecotoxicidad de aguas marinas	Eutrofización de aguas marinas	Transformación de tierra natural	Formación de partículas	Formación de oxidantes fotoquímicos	Acidificación terrestre	Ecotoxicidad terrestre	Ocupación de suelo urbano	Agotamiento de agua
<b>Europa</b>	<b>0,61%</b>				<b>0,01%</b>							
Tratamiento de catalizadores de automóvil (paladio)	0,01%											
Tratamiento de catalizadores de automóvil (platino)	0,60%				0,01%							
Tratamiento de catalizadores de automóvil (rodio)												
<b>Resto del mundo</b>	<b>1,24%</b>				<b>0,02%</b>							
Tratamiento de catalizadores de automóvil (paladio)	0,03%											
Tratamiento de catalizadores de automóvil (platino)	1,21%				0,02%							
Tratamiento de catalizadores de automóvil (rodio)												
<b>Rusia</b>	<b>92,80%</b>	<b>1,32%</b>	<b>55,53%</b>	<b>43,66%</b>	<b>58,70%</b>	<b>0,01%</b>	<b>92,04%</b>	<b>92,17%</b>	<b>92,16%</b>	<b>44,85%</b>	<b>0,11%</b>	<b>33,05%</b>
Operaciones de minería de minerales con alto contenido de paladio (cobre)	7,98%	0,11%	4,77%	3,75%	5,05%		7,91%	7,92%	7,92%	3,86%	0,01%	2,84%
Operaciones de minería de minerales con alto contenido de paladio (níquel)	3,47%	0,05%	2,08%	1,63%	2,20%		3,45%	3,45%	3,45%	1,68%		1,24%
Operaciones de minería de minerales con alto contenido de paladio (paladio)	10,00%	0,14%	5,99%	4,71%	6,33%		9,92%	9,94%	9,93%	4,83%	0,01%	3,56%
Operaciones de minería de minerales con alto contenido de paladio (platino)	71,35%	1,02%	42,69%	33,57%	45,12%	0,01%	70,76%	70,86%	70,86%	34,48%	0,09%	25,41%
Operaciones de minería de minerales con alto contenido de paladio (rodio)												
<b>Sudáfrica</b>	<b>5,34%</b>	<b>98,67%</b>	<b>44,45%</b>	<b>56,33%</b>	<b>41,26%</b>	<b>99,99%</b>	<b>7,95%</b>	<b>7,83%</b>	<b>7,83%</b>	<b>55,15%</b>	<b>99,89%</b>	<b>66,93%</b>
Operaciones de extracción y refinería de minerales del grupo del platino (cobre)		0,06%	0,02%	0,03%	0,02%					0,04%		0,04%
Operaciones de extracción y refinería de minerales del grupo del platino (oro)		0,12%	0,05%	0,06%	0,04%					0,08%		0,09%
Operaciones de extracción y refinería de minerales del grupo del platino (níquel)		0,07%	0,03%	0,03%	0,02%					0,04%		0,05%
Operaciones de extracción y refinería de minerales del grupo del platino (paladio)	0,01%	0,88%	0,37%	0,44%	0,30%					0,54%		0,65%
Operaciones de extracción y refinería de minerales del grupo del platino (platino)	0,27%	30,48%	12,77%	15,22%	10,45%		0,01%	0,01%	0,01%	18,71%		22,44%
Operaciones de extracción y refinería de minerales del grupo del platino (rodio)												
Operaciones de minería y concentración de minerales del grupo del platino (mineral concentrado)	5,06%	67,06%	31,21%	40,55%	30,43%	99,99%	7,94%	7,82%	7,82%	35,74%	99,89%	43,66%
<b>Total general</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

**Conclusión:** En el caso de los procesos extractivos de los metales del grupo del platino, ecoinvent aplica un criterio relacionado con la producción de estos países a nivel mundial y localiza correctamente en países concretos los impactos de los procesos de minería, extracción y refinería. Por otra parte, la imputación a Sudáfrica del 100% del peso conjunto de los tres metales en operaciones de concentración puede desvirtuar notablemente los resultados ofrecidos, teniendo en cuenta que dicho proceso tiene un elevado peso en la cuantificación total de algunas categorías, como ecotoxicidad de aguas dulces, transformación de tierra natural u ocupación de suelo urbano.

### 3.3.2.3. PROCESOS RELACIONADOS CON EL COBALTO

El cobalto constituye otro de los metales especialmente relevantes en la fabricación de automóviles, particularmente en las baterías de los coches eléctricos.

Al igual que sucede con Kazajistán en el caso del uranio, la República Democrática del Congo lidera en solitario la producción mundial de cobalto con un 59% del total global (Comisión Europea, 2020c). En este caso, a diferencia del caso del país centroasiático, la RD Congo sí es, además, también el principal proveedor de este mineral para la UE con un 68% de las importaciones (Comisión europea, 2020c). En ecoinvent, sin embargo, encontramos que todos los procesos vinculados a la producción de cobalto

están asignados a las localizaciones GLO o RoW.

**Conclusión:** En el caso de los procesos extractivos del cobalto, ecoinvent no aplica ningún criterio de localización de impactos y omite cualquier referencia a la RD Congo, el principal actor a nivel mundial, lo que imposibilita la realización de cualquier análisis geográfico riguroso en relación con los impactos provocados por los procesos relacionados con este recurso.

#### 3.3.2.4. PROCESOS RELACIONADOS CON EL PETRÓLEO

La Tabla 15 situaba Oriente Medio (Middle East, [ME]) como otra de las regiones más referenciadas dentro del estudio, con un peso particularmente relevante en las categorías de agotamiento de fósiles y disminución de la capa de ozono. Se observa, además, que el peso que aporta en la caracterización de las diferentes categorías de impacto es mucho mayor en el caso de los coches de combustión que en el eléctrico. Este hecho está sin duda relacionado con la localización del proceso de producción de petróleo en tierra firme en esa área geográfica del planeta.

**Tabla 19. Localización del proceso de producción de petróleo en tierra firme.**

Localizaciones	Cambio climático	Agotamiento de fósiles	Eutrofización de aguas marinas	Disminución de la capa de ozono	Formación de oxidantes fotoquímicos	Agotamiento de agua
Oriente Medio	60,20%	59,87%	0,12%	60,20%	60,20%	73,80%
Rusia	25,77%	26,14%	93,13%	25,77%	25,77%	10,50%
Resto del mundo	7,91%	7,90%	6,67%	7,91%	7,91%	8,20%
África	6,12%	6,09%	0,09%	6,12%	6,12%	7,50%

Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

La Tabla 19 recoge el peso relativo que aportan cada una de las regiones a las diferentes categorías en las que interviene el proceso de producción de petróleo en tierra firme, que es igual para los tres tipos de vehículos estudiados.

La primera observación que cabe realizar es similar a la apuntada para el caso del uranio, en el que el uso de una etiqueta genérica como NA invisibiliza automáticamente la enorme diferencia existente entre las realidades de USA y Canadá con respecto a la minería de dicho metal. Del mismo modo, la localización ME aglutina a 20 países tan diversos en lo referente a la producción de petróleo como pueden serlo Arabia Saudita (3<sup>er</sup> productor mundial en 2018 con 10,43 millones de barriles diarios) o Irak (4<sup>o</sup> con 4,61) frente a Yemen (49<sup>o</sup> con 0,06) o Siria (63<sup>o</sup> con 0,03) (CIA, 2019).

Por otra parte, si bien es cierto que Rusia es uno de los principales productores mundiales de petróleo (2<sup>o</sup> con 10,76), resulta curiosa su singular presencia en ecoinvent frente a la llamativa ausencia de otros países como Canadá (5<sup>o</sup> con 4,26) o China (7<sup>o</sup> con 3,77) y muy particularmente USA (1<sup>o</sup> con 10,96) (CIA, 2019).

**Conclusión:** En el caso del proceso de producción de petróleo en tierra firme, ecoinvent aplica un criterio relacionado con el papel que juega la región de ME en el contexto

mundial como indudable primera potencia, pero utiliza una etiqueta que, al aglutinar 20 países muy diversos, impide extraer conclusiones sólidas aplicables a la realidad específica de cada uno de ellos. Asimismo, la omisión de otros grandes países productores de petróleo como USA, Canadá o China, puede desvirtuar notablemente los resultados obtenidos en un análisis de LCA, repercutiendo exclusivamente a ME o Rusia la práctica totalidad de unos impactos que probablemente puedan estar también relacionados con países como los citados, u otros muchos más como Brasil, México, Nigeria, Noruega, etc.

### 3.3.3. ANÁLISIS DETALLADO POR ASPECTOS

Una vez presentadas las conclusiones a nivel de proceso, se concluye el estudio de caso con un breve análisis final centrado en la perspectiva de la localización de impactos en función del desglose de aspectos realizado en el capítulo 3.2.2.- “Análisis detallado por categorías de impacto y aspectos”.

**Tabla 20. Localización de impactos por aspecto y tipo de vehículo.**

Aspecto	Coche de Gasolina	Coche Diésel	Coche Eléctrico
Vehículo	Europa o Global	Europa o Global	Global
Batería			Global
Carretera	Europa o Global	Europa o Global	Global
Suministro de energía	Suiza o Europa excepto Suiza	Europa	Global
Desplazamiento	Europa	Europa	Global

Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

La Tabla 20 refleja con claridad hasta qué punto los datos obtenidos resultan limitados a la hora de extraer conclusiones del estudio desde una perspectiva geográfica. Si bien es cierto que la herramienta proporcionada por OpenLCA para obtener el árbol de contribuciones por categoría de impacto es claramente funcional de cara a realizar análisis cuantitativos como el que se ha presentado en este trabajo, es también evidente que no puede decirse lo mismo en cuanto a los análisis por localización de impactos. La herramienta asimila los procesos a ubicaciones genéricas que no reflejan en absoluto la realidad, no ya en términos de país, sino, en el caso de la etiqueta GLO, ni siquiera desde una perspectiva de región asimilable a Norte o Sur Globales. Se concluye por tanto que, si se quiere realizar un estudio riguroso sobre desarrollo y sostenibilidad en el ámbito de la globalización vinculado en concreto al transporte en automóvil, por el momento no es posible utilizar directamente las asignaciones por defecto proporcionadas por la base de datos ecoinvent.

Esta conclusión no sugiere que la metodología LCA solamente resulte útil para realizar

análisis a nivel cuantitativo y que no lo sea para hacerlos desde un enfoque geográfico, ni tampoco cuestiona, en concreto, la potencialidad de las aplicaciones OpenLCA y ecoinvent con las que se ha desarrollado el estudio de caso. Lo cierto es que tanto la metodología de LCA, en general, como las herramientas software utilizadas, en particular, están perfectamente preparadas para poder realizar este tipo de análisis, pero es evidente que no deben darse directamente por buenas las localizaciones que el sistema propone por defecto en su versión actual.

Antes de finalizar, es importante resaltar que el LCA es una metodología que puede aportar aún más valor desde la perspectiva de localización si sus resultados se combinan a posteriori con otras fuentes de información disponibles. Una buena referencia para ello puede ser el informe “Vehicles in use - Europe” publicado por la ACEA en 2021 y del que se han obtenido los datos que se presentaban en la Tabla 3. Así, por ejemplo, considerando un estudio concreto sobre emisiones de CO<sub>2</sub> provocadas por los gases de escape generados por los coches de combustión a nivel europeo, los datos de la Tabla 21 permitirían proporcionar con respecto al parque móvil existente en cada país los impactos de los procesos asignados al país local de uso del vehículo dentro del aspecto de desplazamiento.

**Tabla 21. Coches de pasajeros en uso en Europa por tipo de motor (2019).**

País	Gasolina			Diésel			Eléctrico y Otros		
	Unidades	% País	% Europa	Unidades	% País	% Europa	Unidades	% País	% Europa
Alemania	31.492.545	66,0%	11,0%	15.125.965	31,7%	5,3%	1.097.467	2,3%	0,4%
Reino Unido	20.643.768	58,7%	7,2%	13.715.621	39,0%	4,8%	808.870	2,3%	0,3%
Italia	18.190.807	46,0%	6,4%	17.478.993	44,2%	6,1%	3.875.432	9,8%	1,4%
Francia	15.362.430	40,2%	5,4%	22.508.635	58,9%	7,9%	343.935	0,9%	0,1%
Polonia	12.959.608	53,2%	4,5%	7.697.812	31,6%	2,7%	3.702.746	15,2%	1,3%
España	9.878.245	39,5%	3,5%	14.679.823	58,7%	5,1%	450.148	1,8%	0,2%
Holanda	7.150.858	80,0%	2,5%	1.251.400	14,0%	0,4%	536.314	6,0%	0,2%
Grecia	4.780.286	91,1%	1,7%	425.031	8,1%	0,1%	41.978	0,8%	0,0%
Rumanía	3.816.384	55,3%	1,3%	2.988.235	43,3%	1,0%	96.617	1,4%	0,0%
Rep. Checa	3.761.430	62,8%	1,3%	2.150.244	35,9%	0,8%	77.864	1,3%	0,0%
Suiza	3.040.505	66,5%	1,1%	1.371.656	30,0%	0,5%	160.027	3,5%	0,1%
Bélgica	2.767.355	47,6%	1,0%	2.860.375	49,2%	1,0%	186.041	3,2%	0,1%
Suecia	2.693.235	55,1%	0,9%	1.735.206	35,5%	0,6%	459.463	9,4%	0,2%
Hungría	2.529.621	66,4%	0,9%	1.200.046	31,5%	0,4%	80.003	2,1%	0,0%
Portugal	2.430.735	46,7%	0,9%	2.664.960	51,2%	0,9%	109.305	2,1%	0,0%
Austria	2.177.085	43,2%	0,8%	2.771.751	55,0%	1,0%	90.712	1,8%	0,0%
Finlandia	1.866.131	68,6%	0,7%	758.966	27,9%	0,3%	95.210	3,5%	0,0%
Dinamarca	1.773.001	66,9%	0,6%	818.920	30,9%	0,3%	58.304	2,2%	0,0%
Eslovaquia	1.236.331	51,7%	0,4%	1.059.370	44,3%	0,4%	95.654	4,0%	0,0%
Noruega	1.024.526	37,0%	0,4%	1.251.583	45,2%	0,4%	492.881	17,8%	0,2%
Irlanda	886.216	40,8%	0,3%	1.218.547	56,1%	0,4%	67.335	3,1%	0,0%
Croacia	816.046	47,2%	0,3%	905.949	52,4%	0,3%	6.916	0,4%	0,0%
Eslovenia	620.016	49,8%	0,2%	618.771	49,7%	0,2%	6.225	0,5%	0,0%
Estonia	468.211	58,9%	0,2%	314.791	39,6%	0,1%	11.924	1,5%	0,0%
Lituania	329.926	26,1%	0,1%	874.746	69,2%	0,3%	59.412	4,7%	0,0%
Letonia	199.690	30,4%	0,1%	415.145	63,2%	0,1%	42.040	6,4%	0,0%
Luxemburgo	177.351	41,6%	0,1%	237.462	55,7%	0,1%	11.511	2,7%	0,0%

Fuente: ACEA, 2021.

De este modo podría extrapolarse que aproximadamente el 16,3% del CO<sub>2</sub> emitido en

Europa debido al desplazamiento de los coches de combustión a través de sus gases de escape se produce en Alemania, el 8,6% en España, el 1,6% en Suiza, etc.

## **4. ESTUDIO DE IMPACTOS DEL TRANSPORTE EN AUTOMÓVIL DESDE UNA PERSPECTIVA GLOBAL**

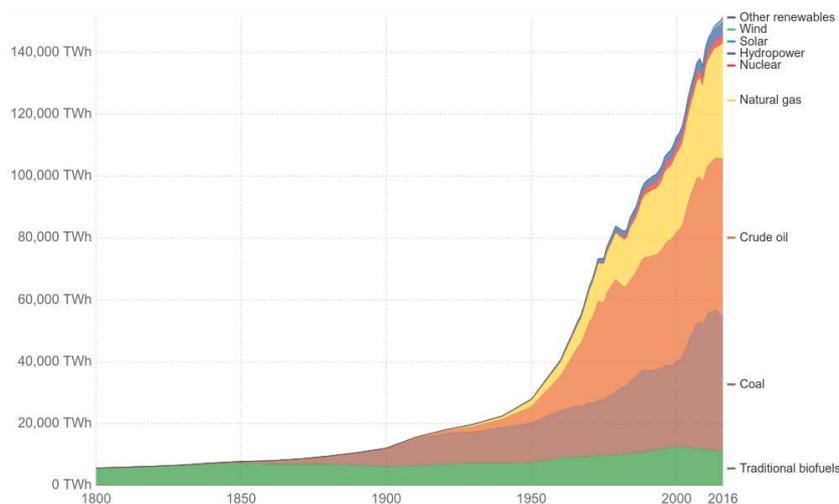
Una vez presentados los resultados del estudio de impactos del transporte en automóvil mediante LCA, se completan las dimensiones cuantitativa y geográfica del análisis realizado con una tercera perspectiva global, retomando el enfoque anticipado a modo de contextualización en el capítulo 2.2.- “Uso de recursos e impactos del transporte en automóvil”.

La sostenibilidad energética, el agotamiento de recursos y la deuda ecológica constituyen los ejes fundamentales del análisis que se aborda a continuación y que da por concluido así el estudio de caso.

### **4.1. SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA**

En el capítulo 2.1.1.- “Concepto de desarrollo” se apuntaban los problemas que genera la visión clásica de desarrollo como sinónimo de crecimiento económico en términos de incremento del volumen de producción y consumo de los países. Asimismo, se mencionaba también la dudosa fiabilidad que otros autores, por el contrario, confieren a indicadores como el PIB per cápita o el nivel de consumo energético a la hora de medir el grado de bienestar de una sociedad. Lo cierto es que, al margen del acierto o desatino de ambos planteamientos, resulta evidente que más allá de la existencia o no de una correlación clara entre desarrollo y crecimiento económico, el mero planteamiento de tal hipótesis caló profundamente a nivel mundial entre los gobiernos y actores económicos, provocando en cualquier caso su precipitada asunción como tesis sin el debido contraste. Fue de este modo como comenzó a mediados del siglo XX esa transición del holoceno al antropoceno planteada por Paul Crutzen y Eugene F. Stoermer (2000) y apuntalada por Will Steffen a través de su concepto de Gran Aceleración (2004), un fenómeno que empieza a producirse tras la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) con el objetivo de mantener un crecimiento económico sostenido supuestamente vinculado al nivel de bienestar de las sociedades que obliga a incrementar incesantemente el consumo de la energía necesaria para conseguirlo.

**Ilustración 27. Evolución del consumo mundial de energía primaria por fuentes (1800-2016).**



Fuente: Smil, V., 2017.

La Ilustración 27 permite observar claramente el punto de inflexión existente en torno al año 1950 en el consumo mundial de energía, así como el crecimiento exponencial que se produce a partir de ese momento en el uso de todas las fuentes, con la única excepción de los biocombustibles tradicionales. Teniendo en cuenta el importante peso que el sector del transporte tiene en el consumo global de energía, que en el caso de la UE ya era superior al 30% del total en 2018, tal y como recogía la Ilustración 10, resulta incuestionable la responsabilidad que tiene la industria automovilística en el advenimiento del panorama descrito. A modo de ejemplo, se citan en la Tabla 22 apenas un 1% de los 2.340 procesos que han sido tenidos en cuenta en la realización del estudio de caso del transporte en automóvil, con el único objeto de poder apreciar hasta qué punto el consumo de energía se hace omnipresente a lo largo de toda la cadena de valor de un vehículo, desde la adquisición de materias primas hasta el reciclado, pasando por la fabricación, distribución, uso y gestión de los residuos.

**Tabla 22. Listado de algunos de los procesos que intervienen en el ciclo de vida del automóvil.**

- ✓ Montaje de generador y motor, auxiliares y uso de energía, para minicentral de cogeneración.
- ✓ Montaje de pantalla de cristal líquido, auxiliares y uso de energía.
- ✓ Producción de condensadores, auxiliares y uso de energía.
- ✓ Producción de diodos, auxiliares y uso de energía.
- ✓ Energía y medios auxiliares, máquina para trabajar el metal, con calor de proceso de la hulla, fueloil pesado, fueloil ligero o gas natural
- ✓ Producción de calor, fueloil pesado o ligero, en horno industrial o caldera.
- ✓ Producción de fueloil pesado, funcionamiento en refinería de petróleo.
- ✓ Fueloil pesado, quemado en horno de refinería.
- ✓ Producción de inductores, auxiliares y uso de energía.
- ✓ Producción de fueloil ligero, a partir de residuos de polietileno.
- ✓ Producción de fueloil ligero, funcionamiento de la refinería de petróleo.
- ✓ Producción de elementos combustibles MOX, para reactores de agua ligera.
- ✓ Construcción de fábricas de combustible nuclear.
- ✓ Construcción de instalaciones de acondicionamiento y reprocesamiento de

- combustible nuclear gastado.
- ✓ Funcionamiento de la refinería de petróleo.
- ✓ Producción de resistencias, auxiliares y uso de energía.
- ✓ Producción de combustible sintético, a partir de carbón, operaciones Fischer-Tropsch de alta temperatura.
- ✓ Producción de transistores, auxiliares y uso de energía.
- ✓ Tratamiento del combustible nuclear gastado, reprocesamiento.
- ✓ Producción de elementos combustibles de uranio enriquecido para reactores de agua ligera.

Fuente: elaboración propia. Datos: software OpenLCA con LCI ecoinvent y LCIA ReCiPe 2014 v1.1 jerárquico.

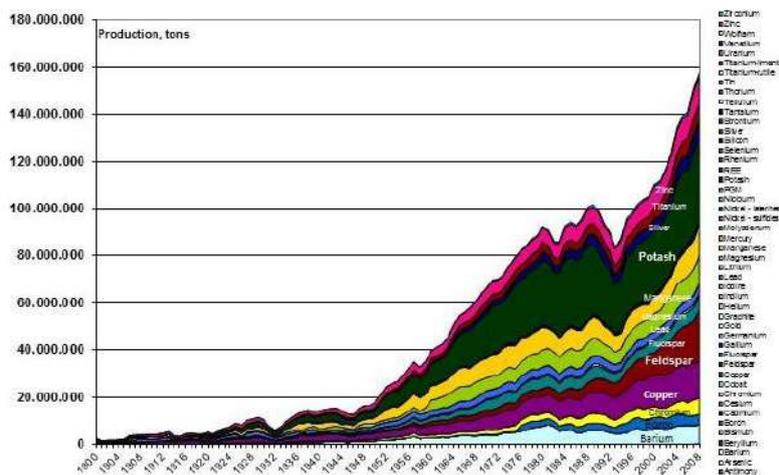
Las consecuencias de la crisis energética descrita se manifiestan en impactos que trascienden la realidad local de los países para alcanzar una escala global. Entre estos cabe destacar fundamentalmente los siguientes:

- ✓ El progresivo e inevitable agotamiento de las fuentes no renovables, como son los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) y los nucleares (uranio).
- ✓ La contaminación medioambiental y la aceleración del cambio climático que provocan los procesos extractivos y de transformación vinculados a la generación de energía.
- ✓ Las drásticas variaciones de precio en los servicios, cada vez más frecuentes, no solamente derivadas de la escasez de recursos, sino también inducidas por los intereses económicos de los oligopolios que controlan los mercados energéticos.

## 4.2. AGOTAMIENTO DE RECURSOS

La identificación en la práctica de los conceptos de crecimiento y desarrollo que ya ha sido apuntada con anterioridad genera con relación a los crecientes niveles de extracción de recursos naturales experimentados durante las últimas décadas una problemática muy similar a la del consumo energético y presenta un panorama igualmente preocupante.

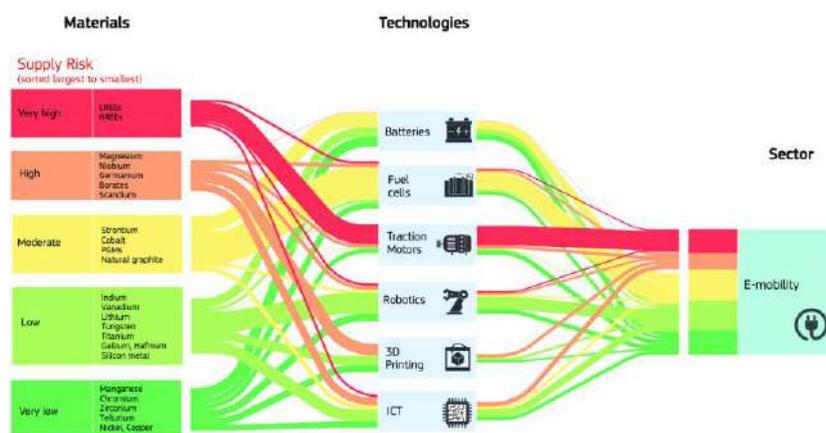
Ilustración 28. Evolución de la explotación mundial de recursos naturales (1900-2008).



Fuente: Valero, A. y Valero, A., 2014.

El crecimiento exponencial que se produce tras la Segunda Guerra Mundial en el contexto de la Gran Aceleración vuelve a resultar evidente y de nuevo debe apuntarse a la industria automovilística como uno de los actores principales de este escenario. Además, en este caso, resulta obligado incidir con énfasis en la especial responsabilidad que el vehículo eléctrico tiene en la crisis global de agotamiento de recursos. Si bien es cierto que la *e-mobility* aporta mejoras drásticas con respecto a la movilidad basada en el uso de coches de combustión en aspectos tan esenciales como la eliminación total de emisiones de gases de escape, el estudio de caso realizado también demuestra que existen otros impactos para los que el vehículo eléctrico no solamente se sitúa al margen de la solución, sino que pasa a formar parte esencial del problema.

**Ilustración 29. Materiales utilizados en las diferentes tecnologías del sector de la *e-mobility*.**

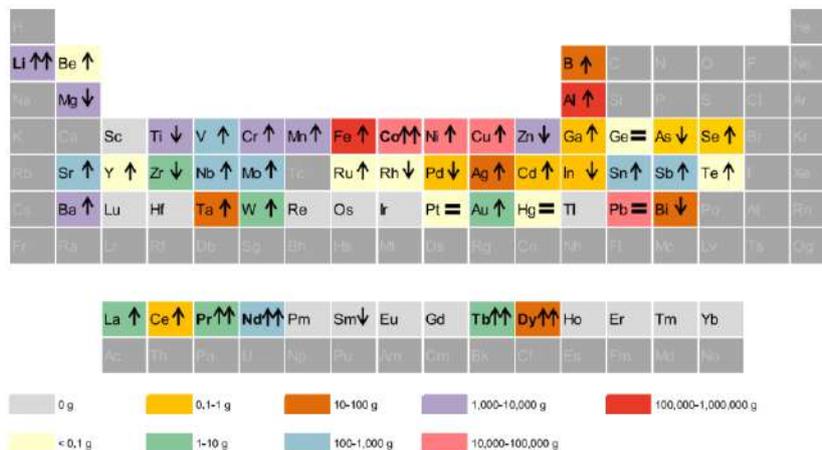


Fuente: Comisión Europea, 2020a.

Más allá del hecho de que la fabricación de vehículos eléctricos afecte a una larga lista de recursos materiales como la que recoge la Ilustración 29, el problema real es que en muchos de los casos las cantidades demandadas por el sector de la *e-mobility* superan los propios consumos requeridos para la fabricación de vehículos de combustión.

La Ilustración 30 recoge la variación de masa existente en los elementos contenidos en un vehículo eléctrico con batería de ion-litio NMC 6:2:2 con respecto a un vehículo de combustión, confirmando que desde el punto de vista de agotamiento de recursos la transición hacia la *e-mobility* no minora en general los niveles de impacto, sino todo lo contrario.

**Ilustración 30. Variaciones de masa en los elementos contenidos en un vehículo eléctrico con respecto a un vehículo de combustión.**



Fuente: Iglesias-Émbil, M. et al., 2020.

Esta crisis de agotamiento de recursos se manifiesta en impactos que de nuevo tienen un alcance global, entre los que cabe destacar principalmente:

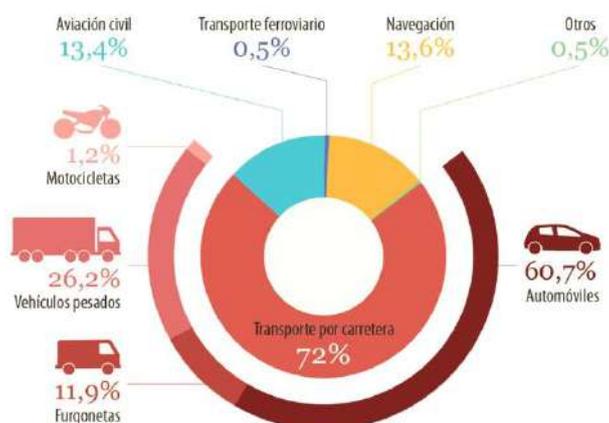
- ✓ El progresivo e inevitable agotamiento de recursos naturales, que en el caso de aquellos cuyas reservas son más escasas alcanzarán su pico de extracción en un plazo cercano, si no lo han alcanzado ya (ver Ilustración 6).
- ✓ La contaminación medioambiental y la aceleración del cambio climático que provocan los procesos de extracción y transformación de minerales vinculados a la industria en general y a la del transporte muy en particular.
- ✓ El constante incremento en el precio de las materias primas a medida que se van agotando sus reservas, lo que en el caso concreto del transporte en automóvil puede llegar a convertir los vehículos eléctricos en verdaderos artículos de lujo inaccesibles para las personas con rentas más bajas.
- ✓ La enorme dificultad para recuperar o reciclar elementos químicos que, si bien no desaparecen del planeta, sí sufren un proceso de dispersión en unidades de masa tan pequeñas que hace prácticamente imposible su reutilización. Resulta obligado, en este sentido, recalcar la indudable responsabilidad que tiene en esta circunstancia la fabricación de componentes electrónicos, altamente vinculada al sector del transporte y muy especialmente a la *e-mobility*.

#### 4.3. DEUDA ECOLÓGICA

En el capítulo 2.2.2.- “Deuda ecológica y conflictos socioecológicos” se introducían los conceptos generales que definen la deuda ecológica y se señalaban la deuda de carbono, la biopiratería, los pasivos ambientales y la exportación de residuos tóxicos como sus principales dimensiones de impacto.

La Ilustración 9 reflejaba que prácticamente un tercio de las emisiones totales de gases de efecto invernadero generadas en la UE en 2018 (vapor de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y O<sub>3</sub>) provinieron del sector del transporte y que un 51,7% de ellas fueron provocadas concretamente por la industria del automóvil (ICCT, 2021). Con relación a las emisiones de CO<sub>2</sub> en particular, los datos ofrecidos por la Agencia Europea del Medio Ambiente para el año 2016 llegan a elevar el impacto del coche hasta un 60,7%.

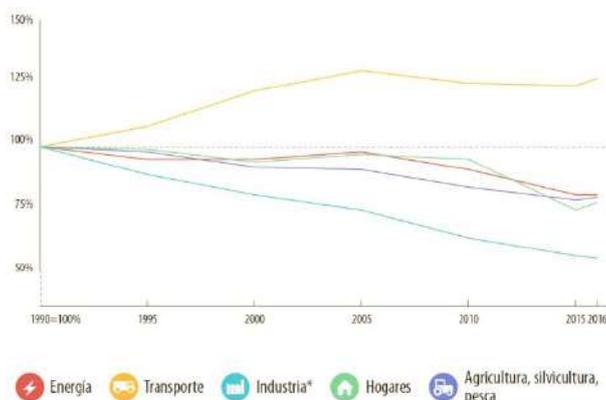
**Ilustración 31. Emisiones de CO<sub>2</sub> por medio de transporte en la UE-27 (2016).**



Fuente: Agencia Europea del Medio Ambiente, 2019.

El mismo informe señala, además, que frente al descenso de emisiones generalizado que se observa en el resto de los sectores, las del transporte van sin embargo en aumento debido a que cada vez hay más vehículos en circulación y que la eficiencia del combustible en los coches nuevos no avanza al ritmo deseable. Así, a pesar de la leve contención sostenida durante el período 2005-2016, de nuevo se registró en 2017 un aumento de 0,4 gCO<sub>2</sub>/km de media con respecto a 2016.

**Ilustración 32. Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> por sector en la UE-27 (2016).**



Fuente: Agencia Europea del Medio Ambiente, 2019.

Puede concluirse por tanto que la industria automovilística es la causante de una parte

muy importante de la deuda ecológica generada a nivel global a través de la deuda de carbono, pero tal y como se ha señalado no es esta la única dimensión de análisis que debe tenerse en cuenta. A pesar de que el transporte en automóvil no tiene una relación clara con la cuestión de la biopiratería, su impacto en lo que respecta a los pasivos ambientales y a la exportación de residuos tóxicos sí vuelve a ser, de nuevo, incuestionable.

La investigación realizada ya ha puesto de manifiesto la voracidad extractiva de la industria automovilística y hasta qué punto esta realidad repercute de forma muy especial en los países el Sur Global. Surgen así los pasivos ambientales derivados de la extracción de unos recursos naturales que son exportados hacia el Norte Global en el marco de unos acuerdos comerciales profundamente injustos, no solo desde una perspectiva netamente económica, sino también ecológica y social, que lastran gravemente las capacidades de desarrollo de los países afectados. Martínez Alier (1997) apunta algunos de los principales componentes de esta parte de la deuda ecológica:

- ✓ Costos actualizados de reparación de las consecuencias de la importación de residuos tóxicos sólidos, líquidos y gaseosos (CO<sub>2</sub> principalmente).
- ✓ Costos actualizados de reproducción, sustentación o manejo sostenible de los recursos naturales renovables exportados.
- ✓ Costos actualizados de la no disponibilidad futura de los recursos no renovables arrasados o de la biodiversidad destruida.
- ✓ Costos actualizados de reparación de los daños locales producidos por las actividades extractivas en términos de deuda ambiental y social (pasivos ambientales).

El primero de los aspectos señalados por Martínez Alier apunta directamente al último de los pilares que conforman la deuda ecológica y que coloca una vez más al Sur Global en una situación de absoluta desprotección frente al Norte Global y sus generalizadas prácticas de exportación de residuos tóxicos hacia esos países. En este sentido, la Convención de Basilea (1989) sobre el control de los movimientos transfronterizos y eliminación de desechos peligrosos constituye un débil marco legal cuyo incumplimiento sistemático ha propiciado la existencia de un nuevo “colonialismo tóxico” que ya se mencionaba en el capítulo 1.1.- “Contexto actual y estado del arte”.

## 5. CONCLUSIONES

A modo de recapitulación final se ofrecen a continuación las principales conclusiones del trabajo realizado.

## 5.1. GRADO DE CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS

El estudio cumple ampliamente los objetivos principales planteados inicialmente:

- ✓ [O1] Se ha realizado un estudio de la localización de los impactos ambientales del transporte en automóvil a través de la metodología LCA usando OpenLCA, ecoinvent y ReCiPe, concluyendo que, en el caso concreto de estas herramientas, los valores proporcionados por defecto no siempre reflejan correctamente la realidad en cuanto al balance de impactos Norte/Sur Global. Las herramientas software utilizadas sí están preparadas como tales para ofrecer información geográfica útil en estudios sobre desarrollo y sostenibilidad en el ámbito de la globalización, pero antes de ejecutar el cálculo del impacto de un sistema de producto es imprescindible efectuar con criterio una reasignación de las localizaciones que vienen por defecto en muchos de los procesos de ecoinvent. En este sentido es deseable, a la vez que presumible, que la calidad de los datos de localización proporcionados por ecoinvent mejore en futuras versiones de este software.
- ✓ [O2] Se ha realizado una exhaustiva comparativa a nivel cuantitativo del impacto ambiental de los coches de gasolina, diésel y eléctrico y se han pormenorizado para las seis principales categorías de impacto los aspectos individualizados que lo conforman (vehículo, batería, carretera, suministro de energía y desplazamiento), analizando de forma crítica los resultados obtenidos.

Los objetivos secundarios también pueden considerarse igualmente satisfechos:

- ✓ [O3] Se ha puesto de manifiesto la utilidad de la metodología LCA de cara a su aplicación en estudios sobre desarrollo y sostenibilidad en el ámbito de la globalización, a la vez que se ha hecho hincapié en sus limitaciones, particularmente las relacionadas con la asignación de localizaciones geográficas en los procesos que intervienen en el sistema de producto.
- ✓ [O4] Se han identificado procesos concretos en los que las localizaciones por defecto asignadas por las fuentes de datos utilizadas en el estudio de caso no reflejan la realidad de los impactos a nivel global, como es el caso de los relacionados con el uranio, los metales del grupo del platino, el cobalto o el petróleo.

## 5.2. CONTRASTE DE HIPÓTESIS

Las hipótesis de la investigación han sido ambas contrastadas con desigual resultado:

- ✓ [H1] El estudio realizado **refuta** la hipótesis de que las asignaciones de localización propuestas por defecto para los procesos en el caso del transporte en automóvil sean específicas y reflejen el especial impacto que esta industria tiene

en el Sur Global en términos de deuda ecológica. La ratificación de esta limitación implica que la metodología LCA aplicada debería ser complementada en este caso con criterios y herramientas concretas que permitan aprovechar plenamente su potencialidad a la hora de facilitar análisis rigurosos desde una perspectiva geográfica.

- ✓ [H2] El estudio realizado **confirma** que vehículo eléctrico no constituye en sí mismo una alternativa de movilidad medioambientalmente sostenible frente al uso del vehículo de combustión, particularmente en lo concerniente a determinadas categorías de impacto. Se ha demostrado, además, que el tipo de recarga utilizado (NOREN+REN vs REN) tiene una incidencia crítica a la hora de considerar si la tecnología de motor eléctrico puede realmente llegar a constituirse o no como alternativa a la de combustión.

### 5.3. REFLEXIONES FINALES

La primera conclusión fundamental del trabajo realizado es que **la metodología LCA constituye una valiosa herramienta de apoyo aplicable en estudios sobre desarrollo y sostenibilidad en el ámbito de la globalización, si bien exige la aplicación de criterios sólidos a la hora de establecer la geolocalización de los impactos ambientales de los procesos.**

En el caso concreto deecoinvent, se ha demostrado que la utilización directa de las localizaciones que propone por defecto esta base de datos de LCI para los procesos productivos, distorsiona considerablemente la repercusión real que sus impactos medioambientales asociados provocan en las diferentes regiones del planeta y no refleja la desigual distribución de estos en el Norte y Sur Globales.

Para solucionar las deficiencias detectadas a nivel de localización, antes de abordar cualquier LCA utilizando directamente los procesos inventariados en ecoinvent se propone realizar siempre un estudio previo riguroso a nivel geográfico que permita identificar realmente, siempre que sea posible, en qué país concreto ocurren los procesos que intervienen en los sistemas de producto que van a ser analizados. Este tipo de anteproyecto resultaría relativamente sencillo de realizar, por ejemplo, en el caso de las actividades relacionadas con la utilización de recursos fósiles y minerales, ya que numerosos organismos, como la Comisión Europea y muchos otros que han sido citados a lo largo de este trabajo, publican con frecuencia informes fiables al respecto que permitirían modificar con criterio muchas de las etiquetas GLO o RoW asignadas por defecto en ecoinvent, mejorando notablemente el valor de los resultados obtenidos en el LCA.

La segunda conclusión clave del trabajo es que **la cuestión de la sostenibilidad del transporte en automóvil no constituye un reto exclusivamente tecnológico, sino que**

**pasa necesariamente por otro tipo de actuaciones que van más allá de la mera evolución del parque móvil mundial hacia un escenario con más vehículos eléctricos y menos de combustión.**

Tal y como refleja la Ilustración 13, sin duda una de las gráficas más elocuentes de las presentadas a lo largo del estudio desde un punto de vista comparativo, el coche eléctrico NOREN+REN se comporta peor que el de combustión en más de la mitad de las 18 categorías (en 12 frente al de gasolina y en 10 frente al diésel). Es cierto que el eléctrico REN sí ofrece mejores resultados que el de gasolina en 11 categorías y hasta en 12 frente al diésel, pero estos resultados impiden concluir con claridad, en cualquier caso, que la tecnología de motor eléctrico constituya la solución definitiva al reto de la movilidad sostenible. No puede olvidarse, además, que entre las seis categorías en las que esta tecnología tiene aún mayor impacto que la de combustión se encuentran algunas tan relevantes como la toxicidad humana o las relacionadas con la eutrofización y ecotoxicidad de las aguas.

Por otra parte, la afirmación realizada viene particularmente respaldada por los resultados obtenidos en el estudio de detalle realizado a nivel cuantitativo, que a través de la Ilustración 23 reflejan con rotundidad dos cuestiones definitivamente relevantes en lo que se refiere a las seis categorías analizadas:

- ✓ Primera: Los impactos medioambientales provocados por la **fabricación** de un coche de combustión son similares o incluso menores que los de uno eléctrico.
- ✓ Segunda: Los impactos medioambientales provocados por el **uso** de un coche de combustión son notablemente menores que los de uno eléctrico, con la obvia excepción de las categorías de cambio climático y agotamiento de fósiles.

Estas conclusiones corroboran definitivamente que, en la actualidad, no puede afirmarse que la tecnología de motor eléctrico constituya una alternativa clara a la de combustión desde un punto de vista ecológico.

En lo referente al primero de los aspectos, sin duda existen alternativas para reducir el impacto derivado de la **fabricación** de vehículos, pero poco o nada tienen que ver con la tecnología en sí misma, sino más bien con los patrones de producción y consumo imperantes actualmente en la industria automovilística. Así, por ejemplo, la reducción progresiva de la tasa de reposición de vehículos sería una vía sin duda mucho más eficaz que la meramente tecnológica a la hora de avanzar en el diseño de una estrategia la movilidad sostenible. Los dos aspectos fundamentales a controlar de cara a reducir dicha tasa son:

- ✓ La disminución de los actuales niveles de producción automovilística a nivel mundial, situada en torno a los 80 millones de unidades anuales, de las cuales 60 son turismos como los contemplados en el estudio de caso realizado (ACEA, 2021).

- ✓ La extensión de la vida media de útil de los vehículos por encima de los 150.000 km, que es el valor de referencia utilizado por ecoinvent en sus estimaciones para los coches analizados y que equivale a un uso de unos 12-13 años con desplazamientos anuales medios de 12.000 km.

En cuanto al segundo de los aspectos destacados existen igualmente alternativas que podrían reducir el impacto en el **uso** de los vehículos, la más evidente de las cuales es, sin duda, la optimización máxima de la ocupación de las plazas de pasajero en los desplazamientos. Para ello existen dos posibles vías:

- ✓ Una primera opción es aumentar la ocupación por vehículo. Fuentes municipales de ciudades como Madrid o Barcelona, por ejemplo, informan de ratios de ocupación media inferiores a las dos personas por vehículo, concretamente 1,35 en la primera ciudad (Empresa Municipal de Transportes de Madrid, 2017) y 1,18 en la segunda (Associació per a la Promoció del Transport Públic, 2016). Considerando de este modo que la ocupación media de un coche puede situarse en estos momentos en torno a 1,26 pasajeros, se concluye fácilmente la enorme incidencia positiva que tendría desde un enfoque medioambiental aumentar el número de viajeras por desplazamiento, ya que solo con llegar a dos personas se reducirían los impactos calculados en un 58%, ascendiendo hasta un 137% si se incorpora un tercero y alcanzando una rotunda mejora del 216% mediante la ocupación completa de cuatro viajeras por vehículo.
- ✓ La segunda posibilidad es disminuir el tamaño de los vehículos, diseñando modelos monoplaza o biplaza de bajo consumo que minimicen la ratio de impacto ambiental medio por pasajero.

Además de estas medidas existen otras que trascienden la movilidad basada en el uso de turismos en propiedad, como son la potenciación de los desplazamientos a pie o en bicicleta, así como el fomento del uso del transporte público y de otros servicios a la demanda, como el coche compartido.

Como última reflexión referida al aspecto del uso, cabe señalar que el estudio de caso realizado tampoco ofrece resultados concluyentes en cuanto a la idoneidad del tipo de electricidad a utilizar para recarga de las baterías de los vehículos eléctricos. Si bien es cierto que el uso de electricidad REN minorra considerablemente los impactos con respecto a la NOREN+REN en cuatro de las seis categorías analizadas en el estudio de detalle, no se puede olvidar que en dos de estas (toxicidad humana y agotamiento de metales) el coche eléctrico ofrece peores resultados globales que el de combustión, por lo que solo debería considerarse como alternativa realmente óptima para las categorías de cambio climático y agotamiento de fósiles. Teniendo en cuenta que, por otra parte, en las dos restantes (agotamiento de agua y ocupación de tierras agrícolas) el suministro de energía REN empeora notablemente los resultados del NOREN+REN, resulta definitivamente imposible concluir que el uso de electricidad producida exclusivamente

con energías renovables a la hora de recargar las baterías de un vehículo eléctrico tenga un menor impacto medioambiental, en términos generales, que el uso de electricidad producida por un mix energético de renovables y no renovables.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- ACEA (2021). Vehicles in use - Europe. Bruselas: ACEA Publications.
- Agencia Europea del Medio Ambiente (2019). Emisiones de CO<sub>2</sub> de los coches (hechos y cifras), disponible en <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia> [consultado el 25/08/2021].
- Arto, I. et al. (2014). The energy footprint of human development. Valladolid: XIV Jornadas de economía crítica (Perspectivas económicas alternativas).
- Arto, I. et al. (2016). The energy requirements of a developed world. *Energy for Sustainable Development*, DOI: 10.1016/j.esd.2016.04.001.
- Associació per a la Promoció del Transport Públic (2016). Ocupación media por vehículo, disponible en <https://www.favb.cat> [consultado el 26/08/2021].
- Bolli, A. (2000). Environmental communication and competitiveness (A case study of the car industry). Lund (Suecia): International Institute For Industrial Environmental Economics, Lund University.
- Calvo, G., Valero, A. y Valero, A. (2017). Assessing maximum production peak and resource availability of non-fuel mineral resources (Analyzing the influence of extractable global resources). Zaragoza: CIRCE, Universidad de Zaragoza.
- CIA (2019). The world factbook (Country comparisons - Crude oil production), disponible en <https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/crude-oil-production/country-comparison> [consultado el 12/08/2021].
- Cleveland, C.J., Kaufmann, R. y Stern, D.I. (2000): Aggregation and the role of energy in the economy. *Ecological Economics*, DOI: 10.1016/S0921-8009(99)00113-5.
- Comisión Europea (2020a). Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU (A foresight study). Luxemburgo: Oficina de publicaciones de la UE.
- Comisión Europea (2020b). EU transport in figures (Statistical pocketbook). Luxemburgo: Oficina de publicaciones de la UE.
- Comisión Europea (2020c). Resiliencia de las materias primas fundamentales: Trazando el camino hacia un mayor grado de seguridad y sostenibilidad. Bruselas: Comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones (03/09/2020).
- Comisión Europea (2020d). Study on the EU's list of critical raw materials (Final report). Luxemburgo: Oficina de publicaciones de la UE.
- Common Community Care (2006). Somalia toxic waste dumping, disponible en <https://ejatlas.org/print/somalia-toxic-waste-dumping-somalia> [consultado el 26/07/2021].

- Court, V. y Fizaine, F. (2016). Estimations of very long-term time series of fossil fuels global EROI. Houches (Francia): Science for Energy Scenarios; 3<sup>rd</sup> Science and Energy Seminar at Ecole de Physique des Houches.
- Crutzen, P.J. y Stoermer, E.F. (2000). “The anthropocene”, en Global change newsletter (Número 41, páginas 17-18). Estocolmo: IGBP Publications.
- De Castro, C. (2015): Una aproximación a las tasas de retorno energético (EROEI) a partir de los diagramas de Sankey de la Agencia Internacional de la Energía (AIE). Valladolid: Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid.
- De Castro, C. (2016): Algunos conceptos erróneos de la TRE (tasa de retorno energético) y algunos cálculos menos incoherentes. Valladolid: Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid.
- Empresa Municipal de Transportes de Madrid (2017). Ocupación media por vehículo, disponible en <https://www.emtmadrid.es> [consultado el 26/08/2021].
- Fernández Durán, R. y González Reyes, L. (2014). “El inicio del fin de la era de los combustibles fósiles: Crisis energética, material, climática y de reproducción social”, en En la espiral de la energía (Volumen II: Colapso del capitalismo global y civilizatorio). Madrid: Ecologistas en Acción - Baladre.
- Hall, C.A.S., Balogh, S. y Murphy, D.J.R. (2009): What is the minimum EROI that a sustainable society must have? *Energies*, DOI: 10.3390/en2010025.
- Hall, C.A.S. y Klitgaard, K.A. (2012). Energy and the wealth of nations (Understanding the biophysical economy). Nueva York: Springer.
- Heinberg, R. (2007). Peak everything (Waking up to the century of declines). Isla Gabriola (Canadá): New Society Publishers.
- Höök, M. (2014). Agotamiento de hidrocarburos convencionales: Perspectivas recientes para petróleo, gas natural y carbón. Barbastro (España): II Congreso Internacional “Más allá del pico del petróleo (El futuro de la energía)” organizado por la UNED.
- Hubbert, M.K. (1956). “Nuclear energy and the fossil fuels”, en Drilling and production practice (Número 95, páginas 1-57). Nueva York: American Petroleum Institute.
- Global Carbon Atlas (2017). CO<sub>2</sub> emissions per capita, disponible en <http://www.globalcarbonatlas.org/es/CO2-emissions> [consultado el 18/05/2021].
- ICCT (2021). Transport could burn up the EU’s entire carbon budget, disponible en <https://theicct.org/blog/staff/eu-carbon-budget-apr2021> [consultado el 16/08/2021].
- Iglesias-Émbil, M. et al. (2020). Raw material use in a battery electric car - a thermodynamic rarity. Amsterdam: Elsevier.
- Kitco (2021). New York spot price, disponible en <https://www.kitco.com/market> [consultado el 07/04/2021].

- Martínez Alier, J. (1997). Deuda ecológica y deuda externa. Caracas: Encuentro “La deuda externa y el final del milenio” organizado por el Parlamento Latinoamericano.
- Martínez Alier, J. (2001). “Mining conflicts, environmental justice, and valuation”, en *Journal of hazardous materials* (Número 86, páginas 153-170). Ámsterdam: Elsevier.
- Martínez Alier J. (2004). “Los conflictos ecológico-distributivos y los indicadores de sustentabilidad”, en la *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica* (Número 1, páginas 21-30). Río de Janeiro: Redibec.
- Moore, C.W. (1989). “Utilizing negotiations to resolve complex environmental disputes”, en Viessman W. y Smerdon E. (eds), *Managing Water-Related Conflicts (The Engineer’s Role)*. Nueva York: American Society of Civil Engineers.
- Morgan, T. (2013). *Perfect storm (Energy, finance and the end of growth)*. Londres: Tullett Prebon.
- Patterson, R. (2015). US oil production nears previous peak, disponible en <https://peakoilbarrel.com/no-name-yet> [consultado el 21/05/2021].
- Rosenstein-Rodan, P.N. (1943). “Problems of industrialisation of Eastern and South-Eastern Europe”, en *The Economic Journal* (Número 53, páginas 202-211). Londres: Royal Economic Society.
- Smil, V. (2017). *Energy Transitions (Global and national perspectives)*. Santa Bárbara (California): Praeger Publishers.
- Steffen, W. et al. (2015). *The trajectory of the anthropocene: The great acceleration*. Newbury Park (California): SAGE Publishing.
- United States Geological Survey (2021). *Mineral commodity summaries*. Washington, D.C.: U.S. Government Publishing Office.
- Valero, A. y Valero, A. (2014). *Thanatia (The destiny of the earth's mineral resources)*. Singapur: World Scientific Publishing Company.
- Wikipedia (2021). Sur global, disponible en [https://es.wikipedia.org/wiki/Sur\\_global](https://es.wikipedia.org/wiki/Sur_global) [consultado el 26/06/2021].
- World Nuclear Association (2020). World uranium mining production, disponible en <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx> [consultado el 18/04/2021].