

# **MINERALES PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA Y DIGITAL EN ESPAÑA**

**Estado del arte, revisión  
de políticas públicas  
y alternativas**



Instituto Universitario de Investigación Mixto  
**CIRCE**  
Universidad Zaragoza



**Amigos de  
la Tierra**

# Minerales para la transición energética y digital en España

Parte 1: Estado del arte, revisión de políticas públicas y alternativas

<b>Autoría</b>	Martín Lallana, Jorge Torrubia, Alicia Valero
<b>Fecha</b>	Borrador febrero 2023, revisión mayo 2023
<b>Entidad que solicita el encargo</b>	Amigos de la Tierra España
<b>Entidad que realiza el encargo</b>	Instituto Universitario de Investigación Mixto CIRCE - Universidad de Zaragoza

Con el apoyo de



# Contenido

<b>1. Planteamiento</b>	<b>1</b>
<b>2. Cuatro enfoques diferentes</b>	<b>4</b>
2.1. Límites minerales	4
2.2. Seguridad mineral	6
2.3. Sostenibilidad mineral	7
2.4. Justicia global mineral	9
<b>3. Revisión de la elaboración de políticas públicas</b>	<b>10</b>
3.1. Informes principales	12
3.2. Escenarios analizados	16
3.3. Aspectos problemáticos	18
<b>4. Elementos que determinan la demanda mineral futura para la transición</b>	<b>23</b>
4.1. Modelo de producción energética	23
4.2. Modelo de movilidad	27
4.3. Intensidad mineral de las tecnologías	31
4.4. Tiempo de vida útil	32
4.5. Demanda del resto de la economía	33
4.6. Recuperación de minerales desde el reciclaje	35
4.7. Otros elementos relevantes	37
<b>5. Alternativas para reducir los requerimientos de extracción primaria</b>	<b>42</b>
5.1. Medidas de economía circular	43
5.2. Escenarios alternativos de movilidad	45
5.3. Cambios socioeconómicos estructurales	52
<b>6. Estudios realizados en el ámbito de España</b>	<b>55</b>
<b>7. Conclusiones, lagunas y líneas de investigación futuras</b>	<b>61</b>

## 1. Planteamiento

*«La edad de piedra llegó a su fin pero no porque se agotaran las piedras, y la era del petróleo llegará a su fin, pero no por el agotamiento del petróleo»*

Esta cita se le suele atribuir a Ahmed Zaki Yamani, quien fue ministro de petróleo y recursos minerales de Arabia Saudita entre 1962 y 1986. Décadas después del momento en el que se pronunció, nos encontramos con la urgencia de poner fin a la era del petróleo dejando bajo tierra el 60% de sus reservas para así tener una mínima posibilidad de no superar un calentamiento global de 1.5°C.<sup>1</sup> Sin embargo, justo cuando la historia parecía empezar a darle la razón, miramos desde un prisma diferente la primera parte de la frase: ¿agotarán las piedras el fin de la era del petróleo?

Durante los últimos años ha aumentado considerablemente el interés y la preocupación por la demanda de una gran variedad de metales en la fabricación de las tecnologías requeridas para la transición hacia una economía descarbonizada. Cobalto, litio, níquel, cobre o neodimio son algunos de los metales que se repiten una y otra vez en los estudios que pronostican un fuerte aumento de la demanda durante las próximas décadas. La comparación con las reservas minerales, ha encendido algunas alarmas sobre los riesgos de cuellos de botella y de problemas de suministro en el futuro próximo. Dada la importancia estratégica de estas tecnologías y la distribución global de las cadenas de suministro, Estados Unidos y la Unión Europea están promoviendo un impulso de la minería doméstica y diversos acuerdos de libre comercio para garantizar un mayor control geopolítico sobre los recursos minerales.

Este hecho podría ser visto como algo positivo que reduce las dinámicas de extractivismo e intercambio ecológico desigual de la Unión Europea con respecto a otros países del Sur Global. Podríamos pensar que esta estrategia alivia los impactos y conflictos en aquellas zonas que actualmente se ven afectadas. Sin embargo, bajo el actual modelo económico y de desarrollo, esta relocalización de la minería apunta hacia una expansión de la frontera extractiva sin reducirla en ningún otro lugar. Como señala Thea Riofrancos: *«trasladar la minería de un sitio a otro no aborda las causas fundamentales de la extracción depredadora: las políticas, las prácticas cotidianas y los modos de producción y consumo que requieren un flujo constante de materias primas»*.<sup>2</sup> A las dinámicas extractivistas sobre el Sur global se suma un

---

<sup>1</sup> Welsby, D., Price, J., Pye, S. *et al.* **Unextractable fossil fuels in a 1.5°C world.** *Nature* 597, 230–234 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03821-8>

<sup>2</sup> Thea Riofrancos, 8 de marzo de 2022. **Por qué relocalizar la extracción de minerales críticos en el Norte global no es justicia climática.** Viento Sur. Disponible en: <https://vientosur.info/por-que-relocalizar-la-extraccion-de-minerales-criticos-en-el-norte-global-no-es-justicia-climatica/>

boom minero en regiones del Norte global, como España, el cual se explica principalmente por tres factores:<sup>3</sup>

1. Una reorganización financiera que ha posibilitado que pequeñas empresas se dediquen a las inversiones en los negocios mineros gracias a su elevado componente especulativo, el cual crea un ciclo de actuación de las empresas inversoras en minería.
2. Los planes y estrategias europeos basados en la transición verde y digital, apoyados en un aumento de la extracción de minerales y materias primas críticas.
3. Una legislación española anticuada y desactualizada con la que es imposible responder a los requerimientos socioambientales que demanda este tipo de proyectos.

Organizaciones ecologistas como Amigos de la Tierra, OMAL o Ecologistas en Acción advierten de cómo se están promoviendo y facilitando prácticas altamente especulativas, no sostenibles y poco responsables.<sup>4</sup> Nuevas empresas del sector están optando por métodos de extracción lo más económicos posibles pero con un alto impacto ambiental, como la minería a cielo abierto y la lixiviación de escombreras. Este impulso de la minería de metales asociados a la fabricación de las tecnologías de descarbonización y digitalización se encuentra especialmente concentrado en cinco comunidades autónomas: Andalucía, Castilla y León, Galicia, Asturias y Extremadura, por este orden.

De esta forma, se observa cómo empresas mineras, industrias y gobiernos están favoreciendo un aumento de la extracción primaria de metales bajo la narrativa de la transición verde y digital. Dadas las implicaciones sociales, ambientales y económicas que tiene este movimiento, se torna necesario realizar un examen detallado de los estudios, escenarios e hipótesis que se han considerado para estimar los requerimientos minerales de esta transición, y sobre los que se están basando la elaboración de políticas públicas. Las decisiones que se están tomando a día de hoy marcarán los senderos de transición del futuro de nuestra sociedad, por lo que no deben ser ocultadas bajo capas de opacidad técnica. A lo largo de este informe recorreremos los planteamientos actuales, apuntaremos hacia algunas alternativas y señalaremos cuáles son las lagunas de investigación sobre la demanda mineral asociada a la transición que no están siendo cubiertas. Independientemente de si se agoten o no, de lo que no cabe duda es que el fin de la era del petróleo dará mucho que hablar sobre las piedras durante las próximas décadas.

---

<sup>3</sup> Amigos de la Tierra y OMAL. (2022). **El boom minero: patrones e impactos de la expansión de la industria extractiva en España**. Disponible en: <https://www.tierra.org/wp-content/uploads/2022/10/Informe-Mineria.pdf>

<sup>4</sup> Ecologistas en Acción, diciembre 2019. **Minería Especulativa en España**. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/131926/>

## 2. Cuatro enfoques diferentes

Los minerales se han vuelto un tema de conversación habitual en relación a la transición energética. Lo que hasta hace poco parecía una faceta oculta, ocupa cada vez mayor espacio. Sin embargo, ante la cantidad y variedad de publicaciones al respecto, cabe preguntarse ¿está todo el mundo hablando de lo mismo? Los minerales son importantes, de eso no cabe duda, pero la misma pregunta se está abordando desde diferentes enfoques. Si bien pueden ser complementarios, también pueden generar una importante confusión bajo la cual se ocultan algunos procesos y dinámicas que no tienen que ver precisamente con la sostenibilidad. Por ello, nos parece relevante diferenciar entre cuatro enfoques principales sobre la misma cuestión:

- **Límites minerales:** Comparación de la demanda de minerales asociada a la descarbonización con las reservas y recursos minerales conocidos. Se busca conocer si los yacimientos minerales son suficientes para satisfacer los escenarios de transición.
- **Seguridad mineral:** Comparación de la demanda de minerales asociada a la fabricación doméstica de tecnologías de descarbonización con el control geopolítico sobre los flujos de origen. Se busca determinar qué cambios serían necesarios para asegurar la seguridad del suministro.
- **Sostenibilidad mineral:** Comparación de la demanda de minerales para las tecnologías según su origen de extracción primaria o secundaria y bajo diferentes escenarios alternativos de descarbonización. Se busca minimizar el uso de recursos energéticos y el impacto medioambiental de la actividad minera.
- **Justicia global mineral:** Comparación de la demanda de minerales para la transición energética de los países del Norte global respecto al porcentaje de las tasas de extracción y las reservas minerales que eso representa a nivel global. Se busca evaluar las desigualdades en el acceso a unos recursos estratégicos limitados.

Estas cuatro dimensiones aparecen en muchas ocasiones entrelazadas y con justificaciones cruzadas. Sin embargo, resulta importante realizar una separación en términos analíticos para lograr una mayor claridad.

### 2.1. Límites minerales

La dependencia de las tecnologías necesarias para la descarbonización hacia determinados metales conduce a la pregunta: ¿contamos con reservas y recursos minerales suficientes para cubrir el incremento de la demanda que vendrá aparejado con la transición energética? Para aproximarse a esta cuestión es importante clarificar algunos conceptos clave. Según las definiciones que da el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), existe una clasificación fundamental en los datos sobre minerales disponibles en la corteza

terrestre, la cual diferencia entre recursos y reservas:<sup>5</sup>

- Los **recursos** se definen como la concentración de material que ocurre naturalmente en la corteza terrestre en tal forma y cantidad que la extracción económica de un producto básico de la concentración es actual o potencialmente factible.
- Las **reservas** se definen como la parte del recurso demostrado que se puede extraer o producir de forma económica en un momento determinado.

Podemos entender los recursos como un límite superior sobre la presencia de un mineral concreto en la corteza terrestre. Este valor se basa en el conocimiento geológico, que puede ser limitado, y no depende de cambios económicos o tecnológicos. Por su parte, las reservas son datos dinámicos, ya que pueden cambiar con la tecnología de extracción disponible, los precios y el descubrimiento de nuevos yacimientos, entre otros factores. Por ejemplo, según las estadísticas anuales del 2010 publicadas por el USGS, las reservas de litio eran de 9.9 millones de toneladas; mientras que en la misma publicación del año 2023 éstas han aumentado hasta los 26 millones de toneladas, es decir, en más de dos veces y media.<sup>6</sup> Así, las reservas futuras se encuentran en los recursos actuales, pero factores como un incremento en el coste de la energía necesaria para la extracción o el incremento del precio de los metales podrían significar la disminución o el aumento de las reservas actuales.

En este sentido, los estudios realizados desde este enfoque lanzan una advertencia sobre la posible superación de las reservas minerales en el futuro. Ejemplos de ello lo encontramos en publicaciones sobre los minerales asociados a la transición energética como el de Valero y colaboradores en 2018,<sup>7</sup> donde se identificaron 13 materias primas cuya demanda estimada hasta 2050 superaría las reservas conocidas, el de Dominish y colaboradores en 2019,<sup>8</sup> donde se superaran las reservas conocidas de cobalto, litio y níquel y se alcanzan el 50% de las reservas de indio, plata y telurio, o el de Moreau y colaboradores 2019,<sup>9</sup> donde se obtiene que antes de 2050 se habrían superado las reservas de ocho metales. Otros estudios, por su parte, ponen la previsión de superación de las reservas en un contexto histórico y señalan cómo el requerimiento de una tasa de expansión de las reservas

---

<sup>5</sup> USGS, **Principles of a Resource/Reserve Classification for Minerals**, informe técnico, U.S. Geological Survey, Estados Unidos, 1980. Disponible en: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/cir831>

<sup>6</sup> USGS. **Lithium Statistics and Information**. National Minerals Information Center, 2023. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/lithium-statistics-and-information>

<sup>7</sup> Alicia Valero, Antonio Valero, Guiomar Calvo, y Abel Ortego. **Material bottlenecks in the future development of green technologies**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93:178–200, oct 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.041>

<sup>8</sup> E. Dominish, N. Florin, and S. Teske. **Responsible minerals sourcing for renewable energy**. Technical report, report prepared for Earthworks by the Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney, 2019. Disponible en: <https://earthworks.org/resources/responsible-minerals-sourcing-for-renewable-energy/>

<sup>9</sup> Moreau, V.; Dos Reis, P.C.; Vuille, F. **Enough Metals? Resource Constraints to Supply a Fully Renewable Energy System**. *Resources* 2019, 8, 29. <https://doi.org/10.3390/resources8010029>

minerales de un 1-3% anual no debería suponer un obstáculo ya que resulta equivalente a lo experimentado en décadas anteriores con unos bajos precios de los metales.<sup>10</sup>

Resulta importante señalar cómo los resultados obtenidos que advierten de una futura escasez pueden ser aprovechados para justificar un aumento de la extracción minera así como incentivos económicos por parte de los estados hacia las industrias.

## 2.2. Seguridad mineral

Los cambios en las políticas públicas sobre materias primas de la Unión Europea y España están fundamentalmente orientadas a la seguridad en el suministro. El marco de las denominadas “*materias primas críticas*” tiene su nacimiento entre 2008 y 2011, cuando la preocupación sobre las cadenas de suministro de Estados Unidos y la Unión Europea se vio incrementada por dos eventos: (1) el aumento de los precios derivado del “*boom de los commodities*” (2000 - 2014) junto a la rápida industrialización de China y otras economías emergentes, y (2) las cuotas establecidas por China sobre las exportaciones de tierras raras en 2010. Es desde este marco desde el que ha trabajado la Comisión Europea desde entonces, con el establecimiento de una lista de materias primas críticas en 2011, actualizada cada tres años, y que en 2020 incluyó a 30 materias primas.<sup>11</sup>

La lista de materias primas críticas de la Unión Europea se define en base a dos parámetros principales:<sup>12</sup>

- La **importancia económica** de una materia prima se determina a partir de las aplicaciones de uso final en las que está presente y el valor añadido de los sectores de actividad económica de la Unión Europea que la incorporan en su proceso productivo. Se corrige mediante un índice de sustitución que mide las posibilidades técnicas y el coste económico del cambio hacia materias primas alternativas en determinadas aplicaciones.
- El **riesgo de suministro** de una materia prima refleja las posibilidades de disrupción de las cadenas de suministro de la Unión Europea. Se determina valorando la dependencia respecto a las importaciones desde algunos países en los que la actividad de extracción o refinado de una materia prima se encuentra muy concentrada, así como aspectos relacionados con la gobernanza de los países proveedores y las restricciones al comercio.

---

<sup>10</sup> Arjan de Koning, René Kleijn, Gjalt Huppel, Benjamin Sprecher, Guus van Engelen, Arnold Tukker (2018). **Metal supply constraints for a low-carbon economy?**. Resources, Conservation and Recycling, 129, 202-208, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.040>

<sup>11</sup> European Commission, **Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020)**. Disponible en: [https://rmis.irc.ec.europa.eu/uploads/CRM\\_2020\\_Report\\_Final.pdf](https://rmis.irc.ec.europa.eu/uploads/CRM_2020_Report_Final.pdf)

<sup>12</sup> European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Pennington, D., Tzimas, E., Baranzelli, C., et al., **Methodology for establishing the EU list of critical raw materials : guidelines**, Publications Office, 2017, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/769526>

De esta forma, es la estructura productiva de la industria europea y su relación con otros países a través de las cadenas de suministro lo que determina que una materia prima sea considerada como crítica. Los aspectos que lo determinan son económicos, comerciales y geopolíticos, lo cual no tiene por qué coincidir con una gestión sostenible y justa de los recursos minerales. Por ejemplo, la bauxita, mineral precursor del aluminio, es considerado crítico por la Unión Europea no porque exista una potencial escasez de aluminio sino porque este mineral es necesario para la industria del aluminio europea, la cual tiene un importante peso económico. Por tanto, bajo este enfoque, un cambio de gobierno en un país exportador de materias primas y la aprobación de unas reformas para consultar con la población de los territorios afectados la apertura de nuevos yacimientos mineros será visto como un riesgo en el suministro.

En la mayoría de ocasiones, el enfoque de la seguridad está siendo presentado en combinación con el de la sostenibilidad. Estados Unidos y la Unión Europea están subvencionando y reduciendo el riesgo económico de proyectos mineros para garantizar su rentabilidad, al mismo tiempo que impulsan sus credenciales medioambientales y éticas. Tal y como indica Thea Riofrancos para el caso del litio:<sup>13</sup>

«En un contexto de disminución de la inversión en el sector minero, y de inversión desigual en el litio específicamente, las empresas extractivas agradecen el apoyo gubernamental. Mientras tanto, al ampliar y diversificar el suministro de litio, la deslocalización responde a las preocupaciones de los fabricantes de vehículos eléctricos sobre una escasez a corto plazo. Ambos sectores se benefician del énfasis que ponen los responsables políticos en la sostenibilidad.»

### 2.3. Sostenibilidad mineral

Minería sostenible, extracción sostenible o gestión sostenible de las materias primas minerales son algunos de los términos utilizados actualmente en algunos informes y en la elaboración de políticas públicas. Junto a los límites evidentes que está mostrando el concepto de la sostenibilidad,<sup>14</sup> su aplicación en este contexto desde los documentos oficiales se asocia a afirmaciones tales como:<sup>15</sup>

«Una tonelada de materia prima mineral extraída y procesada en España cumple, con más ODS y genera menores emisiones de CO<sub>2</sub> que otra tonelada procedente de casi cualquier otro lugar del mundo, donde su extracción y tratamiento se realizan bajo legislaciones, probablemente, menos estrictas que la europea, en cuanto a la protección del medio

<sup>13</sup> Thea Riofrancos; **The Security–Sustainability Nexus: Lithium Onshoring in the Global North.** *Global Environmental Politics* 2023; 23 (1): 20–41. doi: [https://doi.org/10.1162/glep\\_a\\_00668](https://doi.org/10.1162/glep_a_00668)

<sup>14</sup> Andreu Escrivà (2023). **Contra la sostenibilidad.** Arpa: Barcelona

<sup>15</sup> Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2022). **Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales.** Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/materias-primas-minerales/default.aspx>

ambiente, de la seguridad y salud de las personas, de los derechos humanos, la transparencia, etc.»

Se pone el énfasis en un menor impacto medioambiental a partir de unas mejores prácticas y una legislación más estricta para forjar el vínculo entre seguridad de suministro a través de minería doméstica y sostenibilidad. Ante esto, Fernández y colaboradores afirman que ni la legislación es tan estricta, ni las prácticas son las menos nocivas, especialmente cuando la actividad está dominada por los megaproyectos y el poder corporativo.<sup>16</sup>

Toda minería tiene asociado un fuerte impacto socioambiental,<sup>17</sup> así que más allá de las necesarias mejoras técnicas que lo minimicen al máximo posible,<sup>18</sup> el enfoque de la sostenibilidad es también aquel que persigue reducir la extracción primaria gracias a un mejor aprovechamiento de las materias primas secundarias. Esto puede lograrse a partir de la recuperación y el reciclaje, así como a partir de la reducción de la demanda material de la economía.

Resultan especialmente importantes para el análisis de la sostenibilidad mineral las herramientas analíticas de la *Contabilidad de Flujos Materiales* desarrolladas desde la economía ecológica. En concreto, los *Requerimientos Totales de Materiales* (RTM) hacen referencia a la suma del total de inputs materiales directos y ocultos (domésticos e importados), incluida la alteración deliberada del paisaje.<sup>19</sup> Esto incluye tanto minerales energéticos, como no energéticos. A partir de esta herramienta, la investigación de Watari y colaboradores en 2019<sup>20</sup> puso el incremento de la demanda de materiales asociada a las nuevas tecnologías de descarbonización en comparación con la reducción de la demanda de extracción de combustibles fósiles. Sus resultados indican que la expansión de las tecnologías con bajas emisiones de carbono podría reducir los RTM en el sector de generación eléctrica a lo largo de su ciclo de vida, mientras que en el sector del transporte la implantación de los vehículos eléctricos provocaría un aumento de los flujos de recursos materiales asociados. En el primer caso, dejar de quemar combustibles fósiles reduce la cantidad de flujos materiales movilizados, en el segundo caso esa reducción no llega a compensar.

---

<sup>16</sup> Gonzalo Fernández, Erika González, Juan Hernández y Pedro Ramiro, **Megaproyectos: claves de análisis y resistencia en el capitalismo verde y digital**. OMAL, 2022.

<sup>17</sup> Deniau, Y., Herrera, V., Walter, M. 2021 ; **Mapeo de resistencias frente a los impactos y discursos de la minería para la transición energética en las Américas**. EAtlas/MiningWatch Canada. (Noviembre 2021). Disponible en: <https://miningwatch.ca/node/10804> | Se puede consultar el atlas en: [https://www.eiatlas.org/featured/met\\_america](https://www.eiatlas.org/featured/met_america)

<sup>18</sup> Tsilile Igogo, Kwame Awuah-Offei, Alexandra Newman, Travis Lowder, Jill Engel-Cox, (2021). **Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches**. Applied Energy, 300, 117375. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117375>.

<sup>19</sup> Carpintero, Ó. (2005). **El metabolismo de la economía española: Recursos naturales y huella ecológica (1955 - 2000)**. Fundación César Manrique: Lanzarote

<sup>20</sup> Takuma Watari, Benjamin C. McLellan, Damien Giurco, Elsa Dominish, Eiji Yamasue, Keisuke Nansai (2019). **Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity**. Resources, Conservation and Recycling, 148, 91-103, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.015>.

De esta forma vemos cómo el enfoque de la sostenibilidad mineral examina los impactos de la actividad extractiva y las posibilidades que permiten reducir la extracción primaria.

#### 2.4. Justicia global mineral

¿Son suficientes los recursos minerales existentes para sustituir el conjunto de vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos en España? Seguramente sí. ¿Sería universalizable que todos los países del mundo aplicaran ese mismo modelo de movilidad eléctrica? Ahí seguramente nos encontraríamos con un problema. Por tanto, ¿sería justo globalmente acaparar una considerable cantidad de recursos minerales para llevar a cabo nuestra transición verde y digital dificultando el uso de esas tecnologías en otras latitudes?

Este enfoque busca responder a estas preguntas, visibilizando qué porcentaje de las reservas globales y de las tasas de extracción anual son requeridos para los planes de transición de un país en concreto. Como señalan Jason Hickel y Aljoša Slameršak, los escenarios climáticos actualmente evaluados por el IPCC mantienen el consumo energético del Norte Global a un nivel per cápita 2-3 veces superior al del Sur Global, perpetuando así las desigualdades coloniales.<sup>21</sup> Esto encuentra un reflejo claro en la demanda mineral asociada a esos escenarios de transición.

Al mismo tiempo, la extracción y comercio de materias primas está fuertemente asociada a un intercambio ecológico desigual, que ha contribuido a la polarización global y el empobrecimiento de amplios segmentos de la población mundial y sus territorios.<sup>22</sup> El crecimiento económico de las regiones más ricas se logra a partir de un elevado *flujo metabólico* y el consiguiente desplazamiento de la carga medioambiental a las regiones más pobres. De esta forma, estos países son apropiadores netos de materiales, energía, tierra y mano de obra. Otros enfoques revelan también cómo estos países son emisores de residuos que, en muchos casos, terminan en las regiones más empobrecidas, contribuyendo a acentuar aún más esta desigualdad.<sup>23</sup>

En su estudio sobre las materias primas críticas asociadas al PERTE de movilidad eléctrica Bruna Cañada y Nicola Scherer estudiaron la demanda asociada al objetivo de 5 millones de

---

<sup>21</sup> Jason Hickel, Aljoša Slameršak, **Existing climate mitigation scenarios perpetuate colonial inequalities**, *The Lancet Planetary Health*, 2022, 6(7), 628-631, [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00092-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00092-4).

<sup>22</sup> Dorninger, C., Hornborg, A., Abson, D. J., von Wehrden, H., Schaffartzik, A., Giljum, S., Engler, J. O., Feller, R. L., Hubacek, K., & Wieland, H. (2021). **Global patterns of ecologically unequal exchange: Implications for sustainability in the 21st century**. *Ecological Economics*, 179(June 2020), 106824. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106824>

<sup>23</sup> C.P. Baldé, E. D'Angelo, V. Luda O. Deubzer, R. Kuehr (2022), **Global Transboundary E-waste Flows Monitor - 2022**, United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), Bonn, Germany. Disponible en: <https://ewastemonitor.info/gtf-2022/>

vehículos eléctricos para 2030 del *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima*.<sup>24</sup> De esta forma, obtuvieron que sería necesario dedicar un 5,43% de la extracción anual de litio en 2019 a nivel global, siendo que España únicamente representa el 0,61% de la población mundial.

El enfoque de la justicia mineral, por tanto, evalúa las enormes desigualdades a nivel global y examina de qué forma pueden verse profundizadas o revertidas según diferentes escenarios de transición energética.

### 3. Revisión de la elaboración de políticas públicas

Límites, seguridad, sostenibilidad y justicia global mineral se entrelazan e intersectan, realizan justificaciones cruzadas, pero también generan importantes ausencias y desencuentros. Es difícil encontrar un estudio, informe o documento que recoja todos estos enfoques y los aborde de forma conjunta. En el caso de la elaboración de políticas públicas de la Unión Europea, el interés específico en las materias primas para la transición energética se relaciona principalmente con la preocupación sobre la seguridad en las cadenas de suministro para la actividad de la industria europea. Este interés y preocupación se refuerza en el momento en el que algunas de estas materias primas son estratégicas desde el punto de vista de la defensa y el sector aeroespacial. Así lo señalan documentos de análisis del *Instituto Español de Estudios Estratégicos*,<sup>25</sup> dependiente del Ministerio de Defensa. Y también aparece en la propia *Estrategia de Seguridad Nacional 2021*, donde se mencionan las dependencias y repercusiones geopolíticas que tienen los nuevos materiales que están ganando protagonismo tecnológico, como es el caso de las tierras raras.<sup>26</sup>

La comunicación de la Comisión Europea «*Resiliencia de las materias primas fundamentales: trazando el camino hacia un mayor grado de seguridad y sostenibilidad*»<sup>27</sup> realizada en septiembre de 2020 define la orientación de las políticas europeas sobre esta cuestión. En este documento se advierte de la dependencia del extranjero en el abastecimiento de las materias primas que harían posible la neutralidad climática de la Unión Europea, y la feroz competencia mundial en su suministro. Apunta hacia la urgencia de actuar para asegurar

---

<sup>24</sup> Bruna Cañada y Nicola Scherer (2022). **¿Los Next Generation EU respetan los límites biofísicos del planeta? FAQs sobre los PERTE y las materias primas críticas para la transición verde y digital.** Observatori del Deute en la Globalització. Disponible en:

<https://odg.cat/es/publicacion/los-fondos-next-generation-eu-y-los-limites-biofisicos/>

<sup>25</sup> Mar Hidalgo García. **Los minerales estratégicos: el ser o no ser de la descarbonización y transformación digital de la UE.** Documento de Análisis IEEE 03/2021.

[http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs\\_analisis/2021/DIEEEA03\\_2021\\_MARHID\\_MineralesEstrategicos.pdf](http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_analisis/2021/DIEEEA03_2021_MARHID_MineralesEstrategicos.pdf)

<sup>26</sup> Real Decreto 1150/2021, de 28 de diciembre, por el que se aprueba la **Estrategia de Seguridad Nacional 2021.**

<https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/12/28/1150>

<sup>27</sup> Comisión Europea (2020). **Resiliencia de las materias primas fundamentales: trazando el camino hacia un mayor grado de seguridad y sostenibilidad.** COM 474.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0474>

un suministro de materias primas seguro y sostenible, uniendo esfuerzos de empresas, autoridades subnacionales y nacionales e instituciones de la UE. Para ello, define cuatro objetivos principales:

1. Desarrollar cadenas de valor resilientes para los ecosistemas industriales de la Unión Europea.
2. Reducir la dependencia de materias primas fundamentales originales a través del uso circular de los recursos, la sostenibilidad de los productos y la innovación.
3. Fortalecer el abastecimiento y la transformación sostenibles y responsables de materias primas a escala interna en la Unión Europea.
4. Diversificar el suministro a través de un abastecimiento sostenible y responsable desde terceros países, reforzando el comercio abierto regulado de materias primas y eliminando las distorsiones al comercio internacional.

A partir de ahí, se desgranar una serie de acciones a partir de las cuales se consolida el impulso de la minería doméstica, junto a algunas medidas de recuperación de materias primas secundarias.

Este documento se apoya en un extenso estudio previo en el que se estima la demanda de materias primas a escala europea según diferentes escenarios de transición hacia la neutralidad climática.<sup>28</sup> A partir de este estudio,

Con el propósito de adaptar este marco normativo al caso español, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico presentó en agosto de 2022 la *«Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales»*.<sup>29</sup> En este documento se reconoce la importancia de la recuperación de materias primas secundarias al mismo tiempo que se reafirma la necesidad de aumentar la actividad de extracción minera. Se asume que el reciclaje puede suavizar el crecimiento de la demanda pero que en ningún caso sustituirá a la extracción primaria. De esta forma, este documento sostiene que:

«Los avances tecnológicos que impulsan el uso eficiente de materiales y recursos, así como la reducción de residuos y el reciclaje, de conformidad con el Plan de Acción para la Economía Circular de la UE, son lamentablemente insuficientes para sustentar las necesidades sociales y el crecimiento de la población mundial.»

---

<sup>28</sup> In-depth analysis in support of the Communication COM(2018) 773: **A Clean Planet for all A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy**. Comisión Europea, 28 noviembre 2018. Disponible en:

[https://climate.ec.europa.eu/system/files/2018-11/com\\_2018\\_733\\_analysis\\_in\\_support\\_en.pdf](https://climate.ec.europa.eu/system/files/2018-11/com_2018_733_analysis_in_support_en.pdf)

<sup>29</sup> Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2022). **Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales**.

<https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/materias-primas-minerales/default.aspx>

Esto justifica y refuerza las medidas que se detallan en el borrador del «*Plan de acción sobre materias primas minerales 2023-2027*», que supondrán un impulso a la actividad de la industria minera en España. Sin embargo, este documento no se basa en ningún estudio específico sobre la demanda de minerales futura de España bajo los actuales planes de transición energética, sino que únicamente hace referencia a informes realizados a escala europea y mundial a partir de una serie de hipótesis y escenarios. Las afirmaciones realizadas al respecto del reciclaje y la extracción primaria no responden a los resultados obtenidos para el caso específico de España. Dada la importancia que tienen las decisiones que están siendo tomadas actualmente en la elaboración de políticas públicas sobre materias primas, merece la pena examinar los informes y estudios sobre los que se basan. Los informes internacionales con más importancia a este respecto son los tres siguientes:

- «*Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*» del Banco Mundial (2020)<sup>30</sup>
- «*The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*» de la Agencia Internacional de la Energía (2021)<sup>31</sup>
- «*Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge*» de la Universidad KU Leuven (2022)<sup>32</sup>

A continuación, pasamos a revisar los elementos comunes, las hipótesis, los escenarios y los aspectos problemáticos que presentan estos informes.

### 3.1. Informes principales

En todos estos informes nos encontramos una serie de conclusiones compartidas, que son las que guían posteriormente la elaboración de políticas públicas.

- **Fuerte incremento de la demanda de minerales asociados a las tecnologías de descarbonización**

Se obtiene que todos los escenarios de transición energética suponen un incremento de la demanda de minerales. El informe del Banco Mundial obtiene que

---

<sup>30</sup> World Bank (2020), **Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition**, World Bank, Washington, DC. Disponible en: <https://pubdocs.worldbank.org/en/06171158887536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition>

<sup>31</sup> IEA (2021), **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**, IEA, Paris. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

<sup>32</sup> Liesbet Gregoir y Karel van Acker (2022), **Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge**, Universidad KU Leuven. Disponible en: <https://eurometaux.eu/media/rqocjybv/metals-for-clean-energy-final.pdf>

la demanda de los minerales analizados llegaría a duplicarse o triplicarse en 2050 con respecto al escenario tendencial. La Agencia Internacional de la Energía, afirma que la demanda de minerales para tecnologías de descarbonización se multiplicaría por 4 o por 6 en 2040 según la ambición climática del escenario de transición. Desde la Universidad KU Leuven señalan cómo el cobre, litio, cobalto, níquel y tierras raras experimentarían un incremento de la demanda que supera las tasas de crecimiento que han experimentado en el pasado, mientras que para el caso del aluminio, silicio o zinc este incremento resulta más compatible con las tasas de crecimiento históricas.

- **Las tecnologías de descarbonización llegarán a representar un porcentaje significativo de la demanda de algunos minerales**

Los minerales requeridos para la fabricación de estas tecnologías ya tienen actualmente otros usos en otros sectores de la economía. Sin embargo, el fuerte incremento asociado a la transición energética puede llegar a representar un porcentaje de la demanda muy significativo. Según la Agencia Internacional de la Energía, las tecnologías de descarbonización podrían llegar a representar en 2040 el 40% de la demanda de cobre y tierras raras, el 60-70% de la demanda de níquel y cobalto, y prácticamente el 90% de la demanda de litio. Por su parte, desde la Universidad KU Leuven obtienen que en el caso del litio, cobalto, níquel y tierras raras el porcentaje de la demanda asociado a los escenarios de transición sería mayoritario, mientras que en el caso de cobre, aluminio y zinc no llegaría a superar el 20%. En ambos casos, la demanda desde el resto de sectores de la economía experimenta también un incremento durante el periodo analizado, estimado a partir de las tendencias experimentadas en el pasado, el crecimiento económico y la intensidad material de la actividad económica.

- **La movilidad eléctrica es responsable del incremento más significativo de la demanda de minerales**

La demanda futura de minerales para la transición energética está compuesta por la suma de sus partes, pero no todas ellas son equivalentes. La producción de vehículos eléctricos es el principal impulsor de la demanda mineral para la descarbonización. En el estudio de la Universidad KU Leuven, los vehículos eléctricos representan el 50-60% de la demanda asociada a la transición. La Agencia Internacional de la Energía, por su parte, obtiene que la demanda mineral requerida para la fabricación de vehículos eléctricos se multiplicaría por 40 en 2040. El litio experimenta el mayor crecimiento, multiplicándose por un factor de 40, seguido del grafito y el níquel, que se multiplican por 20-25, y del cobalto, que dependiendo de la composición de las baterías utilizadas se multiplicaría por 6-30. Cabe destacar

que este resultado se combina con el anterior, siendo estos metales asociados a la movilidad eléctrica quienes al mismo tiempo pasan a representar un porcentaje mayoritario de la demanda total.

- **El reciclaje es incapaz de desplazar la centralidad de la extracción primaria y las materias primas secundarias únicamente estarán disponibles en grandes cantidades a partir de 2030-2040**

Un elevado aprovechamiento de materias primas secundarias para la fabricación de nuevas tecnologías requiere dos condiciones: (1) unas altas tasas de recogida y reciclaje de productos al final de su vida útil, y (2) un volumen de residuos de magnitud equivalente a la demanda material de la industria. En el caso de las tecnologías de descarbonización, se encuentra que aún con elevadas tasas de recogida y reciclaje de los productos al final de su vida útil, el volumen de materias primas secundarias no sería suficiente para cubrir la demanda de la transición energética. El tiempo de vida útil determina el periodo durante el cual los minerales quedarán retenidos en su uso. Esto resulta especialmente relevante para aquellos minerales que actualmente tienen una baja demanda en el resto de la economía y en los que las tecnologías de descarbonización pasarán a representar el porcentaje mayoritario.

El informe del Banco Mundial evalúa la hipótesis de una tasa del 100% de reciclaje de cobre, níquel, cobalto y aluminio. Esta tasa en ningún caso sería posible, por los límites termodinámicos del proceso de reciclaje, se utiliza como caso extremo para evaluar las hipotéticas consecuencias. Como resultado, se reduciría la extracción primaria en un 15-25% respecto a la correspondiente a las actuales tasas de reciclaje, sin que las materias primas secundarias lleguen a representar más del 50% de la demanda total. El informe de la Universidad KU Leuven considera un aumento las actuales tasas de reciclaje en un 15-30%, junto a algunas excepciones más elevadas, situándolas así en el 60-90% para los minerales analizados. Como resultado se suavizaría el incremento de la extracción primaria durante las próximas décadas, pero en ningún caso se evitaría. La tasa de crecimiento anual de la extracción primaria del litio se rebajaría del 8.2 al 5.8%, la del cobalto del 4,1 al 2,6%, la del níquel del 3.2 al 2.8% y la del cobre del 2.7 al 2.5%. Este informe también señala cómo las materias primas secundarias no estarán disponibles en volúmenes significativos hasta después de 2035 - 2040, cuando la primera generación de las tecnologías de descarbonización empieza a ser sustituida a gran escala. Diferencian tres periodos para el suministro de minerales en la Unión Europea, y no sería hasta 2040-2050 cuando se tendría capacidad de suministrar la mayoría de los metales para las tecnologías de descarbonización a partir del reciclaje. En periodos anteriores, la mayor parte de la demanda sería cubierta a partir de la extracción primaria.

- **Pueden aparecer problemas relativos al suministro, pero la demanda acumulada podrá ser cubierta a partir de los recursos minerales**

Estos informes presentan advertencias sobre los riesgos que pueden derivarse de un fuerte incremento de la demanda como consecuencia de la transición energética. La Agencia Internacional de la Energía indica cómo la demanda de cobre, litio y cobalto podría ser superior a la producción en el año 2030, según las previsiones actuales de yacimientos mineros en funcionamiento y en construcción. Destaca también que entre el descubrimiento de un nuevo yacimiento minero y el inicio de la extracción transcurren 16 años de media. Por tanto, los cuellos de botella en el suministro se encontrarían en la velocidad de extracción necesaria para satisfacer la creciente demanda y no en las reservas en sí. Así mismo, apuntan hacia el desafío que supone la reducción en la ley mineral del cobre, cuya concentración ha disminuído en un 30% desde 2005, lo cual implica que su extracción tiene mayores costes económicos y genera más emisiones y residuos. Sin embargo, estos hechos no les llevan a plantear un problema futuro de escasez de minerales para llevar a cabo la transición energética. Al contrario, señalan que los recursos minerales son suficientes para cubrir la demanda y que las reservas minerales pueden crecer al ritmo necesario para ese incremento. Se explica cómo a pesar del crecimiento continuo de la extracción durante las últimas décadas, las reservas económicamente viables han ido en aumento para muchos minerales asociados a la transición energética. En el caso del litio, las reservas se duplicaron entre 2010 y 2022, mientras su producción se multiplicó por 5 en el mismo periodo. En el caso del cobre las reservas han aumentado un 30% en la última década.

Por su parte, el informe de la Universidad KU Leuven muestra cómo las reservas actuales serían suficientes para cubrir la demanda de litio y aluminio entre 2020 y 2050, mientras que para el zinc, cobre, cobalto, silicio o níquel haría falta aumentar el tamaño de las reservas, sin llegar a superar los recursos minerales. Se considera que no hay preocupación por la disponibilidad de material futura, pues las tendencias históricas muestran que el volumen de las reservas y recursos han crecido con el tiempo debido a las inversiones en exploración consecuencia de la aceleración sostenida de la demanda. Son justamente aquellos mercados de gran demanda los que se exploran con mayor intensidad, y muestra de ello se encuentra en cómo las reservas y recursos de las materias primas para la fabricación de baterías han crecido mucho en la última década. Por tanto, en ambos informes se pone el foco en el papel fundamental que pueden desempeñar los gobiernos a la hora de crear las condiciones que favorezcan la inversión diversificada en las cadenas de suministro de minerales y las actividades de exploración.

### 3.2. Escenarios analizados

A la hora de realizar un estudio sobre la demanda mineral futura, los cálculos se realizan sobre una serie de hipótesis y escenarios de transición energética. Estos escenarios definen la composición y magnitud de las tecnologías que harían posible la descarbonización de la economía en las próximas décadas. De esta forma, presentan una distribución de tecnologías vinculadas a una senda de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero compatible con los presupuestos de carbono que limitarían el calentamiento global al umbral de seguridad de 2°C. En la Tabla 1 se presentan los escenarios utilizados en los informes analizados.

Tabla 1: Escenarios utilizados por los principales informes sobre la demanda futura de minerales para la transición energética.

Informe	Fuente de los escenarios	Escenarios
« <i>Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition</i> » del Banco Mundial (2020)	IEA (2017): Energy Technology Perspectives <sup>33</sup>	<p><b>2°C Scenario (2DS);</b> Reduce en un 70% las emisiones del sector energético entre 2015 y 2060. Tiene una posibilidad del 50% de limitar a 2°C en 2100 (1.170 GtCO<sub>2</sub>).</p> <p><b>Beyond 2°C Scenario (B2DS);</b> Alcanza las cero emisiones netas en 2060. Tiene una posibilidad del 50% de limitar a 1,75°C en 2100 (750 GtCO<sub>2</sub>).</p>
	IRENA (2019): Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050 <sup>34</sup>	<p><b>REmap Case:</b> Reduce un 90% las emisiones relacionadas con la energía entre 2015 y 2050. Limita el calentamiento global por debajo de los 2°C en 2100 (827 GtCO<sub>2</sub>).</p>
« <i>The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions</i> » de la Agencia Internacional de la Energía (2021)	IEA (2020): World Energy Outlook <sup>35</sup>	<p><b>Stated Policies Scenario (STEPS):</b> Informa sobre las consecuencias de los planes climáticos actualmente declarados por los gobiernos.</p> <p><b>Sustainable Development Scenario (SDS):</b> Alcanza las cero emisiones netas en 2070, logrando</p>
	IEA (2020): Energy Technology Perspectives <sup>36</sup>	

<sup>33</sup> IEA (2017), **Energy Technology Perspectives 2017**, IEA, Paris. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>

<sup>34</sup> IRENA (2019), **Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition)**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>

<sup>35</sup> IEA (2020), **World Energy Outlook 2020**, IEA, Paris. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>

<sup>36</sup> IEA (2020), **Energy Technology Perspectives 2020**, IEA, Paris. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>

		limitar el aumento de temperatura por debajo de los 2°C en 2100.
«Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge» de la Universidad KU Leuven (2022)	IEA (2020): Energy Technology Perspectives	<b>STEPS y SDS</b>

Los escenarios climáticos deben ser puestos en contexto con el presupuesto de carbono y las emisiones actuales. Según el análisis de la mitigación del cambio climático del Sexto Informe de Evaluación del IPCC, el presupuesto de carbono restante en 2020 se situaba en las 500 GtCO<sub>2</sub> para tener un 50% de probabilidad de no superar los 1,5°C, y en 1.150 GtCO<sub>2</sub> para tener un 67% de probabilidad de no superar los 2°C.<sup>37</sup> Así mismo, en 2021 las emisiones globales se situaron en 38 Gt<sup>38</sup>, volviendo a los niveles pre-COVID19 tras un leve descenso del 5% durante 2020, y se prevé un incremento del 1% durante 2022.<sup>39</sup>

Las sendas de reducción de emisiones representadas por los informes trabajan con una serie de hipótesis tecnológicas. Por ejemplo, en el informe del Banco Mundial se ve cómo el escenario REmap de IRENA presenta un mix energético con una mayor presencia de las tecnologías eólicas y solar fotovoltaica con respecto al presentado en los escenarios 2DS y B2DS de la IEA, que le dan más peso a las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono. Son relevantes también las diferencias en los escenarios de movilidad, como veremos más adelante. Por otro lado, podemos observar cómo el consumo energético global considerado por estos escenarios no experimenta un fuerte aumento en el periodo analizado. Según los escenarios considerados, oscila entre una reducción del 9-11% y un aumento del 7%. En la Tabla 2 se recogen las variaciones en el consumo de energía final y la flota de vehículos de pasajeros en circulación de diferentes escenarios.

Tabla 2: Variación en el consumo de energía final y flota de vehículos de pasajeros en circulación de diferentes escenarios

Escenarios	Consumo de energía final	Flota de vehículos
<b>2°C Scenari (2DS), IEA ETP 2017)</b>	Incremento del 7% entre 2014 y 2060: 402 → 431 EJ	Duplica el número de vehículos en circulación entre 2014 y 2060:

<sup>37</sup> IPCC, 2022: **Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouridajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001

<sup>38</sup> Crippa M., Guizzardi D., Banja M., Solazzo E., Muntean M., Schaaf E., Pagani F., Monforti-Ferrario F., Olivier, J.G.J., Quadrelli, R., Riskey Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Grassi, G., Rossi, S., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Vignati, E. **CO<sub>2</sub> emissions of all world countries** – JRC/IEA/PBL 2022 Report, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, doi:10.2760/07904, JRC130363

<sup>39</sup> Friedlingstein, P., et al. **Global Carbon Budget 2022**, Earth Syst. Sci. Data, 14, 4811–4900, <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>

		1.100 → 2.200 millones, siendo la mayoría de ellos eléctricos
<b>REmap Case, IRENA 2019</b>	Reducción del 11% entre 2016 y 2050: 395 → 351 EJ	Alcanzan los 1.000 millones de vehículos eléctricos en 2050
<b>Sustainable Development Scenario (SDS), IEA ETP 2020</b>	Reducción del 9% entre 2019 y 2070: 435 → 397 EJ	Alcanza los 2.000 millones de vehículos eléctricos de pasajeros en 2070

Por su importancia, merece la pena también destacar el escenario *Net Zero by 2050 (NZE)*<sup>40</sup> de la Agencia Internacional de la Energía, publicado en 2021, el cual se toma como referencia en el informe *Energy Technology Perspectives 2023*.<sup>41</sup> En este escenario, las emisiones acumuladas entre 2020 y 2050 serían de 500 GtCO<sub>2</sub> y el consumo de energía final se reduciría en un 22% en el mismo periodo. El número de coches y furgonetas eléctricas, híbridas y de hidrógeno aumentaría hasta los 350 millones en 2030 y hasta 2.000 millones en 2050.

De esta forma vemos cómo los escenarios que sirven de base a los estudios principales sobre demanda futura de minerales tienen unas modestas variaciones en el consumo de energía final, un aumento significativo en los vehículos de pasajeros en circulación y se ciñen a unos presupuestos de carbono que buscan limitar el calentamiento global por debajo de los 2°C.

Para calcular la demanda futura de minerales asociada a la transición energética se necesitan también otras consideraciones, como el tiempo de vida útil de las tecnologías, la distribución de sub-tecnologías dentro de cada ámbito o la intensidad material y sus curvas de mejora. Antes de entrar en su descripción, apuntaremos algunos aspectos problemáticos que pueden ser detectados en estos escenarios.

### 3.3. Aspectos problemáticos

Los escenarios aquí analizados presentan una solución tecnológica a los retos y desafíos de la crisis ecológica y el calentamiento global. De esta forma, aunque presenten reducciones drásticas de emisiones, la centralidad de la transición se sitúa sobre la esfera tecnológica, sin apenas influencia de otro tipo de factores de carácter social, cultural o económico. Por ese motivo nos encontramos con algunos aspectos que resultan problemáticos cuando se analizan en toda su complejidad y que tienen importantes consecuencias sobre la demanda futura de minerales. Destacamos principalmente dos: el desacoplamiento y el aumento de

<sup>40</sup> IEA (2021), *Net Zero by 2050*, IEA, Paris. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

<sup>41</sup> IEA (2023), *Energy Technology Perspectives 2023*, IEA, Paris. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>

los vehículos privados en circulación.

### **Desacoplamiento**

Los escenarios analizados presentan una serie de hipótesis macroeconómicas y demográficas que acompañan a las hipótesis energéticas, tecnológicas y climáticas. Ahí se consideran cuestiones como un aumento de la población mundial, que alcanzaría los 10.000 millones de habitantes en 2050 en la mayoría de los casos. También se considera un ritmo de crecimiento de la economía mundial situado en torno al 3% anual. De esta forma, vemos cómo en los escenarios del informe de la Agencia Internacional de la Energía o del IRENA el producto interior bruto mundial llega a duplicarse o triplicarse en 2050 con respecto al actual. Al mismo tiempo, se considera que esto ocurriría mientras el consumo de energía final apenas aumenta o disminuye levemente, y mientras se reducen drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero en el mismo periodo. Para que esto sea posible debe producirse un fuerte desacoplamiento absoluto entre el crecimiento económico con respecto a las emisiones o el consumo energético.

El desacoplamiento es una teoría que intenta dar respuesta a los retos de la crisis ecológica la cual afirma que se pueden mantener tasas de crecimiento económico elevadas al mismo tiempo que se reducen dichos impactos o consumos. Esta teoría está presente en los informes y recomendaciones de organismos internacionales como la OCDE, la Comisión Europea, el Banco Mundial o el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). La validez de esta teoría, sin embargo, ha sido puesta en entredicho desde diferentes sectores académicos.<sup>42</sup> La investigación publicada por Haberl y colaboradores en 2020<sup>43</sup> realiza una revisión sistemática de 835 artículos científicos y encuentra que los ejemplos de desacoplamiento absoluto a largo plazo son escasos, concluyendo que:

«Llegamos a la conclusión de que no se pueden lograr grandes reducciones absolutas rápidas del uso de recursos y de las emisiones de gases de efecto invernadero mediante las tasas de desacoplamiento observadas, por lo que el desacoplamiento debe complementarse con estrategias orientadas a la suficiencia y con el cumplimiento estricto de los objetivos de reducción absoluta.»

Esto lleva a diversos investigadores a defender que con las trayectorias de crecimiento actuales es improbable que se consigan las reducciones absolutas en la demanda energética

---

<sup>42</sup> T. Parrique, J. Barth, F. Briens, C. Kerschner, A. Kraus-Polk, A. Kuokkanen, and J. Spangenberg. **Decoupling debunked: Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability**. Technical report, European Environmental Bureau, 2019. Disponible en: <https://eeb.org/library/decoupling-debunked/>

<sup>43</sup> Helmut Haberl, Dominik Wiedenhofer, Doris Virág, Gerald Kalt, Barbara Plank, Paul Brockway, Tomer Fishman, Daniel Hausknost, Fridolin Krausmann, Bartholomäus Leon-Gruchalski, Andreas Mayer, Melanie Pichler, Anke Schaffartzik, Tânia Sousa, Jan Streeck, and Felix Creutzig. **A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part II: synthesizing the insights**. Environmental Research Letters, 15(6):065003, jun 2020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab842a>

y el uso de recursos naturales requeridas para afrontar los desafíos de la transición.<sup>44</sup> En un sistema económico orientado al crecimiento las mejoras de la productividad se aprovechan para aumentar la producción y el consumo, lo cual dificulta aprovechar esas mejoras para reducir el uso de los recursos naturales.

De esta forma, una fuerte dependencia hacia un desacoplamiento de dudosa validez supone un riesgo a la hora de elaborar políticas públicas basadas en este tipo de escenarios. Por un lado, pone en cuestión si las reducciones de emisiones y consumo energético planteadas son realmente compatibles con el escenario socioeconómico. Por otro lado, el crecimiento refuerza la presión sobre el uso de recursos materiales independientemente de los escenarios de transición energética. Las proyecciones de la OCDE consideran que, a pesar de un descenso en la intensidad material de la economía mundial, la demanda de materiales se va a duplicar entre 2011 y 2060 como consecuencia de factores socioeconómicos, pasando de 79 a 167 gigatoneladas anuales.<sup>45</sup> Por estos motivos, considerar la demanda de minerales para la transición energética en un escenario de fuerte crecimiento supone asumir que la demanda de minerales también va a aumentar desde otros sectores de actividad económica, dando como resultado unos elevados requerimientos de extracción primaria.

### **Aumento de los vehículos de pasajeros en circulación**

Según las estimaciones del *International Council on Clean Transportation* (ICCT), las tendencias actuales conducen a 3.050 millones de vehículos ligeros en circulación en 2050 (turismos, motocicletas y furgonetas).<sup>46</sup> Eso supondría triplicar la flota de vehículos global. Como hemos visto, los escenarios de la Agencia Internacional de la Energía consideran también una flota de vehículos que duplica su tamaño en el periodo estudiado. Aumentar la flota de vehículos al mismo tiempo que se persigue una reducción de las emisiones implica que no bastaría con sustituir el número actual de vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos, sino que hay fabricar casi el doble.

Como hemos visto, la movilidad eléctrica es responsable del incremento más significativo en la demanda de minerales relacionados con la transición energética y digital. Al mismo tiempo, el litio, cobalto y níquel asociado a estas tecnologías supondría un porcentaje mayoritario de la demanda total en el conjunto de la economía. Las previsiones futuras sobre los requerimientos de extracción primaria de minerales vinculados a la transición energética, por tanto, están fuertemente determinadas por los escenarios de movilidad que se consideren. En este sentido, duplicar el número de vehículos de pasajeros en circulación

---

<sup>44</sup> Ward JD, Sutton PC, Werner AD, Costanza R, Mohr SH, et al. (2016) **Is Decoupling GDP Growth from Environmental Impact Possible?**. PLOS ONE 11(10): e0164733. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164733>

<sup>45</sup> OECD (2019), **Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences**, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.

<sup>46</sup> International Council on Clean Transportation. **ICCT Global Transportation Roadmap Model**, Version 1-0 (ICCT, Washington, DC, 2012).

resulta un aspecto problemático que debe ser evaluado en mayor profundidad. El informe «*Las cuentas ecológicas del transporte en España*» nos aporta una visión completa de las consecuencias del actual modelo de movilidad, en el que los vehículos privados apenas se utilizan durante un 3% del tiempo de su vida útil.<sup>47</sup>

Este tipo de escenarios presentan una visión tecnocéntrica de la transición energética, donde la tarea se encuentra en intercambiar unas tecnologías contaminantes por otras que lo son menos. En el camino, apenas se tiene en cuenta la posibilidad de transformaciones estructurales significativas en la esfera socioeconómica, o cambios en los estilos de vida que garanticen un elevado bienestar social con un menor uso de recursos naturales. En el caso de la movilidad, reproduce en el futuro la situación actual y las tendencias observadas, sin apenas cuestionarlas.

Algunas investigaciones afirman que las estrategias de transición tecno-céntricas para la movilidad resultan insuficientes para cumplir con el presupuesto de carbono que limitaría el calentamiento global a los 2°C.<sup>48</sup> Esta conclusión lleva a plantear la necesidad de medidas políticas orientadas a reducir la propiedad y uso de vehículos. Además, junto a esta razón, existen múltiples motivos por los cuales conviene cuestionar el modelo de movilidad basado fundamentalmente en el uso del vehículo privado por carretera.

El transporte motorizado de pasajeros presenta unas enormes desigualdades a nivel global junto a un fuerte impacto en huella energética y en emisiones. Actualmente, el 50% de la población mundial con menos ingresos consume el 10% de la energía asociada al transporte por carretera, mientras que el 10% con más ingresos consume el 45%.<sup>49</sup> Dada la elevada elasticidad económica del consumo en las categorías de transporte, puede llegar a clasificarse como un consumo de lujo y de alta intensidad energética. Estas desigualdades se replican también en el interior de los países. En España, la diferencia de huella energética entre los quintiles 5 y 1 (20% más rico, 20% más pobre) es del orden de 11-12 veces más para categorías como la compra de vehículos o de 3-4 veces superior para las categorías de otros transportes o combustible y mantenimiento de vehículos.

Unos escenarios tecno-céntricos en materia de movilidad, por tanto, corren el riesgo de profundizar y acentuar estas desigualdades al mismo tiempo que proyectan unos elevados requerimientos de extracción primaria para cubrir la demanda mineral obtenida. Investigadores como Giulio Mattioli plantean enfoques alternativos para abordar un futuro

---

<sup>47</sup> Alfonso Sanz Alduán, Pilar Vega Pindado, Miguel Mateos Arribas (2016). **Las cuentas ecológicas del transporte en España**. Ecologistas en Acción y Grupo de Estudios y Alternativas 21, S.L. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/28705/>

<sup>48</sup> Milovanoff, A., Posen, I.D. & MacLean, H.L. **Electrification of light-duty vehicle fleet alone will not meet mitigation targets**. *Nat. Clim. Chang.* **10**, 1102–1107 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00921-7>

<sup>49</sup> Oswald, Y., Owen, A., & Steinberger, J. K. (2020). **Large inequality in international and intranational energy footprints between income groups and across consumption categories**. *Nature Energy*, 5(March), 231–239. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0579-8>

de la movilidad en el que se reduzca la dependencia hacia el vehículo privado.<sup>50</sup> Resolver de qué forma pueden cubrirse las necesidades sociales de transporte al mismo tiempo que se limita el impacto ecológico del mismo es todavía una tarea pendiente.<sup>51</sup>

---

<sup>50</sup> Mattioli, G. (2016). **Transport needs in a climate-constrained world. A novel framework to reconcile social and environmental sustainability in transport.** Energy Research and Social Science, 18, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.03.025>

<sup>51</sup> Dillman, K. J., Czepkiewicz, M., Heinonen, J., & Davíðsdóttir, B. (2021). **A safe and just space for urban mobility: A framework for sector-based sustainable consumption corridor development.** Global Sustainability, 4. <https://doi.org/10.1017/sus.2021.28>

## 4. Elementos que determinan la demanda mineral futura para la transición

Hasta ahora hemos visto las estimaciones futuras sobre la demanda mineral en los informes internacionales que se toman como referencia para la elaboración de políticas públicas. Estos resultados se encuentran asociados a unos escenarios, pero también a una serie de hipótesis tecnológicas relevantes en diversos ámbitos. Para comprender en más detalle el origen de los resultados finales, entramos a explicar los detalles de algunas de estas hipótesis.

En este apartado vamos a hacer mención de forma recurrente a los tres informes internacionales que hemos introducido en el apartado anterior. Por facilitar la lectura, nos referiremos a ellos únicamente por el organismo responsable.

### 4.1. Modelo de producción energética

Existen diferentes vías para cumplir con el mismo objetivo climático. Algunos escenarios mantienen un consumo energético elevado y confían un despliegue de tecnologías de emisiones negativas a gran escala, aunque su efectividad haya sido puesta en duda.<sup>52</sup> Otros escenarios plantean una reducción de la demanda energética global del 40% para no depender de dichas tecnologías.<sup>53</sup> Existen, incluso, escenarios que plantean una redistribución del consumo energético a nivel global como parte de la transición.<sup>54</sup> Por tanto, el cumplimiento de un presupuesto de carbono es únicamente el inicio de la conversación. Sin cumplirlo, el escenario es inaceptable, pero hay muchos más elementos a su alrededor.

El modelo de producción energética de un escenario está determinado por cuatro elementos principales:

#### **Demanda de energía final**

La demanda energética impone la cantidad de tecnologías que deben desarrollarse para lograr satisfacerla mientras se reducen drásticamente las emisiones. Tal y como señalan Barrett y colaboradores<sup>55</sup>, una reducción de la demanda energética tiene cinco importantes

---

<sup>52</sup> Anderson K, Peters G. **The trouble with negative emissions**. *Science*. 2016 Oct 14;354(6309):182-183. <https://doi.org/10.1126/science.aah4567>

<sup>53</sup> Grubler, A., Wilson, C., Bento, N. *et al.* **A low energy demand scenario for meeting the 1.5°C target and sustainable development goals without negative emission technologies**. *Nat Energy* 3, 515-527 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6>

<sup>54</sup> Keyßer, L.T., Lenzen, M. **1.5°C degrowth scenarios suggest the need for new mitigation pathways**. *Nat Commun* 12, 2676 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22884-9>

<sup>55</sup> Barrett, J., Pye, S., Betts-Davies, S., Eyre, N., Broad, O., Price, J., Norman, J., Anable, J., Bennett, G., Brand, C., Carr-Whitworth, R., Marsden, G., Oreszczyn, T., Gieseckam, J., Garvey, A., Ruyssevelt, P. and Scott, K. 2021. **The role of energy demand reduction in achieving net-zero in the UK**. Centre for Research into Energy Demand Solutions. Oxford, UK. Disponible en: <https://low-energy.creds.ac.uk/the-report/>

efectos que facilitan la transición:

1. Acelera la transición hacia un suministro energético bajo en carbono a corto plazo al reducir directamente nuestra necesidad de producción de energía a partir de combustibles fósiles.
2. Reduce los desafíos tecnológicos asociados a la fabricación e instalación de grandes sistemas requeridos para el suministro de energía baja en carbono.
3. Reduce los requisitos generales de inversión económica para lograr una descarbonización completa.
4. Aporta flexibilidad a la hora de aumentar la ambición climática y los compromisos asumidos.
5. Reduce la dependencia hacia unas tecnologías de emisiones negativas.

A estos cinco efectos podríamos añadir un sexto vinculado con una reducción de la demanda de extracción primaria de los minerales de las tecnologías de descarbonización. Como hemos visto, los escenarios presentes en los principales informes escenarios internacionales apenas llegan a considerar una reducción de la demanda de energía final global del ~10%, condicionado a la efectividad del desacoplamiento respecto al crecimiento económico. Una mejor comprensión de la relación entre bienestar social y consumo energético puede guiar otros escenarios orientados a reducciones más significativas de la demanda.<sup>56</sup>

### **Distribución de tecnologías**

El mismo consumo energético puede ser cubierto de muchas formas diferentes. Las tecnologías renovables principalmente generan energía eléctrica, mientras que actualmente tres cuartas partes del consumo energético no es eléctrico. Esto genera cierta incertidumbre acerca del nivel de electrificación que puede realizarse en diferentes sectores de la economía. Al mismo tiempo, los flujos de energía renovable ofrecen perfiles de aprovechamiento diferenciado: no es lo mismo el sol, que el agua o el viento. Esto lleva a que puedan plantearse diversos escenarios con múltiples distribuciones de tecnologías. Algunos de ellos, por ejemplo, pueden poner un peso importante sobre la transformación de la electricidad renovable en combustibles sintéticos mediante procesos *Power-to-X*, como es el caso del hidrógeno verde, o sobre el aprovechamiento de biocombustibles. Mientras que otros pueden plantear una fuerte electrificación basada principalmente en tecnologías renovables intermitentes, como la solar fotovoltaica o la eólica.

Será la distribución específica de tecnologías lo que determinará la demanda de minerales asociadas, pues cada una de ellas tiene unos requerimientos propios. En el escenario *Net Zero by 2050 (NZE)* de la Agencia Internacional de la Energía, las renovables suministran el

---

<sup>56</sup> Brand-Correa, L. I., & Steinberger, J. K. (2017). **A Framework for Decoupling Human Need Satisfaction From Energy Use**. *Ecological Economics*, 141, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.05.019>

66% de la demanda energética de 2050 a partir de tecnologías de bioenergía, eólicas, solares, hidroeléctricas y geotérmicas. En el escenario de IRENA, el sector eléctrico duplica su tamaño en 2050, con un 86% de generación renovable suministrado principalmente por 6.000 GW de solar fotovoltaica y 8.500 GW de eólica instalada.

### **Distribución de sub-tecnologías**

En el ámbito de la generación eólica o fotovoltaica existen diferentes tecnologías con unos requerimientos minerales específicos. En el caso de los paneles fotovoltaicos, materiales relativamente escasos como el indio o el telurio solo se emplean en las tecnologías de capa fina, como los paneles de cadmio-telurio o los CIGS. Sin embargo, estas tecnologías fotovoltaicas representaron en el año 2021 el 1 y 4% de la producción anual, respectivamente.<sup>57</sup> El 95% restante de los paneles fotovoltaicos fabricados están basados en tecnologías de silicio monocristalino y policristalino, en los cuales la mayor limitación se encontraría en la plata. Por su parte, en los aerogeneradores se puede diferenciar entre aquellos que contienen imanes permanentes fabricados a partir de tierras raras como el neodimio o el disprosio, frente a aquellos que utilizan otros sistemas de transmisión que no requieren de estos minerales. En 2015, el 77% de los aerogeneradores instalados se basaban en generadores electromagnéticos convencionales, mientras que un 23% de los aerogeneradores instalados utilizaban la tecnología basada en imanes permanentes.<sup>58</sup>

Los requerimientos minerales futuros, por tanto, están marcados por las hipótesis sobre la distribución de sub-tecnologías. En el informe del Banco Mundial se considera que las tecnologías fotovoltaicas de 2050 se distribuirán según: 50% silicio cristalino, 16,7% cadmio-telurio, 16,7% CIGS y 16,7% silicio amorfo (vinculado al germanio). Mientras que para el caso de las tecnologías eólicas, considera que el 25% de los aerogeneradores serán de transmisión directa con imanes permanentes. En el informe de la Agencia Internacional de la Energía, consideran 11 casos alternativos para evaluar y cuantificar los impactos de diferentes opciones tecnológicas. Para la solar fotovoltaica, evalúan los impactos de una mayor penetración de las tecnologías de cadmio-telurio, una implantación rápida de los paneles solares de perovskita y una mayor instalación de las tecnologías basadas en arseniuro de galio. En el caso de la eólica, consideran un caso en el que las limitaciones en el suministro de tierras raras fuerzan una reducción en el uso de los aerogeneradores de transmisión directa con imanes permanentes.

La investigación de Månbergera y Stenqvist en 2018 destaca la importancia que tiene la elección de la distribución de sub-tecnologías a la hora de evaluar los futuros

---

<sup>57</sup> ISE. **Photovoltaics Report 2022**. Fraunhofer Institute for Solar Energy: Freiburg, Alemania, 2022. Disponible en: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>

<sup>58</sup> European Commission, Joint Research Centre, Villalba Pradas, A., Telsnig, T., Vázquez Hernández, C., **JRC wind energy status report : market, technology and regulatory aspects of wind energy: 2016 edition**, Publications Office, 2018, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/332535>

requerimientos minerales de la transición energética.<sup>59</sup> Obtienen que una elevada cuota de mercado de las tecnologías fotovoltaicas de capa fina es incompatible con las reservas de algunos de los minerales requeridos. Por contra, no encuentran problemas de suministro para los requerimientos de plata requerida para la fabricación de las tecnologías fotovoltaicas de silicio cristalino. Por ese motivo, sostienen que la preocupación sobre la demanda de metales críticos para las tecnologías de energías renovables depende especialmente de las sub-tecnologías específicas utilizadas. Recomiendan reducir la vulnerabilidad desarrollando aquellas tecnologías que utilizan metales abundantes.

### **Requerimientos de almacenamiento**

Basar un sistema energético completo en energías renovables variables, como son aquellas que aprovechan el sol o el viento, requiere algún tipo de sistemas de almacenamiento de energía. El recurso solar o eólico no está disponible en todo momento por igual, y el perfil de demanda no coincide con sus variaciones. En el informe del Banco Mundial, se considera que el almacenamiento energético para la red eléctrica en 2050 se realizaría con 2,5-5% baterías de ácido-plomo, 70-84% baterías de ion-litio, 2,8-3,7% baterías de flujo y 9,8-25% otro tipo de sistemas de almacenamiento energético, como el bombeo hidráulico reversible. En el informe de la Agencia Internacional de la Energía, consideran dos casos alternativos: una rápida implantación del almacenamiento energético doméstico, y una comercialización temprana de las baterías redox de vanadio. Debido a la variedad de tecnologías existentes y las nuevas innovaciones que pueden llegar a fase de comercialización, se reconoce que hay una gran incertidumbre acerca de cuáles serán los sistemas que finalmente se desarrollarán a gran escala a partir de 2030. Un ejemplo de ello se encuentra en tecnologías emergentes como las baterías de estado sólido. La elección de unas tecnologías de almacenamiento u otras tendrá un impacto sobre los requerimientos minerales asociados.

En la *Estrategia de Almacenamiento Energético* elaborada por el *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico* del Gobierno de España se considera la necesidad de pasar de los actuales 8,3 GW de almacenamiento hasta 20 GW en el año 2030 y 30 GW en 2050, cubiertos fundamentalmente por sistemas de bombeo hidráulico, baterías y otros sistemas de almacenamiento a gran escala, baterías detrás del contador y almacenamiento de energía térmica.<sup>60</sup> En la Figura 1 se muestra una clasificación de las tecnologías de almacenamiento energético.

---

<sup>59</sup> André Månberg y Björn Stenqvist (2018). **Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of substitutes, technological mix and development**. Energy Policy, 119, 226-241. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.056>

<sup>60</sup> Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2021). **Estrategia de Almacenamiento Energético**. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/prensa/estrategiaalmacenamiento\\_tcm30-522655.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/prensa/estrategiaalmacenamiento_tcm30-522655.pdf)



Figura 1: Clasificación de las tecnologías de almacenamiento energético. Obtenido de MITECO, 2021

## 4.2. Modelo de movilidad

Como ya hemos mencionado, la movilidad eléctrica es responsable del incremento más significativo de la demanda de minerales. Eso hace que las consideraciones en torno al modelo de movilidad del futuro tengan una importancia central sobre los requerimientos minerales. Un enfoque tecno-céntrico de la movilidad presta atención únicamente a los desarrollos tecnológicos específicos que podrían aumentar la eficiencia de los vehículos. Sin embargo, la movilidad está determinada por una amplia multitud de factores sociales, económicos, urbanísticos y culturales. Por ese motivo, y dada la importancia que tiene sobre la extracción primaria de materias primas, conviene no limitarse a los aspectos puramente técnicos. Podemos diferenciar dos elementos principales del modelo de movilidad que determinan los requerimientos minerales: el número total de vehículos en circulación, y el tamaño y tipología de las baterías.

### Número total de vehículos en circulación

No es lo mismo duplicar o triplicar el número de vehículos privados en circulación en 2050 que mantener la flota de vehículos actual. Tampoco es lo mismo mantener la flota de vehículos según su distribución internacional y socioeconómica actual que hacerlo con una redistribución de su uso a nivel global. Como hemos visto, los escenarios de la Agencia Internacional de la Energía duplican el número de vehículos en circulación, sin apenas realizar ninguna consideración sobre la redistribución de su uso. Existen, sin embargo, otras investigaciones que abren la puerta a un modelo de movilidad que reduzca el número de vehículos en circulación en los países del Norte global.

Brand y colaboradores modelaron para el caso de Reino Unido algunos escenarios en los que se reduciría la demanda de transporte a partir de un conjunto de transformaciones.<sup>61</sup> Los modelos de movilidad como servicio (MaaS), el aumento de los desplazamientos a pie y en bicicleta, la localización de servicios en zonas rurales, o la disminución de los viajes en avión lograrían reducir en un 52% las distancias recorridas en vehículo privado, aumentar en un 85% las distancias recorridas en autobús y lograr que las distancias recorridas en bicicleta pasen de representar el 1% del total hasta el 8%. Esto ocurriría mientras se divide entre 3 el número de vehículos individuales y se multiplica por 4 el número de autobuses, dando como resultado una reducción de la demanda energética en el transporte del 49% si se emplean las tecnologías de movilidad eléctrica.

La posibilidad de lograr este tipo de transformaciones estará determinada por factores relacionados con las infraestructuras disponibles y el funcionamiento del transporte público colectivo. Un análisis de la calidad del servicio permite identificar las deficiencias. Por ejemplo, una investigación realizada sobre el caso de Austria determinó que el 15,4% de la población austriaca no tiene acceso al transporte público durante los fines de semana, y el 10,4% de las personas empleadas no tienen acceso a un transporte público mínimo durante los días laborables.<sup>62</sup>

### **Tamaño y tipología de las baterías**

Existen varias tipologías de baterías utilizadas para la movilidad eléctrica, con diferentes composiciones químicas, lo que da como resultado unos requerimientos minerales concretos para cada una de ellas. Las baterías de ion-litio son las empleadas mayoritariamente para los vehículos eléctricos, dada su densidad energética, estabilidad y fiabilidad. Dentro de esta tipología, podemos diferenciar entre las baterías de óxido de litio-cobalto (LCO), níquel-cobalto-óxido de aluminio (NCA), níquel-manganeso-óxido de cobalto (NMC). Las baterías NMC presentan una subdivisión según la química del cátodo, con diferentes proporciones entre el manganeso, cobalto y níquel. En las baterías NMC 111 el cátodo contiene un átomo de manganeso y cobalto por cada uno de níquel, en las NMC 611 contiene dos átomos de manganeso y cobalto por cada seis átomos de níquel, y en las NMC 811 contiene un átomo de manganeso y cobalto por cada ocho de níquel. En la Figura 2 se muestra la intensidad material de los metales contenidos en los diferentes tipos de baterías recargables de ión-litio.

---

<sup>61</sup> Brand, C., Anable, J., & Morton, C. (2019). **Lifestyle, efficiency and limits: modelling transport energy and emissions using a socio-technical approach**. *Energy Efficiency*, 12(1), 187–207. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-0678-9>

<sup>62</sup> Laa, B., Shibayama, T., Brezina, T., Schönfelder, S., Damjanovic, D., Szalai, E., & Hammel, M. (2022). **A nationwide mobility service guarantee for Austria: possible design scenarios and implications**. *European Transport Research Review*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00550-5>

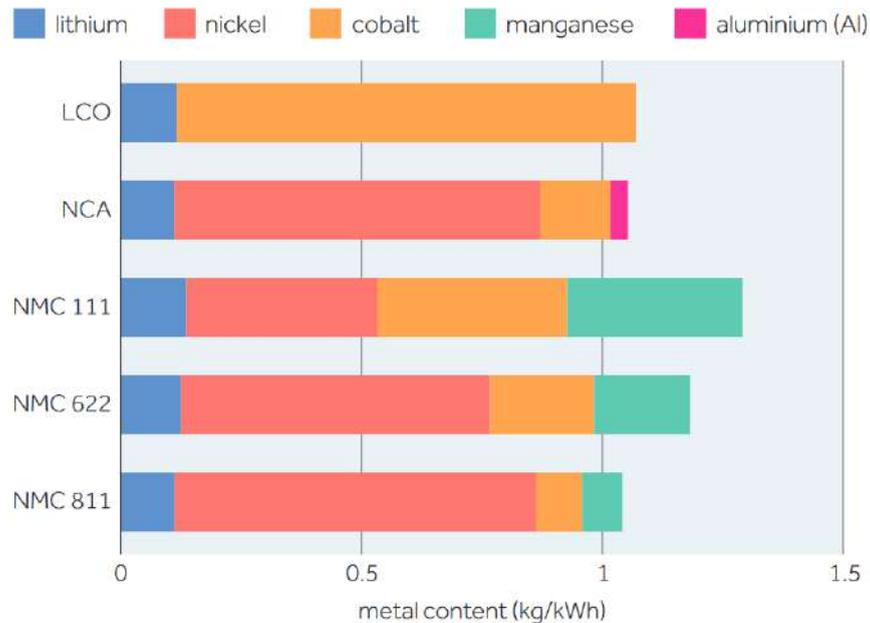


Figura 2: Cantidad de litio, níquel, cobalto, manganeso y aluminio contenidos en los diferentes tipos de baterías recargables de ion-litio de vehículos eléctricos. Obtenido de Yugo y Soler, 2019 <sup>63</sup>

Las previsiones apuntan hacia una reducción del uso de cobalto en las baterías de vehículos eléctricos a partir de la sustitución de las actuales tecnologías hacia los cátodos NMC 622 y NMC 811.<sup>64</sup> La Agencia Internacional de la Energía considera que las tendencias del mercado actuales conducen hacia un reparto entre los diferentes tipos de baterías recargables de ion litio para vehículos eléctricos en 2030 de 10% NCA, 40% NMC 622 y 50% NMC 811.<sup>65</sup>

Existen también otras composiciones de baterías de litio que no contienen cobalto, como las de óxido de litio-manganeso (LMO) y las de litio-ferrofosfato (LFP). Las primeras son las utilizadas en turismos eléctricos como el *Nissan Leaf* y las segundas actualmente están presentes principalmente en los vehículos eléctricos utilizados en China, como los fabricados por la compañía china *BYD Auto*. Podemos también mencionar otros tipos de baterías que actualmente no están siendo utilizadas pero podrían alcanzar la fase comercial en el futuro, como las baterías de litio-sulfuro (Li-S), las baterías de estado sólido o las baterías (ASSB) de litio-aire (Li-aire). Merecen una especial mención las baterías de sodio, ya que el fabricante chino JAC recientemente anunció que incluiría este tipo de baterías en uno de los modelos de vehículos eléctricos que comercializa.<sup>66</sup>

<sup>63</sup> Yugo, M.; Soler, A. **Outlook for battery raw materials (literature review)**. Concawe Review, 2019, 28 (1). Disponible en: <https://www.concawe.eu/publication/outlook-for-battery-raw-materials/>

<sup>64</sup> Alves Dias P., Blagoeva D., Pavel C., Arvanitidis N. (2018) **Cobalt: demand-supply balances in the transition to electric mobility**, EUR 29381 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-94311-9, JRC112285. <http://dx.doi.org/10.2760/97710>

<sup>65</sup> IEA (2019), **Global EV Outlook 2019**, IEA, Paris. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>

<sup>66</sup> Diego Gutierrez (23/02/2023). **Un fabricante chino comienza a probar las baterías de sodio en su coche eléctrico más barato**. Híbridos y eléctricos. Disponible en:

En el informe de la Agencia Internacional de la Energía se evalúan diferentes distribuciones de baterías para la movilidad eléctrica. En el caso base, se llega a 2040 con una fuerte penetración de las baterías NMC 811 y las baterías de estado sólido en los vehículos ligeros, y de las baterías LFP y de estado sólido en los vehículos pesados, como camiones y autobuses. En la Figura 3 puede verse la distribución de tipos de baterías consideradas.

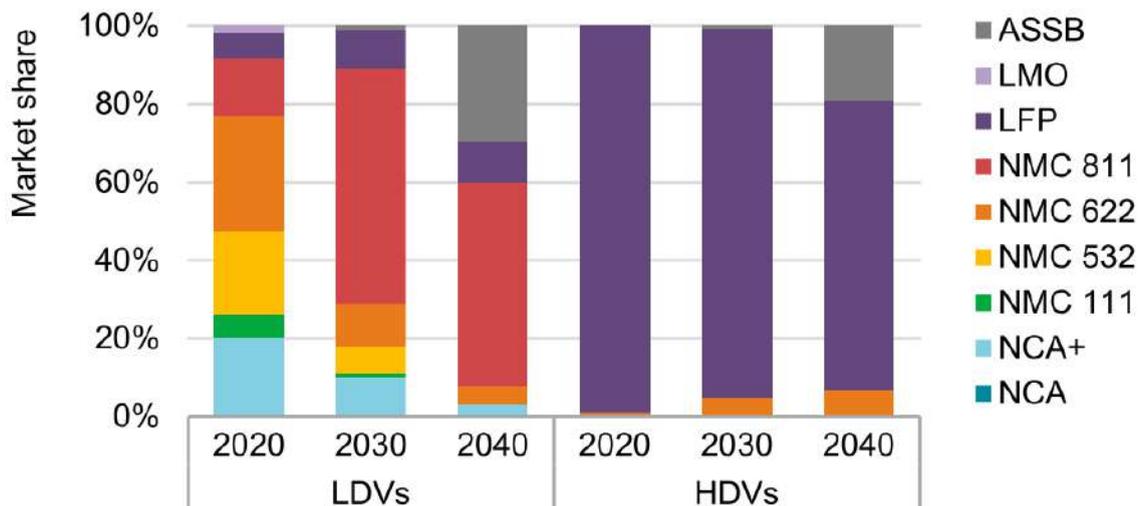


Figura 3: Distribución de la composición química del cátodo de los vehículos eléctricos en el caso base. Obtenido de IEA, 2021

De esta forma vemos cómo la tipología de las baterías empleadas en las tecnologías de movilidad eléctrica tiene un fuerte impacto sobre los requerimientos minerales asociados. Junto a la composición, otro factor relevante se encuentra en el tamaño de las baterías. Vehículos como el *Nissan Leaf* emplean baterías de 30 kWh, el *Renault ZOE* de 52 kWh y el *Tesla Model 3* de 80 kWh. Cuanto mayor tamaño, mayor autonomía en sus recorridos pero también mayor demanda de minerales para su fabricación. Como señalan Pulido-Sánchez y colaboradores, el mercado actual demanda vehículos eléctricos con la mayor autonomía posible, buscando evitar al máximo la recarga debido a la reducida infraestructura existente y el largo tiempo de recarga.<sup>67</sup> Esto ha conducido a la instalación de grandes baterías cuyo uso en el día a día será menor, provocando así la infrutilización de estos sistemas. En el informe de la Universidad KU Leuven se considera que el tamaño medio de las baterías de los vehículos eléctricos ascenderá desde los 50 kWh en 2020 hasta 60 kWh en 2030.

[https://www.hibridosvelectricos.com/coches/fabricante-chino-comienza-probar-baterias-sodio-en-su-coche-electrico-mas-barato\\_68495\\_102.html](https://www.hibridosvelectricos.com/coches/fabricante-chino-comienza-probar-baterias-sodio-en-su-coche-electrico-mas-barato_68495_102.html)

<sup>67</sup> Pulido-Sánchez, D., Capellán-Pérez, I., de Castro, C., & Frechoso, F. (2022). **Material and energy requirements of transport electrification.** *Energy & Environmental Science*, 15(12), 4872-4910. <https://doi.org/10.1039/D2EE00802E>

### 4.3. Intensidad mineral de las tecnologías

Una vez definido el escenario energético y de movilidad futuro a evaluar, la cantidad de minerales requeridos para la fabricación de las tecnologías se obtiene a través de la intensidad mineral de cada una de ellas. La intensidad mineral de las tecnologías eólicas y fotovoltaicas determina la cantidad de metal por unidad de potencia. Este dato se obtiene a partir de una recopilación bibliográfica de *Análisis de Ciclo de Vida* y documentación proporcionada por los fabricantes. La cantidad de minerales contenida en las tecnologías, sin embargo, puede variar con el tiempo debido a mejoras en los procesos de fabricación o los efectos de las economías de escala. Esto puede observarse claramente en el caso de la plata contenida en los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino, la cual ha reducido su intensidad mineral en dos tercios durante la última década, tal y como se muestra en la Figura 4. Además, se espera que se pueda seguir reduciendo la intensidad mineral de la plata en las tecnologías fotovoltaicas desde los 20 mg/W en 2018 hasta 6 mg/W en 2030 y 2 mg/W en 2050.<sup>68</sup>

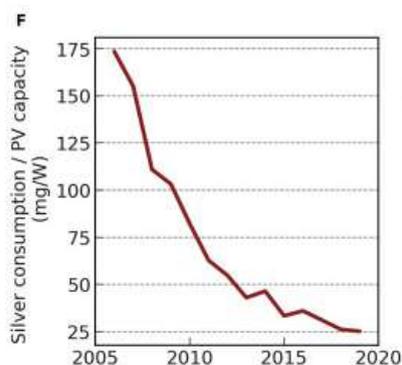


Figura 4: Relación entre el consumo de plata y la capacidad fotovoltaica fabricada. Obtenido de Marta Victoria y colaboradores, 2021<sup>69</sup>

Por ese motivo, una recopilación correcta y actualizada de los datos de intensidad mineral es fundamental. Así mismo, un análisis estático que calcule los requerimientos minerales de la transición energética futura basados en la intensidad mineral presente no es capaz de capturar las evoluciones y mejoras que probablemente se den en ese periodo. Por eso se recomienda incluir un comportamiento dinámico sobre la intensidad mineral, que varíe con el tiempo.

En el informe de la Agencia Internacional de la Energía, se considera que en el escenario SDS se experimenta una modesta mejora del 10% de la intensidad mineral. En el informe de la Universidad KU Leuven, en lo referido a las tecnologías fotovoltaicas, se considera que la

<sup>68</sup> European Commission, Joint Research Centre, Alves Dias, P., Pavel, C., Plazzotta, B., et al., **Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system**, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/160859>

<sup>69</sup> Marta Victoria, Nancy Haegel, Ian Marius Peters, Ron Sinton, Arnulf Jäger-Waldau, Carlos del Cañizo, Christian Breyer, Matthew Stocks, Andrew Blakers, Izumi Kaizuka, Keiichi Komoto, Arno Smets, **Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future**, *Joule*, 2021, 5, (5), 1041-1056, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.005>.

intensidad del silicio se reducirá en un 50% en 2050, la de la plata en un 68% y la del aluminio en un 9%. En el caso de las tecnologías eólicas, considera que la intensidad de las tierras raras se puede llegar a reducir en un 50% en el mismo periodo. Por su parte, la investigación publicada por Månbergera y Stenqvist en 2018 analizaba los escenarios *Beyond 2 Degree* de la Agencia Internacional de la Energía bajo la hipótesis de unas mejoras de intensidad mineral del 2-5% anual.<sup>70</sup> Según sus cálculos, la mejora en la intensidad mineral supondría una reducción de la demanda de extracción primaria de litio más significativa que la obtenida a partir de una mejora en las tasas de reciclaje.

#### 4.4. Tiempo de vida útil

Cuando una tecnología se fabrica pasa a utilizarse en la economía durante un determinado periodo de tiempo. Cuanto menos dure, antes habrá que desmantelarla y reemplazarla por un nuevo modelo. Eso implica dos consecuencias: (1) los materiales contenidos en esa tecnología pasarán a estar disponibles para su recuperación y reciclaje, (2) se necesitará una nueva demanda para fabricar los modelos que reemplacen a la anterior. El tiempo de vida útil de las tecnologías empleadas en la transición energética, por tanto, tiene un doble impacto sobre los requerimientos minerales de la misma.

A partir de las garantías de los fabricantes y de la evidencia empírica se puede conocer el tiempo de vida útil de diferentes tecnologías. En el informe del Banco Mundial se considera una vida útil de 30 años para las tecnologías fotovoltaicas, de 20 años para las eólicas y de 10 años para todos los tipos de baterías. El informe de la Universidad KU Leuven considera una vida útil de 40 años para las tecnologías fotovoltaicas, 30 años para los aerogeneradores con imanes permanentes y 15 años para las baterías de vehículos eléctricos.

Un aumento de la vida útil es positivo por dos motivos principales:

1. Cuanto más duren las tecnologías que se fabrican e instalan ahora, más tiempo pasará hasta que haga falta reemplazarlas. En ese periodo podrán desarrollarse avances e innovaciones que reduzcan la intensidad mineral de las nuevas tecnologías del futuro. Debemos recordar que por elevada que sea la utilización de materias primas secundarias, siempre existirán pérdidas y una nueva fabricación requerirá ciertas cantidades de materias primas vírgenes obtenidas desde la extracción primaria.
2. Cuanto más tiempo pase hasta que las tecnologías lleguen al final de su vida útil, más margen existirá para que se desarrollen adecuadamente los circuitos de recogida, reciclaje y reutilización necesarios para reducir la demanda de extracción primaria. En este momento, dichos circuitos se encuentran en una fase de implantación muy incipiente y apenas tienen capacidad de gestionar grandes

---

<sup>70</sup> André Månbergera y Björn Stenqvist (2018). **Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of substitutes, technological mix and development**. Energy Policy, 119, 226-241. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.056>

volúmenes de residuos. Si las tecnologías de descarbonización llegan al final de su vida útil antes de que haya unos procesos de recuperación maduros, grandes cantidades de minerales se perderán entre chatarras y escorias.

Otro aspecto importante relativo a los requerimientos minerales tiene que ver con las posibilidades de reacondicionamiento de determinadas tecnologías cuando llegan al final de su vida útil. Tal y como se señala en el informe del Banco Mundial, los aerogeneradores al final de su vida útil pueden renovarse conservando la torre pero sustituyendo algunos o todos los demás componentes, aumentando la capacidad de la turbina o reequipándola con componentes más eficientes. Esto permitiría reducir la demanda de los minerales utilizados en las estructuras o en algunos componentes específicos como motores o imanes.

Por último, existe también la posibilidad de darle una segunda vida a las baterías de vehículos eléctricos que llegan al final de su vida útil, empleándolas en sistemas de almacenamiento de la red eléctrica. En el informe del Banco Mundial se estima el impacto que tendría cubrir el 50% de la demanda de baterías de ión-litio de almacenamiento estacionario en 2050 a partir de baterías reutilizadas. De esta forma obtienen que la demanda total acumulada de litio se reduciría en un 3% en ese periodo. En el informe de la Agencia Internacional de la Energía, sin embargo, señalan los importantes obstáculos técnicos y regulatorios que ahora mismo dificultan la reutilización de baterías a gran escala.

#### 4.5. Demanda del resto de la economía

En algunos casos, como el litio, el níquel o el cobalto, el principal aumento de la demanda se encuentra asociado a las tecnologías de descarbonización. Sin embargo, en muchos otros casos esa demanda únicamente representa un pequeño porcentaje de la demanda total asociada a otros sectores de la economía. Por tanto, las consideraciones que se tomen sobre el funcionamiento del resto de la economía tiene un impacto importante sobre los requerimientos minerales futuros de los escenarios evaluados. En la Figura 5 podemos observar cómo en el informe de la Universidad KU Leuven el incremento de la demanda de cobre asociado a las tecnologías de descarbonización entre 2020 y 2050 es inferior al incremento de la demanda asociado al resto de sectores de la economía. En este informe, la demanda de cobre del resto de la economía se estima aplicando unas tasas de crecimiento sobre la demanda de aplicaciones y productos que contienen este metal, como el sector de la construcción o los productos electrónicos. Basándonos en las tendencias observadas en el pasado, podemos asumir que una parte del aumento estará motivado por la propia transición digital, pues hemos visto cómo a partir de los años 80 la basura electrónica se convirtió en el principal suministrador de cobre secundario.<sup>71</sup>

---

<sup>71</sup> Carlito Baltazar Tabelin, Ilhwan Park, Theerayut Phengsaart, Sanghee Jeon, Mylah Villacorte-Tabelin, Dennis Alonzo, Kyoungkeun Yoo, Mayumi Ito, Naoki Hiroyoshi (2021). **Copper and critical metals production from**

## Copper

Global transition demand

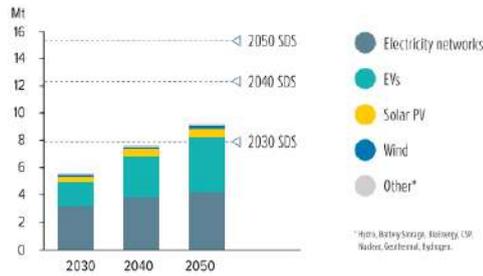


Figure 12. Copper global transition demand by technology (SDS and STEPS)

Global total demand

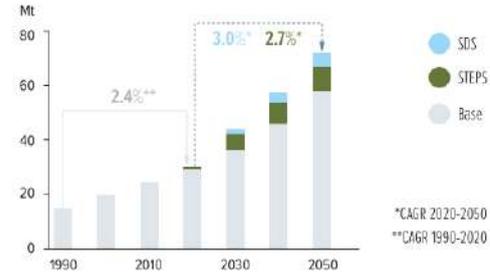


Figure 13. Copper global total demand by scenario (SDS and STEPS)

Figura 5: Demanda de cobre según tecnología de descarbonización (izquierda) y demanda total de cobre hasta 2050 según escenario de transición. Obtenido de Universidad KU Leuven, 2022.

Por este motivo es importante ser capaces de diferenciar qué parte del incremento de la demanda de extracción primaria está directamente vinculada con las tecnologías de descarbonización, qué parte está vinculada a la digitalización y qué parte está vinculada con el crecimiento económico de otros sectores. Sería posible plantear escenarios en los que la ausencia de crecimiento económico, o incluso un decrecimiento, acompañe al aumento de la demanda de minerales para la fabricación de estas tecnologías, dando como resultado unos requerimientos de extracción primaria mucho más suavizados. Estos escenarios alternativos en los que la demanda de minerales del resto de la economía no siga una senda de crecimiento no han sido considerados por ninguno de los grandes informes internacionales en los que se basan actualmente la elaboración de políticas públicas.

En el caso de España, los estudios muestran una dependencia muy acentuada entre expansión del PIB y uso de recursos materiales en toda la segunda mitad del siglo XX.<sup>72</sup> Datos más recientes apuntan hacia cierto nivel de desacoplamiento entre el consumo interno de materiales y la huella material con respecto al crecimiento del PIB durante los últimos años<sup>73</sup>, como se puede apreciar en la Figura 6.

**porphyry ores and E-wastes: A review of resource availability, processing/recycling challenges, socio-environmental aspects, and sustainability issues.** Resources, Conservation and Recycling, 170, 105610. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105610>.

<sup>72</sup> Carpintero, Ó. (2005). *El metabolismo de la economía española: Recursos naturales y huella ecológica (1955 - 2000)*. Fundación César Manrique: Lanzarote

<sup>73</sup> WU Vienna (2022): **Country Profile for Spain. Visualisations based upon the UN IRP Global Material Flows Database.** Vienna University of Economics and Business. Online available at: [materialflows.net/visualisation-centre/country-profiles](https://materialflows.net/visualisation-centre/country-profiles)

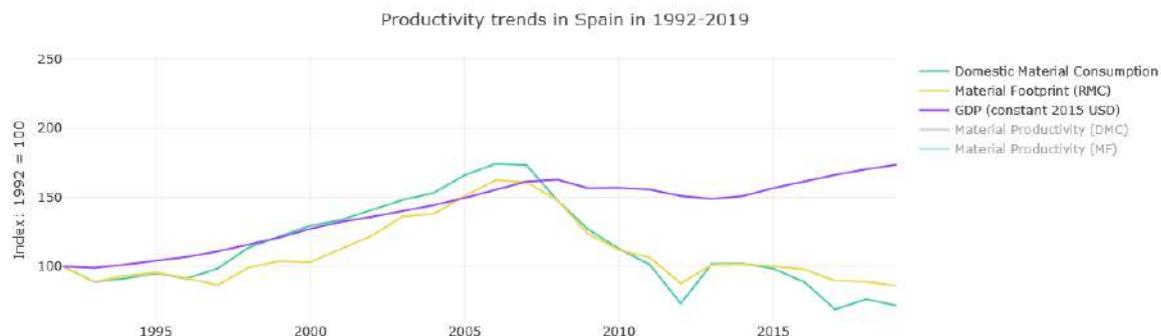


Figura 6: Evolución del PIB, consumo interno de materiales y huella material en España entre 1992 y 2019. Obtenido a partir de WU Viena, 2022

Esto se debe a una reducción de la intensidad material de la actividad económica, lo cual es un fenómeno positivo. Sin embargo, esa reducción puede resultar insuficiente en un escenario global en el que se mantengan unas elevadas tasas de crecimiento económico. En un informe elaborado por la OCDE se valoró cómo las tendencias actuales conducen a una reducción de la intensidad material de la economía mundial del - 1,3% anual entre 2017 y 2060.<sup>74</sup> Pero esta reducción queda compensada por un crecimiento anual del 2,8%, que finalmente llegaría a duplicar el uso de materias primas a nivel global durante ese periodo. Esta tendencia preocupante se encuentra reforzada por los resultados que arroja el *Circularity Gap Report de 2023*, los cuales determinan que la economía mundial solo es circular en un 7,2 %, y empeora año tras año debido al aumento de la extracción y el uso de materiales.<sup>75</sup>

Por tanto, para determinar los requerimientos minerales de la transición energética será muy importante tomar una serie de decisiones sobre el escenario económico que se quiera proyectar en el futuro. Fundamentalmente, habrá que determinar la tasa de crecimiento económico y la evolución de la intensidad material, con mayor o menor grado de desacoplamiento. Esto será especialmente importante para todos aquellos minerales en los cuales la demanda asociada a las tecnologías de descarbonización solo representa un pequeño porcentaje de la demanda total.

#### 4.6. Recuperación de minerales desde el reciclaje

La demanda de extracción primaria de minerales del futuro estará marcada por dos factores: (1) la demanda total de ese mineral en el conjunto de la economía, y (2) el porcentaje de la demanda que podrá ser cubierto a partir del reciclaje. Para aproximarnos al segundo aspecto, primero debemos aclarar algunos conceptos importantes.

<sup>74</sup> OECD (2019), **Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences**, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.

<sup>75</sup> Circle Economy & Deloitte (2023). **Circularity Gap Report 2023**. Disponible en: <https://www.circularity-gap.world/2023>

En primer lugar, introducimos la *tasa de reciclado al final de la vida útil* (EOL-RR por sus siglas en inglés, *End-of-life recycling rate*). Esta tasa describe la cantidad de materiales secundarios recuperados y reciclados funcionalmente al final de su vida útil en comparación con las cantidades totales de residuos generados. Si en una batería gastada hay 10 unidades de litio y se reciclan funcionalmente 3 unidades, la EOL-RR será del 30%. En segundo lugar, introducimos la *tasa de contenido reciclado* (RC por sus siglas en inglés, *recycled content*), la cual mide el porcentaje de material secundario que entra en la demanda de uso final de un mineral. Si en una nueva batería se emplea 1 unidad de litio reciclado, la RC será del 10%. La diferencia principal entre ambos indicadores se encuentra en la disponibilidad de chatarra de un determinado metal. Si la demanda general aumenta considerablemente, un incremento en las tasas de reciclado no será suficiente para evitar que la tasa de contenido reciclado disminuya, ya que se necesita de nuevas materias primas para cubrir el incremento de demanda. Esto explica los motivos por los cuáles a pesar de contar con una industria del reciclaje bien implantada para metales como el aluminio, la tasa de contenido reciclado en los nuevos productos fabricados no llega a representar el 40%.<sup>76</sup> La diferencia se relaciona también con la pureza que requieren algunos procesos productivos sobre las materias primas, lo cual limita la cantidad de material reciclado que puede incorporarse, como ocurre en el caso del cobalto de las baterías eléctricas.<sup>77</sup> Esto conduce a que la tasa de contenido reciclado incorporado en los nuevos productos dependa de la tasa de reciclado al final de la vida útil, pero también del flujo de residuos disponibles, del incremento de la producción y de las especificaciones técnicas del proceso productivo.

En tercer lugar, deben definirse cuáles son los flujos de residuos que van a reciclarse para su posterior incorporación en las tecnologías de descarbonización que están analizándose. Algunos metales como el cobre o el aluminio tienen un uso generalizado en múltiples sectores de la economía y unos circuitos de reciclaje maduros, lo cual permite destinar parte del cobre y aluminio reciclado desde otros sectores económicos hacia las tecnologías de descarbonización y digitalización. En otros casos, como el litio o el cobalto, los usos actuales son limitados y en una cantidad muy inferior al volumen de la demanda que se prevé en el futuro asociada a la movilidad eléctrica fundamentalmente. Eso hace que en la mayoría de ocasiones se considere que la única forma de lograr cobalto y litio reciclado será a partir de las baterías eléctricas que lleguen al final de su vida útil en el futuro. Existe también la posibilidad de aprovechar el creciente volumen de residuos asociado a los aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), que contienen una gran variedad de metales con un alto valor tecnológico. Europa lidera la generación de RAEE a nivel mundial, y España generó 19 kg per cápita en 2019.<sup>78</sup> En todos estos casos, además de la efectividad del

---

<sup>76</sup> United Nations Environment Programme, & International Resource Panel (2011). **Recycling Rates of Metals: A Status Report**. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8702>

<sup>77</sup> Bomgardner, M. M., and A. Scott. 2018. **Recycling Renewables: Can We Close the Loop on Old Batteries, Wind Turbines, and Solar Panels to Keep Valuable Materials Out of the Trash?** Chemical and Engineering News 96 (15): 34. <https://cen.acs.org/energy/renewables/Recycling-renewables/96/i15>

<sup>78</sup> Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential**. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research

reciclaje a partir de los residuos, tiene especial importancia la tasa de recogida y entrada en los canales oficiales de gestión de residuos. En muchas ocasiones los residuos tecnológicos que contienen una gran variedad de metales no llegan a los canales oficiales de recogida, lo cual imposibilita su reciclaje y hace que esas materias primas se pierdan en vertederos u otros lugares.

Todos estos elementos definen la capacidad de recuperación de materias primas secundarias desde el reciclaje, lo cual determinará las necesidades de extracción primaria del futuro. Los informes internacionales trabajan con diferentes hipótesis al respecto. Tal y como hemos mencionado anteriormente, el informe del Banco Mundial evalúa la hipótesis de una tasa de reciclaje al final de su vida útil del 100% para cinco minerales, mientras que el informe de la Universidad KU Leuven considera un aumento del 15-30% de las actuales tasas de reciclaje, situándolas así en el 60-90% para los metales analizados. En el informe de la Agencia Internacional de la Energía consideran un fuerte incremento de las tasas de recogida de baterías, que pasarían del 45% en 2020 hasta el 80% en 2040.

En otras investigaciones, como la de Dominish y colaboradores en 2019, se trabaja con una tasa de reciclaje potencial del 95% y se toman varias hipótesis sobre la tasa de recogida de diferentes tecnologías: 100% para baterías, vehículos y eólica, 85% para solar fotovoltaica <sup>79</sup>. Månbergera y Stenqvist, por su parte, consideran un escenario de mejora del reciclaje en la que todos los metales alcanzan una tasa del 80% en 2040.<sup>80</sup> Junne y colaboradores utilizan también una hipótesis similar, en la que las tasas de reciclaje de todos los metales analizados aumentan linealmente desde su valor actual hasta el 80% en 2050.<sup>81</sup>

Alcanzar estas elevadas tasas de recogida y reciclaje presenta una gran cantidad de obstáculos económicos, legislativos y técnicos que todavía no están resueltos. La demanda de extracción primaria del futuro estará condicionada por el grado de éxito que se tenga sobre la mejora de los actuales circuitos e industrias de recogida y reciclaje de metales.

#### 4.7. Otros elementos relevantes

Junto a los aspectos clave ya mencionados, terminamos añadiendo algunos otros elementos que deben tenerse en cuenta para determinar la demanda mineral de los escenarios de

---

(UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam. Disponible en: <https://ewastemonitor.info/gem-2020/>

<sup>79</sup> Dominish, E., Florin, N. and Teske, S., 2019, **Responsible Minerals Sourcing for Renewable Energy**. Report prepared for Earthworks by the Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney. Disponible en: <https://www.uts.edu.au/isf/explore-research/projects/responsible-minerals-sourcing-renewable-energy>

<sup>80</sup> André Månbergera y Björn Stenqvist (2018). **Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of substitutes, technological mix and development**. Energy Policy, 119, 226-241. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.056>

<sup>81</sup> Tobias Junne, Niklas Wulff, Christian Breyer, Tobias Naegler (2020). **Critical materials in global low-carbon energy scenarios: The case for neodymium, dysprosium, lithium, and cobalt**. Energy, 211, 118532. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118532>.

transición energética futura. Se trata de aspectos más difícilmente cuantificables, pero que pueden tener una gran importancia.

### **Incertidumbre sobre la innovación**

«*En esencia, todos los modelos están equivocados, pero algunos son útiles*» es una cita que se le atribuye al estadístico británico George Box. Esto debe tenerse muy en cuenta a la hora de analizar la demanda mineral futura obtenida como resultado de la modelización de un escenario concreto de transición. El modelo no tiene la capacidad de predecir el futuro con precisión, sino que es útil para informarnos de las consecuencias de múltiples decisiones que se están tomando en el presente.

Sin embargo, debemos contar siempre con una dosis de incertidumbre sobre factores que no tenemos capacidad de predecir. En el caso que nos ocupa, existe una importante dosis de incertidumbre sobre la innovación y desarrollos tecnológicos que ocuparán una posición dominante más allá de 2030. En el corto-medio plazo se pueden trabajar con algunas certezas, pero cuanto más se amplía el horizonte temporal del análisis, mayor es la incertidumbre al respecto. Si hace 20 años se hubiera calculado la demanda mineral asociada a la transición energética, los resultados serían diferentes a los que se obtienen ahora teniendo en cuenta la distribución de tecnologías. Asumir que esto no va a ocurrir en el futuro es una apuesta que probablemente va a resultar fallida.

Esto no implica asumir una posición de solucionismo tecnológico como el representado por John Kerry en la COP26, quien afirmó que «*el 50% de las reducciones de carbono necesarias para llegar a cero neto provendrán de tecnologías que aún no se han inventado*». <sup>82</sup> Implica, al contrario, incluir la prudencia y cautela en el análisis, buscando la forma de gestionar la incertidumbre sobre la innovación futura. En el informe del Banco Mundial, por ejemplo, consideran una horquilla sobre la intensidad mineral de las tecnologías, y se evalúan diferentes escenarios que representan diferentes vías tecnológicas posibles para alcanzar el mismo nivel de reducción de emisiones. No se cubre, sin embargo, la incertidumbre correspondiente a la aparición de nuevas sub-tecnologías como las baterías de estado sólido o las baterías de flujo, aspecto que sí se recoge en el informe de la Agencia Internacional de la Energía.

### **Demanda de minerales asociada a las tendencias de digitalización**

La actual elaboración de políticas públicas de la Unión Europea trabaja en un marco de una doble transición: verde y digital. <sup>83</sup> Se presentan como dos procesos con dinámicas propias, pero que pueden entrelazarse y reforzarse mutuamente. Sin embargo, una digitalización

---

<sup>82</sup> Jessica Murray (16/05/2021). **Half of emissions cuts will come from future tech, says John Kerry**. The Guardian. Disponible en:

<https://www.theguardian.com/environment/2021/may/16/half-of-emissions-cuts-will-come-from-future-tech-says-john-kerry>

<sup>83</sup> Muench, S., Stoermer, E., Jensen, K., Asikainen, T., Salvi, M. and Scapolo, F., **Towards a green and digital future**, EUR 31075 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, ISBN 978-92-76-52451-9, <http://dx.doi.org/10.2760/977331>, JRC129319.

creciente de la economía y la sociedad tiene un impacto sobre el uso de recursos materiales y energéticos que debe evaluarse adecuadamente.

Por un lado, una mayor digitalización puede implicar un aumento de las emisiones y del consumo energético. El estudio publicado por Belkhi y Elmeligi en 2018 estimaba que la contribución de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) a las emisiones globales podría crecer desde 1-1,6% en 2007 hasta más del 14% en 2040.<sup>84</sup> Por otra parte, un informe reciente de la Agencia Internacional de la Energía estimaba que los centros de datos consumieron 220-320 TWh de electricidad en 2021, equivalente a la demanda eléctrica anual de España y más del 1% de la demanda global.<sup>85</sup> En el caso de los centros de datos en la Unión Europea, se estima que su actividad supone ya el 3,7% de todo el consumo de electricidad, con perspectivas de aumentar en los próximos años.<sup>86</sup> Las tendencias hacia la digitalización, el aumento del tráfico de datos y la introducción de nuevas tecnologías como el 5G o el *Internet de las cosas (IoT)* van a aumentar considerablemente la actividad de los centros de datos en el futuro próximo. A pesar de las mejoras en la eficiencia, esto terminará suponiendo un incremento de la demanda energética debido al estancamiento progresivo de dichas mejoras. Algunas simulaciones han estimado un incremento del consumo de electricidad en los centros de datos superior a 500 TWh en 2030.<sup>87</sup>

Este incremento de la demanda eléctrica por sí mismo ya tiene un impacto sobre la demanda mineral. Cuanto mayor sea la demanda energética, mayor será la cantidad de tecnologías de descarbonización que tendrán que fabricarse en el futuro para cubrirla. Pero una mayor digitalización también tiene asociado un incremento específico del uso de algunos minerales para la fabricación de las tecnologías. La faceta mineral de la transición digital ha sido menos explorada que la de la transición verde, aunque podemos encontrar algunos estudios al respecto.

Un informe realizado en 2020 desde la *Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD)* pone el foco sobre siete minerales asociados a las TIC: galio, germanio, indio, tierras raras, selenio, tántalo y telurio.<sup>88</sup> Estos minerales son la materia prima esencial de los componentes básicos de todo el hardware de las TIC, como los microchips y los circuitos integrados. El porcentaje de la demanda total de estos minerales para usos en TIC es superior al 70% en la mayoría de casos, con la excepción de tierras

---

<sup>84</sup> Belkhir, Lotfi & Elmeligi, Ahmed (2018) **Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations**. Journal of Cleaner Production, 177, 448-463. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239>

<sup>85</sup> IEA, 2022. **Data Centres and Data Transmission Networks**. Iea.Org. 2022. <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>

<sup>86</sup> Dodd, N, F Alfieri, L Maya-Drysdale, J Viegand, S Flucker, R Tozer, B Whitehead, A Wu, and F Brocklehurst. 2020. **Development of the EU Green Public Procurement (GPP) Criteria for Data Centres, Server Rooms and Cloud Services, Final Technical Report**. Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/964841>.

<sup>87</sup> Koot, Martijn, and Fons Wijnhoven. 2021. **Usage Impact on Data Center Electricity Needs: A System Dynamic Forecasting Model**. Applied Energy 291 (June): 116798. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116798>.

<sup>88</sup> UNCTAD (2020). **Digital economy growth and mineral resources: implications for developing countries**. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD): Ginebra, Suiza. Disponible en: [https://unctad.org/system/files/official-document/tn\\_unctad\\_ict4d16\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/tn_unctad_ict4d16_en.pdf)

raras, selenio y tántalo que se encuentran en el 16–32%. En un estudio realizado en 2016 por la *Agencia alemana de materias primas (DERA)*, se estimaba un fuerte incremento de la demanda entre 2013 y 2035 de algunos de estos metales como el galio (+ 46%), el germanio (+ 111%), el indio (+ 55%), las tierras raras pesadas (+ 370%), el itrio (+ 659%) y el tántalo (+ 416%).<sup>89</sup>

Facetas de la digitalización como el *Internet de las Cosas (IoT)*, la inteligencia artificial y las tecnologías emergentes de almacenamiento de datos tienen también unas implicaciones materiales que pueden llegar a cuantificarse. En la investigación publicada en 2018 por Anthony Y. Ku se estima el incremento de la demanda de germanio, indio, selenio, tántalo y telurio asociado a estos procesos.<sup>90</sup> Por último, en un estudio del *Joint Research Centre (JRC)* de la Comisión Europea se cuantificó el incremento de la demanda asociada al *IoT* entre 2015 y 2035 en un 25% para el galio, un 33% para las tierras raras pesadas y en un 38% para el tántalo.<sup>91</sup>

A todo esto se le suma la problemática que supone un volumen creciente tanto de producción como de residuos tecnológicos. Según las estimaciones del sector, de los 16 millones de teléfonos móviles presentes a nivel mundial, 5,3 millones de ellos se convertirán en residuos en 2022.<sup>92</sup> En 2019 se produjeron a nivel global 53,6 mega toneladas de residuos electrónicos, de los cuales únicamente el 17,4% llegaron a unos canales oficiales de recogida, mientras que el destino del 83% restante no está documentado.<sup>93</sup> Las tendencias apuntan hacia las 74,7 Mt de residuos tecnológicos en 2030, un incremento propiciado fundamentalmente por unas elevadas tasas de consumo de aparatos eléctricos y electrónicos, una corta duración de la vida útil de los productos y unas opciones de reparación muy escasas.

Por estos motivos sería recomendable tomar en consideración las implicaciones sobre la demanda de minerales que tienen las diferentes facetas del proceso de digitalización de la economía y la sociedad. En algunos casos, pueden encontrarse sinergias positivas, como la

---

<sup>89</sup> Deutsche Rohstoffagentur (DERA) 2016, **Rohstoffe für Zukunftstechnologien**, DERA Rohstoff informationen no 28 2016. Disponible en: [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Laufende-Projekte/Rohstoffwirtschaft/Zukunftstechnologien/lp-zukunftstechnologien\\_node.html](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Laufende-Projekte/Rohstoffwirtschaft/Zukunftstechnologien/lp-zukunftstechnologien_node.html)

<sup>90</sup> Anthony Y. Ku, (2018). **Anticipating critical materials implications from the Internet of Things (IOT): Potential stress on future supply chains from emerging data storage technologies**. *Sustainable Materials and Technologies*, 15, 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.10.001>.

<sup>91</sup> European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., et al., **Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU : a foresight study**, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/58081>

<sup>92</sup> WEEE Forum, octubre 2022. **International E-waste Day: Of ~16 Billion Mobile Phones Possessed Worldwide, ~5.3 Billion will Become Waste in 2022**. Disponible en: [https://weee-forum.org/ws\\_news/of-16-billion-mobile-phones-posessed-worldwide-5-3-billion-will-become-waste-in-2022/](https://weee-forum.org/ws_news/of-16-billion-mobile-phones-posessed-worldwide-5-3-billion-will-become-waste-in-2022/)

<sup>93</sup> Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential**. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam. Disponible en: <https://ewastemonitor.info/gem-2020/>

de destinar aquellas materias primas secundarias obtenidas del reciclaje de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos a la fabricación de tecnologías de descarbonización. Sin embargo, no debe perderse de vista cómo el aumento de los flujos de residuos tecnológicos se encuentra asociado a un aumento de la demanda mineral, y cómo en la mayoría de ocasiones esos residuos no están llegando a los canales oficiales de recogida.

### **Narrativa general sobre el escenario de transición estudiado**

Hemos visto los múltiples factores que influyen y determinan la demanda mineral de los escenarios de transición futuros. Sin embargo, todos estos factores aparecen de forma prácticamente aislada. Un último elemento con el que completar el estudio de estos escenarios se encuentra en la narrativa general que lo describe.

Una narrativa cuenta una historia sobre todo el resto de factores que sabemos que tienen una importancia sobre el objeto de estudio pero que no se están cuantificando de forma directa. Una referencia la podemos encontrar en las *trayectorias socioeconómicas compartidas* (SSPs por sus siglas en inglés, *shared socioeconomic pathways*) utilizadas en los modelos climáticos para describir cambios futuros plausibles en la demografía, el desarrollo humano, la economía, las instituciones y la tecnología.<sup>94</sup>

Aspectos como la calidad y el aumento del servicio del transporte público, la disponibilidad de infraestructuras y el descenso en el uso del vehículo privado, por ejemplo, tienen una gran importancia a la hora de plantear unos escenarios de movilidad u otros. Son aspectos que no llegan a cuantificarse en el cálculo de requerimientos minerales futuros pero que determinan las consecuencias sociales que tendría el escenario planteado. Aquí entran también en juego aspectos vinculados con el nivel de desigualdad social, el régimen laboral y el desequilibrio territorial.

Aunque en la mayoría de casos sea complicado ponerle números, es importante contar con una narrativa que acompañe los procesos de transición energética de los cuales se pretende conocer la demanda mineral futura.

---

<sup>94</sup> Brian C. O'Neill, Elmar Kriegler, Kristie L. Ebi, Eric Kemp-Benedict, Keywan Riahi, Dale S. Rothman, Bas J. van Ruijven, Detlef P. van Vuuren, Joern Birkmann, Kasper Kok, Marc Levy, William Solecki (2017). **The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century**. Global Environmental Change, 42, 169–180, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>.

## 5. Alternativas para reducir los requerimientos de extracción primaria

La demanda mineral del futuro no está dada. No es una cifra que venga determinada por agentes externos y sea incuestionable. La demanda mineral del futuro será el resultado de procesos sociales, económicos, políticos, históricos y culturales. Y justamente por ese motivo, a la hora de proyectar escenarios futuros es importante tener en cuenta alternativas que vayan más allá del mantenimiento de las tendencias sociales y económicas actuales. *Todos los modelos sobre el futuro están equivocados*, pero tienen consecuencias sobre la elaboración de políticas públicas del presente. En el momento en el que la mayoría de los escenarios proyectan una demanda que supera el suministro, la respuesta vista hasta ahora por parte de los responsables políticos y representantes de las empresas aboga por acelerar la concesión de permisos, eliminar la normativa medioambiental y subvencionar directamente la industria minera.

Esto refuerza la importancia de definir, plantear y evaluar los requerimientos minerales de escenarios alternativos a los que actualmente dominan los principales informes internacionales. Las publicaciones que abordan escenarios alternativos son todavía limitadas, pero se puede observar un creciente interés en los últimos años y los resultados que arrojan son bastante prometedores. Podemos clasificar las alternativas en tres grandes ejes, ordenados por dificultad de aplicación:

1. **Medidas de economía circular:** Buscan reducir la demanda mineral a partir de mejoras técnicas en los productos, modelos de negocio alternativos y el desarrollo de canales de recogida y reciclaje más eficientes. Incluye iniciativas como ampliar la vida útil de los productos, fomentar su reutilización, reparación y reacondicionamiento, aumentar las tasas de reciclaje y cambios tecnológicos que reduzcan la utilización de metales escasos.
2. **Escenarios alternativos de movilidad:** Plantean alternativas a los escenarios tecno-céntricos, basados en el uso de vehículo privado y la sustitución eléctrica de la movilidad, que actualmente dominan la investigación sobre los requerimientos minerales. Examinan las consecuencias de unos modelos de movilidad que reducen la dependencia hacia el vehículo privado y aumentan el uso del transporte público colectivo. Trabajan con hipótesis que incluyen aspectos como la reordenación territorial y urbanística o la ampliación de servicios públicos e infraestructuras.
3. **Cambios socioeconómicos estructurales:** Ponen sobre la mesa transformaciones de gran calado con un impacto sobre las dinámicas de crecimiento económico y la actividad de diferentes sectores. Representan una profunda transición de la forma en la que se estructura la sociedad actualmente y evalúan las consecuencias sobre el uso de recursos minerales que tendrían esos escenarios.

A continuación, describimos algunos de los estudios realizados en cada uno de estos ejes y los resultados obtenidos sobre la reducción de la demanda de minerales.

### **5.1. Medidas de economía circular**

Los estudios sobre economía circular han experimentado un incremento en el pasado reciente. Aquí vamos a destacar tres publicaciones que cuantifican los beneficios de las medidas propuestas. En la investigación «*Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials*», publicada por Baars y colaboradores en 2021<sup>95</sup>, se identificaron tres estrategias de economía circular para reducir la demanda de cobalto en la movilidad eléctrica de la Unión Europea:

- Reducción o sustitución tecnológica del contenido de cobalto en las baterías eléctricas a partir de la comercialización de otras tipologías de baterías.
- Promover la reutilización de las baterías eléctricas de vehículos eléctricos que llegan al final de su vida útil en otras aplicaciones menos exigentes.
- Sistemas de reciclaje en circuito cerrado en los cuales las baterías que llegan al final de su vida útil son la fuente de materias primas secundarias para la producción de las nuevas baterías.

Aplican estas estrategias sobre los escenarios de electrificación de la movilidad en la Unión Europea y evalúan sus consecuencias. Al trabajar sobre esa base, asumen una serie de hipótesis derivadas de las actuales tendencias del mercado. Por ejemplo, asumen que debido al incremento del uso de los vehículos utilitarios deportivos (SUV) el tamaño medio de las baterías pasará desde los 42 kWh en 2017 hasta los 86 kWh en 2030, lo cual aumentaría en un 60% el contenido de cobalto en cada vehículo.

Al aplicar una reducción tecnológica del cobalto se podría lograr una reducción del 55% de la demanda acumulada de cobalto en 2050 en comparación con el escenario tendencial. En el caso de las estrategias basadas en el reciclaje se obtiene que la capacidad europea de reciclado debería multiplicarse por 5 en 2035 y por 45 en 2050 para reciclar el volumen de baterías de litio esperado, que empezará a llegar como residuos a partir de 2032. De esta forma, el 56% de la demanda de cobalto en 2050 provendría del reciclaje, en comparación con el 31% resultante en el escenario tendencial. Las estrategias que minimizan la demanda futura de cobalto son aquellas basadas en la reducción o sustitución tecnológica. Sin embargo, esto ocurriría a expensas de aumentar la demanda de níquel, que podría llegar a multiplicarse por 60 en 2030 y por 190 en 2050. Además, debe tenerse en cuenta que el cobalto es actualmente el principal motor económico del reciclaje de baterías, por lo que ese cambio podría afectar a la viabilidad económica del reciclaje.

---

<sup>95</sup> Baars, J., Domenech, T., Bleischwitz, R. et al. **Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials**. Nat Sustain 4, 71–79 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00607-0>

Otra investigación que explora estas alternativas se encuentra en el informe «*Reducing New Mining for Electric Vehicle Battery Metals: Responsible Sourcing Through Demand Reduction Strategies and Recycling*», realizado por Dominish y colaboradores en 2021.<sup>96</sup> Se centra el cobalto, litio, níquel y cobre, y plantea cuatro estrategias para reducir la demanda de estos metales en las baterías de los vehículos eléctricos:

- Recuperación de metales desde el resto de sectores de la economía
- Recuperación de metales desde las baterías al final de su vida útil
- Utilización de metales reciclados en la fabricación de nuevas baterías
- Reducir la demanda de materias primas para las baterías de vehículos eléctricos

En la segunda estrategia se afirma que sería técnicamente posible llegar a unas tasas de recuperación del 90% para los cuatro metales en el reciclaje de baterías, si se aplican los incentivos económicos y las políticas que favorezcan el uso de materias primas secundarias. En la cuarta estrategia se recogen medidas como ampliar la vida útil de las baterías hasta los 15-20 años, darle una segunda vida a las baterías en almacenamiento energético para la red eléctrica, cambiar los modelos de movilidad basados en la propiedad privada por otros basados en vehículos compartidos, o mejorar los servicios de transporte público y las infraestructuras para los desplazamientos en bicicleta.

Los resultados obtenidos muestran que el reciclaje tendría el potencial de reducir la demanda de extracción primaria en un 25% para el litio, un 35% para el cobalto y el níquel, y un 55% para el cobre, en 2040 en comparación con el escenario tendencial. Para lograr esto, la tasa de recuperación del litio desde baterías al final de su vida útil debería mejorarse considerablemente respecto a los niveles actuales. En el caso del cobre, la mayor parte del contenido de metales reciclados incorporados en las nuevas baterías procedería de los circuitos de recuperación del resto de sectores de la economía.

Por último, el informe «*The Future is Circular: Circular Economy and Critical Minerals for the Green Transition*», realizado Simas y colaboradores en 2022 por encargo de WWF <sup>97</sup>, presenta una serie de propuestas de economía circular para reducir la demanda mineral de la transición energética. Trabaja sobre la base del escenario *Net Zero by 2050 (NZE)* de la Agencia Internacional de la Energía y analiza la demanda de litio, cobalto, níquel, manganeso, tierras raras, platino y cobre. Evalúa tres enfoques de economía circular, que

---

<sup>96</sup> Dominish, E., Florin, N., Wakefield-Rann, R., (2021). **Reducing new mining for electric vehicle battery metals: responsible sourcing through demand reduction strategies and recycling**. Report prepared for Earthworks by the Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney. Disponible en: <https://earthworks.org/resources/recycle-dont-mine/>

<sup>97</sup> Moana Simas, Fabian Aponte y Kirsten Wiebe (2022). **The Future is Circular: Circular Economy and Critical Minerals for the Green Transition**. SINTEF Industry. <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/3032049>

se agrupan en:

- **Reducción de la demanda:** Buscan reducir la fabricación de vehículos y la instalación de infraestructuras eléctricas. Plantean disminuir la propiedad privada de vehículos, disminuyendo la extracción y el procesamiento de materiales para su fabricación, fomentando una mayor eficiencia de los materiales con mayores tasas de reutilización e incentivando otros modos de transporte a través de un cambio en los patrones de consumo hacia una menor compra de productos.
- **Prolongar la vida útil:** En el caso de las baterías para vehículos eléctricos, se podría lograr reduciendo el uso gracias a estrategias de planificación urbanística o reduciendo la propiedad privada de vehículos. En el caso de infraestructuras de generación de electricidad, se podría lograr mediante un mayor mantenimiento y sustitución de componentes, inversiones a mitad de vida y repotenciación que reutilice parte de la infraestructura existente. En el caso de las tecnologías fotovoltaicas se pasaría de una vida útil de 25 hasta 50 años, en las eólicas de 20 hasta 30 años y en los vehículos eléctricos de 10 hasta 15 años.
- **Reciclaje:** Se considera que los minerales reciclados empezarán a desempeñar un papel significativo en el suministro a partir de 2040. Esto daría un margen temporal para el desarrollo y ampliación de las mejores técnicas que aseguren su recuperación desde los productos al final de su vida útil. Para ello será crucial el diseño para el desmontaje y la reciclabilidad, incorporado en las primeras fases de desarrollo de los componentes y las tecnologías. Se evalúa una tasa de recogida del 90-100% para todas las tecnologías, y una tasa de recuperación en el reciclaje del 80-95% para la mayoría de minerales.

Junto a las estrategias de economía circular, se propone un escenario de avances tecnológicos en el que aquellas tecnologías con menor demanda de minerales críticos alcanzan rápidamente unas elevadas cuotas de mercado en 2050. De esta forma, la mayoría de aerogeneradores y motores eléctricos no utilizarían imanes permanentes, mientras que el 60% de las baterías de vehículos eléctricos serían de estado sólido.

La combinación de estrategias lograría reducir en un 58% la demanda acumulada en 2050 de los siete minerales críticos analizados, en comparación con la resultante en su ausencia. Al mismo tiempo, se obtiene que los metales obtenidos a partir del reciclaje podrían cubrir el 20% de la demanda mineral de las próximas tres décadas.

## 5.2. Escenarios alternativos de movilidad

Los escenarios alternativos de movilidad son más escasos en la literatura académica y los informes internacionales. Existen algunas excepciones que merecen ser reconocidas, como la publicada por Brand y colaboradores en 2019, quienes definen un escenario en el que se

reducen las distancias recorridas y el número vehículos privados en Reino Unido.<sup>98</sup> En ese caso, sin embargo, no se realiza una estimación de los requerimientos minerales asociados al escenario planteado. Podemos encontrar dos investigaciones en las que sí se define un escenario alternativo y se calculan los requerimientos minerales: a nivel global y a nivel de Estados Unidos. Dada la importancia que tienen los escenarios de movilidad sobre los requerimientos minerales, en este apartado exponemos con un mayor grado de detalle las hipótesis y metodologías empleadas en las investigaciones descritas.

En el primer caso, el estudio a nivel global ha sido realizado desde el *Grupo de Economía, Ecología y Dinámica de Sistemas (GEEDS)* de la Universidad de Valladolid. El artículo «*The limits of transport decarbonization under the current growth paradigm*» de 2020<sup>99</sup> define cuatro escenarios de movilidad a nivel global, y el artículo posterior «*Material and energy requirements of transport electrification*» de 2022<sup>100</sup> analiza en detalle los requerimientos minerales asociados a los mismos. En ambos casos utilizan el modelo de evaluación integrada MEDEAS, que integra las variables del módulo económico con el consumo energético, las emisiones y el uso de recursos naturales asociados.<sup>101</sup> Los escenarios definidos tienen las siguientes características:

- **Tendencias previstas del vehículo eléctrico (*EV Trends*):** El uso de cada tipo de vehículo en 2050 viene determinado por la extrapolación de las tendencias observadas en el pasado.
- **Alta penetración del vehículo eléctrico (*high EV*):** Escenario hipotético de electrificación muy alta en el transporte terrestre. En 2050 todos los turismos, autobuses y motocicletas serán sustituidos por vehículos eléctricos, mientras que el 80% de los vehículos pesados serán híbridos.
- ***E-bike*:** Se promueve la movilidad personal basada principalmente en vehículos eléctricos muy ligeros. La mayoría de turismos se sustituyen por vehículos eléctricos de dos ruedas (60%), bicicletas eléctricas (20%) y modos de transporte activo (8%).
- **Decrecimiento (*Degrowth*):** La demanda de transporte privado se reduce fuertemente, debido a un profundo cambio en los patrones culturales de movilidad. Se modela una reducción media del 60% para el transporte terrestre y acuático, y

---

<sup>98</sup> Brand, C., Anable, J., & Morton, C. (2019). **Lifestyle, efficiency and limits: modelling transport energy and emissions using a socio-technical approach.** *Energy Efficiency*, 12(1), 187–207. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-0678-9>

<sup>99</sup> de Blas, I., Mediavilla, M., Capellán-Pérez, I., & Duce, C. (2020). **The limits of transport decarbonization under the current growth paradigm.** *Energy Strategy Reviews*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100543>

<sup>100</sup> Pulido-Sánchez, D., Capellán-Pérez, I., de Castro, C., & Frechoso, F. (2022). **Material and energy requirements of transport electrification.** *Energy & Environmental Science*, 15(12), 4872–4910. <https://doi.org/10.1039/D2EE00802E>

<sup>101</sup> Capellán-Pérez, I., De Blas, I., Nieto, J., De Castro, C., Miguel, L. J., Carpintero, Ó., Mediavilla, M., Lobejón, L. F., Ferreras-Alonso, N., Rodrigo, P., Frechoso, F., & Álvarez-Antelo, D. (2020). **MEDEAS: A new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints.** *Energy and Environmental Science*, 13(3), 986–1017. <https://doi.org/10.1039/c9ee02627d>

del 85% para la aviación frente a la demanda de los hogares en 2020. Se produce el mismo cambio modal hacia vehículos eléctricos ligeros que en el escenario E-bike

Para analizar los requerimientos minerales asociados a estos escenarios de movilidad, la distribución de tipos de baterías empleada evoluciona endógenamente en el modelo de dinámica de sistemas: si un metal escasea, se favorece la tecnología que menos lo usa. De esta forma, en los primeros años las tecnologías dominantes son NCA y NMC, pero poco después las baterías LFP ganan centralidad en cuanto el níquel y el cobalto empiezan a escasear. Por otro lado, se asume que las actuales tasas de reciclaje (EOL-RR) se duplican en 2050, con dos excepciones: para las que actualmente están por debajo del 10%, se establece un objetivo del 30%, y para las que superan el 85%, se fija un límite máximo en este mismo valor.

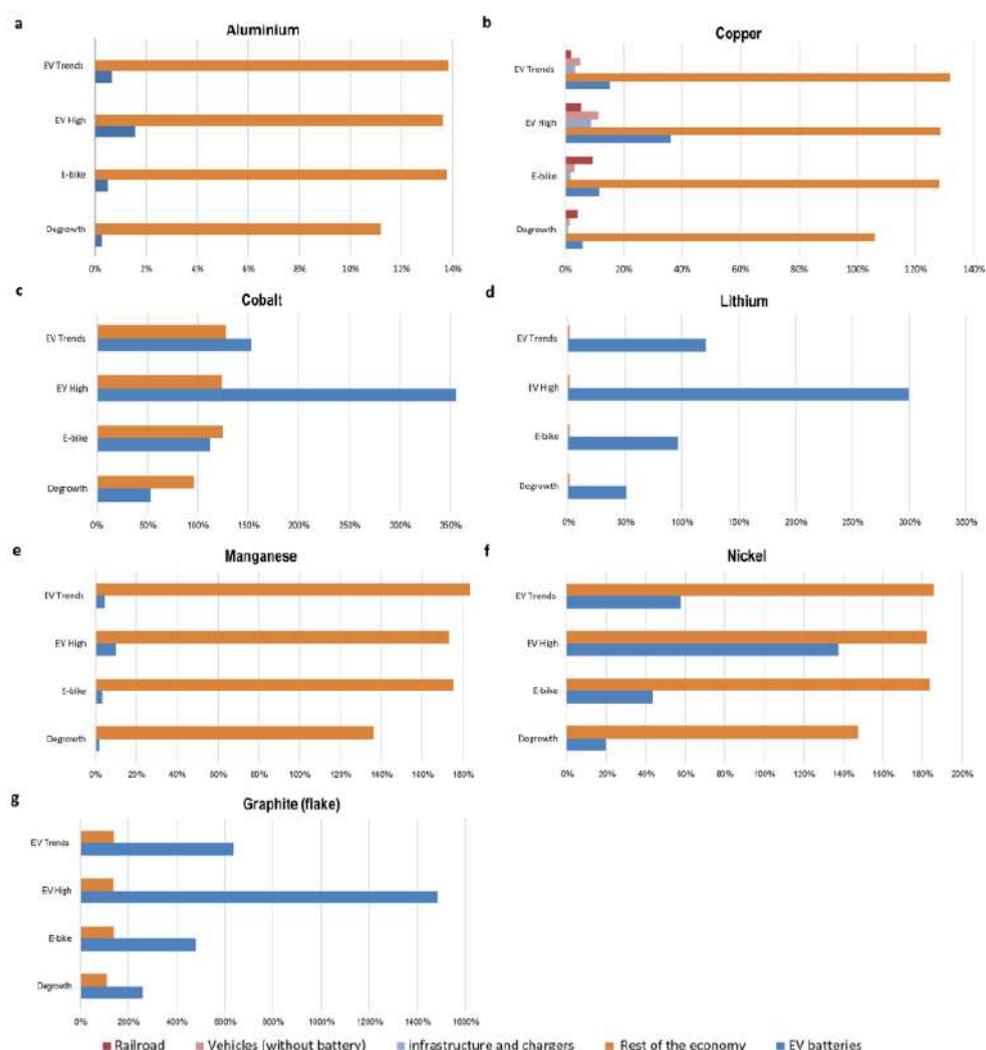


Figura 7: Demanda mineral acumulada hasta 2050 en relación a las reservas actuales para los cuatro escenarios de movilidad evaluados. Obtenido de Pulido-Sánchez y colaboradores, 2022

De esta forma se obtienen los requerimientos minerales para cada uno de los escenarios. La demanda asociada a las baterías de vehículos eléctricos con respecto a las actuales reservas minerales representa el 0,3–2% de aluminio, el 6–36% de cobre, el 54–360% cobalto, el 50–300% litio, el 2–10% manganeso y el 20–138% níquel, según los diferentes escenarios. En la Figura 7 se muestra la demanda acumulada hasta 2050 en relación a las reservas actuales para los cuatro escenarios de movilidad.

Puede comprobarse cómo la evolución del modelo de transporte es especialmente relevante para la demanda de cobalto, litio y grafito. Mientras que la disponibilidad de aluminio, cobre, manganeso y níquel está marcada por la evolución del resto de la economía. El escenario de decrecimiento es aquel que tiene asociados unos menores requerimientos minerales, y también aquel que logra un mayor porcentaje de la demanda cubierta a partir del reciclaje en 2050. Se obtiene también que los requerimientos asociados a las infraestructuras de recarga (cargadores y redes adicionales), los ferrocarriles y el cobre utilizado en los vehículos eléctricos pueden sumar hasta un ~ 25% de las reservas de cobre en el escenario más desfavorable (*High EV*) y un 7% en el más favorable (*Degrowth*).

El otro estudio realizado sobre los requerimientos minerales de escenarios alternativos de movilidad se titula «*Achieving Zero Emissions with More Mobility and Less Mining*» y fue publicado por el Climate and Community Project en 2023.<sup>102</sup> En este caso, el objeto de estudio se acota a la demanda de litio asociada a la electrificación del transporte de pasajeros por carretera en Estados Unidos. Para ello, definen cuatro escenarios con las siguientes características:

- **Escenario 1 | Escenario base:** Los sistemas actuales de transporte privado y uso del suelo permanecen inalterados. Los índices de uso y propiedad de automóviles permanecen constantes y el número de vehículos necesarios sólo varía según la población.
- **Escenario 2 | Escenario de cambio modal:** Aumentan los desplazamientos a pie, en bicicleta, en autobús o en tren. Los niveles de dependencia del coche en las ciudades estadounidenses se ajustan a los de las ciudades europeas de características equivalentes. El reparto modal en las zonas urbanas se ajusta a las medias actuales europeas, mientras que en las zonas rurales permanece inalterado.
- **Escenario 3 | Escenario de cambio modal junto a otras políticas:** Junto a las transformaciones del escenario 2, se añaden cambios sobre el uso del suelo que dan como resultado unas ciudades más densamente pobladas, con infraestructuras que impulsan la movilidad activa y el transporte público. Se aplican también cambios políticos y legislativos que reducen los índices de propiedad de automóviles.

---

<sup>102</sup> Thea Riofrancos, Alissa Kendall, Kristi K. Dayemo, Matthew Haugen, Kira McDonald, Batul Hassan, Margaret Slattery, and Xan Lillehei, **Achieving Zero Emissions with More Mobility and Less Mining**, 2023, Climate and Community Project [<http://www.climateandcommunity.org/more-mobility-less-mining>]

- **Escenario 4 | Escenario más ambicioso:** Se profundizan las transformaciones descritas por los escenarios 2 y 3. Cada vez más personas utilizan el transporte público, la bicicleta y los desplazamientos a pie para llegar a sus destinos, y cada vez más personas viven en zonas urbanas de densidad media donde las distancias entre el hogar, el trabajo, la escuela y la vida social son reducidas. El reparto modal de transporte resultante es equivalente al de ciudades como Viena, donde se fijaron unos ambiciosos objetivos que buscaban disminuir el nivel de uso del coche para mejorar la habitabilidad y la sostenibilidad.

Para obtener la demanda de litio se aplica una metodología de cálculo que consta de varias etapas. En primer lugar, se busca determinar el número de vehículos en circulación correspondiente a cada uno de los escenarios. Para ello, se trabaja sobre la relación entre densidad urbana e intensidad energética del sistema de transporte: cuanto menos densa sea una ciudad, más energía se necesitará por persona para el transporte, y viceversa.<sup>103</sup> Se parte de la actual distribución urbana y rural de la población estadounidense y se aplican algunos cambios que aumentan la densidad de población según la narrativa de los diferentes escenarios. Posteriormente, se define el reparto modal asociado a cada nivel de densidad urbana. En los escenarios menos ambiciosos, apenas se experimentan cambios, mientras que en los más ambiciosos el reparto modal intercambia gran parte de los desplazamientos en coche por transporte público o transporte activo. Se toma como referencia los datos actuales de ciudades europeas, con características de densidad urbana similares a los casos estudiados. En la Figura 8 se puede observar el reparto modal según diferentes niveles de densidad demográfica para los escenarios evaluados.

A continuación, los resultados obtenidos se cruzan con los índices de vehículos necesarios. Este parámetro define el número de vehículos requeridos según la cantidad de personas que se desplazan principalmente de ese modo. De nuevo, los datos se toman de casos existentes actualmente. De esta forma, en el escenario 1 y 2 se requerirían 880 automóviles por cada mil personas que se desplazan principalmente en coche, mientras que en el escenario 3 el índice se sitúa en los 600 coches, y en el escenario 4 bajaría hasta los 400. Es así como se conoce el número total de coches, autobuses y autobuses escolares requeridos para cada uno de los escenarios. Esto resulta en 297 millones de vehículos eléctricos en 2050 para el escenario 1, 215 millones para el escenario 2, 153 millones el escenario 3 y 79 millones para el escenario 4.

---

<sup>103</sup> Peter W. G. Newman & Jeffrey R. Kenworthy (1989) **Gasoline Consumption and Cities**, Journal of the American Planning Association, 55:1, 24-37, DOI: [10.1080/01944368908975398](https://doi.org/10.1080/01944368908975398)

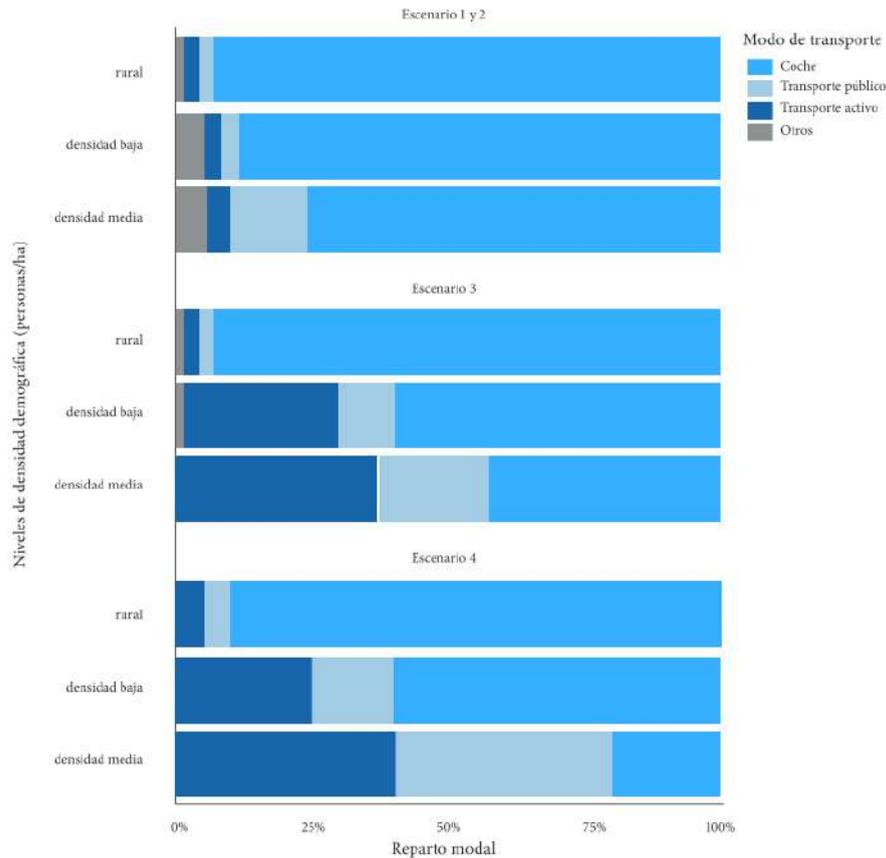


Figura 8: Reparto modal considerado según niveles de densidad demográfica para los diferentes escenarios de movilidad evaluados. Obtenido de Riofrancos y colaboradores, 2023.

En segundo lugar, a partir del número de vehículos y algunos escenarios tecnológicos se obtienen los requerimientos de litio. Se consideran tres factores tecnológicos: tamaño medio de la batería de los automóviles, tiempo de vida útil de la batería, y nivel de reciclaje. Los vehículos eléctricos de Estados Unidos tienen unas baterías especialmente grandes: entre 2012 y 2021 su tamaño medio se duplicó desde 35 kWh hasta 70 kWh. Aquí se consideran tres escenarios futuros posibles: (1) tamaño pequeño, con un tamaño medio de 54 kWh, (2) tamaño mediano, con un tamaño medio de 77 kWh, y (3) tamaño grande, con un tamaño medio de 123 kWh. La tipología de las baterías se considera que será un 50% NCA y otro 50% NMC 811 para los automóviles, mientras que 50% LFP y 50% NMC 811 para los autobuses. Respecto al tiempo de vida útil, se consideran unos periodos de garantía de 8, 10 y 12 años. Por último, en cuanto al reciclaje se considera la posibilidad de alcanzar una tasa de recogida del 100% de las baterías que llegan al final de su vida útil y una tasa de recuperación del 98% para el litio contenido en ellas.

Los resultados obtenidos muestran una reducción de la demanda de litio del 18, 41 y 66% para los escenarios 2, 3 y 4, respectivamente, en comparación con la resultante si se mantienen las tasas actuales de propiedad de vehículos en Estados Unidos. Incluso si el sistema de transporte estadounidense siguiera dependiendo del automóvil, limitar el

tamaño de las baterías podría reducir la demanda de litio hasta un 42% respecto al escenario tendencial. Aumentar la vida útil de las baterías tiene un efecto menor sobre la demanda de litio en comparación con el tamaño de las baterías y los escenarios de movilidad. En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos sobre la demanda anual y acumulada de litio para cada uno de los escenarios evaluados.

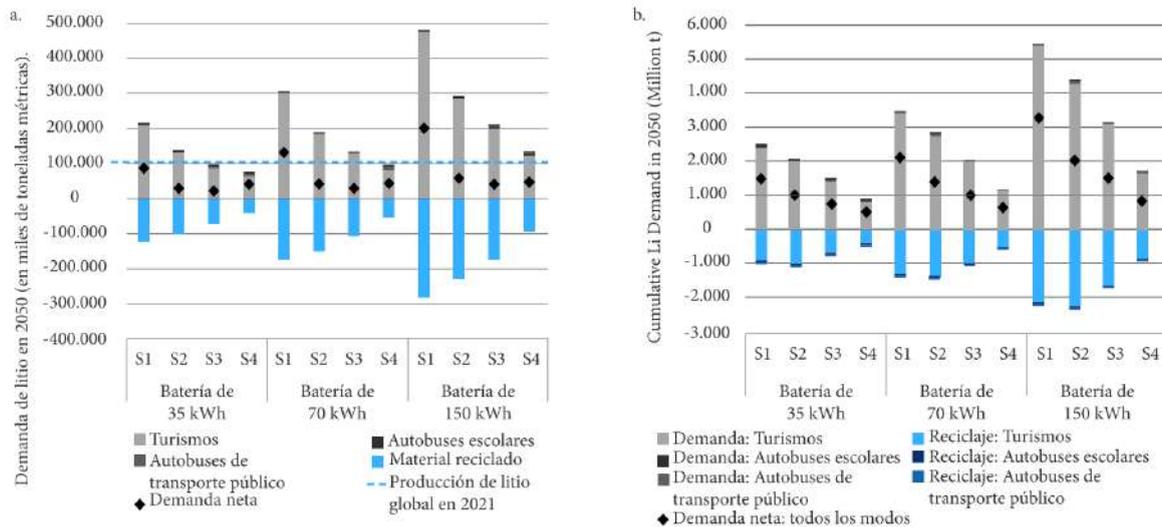


Figura 9: Demanda anual (a) y acumulada (b) de litio para la fabricación de baterías de vehículos eléctricos en Estados Unidos hasta 2050 según los diferentes escenarios evaluados. Obtenido de Riofrancos y colaboradores, 2023.

La comparación entre los dos escenarios más extremos arroja una reducción del 85% de la demanda acumulada de litio hasta 2050: el escenario 4 con baterías pequeñas con una vida útil de 12 años frente al escenario 1 con baterías grandes y una vida útil de 8 años. En el caso de aplicar un ambicioso reciclaje, el 38 – 49% de la demanda de litio en el año 2050 podría ser cubierta a partir de materias primas secundarias, reduciendo los requerimientos de extracción primaria. Sin embargo, los resultados obtenidos aquí demuestran que reducir la demanda de litio mediante la reducción de la propiedad de vehículos resulta más eficaz para reducir la extracción primaria que unos objetivos excesivamente optimistas sobre el reciclaje futuro.

Esto lleva a la conclusión de recomendar medidas políticas como promover opciones de transporte como la bicicleta y los desplazamientos a pie, aumentando la disponibilidad y la seguridad de los carriles bici, las aceras y las calles sin coches; subvencionando las bicicletas y las e-bikes; facilitando los programas de coche compartido como alternativa a la propiedad individual del vehículo; y ofreciendo opciones de bajo coste o gratuitas para compartir bicicletas. Al mismo tiempo, señalan que estas estrategias deberían complementarse con una reducción de las subvenciones espaciales y financieras a los vehículos privados. Esto podría lograrse con medidas como: reducir las plazas de aparcamiento en la calle; suprimir el aparcamiento gratuito; imponer tasas adicionales a

los vehículos de gran tamaño, incluidos los vehículos utilitarios deportivos (SUV); e implantar tasas por congestión, centros urbanos sin coches y con pocos coches.

El objetivo de estas recomendaciones es reducir los requerimientos minerales de la transición energética haciendo posible un modelo alternativo de movilidad que desplace al vehículo privado de su actual posición prioritaria. Para lograrlo, es importante comprender en toda su amplitud y complejidad las dinámicas que mantienen y refuerzan un sistema de transporte dependiente del automóvil.<sup>104</sup> Las recomendaciones señaladas se nutren de la investigación sobre su efectividad en experiencias recientes de múltiples ciudades. Por ejemplo, la investigación de Kuss y Nicholas publicada en 2022<sup>105</sup>, analizó 800 estudios e identificó 12 tipos de intervención que han resultado eficaces para reducir el uso del coche en las ciudades europeas, entre los que destacan: tasas por congestión, control de aparcamiento y zona de tráfico limitado.

### 5.3. Cambios socioeconómicos estructurales

Por último, existe también la posibilidad de plantear escenarios socioeconómicos alternativos y evaluar los requerimientos minerales asociados a ellos. Hemos visto anteriormente cómo el crecimiento económico tiene una clara influencia sobre la demanda mineral del resto de sectores de la economía, independientemente de las tecnologías de descarbonización utilizadas. Así mismo, diferentes grados de crecimiento económico tendrán asociada una diferente demanda energética que deberá ser cubierta sin combustibles fósiles para cumplir con el presupuesto de carbono que limita el calentamiento global.

Los estudios de estas características son poco comunes y todavía incipientes. Un ejemplo lo podemos encontrar en el reciente informe «*Requerimientos minerales de la transición energética*» elaborado por Iñigo Capellán Pérez en 2023 para el Área de Minería de Ecologistas en Acción.<sup>106</sup> Este informe realiza una recopilación de trabajos previos realizados desde el *Grupo de Economía, Ecología y Dinámica de Sistemas (GEEDS)* de la Universidad de Valladolid, entre los que se encuentran los que ya hemos mencionado como escenarios alternativos de movilidad. Utiliza el modelo de evaluación integrada MEDEAS para analizar la demanda de 22 minerales a nivel global según dos escenarios socioeconómicos: *Crecimiento verde* y *Decrecimiento*.

---

<sup>104</sup> Mattioli, G., Roberts, C., Steinberger, J. K., & Brown, A. (2020). **The political economy of car dependence: A systems of provision approach.** *Energy Research and Social Science*, 66(July 2019), 101486. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101486>

<sup>105</sup> Kuss, P., & Nicholas, K. A. 2022. **A Dozen Effective Interventions to Reduce Car Use in European Cities: Lessons Learned from a Meta-Analysis and Transition Management.** *Case Studies on Transport Policy* 10 (3): 1494–1513. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.02.001>

<sup>106</sup> Iñigo Capellán Pérez (2023). **Requerimientos minerales de la transición energética.** Ecologistas en Acción: Madrid. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/284674/informe-requerimientos-minerales-de-la-transicion-energetica/>

Se calculan los requerimientos minerales asociados al conjunto de la economía y a cuatro tecnologías de descarbonización: baterías eléctricas, eólica, solar fotovoltaica y termosolar de concentración. En ambos escenarios se busca alcanzar un 90% de la electricidad y un 70% del total de energía final de origen renovable en 2050. En el escenario *Crecimiento verde* se asume un crecimiento económico global del 1,4% anual, mientras que en el escenario *Decrecimiento* se asume una economía de estado estacionario con un PIB promedio de 5,500\$ per cápita para 2050. Junto a las variables socioeconómicas introducidas al modelo, se definen también una serie de hipótesis sobre las tecnologías de descarbonización analizadas. Los escenarios de movilidad correspondientes a cada uno de los escenarios son *high-EV* y *Degrowth* de la investigación previa que ya hemos mencionado. Combinando los diferentes elementos se obtiene, por ejemplo, una instalación de 75 TW de tecnología solar fotovoltaica en el escenario *Crecimiento verde*, y de 35 TW en el escenario *Decrecimiento*.

Con el escenario definido se obtienen los requerimientos minerales asociados. En ambos escenarios se toman las mismas hipótesis sobre el reciclaje futuro. En la Figura 10 se muestra la demanda mineral obtenida en comparación a las reservas actuales para los dos escenarios.

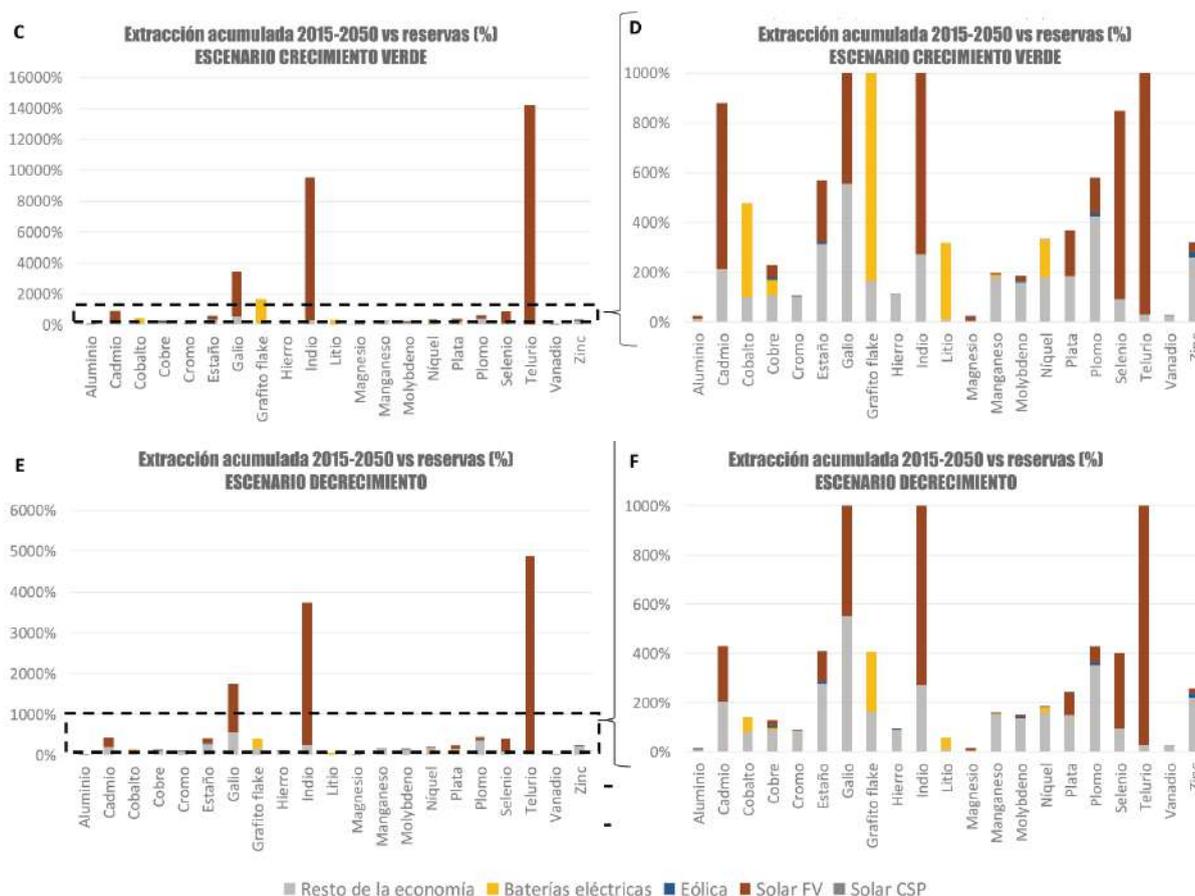


Figura 10: Resultados de extracción acumulada 2015–2050 en comparación a las reservas minerales actuales para el escenario *Crecimiento verde* y *Decrecimiento*. Obtenido de Capellán-Pérez, 2023

De esta forma, puede comprobarse cómo en el escenario *Crecimiento verde* la demanda acumulada entre 2015 y 2050 superan las reservas actuales de la mayor parte de los 22 minerales analizados. Los resultados del escenario *Decrecimiento* suponen una menor presión sobre las reservas y los recursos minerales, aunque en 2050 se superarían las reservas de 15 minerales y se superaría el nivel actual de recursos para 5 de ellos: indio, molibdeno, níquel, selenio y telurio. El autor llama a tomar con cautela estos resultados, especialmente por no haber analizado en detalle posibles dinámicas internas en el resto de la economía durante la transición, que tendrían un impacto sobre la demanda mineral.

Como conclusión, este informe afirma que sólo a través de un decrecimiento económico y un avance significativo en la recuperación funcional de los metales podrá desarrollarse una transición energética realmente sostenible. Así mismo, se señala que todas esas medidas serán insuficientes si no se avanza hacia una economía planificada socialmente, con un control democrático de la extracción y uso de los recursos naturales, y una redistribución equitativa de la riqueza.

## 6. Estudios realizados en el ámbito de España

Para concluir este informe, realizamos un repaso sobre algunas de las investigaciones realizadas sobre el ámbito concreto de España. Encontramos que los estudios sobre la demanda de minerales para la transición energética en España son escasos, y los existentes son muy recientes. Esto muestra un creciente interés, aunque todavía quedan diferentes huecos de investigación por ser cubiertos.

Conocer los requerimientos minerales en un ámbito territorial acotado tiene especial importancia en el momento en el que es dentro de ese ámbito donde se están tomando las decisiones políticas que conducirán a uno u otro escenario de transición. Los escenarios mundiales son útiles porque permiten realizar comparaciones entre la demanda total y las reservas y recursos actuales. Sin embargo, este tipo de escenarios reducen su utilidad a la hora de informar a la elaboración de políticas públicas, que se desarrollan a menor escala. Ser capaces de unir causas con consecuencias, una acción y con su efecto, es parte fundamental de una elaboración de políticas públicas basadas en la evidencia científica. Por eso la ausencia de un estudio específico sobre la demanda mineral futura en la «*Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales*» supone una gran debilidad de la misma. A continuación, mencionamos algunas de las pocas investigaciones publicadas sobre estas cuestiones en el ámbito de España: sobre la demanda mineral asociada a la transición energética y sobre el potencial de recuperación de materias primas secundarias.

En primer lugar, encontramos algunas publicaciones que realizan una estimación de la demanda mineral según diferentes escenarios de transición energética. En el estudio publicado por Felipe-Andreu y colaboradores en 2022 se calcularon los requerimientos minerales de dos escenarios de descarbonización en 2050 para la “*Biorregión Cantábrico-Mediterránea*”.<sup>107</sup> Ahí se encuentran incluidas las comunidades autónomas de Cantabria, País Vasco, La Rioja, Navarra, Aragón, Cataluña, Comunidad Valenciana e Islas Baleares. El *escenario 2050* representa una economía descarbonizada, basada en la sustitución de fuentes fósiles por renovables principalmente a través de la electrificación y un sistema eléctrico 100% renovable. El *escenario 2050 eficiente*, por su parte, añade una reducción de la demanda de energía y materiales, gracias a un mayor uso del transporte público colectivo, el transporte de mercancías en tren y una mayor eficiencia en los edificios gracias al aislamiento. A partir de las hipótesis tecnológicas que definen ambos escenarios, se calcula la *huella mundial de reservas minerales equivalentes*. Este parámetro busca representar qué porcentaje de las reservas minerales que sería necesario extraer si la misma estrategia de transición fuera aplicada al conjunto de la población mundial. A partir de los requerimientos minerales per cápita obtenidos en la biorregión, se extrapola a nivel

---

<sup>107</sup> Felipe-Andreu, J.; Valero, A.; Valero, A. (2022) **Territorial Inequalities, Ecological and Material Footprints of the Energy Transition: Case Study of the Cantabrian-Mediterranean Bioregion**. *Land*, 11, 1891. <https://doi.org/10.3390/land1111891>

mundial para conocer cómo de universalizable sería la transición energética planteada. De esta forma, se obtienen los resultados que pueden visualizarse en la Figura 11.

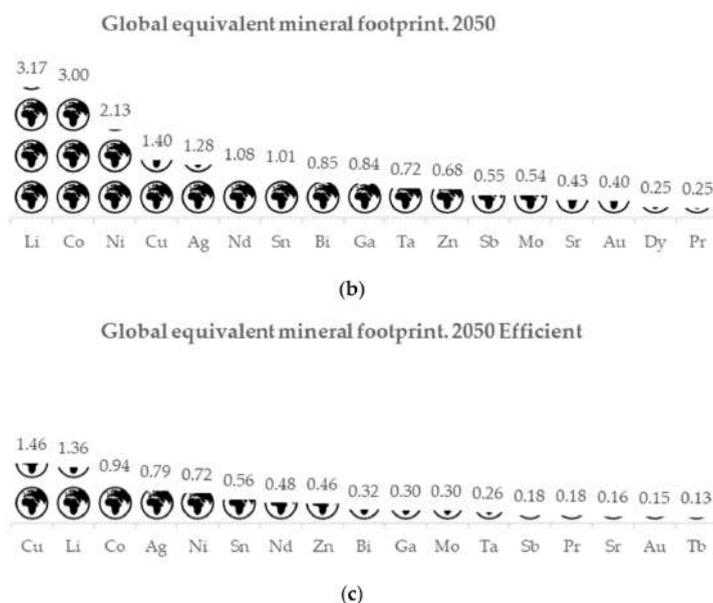


Figura 11: Huella mundial de reservas minerales equivalentes según los escenarios 2050 y 2050 eficiente. Obtenido de Felipe-Andreu y colaboradores, 2022.

En el *escenario 2050* se necesitarían 3,2 veces las reservas actuales de litio y 3 veces las reservas de cobalto, mientras que en el *escenario 2050 eficiente* disminuye la presión material pero se seguirían superando las reservas actuales de minerales como el cobre o el litio. Estas estimaciones apuntan hacia la insostenibilidad global que suponen los estilos de vida actuales en la *Biorregión Cantábrico-Mediterránea* y la transición energética planteada.

Este análisis se podría inscribir en la categoría de *justicia global mineral* que hemos definido al inicio de este informe. Otro análisis que apunta en la misma línea lo podemos encontrar en la publicación de Cañada y Scherer en 2022 como parte del seguimiento de políticas públicas realizado desde el *Observatori del Deute en la Globalització*.<sup>108</sup> En su investigación estiman la demanda total de minerales asociada al objetivo del *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNEIC)* de contar con la presencia de 5 millones de vehículos eléctricos en España en 2030. Es así como se obtiene que los planes de transición hacia la movilidad eléctrica en España tienen asociada una demanda mineral anual equivalente al 5,43% y 4,6% de la extracción anual de litio y cobalto en 2019. Esto se pone en perspectiva con el 0,6% de la población mundial que representa España. De esta forma, se pone sobre relieve la acaparamiento de unos recursos minerales fundamentales para la transición por parte de un país del Norte global y sus actuales planes de transición energética.

<sup>108</sup> Bruna Cañada y Nicola Scherer (2022). **¿Los Next Generation EU respetan los límites biofísicos del planeta? FAQs sobre los PERTE y las materias primas críticas para la transición verde y digital.** Observatori del Deute en la Globalització. <https://odg.cat/es/publicacion/los-fondos-next-generation-eu-y-los-limites-biofisicos/>

En segundo lugar, encontramos algunas publicaciones que realizan estimaciones sobre la cantidad de materias primas secundarias que podrían recuperarse a partir de los productos que llegan al final de su vida útil en España. Una investigación que combina ambos enfoques la podemos encontrar en el informe «*Reciclaje de metales. La alternativa a la minería*» elaborado por Martín Lallana y Joám Evans en 2022 para el Área de Minería de Ecologistas en Acción.<sup>109</sup> En este informe se estimó la demanda mineral asociada a la expansión del vehículo eléctrico y la producción fotovoltaica y eólica hasta 2030 según el *PNIEC*, así como la cantidad de minerales actualmente presentes en el stock de vehículos, baterías y aparatos eléctricos y electrónicos presentes en la economía española. La gestión del final de la vida útil de estos tres productos se encuentra regulado por la legislación, en la que se establecen unos objetivos mínimos de recogida: en el Real Decreto 265/2021 para los vehículos<sup>110</sup>, en el Real Decreto 106/2008 para las baterías<sup>111</sup>, y en el Real Decreto 27/2021 para los aparatos eléctricos y electrónicos<sup>112</sup>.

De esta forma, se estima la cantidad de minerales que podría llegar a lo largo de la próxima década a los canales oficiales de recogida, según los objetivos marcados. Esto representaría un límite superior sobre volumen de materias primas secundarias que podrían llegar a estar disponibles para fabricar las tecnologías de descarbonización en el futuro próximo. Las limitaciones técnicas impiden que el 100% de los minerales contenidos en estos residuos lleguen a reciclarse, pero aporta un orden de magnitud. Es así como se realiza una comparación entre los resultados de demanda mineral para la transición y la cantidad de minerales que entrarían a los canales oficiales de recogida. En el hipotético e irreal caso de recuperar y aprovechar el 100% de los minerales contenidos en esos residuos, se obtiene que se podría cubrir el conjunto de la demanda de oro y cobre, entre el 30 y el 60% de la de níquel, neodimio y disprosio; entre el 3 y el 9% de la de litio, indio, cobalto y plata. Situar este resultado en perspectiva con la realidad actual refuerza la importancia de impulsar los procesos de minería urbana que logren aprovechar el potencial existente. Mientras que una parte sustancial de la demanda de neodimio y disprosio necesarios para la fabricación de aerogeneradores podría llegar a ser cubierta a partir de la minería urbana, las actuales tasas de reciclaje de estos minerales en la Unión Europea son de 1,3 y 0% respectivamente.

---

<sup>109</sup> Martín Lallana y Joám Evans (2022). **Reciclaje de metales como alternativa a la minería**. Ecologistas en Acción. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/189564/>

<sup>110</sup> **Real Decreto 265/2021**, de 13 de abril, sobre los vehículos al final de su vida útil y por el que se modifica el Reglamento General de Vehículos, aprobado por el Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre. Boletín Oficial del Estado, n. 89, de 14 de abril de 2021. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-5868>

<sup>111</sup> **Real Decreto 106/2008**, de 1 de febrero, sobre pilas y acumuladores y la gestión ambiental de sus residuos. Boletín Oficial del Estado, n. 37, de 12 de febrero de 2008. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2008-2387>

<sup>112</sup> **Real Decreto 27/2021**, de 19 de enero, por el que se modifican el Real Decreto 106/2008, de 1 de febrero, sobre pilas y acumuladores y la gestión ambiental de sus residuos, y el Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Boletín Oficial del Estado, n. 17, de 20 de enero de 2021. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-796>

Por su parte, la investigación publicada por Sanclemente-Crespo y colaboradores en 2022 analizó el flujo de materias primas secundarias contenidas en las baterías de vehículos eléctricos que llegarán al final de su vida útil en Cataluña entre 2020 y 2050.<sup>113</sup> Para ello, definen un escenario de electrificación de la movilidad determinado por la Ley de Cambio Climático española.<sup>114</sup> De esta forma obtienen que la llegada de baterías eléctricas como residuos se multiplicaría con respecto a los niveles actuales por 25 en 2030 y por 72 en 2040.

En este estudio se asumen las tasas de reciclaje fijadas en la actual *propuesta de reglamento de relativo a las pilas y baterías y sus residuos* de la Comisión Europea, en el que se establece unas mejoras drásticas sobre la eficiencia del reciclado desde baterías eléctricas.<sup>115</sup> En este reglamento se fijan unos índices de valoración específicos para el cobalto, níquel litio y cobre, que deberían aumentar desde sus niveles actuales hasta el 90, 90, 35 y 90% en 2025, y el 95, 95, 70 y 95% en 2030, respectivamente. En el caso del litio, se asume como punto de partida una eficiencia del reciclaje del 0% en 2017, mientras que para el cobre, cobalto y níquel se asume una eficiencia inicial del 80% en 2017. Los resultados obtenidos muestran que el suministro potencial de materiales secundarios procedentes de baterías al final de su vida útil podría aumentar hasta un 80% de cobalto, cobre y níquel, y un 60% de litio en 2050. En la Figura 12 se muestran el potencial suministro desde materias primas secundarias.

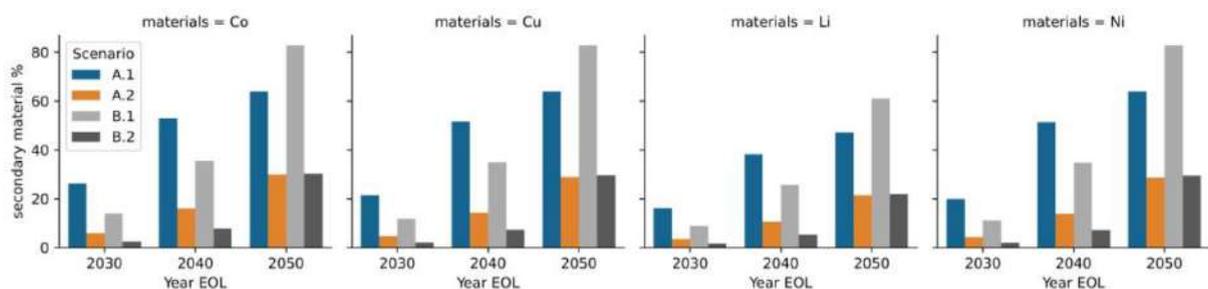


Figura 12: Potenciales materias primas secundarias que se podrían recuperar anualmente de 2030 a 2050: cobalto (Co), cobre (Cu), litio (Li) y níquel (Ni). Obtenido de Sanclemente-Crespo y colaboradores, 2022

Estos resultados conducen a la recomendación de poner en marcha estrategias de gestión para las baterías de vehículos eléctricos que ayuden a optimizar su uso y logren alcanzar el máximo potencial de recuperación de materias primas secundarias.

<sup>113</sup> Sanclemente Crespo, M.; van Ginkel González, M.; Talens Peiró, L. (2022). **Prospects on End of Life Electric Vehicle Batteries through 2050 in Catalonia**. Resour Conserv Recycl, 180,106133. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106133>.

<sup>114</sup> **Ley 7/2021**, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética. Boletín Oficial del Estado, n. 121, de 21 de mayo de 2021. Disponible en: [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-8447](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-8447)

<sup>115</sup> **Propuesta de reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a las pilas y baterías y sus residuos y por el que se deroga la Directiva 2006/66/CE y se modifica el Reglamento (UE) 2019/1020**. COM(2020) 798. Comisión Europea, 10 de diciembre de 2020. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52020PC0798>

Por último, Torrubia y colaboradores publicaron en 2023 una investigación en la que se analizaba el flujo de minerales contenidos en los aparatos eléctricos y electrónicos puestos en el mercado entre 2016 y 2021<sup>16</sup>. Se aplica un método de estudio con elevada desagregación que diferencia entre 43 categorías de aparatos eléctricos y electrónicos, con datos específicos sobre su tiempo de vida útil y composición material. Basándose en los métodos actualmente utilizados para la recolección y el reciclaje de diferentes metales<sup>17</sup> obtienen una estimación de las cantidades de los metales contenidos en estos productos que podrían ser recuperados cuando lleguen al final de su vida útil. En la Figura 13 se muestra una representación de los resultados expresados en su valor económico.

Los aparatos eléctricos y electrónicos puestos en el mercado en España 2016 y 2021 contienen unas 1,4 millones de toneladas de metales, de los cuales 20,000 toneladas representan materias primas críticas según la clasificación de la Unión Europea. Los metales contenidos en estos productos son equivalentes al 81% de todos los extraídos por la minería primaria en España durante el mismo periodo. Sin embargo, se comprueba como únicamente el 11% de los metales críticos y el 13% de los metales preciosos llegan hasta los canales de reciclaje. El 35% del cobalto y el 85% del oro se pierden en los pasos intermedios del proceso de recuperación. En términos económicos, el 62% del valor de estos metales se pierde en el proceso de recogida.

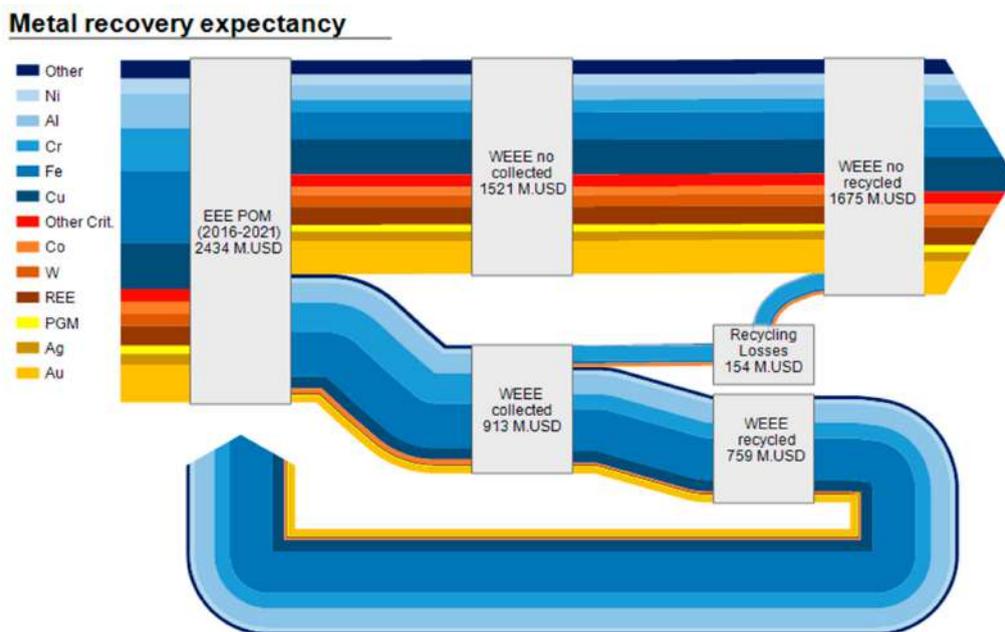


Figura 13: Diagrama de Sankey que muestra la previsión de recuperación de metales a partir de los aparatos eléctricos y electrónicos puestos en el mercado en España entre 2016 y 2021 y las pérdidas en cada paso del

<sup>16</sup> Torrubia, J.; Valero, A.; Valero, A.; Lejuez, A (2023). **Challenges and Opportunities for the Recovery of Critical Raw Materials from Electronic Waste: The Spanish Perspective.** Sustainability, 15, 1393. <https://doi.org/10.3390/su15021393>

<sup>17</sup> Charpentier Poncelet, A., Helbig, C., Loubet, P. et al. **Losses and lifetimes of metals in the economy.** Nat Sustain 5, 717–726 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00895-8>

proceso de recuperación. Unidades: millones de dólares estadounidenses. Obtenido de Torrubia y colaboradores, 2023

Estos resultados conducen a la recomendación de impulsar estrategias de minería urbana que hagan posible aprovechar el máximo potencial de recuperación de materias primas secundarias a partir de estos residuos tecnológicos. Para ello, se señalan cuatro desafíos que deben superarse: (1) la gran heterogeneidad de los aparatos eléctricos y electrónicos que dificultan procesos estandarizados de reciclaje, (2) la falta de trazabilidad de los residuos, que conduce a unas elevadas pérdidas en el proceso de recogida, (3) las bajas tasas de reciclaje de gran parte de estos metales ante la ausencia de incentivos económicos o legislativos para su recuperación, y (4) la importancia de mejorar la durabilidad y reparabilidad de estos productos tecnológicos para alargar su vida útil.

A estos estudios se les suman otros informes realizados recientemente desde organizaciones ecologistas, como el informe «*Minant una transició ecològica. Impactes ambientals i socials de la mineria que sosté la mobilitat elèctrica privada*» de Observatori Desc<sup>118</sup> y «*El boom minero: patrones e impactos de la expansión de la industria extractiva en España*» de Amigos de la Tierra y OMAL<sup>119</sup>. Aunque estas publicaciones no realizan un cálculo específico sobre los requerimientos minerales de la transición energética, muestran la creciente preocupación sobre los impactos socioambientales de la extracción primaria asociados a ella.

Este breve repaso al material existente en el ámbito de España deja claro que hasta el momento no se ha realizado un estudio completo en el que se aborda la faceta mineral de la transición energética en profundidad, pero sí que podemos encontrar varias aproximaciones que podrían unificarse para avanzar en ese sentido.

---

<sup>118</sup> Gisela Torrents (2022). **Minant una transició ecològica. Impactes ambientals i socials de la mineria que sosté la mobilitat elèctrica privada**. Observatori Desc

<sup>119</sup> Amigos de la Tierra y OMAL. (2022). **El boom minero: patrones e impactos de la expansión de la industria extractiva en España**. Disponible en: <https://www.tierra.org/wp-content/uploads/2022/10/Informe-Mineria.pdf>

## 7. Conclusiones, lagunas y líneas de investigación futuras

A lo largo de este informe hemos examinado los informes internacionales en los que se basa la actual elaboración de políticas públicas en materia de recursos minerales para la transición energética, hemos descrito cuáles son los elementos que determinan la demanda mineral futura, hemos presentado algunas estrategias y escenarios alternativos que lograría reducir la demanda de extracción primaria y hemos repasado los estudios realizados en el ámbito de España sobre estas cuestiones. Aunque no llega a ser una panorámica completa, y seguramente se queden aspectos importantes a considerar, consideramos que sí representa una visión amplia que puede informar las discusiones sobre el reciente impulso de la minería doméstica en España, bajo la narrativa de la transición hacia una economía descarbonizada. Para concluir, presentamos una lista de ocho lagunas y líneas de investigación que sería importante cubrir en el futuro próximo.

### 1. **Determinar la demanda mineral futura asociada a los marcos estratégicos para la transición energética en España**

Como hemos visto, la «*Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales*» aprobada por el Gobierno de España no viene acompañada de una previsión específica de la demanda mineral correspondiente a los actuales planes estatales de transición energética. Se toman informes de ámbito internacional y se trasladan las conclusiones que apuntan hacia la necesidad de aumentar la extracción primaria de materias primas críticas. Esto representa una importante ausencia que convendría cubrir. Existen diferentes marcos estratégicos y documentos ministeriales que podrían tomarse como referencia para un análisis de estas características, tales como la «*Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo (ELP 2050)*», la «*Estrategia de Almacenamiento Energético*», el «*Anteproyecto de Ley de Movilidad Sostenible*» o la «*Hoja de Ruta del Hidrógeno*», entre otros.

### 2. **Examinar la previsión de incremento de la movilidad eléctrica y plantear escenarios alternativos basados en transporte público colectivo y otras estrategias**

La movilidad eléctrica representa el impulso principal de los requerimientos minerales en la transición energética. En este informe hemos visto los diferentes aspectos problemáticos que se derivan de unos escenarios de movilidad futura tecno-céntricos, en los que únicamente se busque una sustitución de automóviles de combustión por eléctricos. Definir escenarios alternativos y evaluar los requerimientos minerales asociados es importante para visibilizar los importantes beneficios sociales y ambientales que podrían lograrse. Realizar esta tarea sobre el ámbito territorial en el que se discuten y se definen las políticas públicas permitiría aumentar su utilidad y recorrido.

**3. Valorar los cambios producidos en la demanda futura obtenida según diferentes hipótesis tecnológicas**

Las tecnologías con las que debemos reducir radicalmente las emisiones en las próximas dos décadas son las que conocemos hoy en día, no están pendientes de inventarse. Pero dentro del mismo ámbito tecnológico, existen diferentes sub-tecnologías que pueden adquirir mayor o menor centralidad. Algunas de ellas están basadas en unos minerales más escasos que otras. La forma concreta en la que evolucionen y se implanten las diferentes tecnologías tendrá un impacto sobre la demanda mineral del futuro. Aerogeneradores y vehículos eléctricos con imanes permanentes, módulos fotovoltaicos de capa fina o baterías con un alto contenido en cobalto son algunas de las sub-tecnologías más críticas desde el punto de vista mineral, pero también existen alternativas a ellas. Definir y evaluar diferentes hipótesis permitiría extraer recomendaciones que favorezcan las tecnologías basadas en minerales abundantes.

**4. Examinar las posibilidades de reducir la demanda a través de medidas de economía circular**

Alargar la vida útil de las tecnologías, garantizar la reparabilidad o el reacondicionamiento, realizar mantenimientos rutinarios, diseñar pensando en el desmontaje o favorecer la reutilización son algunas de las muchas medidas de economía circular que pueden aplicarse para reducir la demanda mineral asociada a la transición energética. Existen investigaciones que cuantifican el impacto beneficioso que tendría su aplicación a gran escala. Al mismo tiempo, podemos encontrar diferentes marcos legislativos europeos y estatales que apuntan hacia el impulso de la economía circular. Examinar las posibilidades de reducción de la demanda que podría lograrse a partir de estas estrategias aportaría una importante información.

**5. Evaluar el potencial de recuperación de materias primas secundarias maximizando la recogida y el reciclaje de las tecnologías de descarbonización al final de su vida útil**

El 80% de cobalto, cobre y níquel, y el 60% de litio de las baterías para vehículos eléctricos producidas en Cataluña en 2050 podría suministrarse desde el reciclaje si se aplican los índices de valorización de la propuesta de reglamento de relativo a las pilas y baterías y sus residuos de la Comisión Europea. ¿Qué ocurriría para el conjunto de España? ¿Y con otras tecnologías? Algunos de los informes que hemos repasado consideran técnicamente posible alcanzar unas tasas de reciclaje del orden del 90% para los metales críticos contenidos en las tecnologías de descarbonización. Evaluar las posibilidades existentes y cuantificar la reducción de la demanda de extracción primaria que supondría en España una ambiciosa estrategia de reciclaje de estas tecnologías es todavía una tarea pendiente.

**6. Estimar los impactos sobre la demanda energética y mineral de la transición digital**

La digitalización de la economía lleva asociado un aumento de la actividad de centros de datos, redes de comunicación, millones de dispositivos electrónicos y otras infraestructuras. Esto implica un aumento de su demanda energética, que deberá ser suministrada a partir de tecnologías de energías renovables en el futuro próximo. El impacto mineral de la digitalización, por tanto, se genera tanto en los dispositivos electrónicos e infraestructuras asociadas como en los sistemas energéticos que abastecen la energía que requieren para su funcionamiento. Esta faceta ha sido muy poco estudiada hasta el momento y convendría obtener algunas estimaciones de su impacto en las políticas públicas de la transición verde y digital.

**7. Cuantificar la cantidad de minerales que podría recuperarse a partir de otras fuentes de residuos tecnológicos, según diferentes escenarios de digitalización**

Los metales contenidos en los aparatos eléctricos y electrónicos puestos en el mercado en España entre 2016 y 2021 son equivalentes al 81% de todos los metales extraídos por la minería primaria española durante el mismo periodo. Si todo se mantiene como hasta ahora, el 89% de las materias primas críticas contenidas en esos productos no serán recuperadas a través de los canales de recogida y reciclaje. Esto nos da una muestra del importante margen de mejora existente para una aplicación ambiciosa de estrategias de minería urbana que reduzcan las pérdidas y maximicen la recuperación de estos metales. Al mismo tiempo, el volumen de productos puestos en el mercado está marcado por diferentes escenarios de digitalización. Cuantificar el volumen de estos flujos minerales aportaría información sobre una estrategia alternativa para reducir la demanda de extracción primaria.

**8. Describir de forma desagregada por sectores las previsiones del aumento de la demanda y obtener escenarios alternativos sobre la demanda mineral vinculada al resto de la economía**

La transición energética y digital no es la única responsable de las previsiones de incremento futuro de la demanda mineral. Otros sectores de la economía utilizan muchos de los metales analizados y las tendencias de crecimiento de su actividad explican una parte significativa de las previsiones del aumento de la demanda total. Expresar de forma clara qué actividad económica representa qué parte de la demanda mineral es importante para tener una visión completa de las perspectivas futuras. A partir de unos datos de estas características se podrían examinar los impactos de políticas de reducción de la demanda en algunos sectores de la economía. Por ejemplo, la demanda de metales asociada a un escenario futuro basado en la construcción de cientos de miles de nuevas viviendas será superior a la

de un escenario basado en la rehabilitación de edificaciones ya construidas.

**9. Comparar la demanda de extracción primaria obtenida con las reservas existentes bajo una perspectiva de justicia global**

Atendiendo a los números de demanda y reservas, actualmente hay suficiente cobalto, litio, neodimio y plata en el mundo para llenar España de vehículos eléctricos, aerogeneradores y paneles fotovoltaicos en las dos próximas décadas. Sin embargo, un modelo de transición energética de enfoque tecno-céntrico puede suponer una demanda mineral que no sería universalizable ni ampliable en el tiempo para el conjunto de la población mundial y las generaciones futuras. Esto pone sobre la mesa la importancia de incluir una óptica de justicia global mineral e intergeneracional que incorpore la perspectiva ecosocial y feminista en los análisis realizados. Como hemos visto, esta comparación puede realizarse sea cual sea la escala territorial sobre la que se realice la estimación de la demanda, lo cual aporta una potente herramienta con la que evaluar los escenarios planteados.

**10. Elaborar recomendaciones y líneas de acción para reducir los requerimientos de extracción primaria a partir de medidas que disminuyan la demanda y aumenten la minería urbana**

Una investigación que cuantifique las reducciones sobre la demanda mineral derivadas de las estrategias mencionadas puede aportar recomendaciones concretas aterrizadas en el ámbito de discusión y aplicación de las políticas públicas. La variedad y amplitud de las estrategias mencionadas implican que no hay un único organismo responsable, sino que deberían desarrollarse como marcos estratégicos en los que se combinen medidas orientadas al urbanismo y los servicios públicos, con otras de política industrial activa y regulaciones a diferentes escalas. En cualquier caso, estas recomendaciones concretas no deben perder de vista la magnitud de las transformaciones necesarias para lograr una reducción significativa de la demanda de extracción primaria. En última instancia, ese objetivo requeriría una economía planificada socialmente que no persiga el crecimiento económico, sino la satisfacción de las necesidades materiales y energéticas de toda la población a través del control democrático de la extracción y uso de los recursos naturales, y de una redistribución equitativa de la riqueza.