

Requerimientos minerales de la transición energética



ÁREA DE MINERÍA

FICHA TÉCNICA

Título:
Requerimientos minerales de la transición energética.

Autor:
Iñigo Capellán Pérez
Investigador Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid (GEEDS-UVA)

Coordinación:
Área de Minería

Edición:
Febrero 2023

Edita:
Ecologistas en Acción

Contacto:
mineria@ecologistasenaccion.org
www.ecologistasenaccion.org

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

Ecologistas en Acción agradece la reproducción y divulgación de los contenidos de este informe siempre que se cite la fuente.

Esta actividad recibe financiación del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.



ÁREA DE MINERÍA

ÍNDICE



<u>Resumen</u>	2
<u>Glosario</u>	5
<u>1. La necesaria y urgente transición a las energías renovable</u>	6
<u>2. Estimando la demanda de minerales asociada a la transición energética</u>	13
<u>3. Requerimientos de minerales para eólica terrestre, solar fotovoltaica y solar de concentración</u>	17
3.1 Selección tecnologías energéticas	
3.2 Intensidades materiales de las principales tecnologías energéticas	
<u>4. Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial</u>	26
4.1 Aplicación de escenarios a Modelos de Evaluación Integrada	
4.2 Definición de escenarios de transición a 2050	
4.3 Parametrización de escenarios	
4.4 Resultados	
<u>5. ¿Qué podemos esperar de las futuras mejoras tecnológicas?</u>	40
<u>6. Propuestas y recomendaciones políticas</u>	43
6.1 Medidas en las esferas sociocultural, político-económica y de consumo	
6.2 Medidas en la esfera técnica	
6.3 Medidas en la esfera de extracción y uso de materiales	
<u>7. Conclusiones</u>	47
<u>8. Anexos</u>	55
Anexo metodológico I: Modelos MEDEAS	
Anexo metodológico II: Entradas y supuestos comunes para todos los escenarios	
Anexo resultados I: Tablas de extracción acumulada 2015-2050 vs reservas y recursos por escenario	
<u>9. Referencias</u>	60

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

RESUMEN

Las plantas de generación de energías renovables y baterías eléctricas son imprescindibles para la transición a un sistema energético sostenible, pero dependen de recursos no renovables para su funcionamiento. La cuestión de la abundancia o escasez de minerales es siempre relativa a la demanda que hagamos de ellos y la disponibilidad que haya en la corteza terrestre y cómo de accesible sea extraerlos con la tecnología y el contexto económico dados.

En este informe se aplica un modelo de evaluación integrada mundial para proyectar las demandas de minerales asociadas a las principales tecnologías energéticas de solar fotovoltaica, solar de concentración, eólica y baterías eléctricas en 3 escenarios de futuro con el horizonte de 2050.

Nos centramos en los 22 minerales más relevantes por razones de criticidad: aluminio, cadmio, cromo, cobalto, cobre, estaño, galio, grafito, indio, hierro/acero, litio, magnesio, manganeso, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio, telurio, titanio, vanadio y zinc.

Durante estos 25 años se debería haber realizado el grueso de la transición energética mundial si queremos evitar los peores escenarios de impactos climáticos y desequilibrio de la biosfera. Además, se trata de un horizonte razonable para proyectar actuales tecnologías, ya que el desarrollo y difusión de nuevas tecnologías es un proceso con una considerable inercia; como para que los actuales valores de reservas y recursos minerales nos sirvan de referencia útil.

En un escenario de “Crecimiento Verde”, muchos de estos minerales dispararían su demanda extraordinariamente para suministrar minerales para la construcción de nuevas infraestructuras de captación de energías renovables y almacenamiento eléctrico, lo que arroja dudas sobre la viabilidad a la transición a las energías renovables tal y como se plantea actualmente desde las instituciones nacionales e internacionales principales.

Aunque algunas instituciones internacionales reconocen la problemática de la criticidad de los materiales, en general suelen plantear que ésta podrá ser abordada mediante reformas que fomenten una “Economía Circular” que permita cerrar los ciclos y aumentar todo lo posible las tasas de reciclado mediante buenas prácticas y ecodiseños.

La definición de esta “Economía Circular” es ambigua y destacamos que se plantea de forma parcial y obviando factores como que existe una incompatibilidad entre una transición muy rápida y la mejora de las tasas de reciclado puesto que son necesarias innovación, cambios profundos en los



En un escenario de “Crecimiento Verde”, muchos de estos minerales dispararían su demanda extraordinariamente para suministrar minerales para la construcción de nuevas infraestructuras de captación de energías renovables y almacenamiento eléctrico, lo que arroja dudas sobre la viabilidad a la transición a las energías renovables tal y como se plantea actualmente desde las instituciones nacionales e internacionales principales.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

RESUMEN

procesos de diseño y productivos además de los culturales y sistémicos (fomentando por ejemplo diseños que permitan la recuperación de minerales en vez de mejores prestaciones técnicas o menor coste).

El escenario de “**Decrecimiento**” simulado en este informe, además de producir muchas menos emisiones GEI, es que representa una opción mucho menos intensiva en materiales, pero que todavía requeriría de una importante actividad minera para cubrir las necesidades de materiales que aún no están dentro de la economía, o que también tienen otros usos. En particular, no se evitaría la superación de las reservas estimadas actualmente para algunos materiales importantes como el cobalto, cobre, níquel o plata, y para varios recursos como indio, molibdeno, níquel, selenio y telurio.

Los resultados presentados en este trabajo tienen dos lecturas principales: por un lado, la transición a las energías renovables incrementará la presión para la extracción de recursos mineros, con todos los graves problemas que el extractivismo acarrea en las poblaciones locales. Una extracción que cada vez genera más residuos tóxicos ante la baja concentración en la que se encuentran los minerales explotados en el subsuelo. De hecho, la minería, en Europa, es ya uno de los sectores industriales que más residuos genera.

Por otro lado, la insuficiencia de las actuales reservas conocidas para cubrir la futura demanda de algunos de los minerales actualmente empleados incrementará las presiones para hacer avanzar la frontera extractiva a otras zonas, como está de hecho ocurriendo recientemente en la UE y España. Ambos problemas serían mucho más acuciantes en el caso del escenario basado en el “Crecimiento Verde”.

Existen una diversidad de medidas políticas que se podrían poner en marcha para reducir todo lo posible la demanda de materiales primarias (a extraer de la mina), y en caso de no poder evitarse, minimizar los impactos ambientales y sociales. Todas ellas pasan por el diseño de una política integral y transversal que tenga en cuenta todos los sectores y demandas de bienes y servicios de la economía; y obviamente a grandes escalas geográficas puesto que las reservas y los mercados de materiales son hoy en día mayormente internacionales.

En este sentido, para reducir la demanda de extracción primaria de materiales, se pueden aplicar varias líneas estratégicas de acción en las esferas sociocultural, político-económica, de consumo y técnica, ya que toda acción resultante en una reducción de la demanda de energía redundará en último término en una reducción de la demanda de materiales.



El escenario de “Decrecimiento” simulado en este informe, además de producir muchas menos emisiones GEI, es que representa una opción mucho menos intensiva en materiales, pero que todavía requeriría de una importante actividad minera para cubrir las necesidades de materiales que aún no están dentro de la economía, o que también tienen otros usos.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

RESUMEN

Es fundamental avanzar cara un sistema económico planificado no dependiente del crecimiento económico, acordar un control democrático de la población para que esta esté proporcionada a los límites del planeta y abordar cambios culturales en el comportamiento para adoptar usos y costumbres que necesiten menos intensidad de materiales y energía.

Tecnológicamente es imprescindible promover la I+D de tecnologías basadas en materiales abundantes, fomentar el ecodiseño y estandarización de productos para facilitar la reparabilidad y reciclaje, la mejora de los procesos industriales para reducir el residuo durante la fabricación de piezas y equipos,

Hay medidas concretas que se pueden implementar de forma inmediata en el sector de gestión de materiales, como por ejemplo: el incremento de las tasas de reciclado al final de la vida útil y establecimiento de contenidos mínimos obligatorios de metales secundarios en la fabricación de los nuevos dispositivos, el fomento de la minería urbana, la creación de empresas públicas que impulsen la industria de la recuperación y el reciclaje de minerales para afrontar el hecho de que hoy en día los metales vírgenes son más económicos que los reciclados, medidas fiscales, restricciones al comercio internacional o medidas para controlar y limitar la extracción primaria.

En definitiva, sólo a través de un decrecimiento económico y un avance significativo en la recuperación funcional de los metales podremos abordar la necesaria transición cara un sistema energético sostenible ambientalmente. Pero todas estas medidas serán insuficientes si no transitamos cara una economía planificada socialmente. con un control democrático de la extracción y empleo de los recursos y una redistribución equitativa de la riqueza.

**Iñigo Capellán (autor del informe) y Xoán Evans ´ más Cristóbal López (cordina-
dores del Área de Minería de Ecologistas en Acción).**



**Demanda de
extracción
de minerales
en la
transición
energética**

**ÁREA DE
MINERÍA**

GLOSARIO

CSP: Concentración Solar.

FV: Fotovoltaica.

GEI: Gases de Efecto invernadero.

Ley de mena: Medida que describe el grado de concentración de recursos naturales valiosos presentes en una mena.

MEDEAS-World: Modelo de Evaluación Integrada aplicado en este informe.

Recursos: Concentración de sólidos, líquidos, o material gaseoso en o sobre la corteza terrestre en tal forma y cantidad que la extracción económica de una mercancía de la concentración es actualmente o potencialmente factible.

Reservas: Aquella parte de la base de reservas que podría ser económicamente extraída en el momento de la determinación. No es necesario que exista infraestructura de extracción y operativo.

Tasa de reciclado EOL: Tasa de reciclado al final de vida de los productos.

Tasa de Retorno Energética: cociente de la cantidad de energía total que es capaz de producir una fuente de energía y la cantidad de energía que es necesario emplear o aportar para explotar ese recurso energético.

Grafito flake: Tipo de grafito empleado en la fabricación de baterías eléctricas

Subtecnología energética: Familia de tecnologías que generan el mismo tipo de energía bajo el mismo principio físico principal



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

La necesaria y urgente transición a las energías renovables



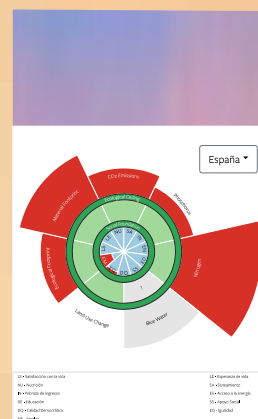
La actual crisis de sostenibilidad es un problema muy complejo que requiere medidas de control urgentes y radicales a nivel mundial (IPBES,2019; IPCC, 2019). Al acelerar la pérdida de biodiversidad, alterar significativamente los ciclos naturales del carbono (cambio climático), el nitrógeno o el fósforo, degradar los ecosistemas, etc., las sociedades humanas estamos degradando los sistemas y procesos naturales que sustentan la vida y de los que dependemos para sostener nuestra propia existencia.

Investigaciones recientes indican que algunos puntos de inflexión climáticos, que se refieren al umbral crítico en el que una pequeña perturbación puede alterar cualitativamente el estado o desarrollo de un componente del sistema del clima de la Tierra, pueden ser traspasados en las próximas décadas, lo que implicaría impactos a gran escala peligrosos e incluso catastróficos para los sistemas humanos y ecológicos. En consecuencia, estamos arriesgando la continuidad de nuestras sociedades tal y como las conocemos.

Por otro lado, hoy en día no existe ningún país que satisfaga las necesidades básicas de sus ciudadanos a un nivel globalmente sostenible de uso de los recursos naturales, como se puede ver en el visor <https://goodlife.leeds.ac.uk/>, dónde se representan los datos recopilados para 150 países desde el año 1992 al 2015 de la situación respecto de los límites planetarios transgredidos y las necesidades básicas cubiertas. Además, se mantienen enormes diferencias de riqueza y consumo de recursos tanto entre personas de países diferentes como dentro de ellos. Por lo tanto, la transición hacia la sostenibilidad es un reto no sólo técnico, sino también y esencialmente un reto de naturaleza global y política.

En este contexto, la implementación rápida y efectiva de políticas de transición a las energías renovables se dirige principalmente a los problemas de cambio climático generados por la emisión de gases de efecto invernadero (principalmente dióxido de carbono (76%), aunque también metano (16%) y dióxido de nitrógeno (6%)) y agotamiento de los combustibles fósiles. De hecho, se estima que más de 2/3 de las emisiones de efecto invernadero mundiales proceden de la quema de combustibles fósiles, fuentes de energía de los que el mundo depende de forma masiva con variaciones regionales y/o nacionales según disponibilidad de recursos renovables locales (como puede ser el caso de la hidroeléctrica) o según el perfil de metabolismo económico de cada país, es decir sociedades más agrícolas o industrializadas (Fernández Durán and González Reyes, 2018).

A pesar de sus impactos ambientales nocivos, los combustibles fósiles están caracterizados por unas propiedades físico-químicas muy favorables (alta



hoy en día no existe ningún país que satisfaga las necesidades básicas de sus ciudadanos a un nivel globalmente sostenible de uso de los recursos naturales, como se puede ver en el visor <https://goodlife.leeds.ac.uk/>, dónde se representan los datos recopilados para 150 países desde el año 1992 al 2015 de la situación respecto de los límites planetarios transgredidos y las necesidades básicas cubiertas.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

La necesaria y urgente transición a las energías renovables



densidad energética, almacenables, inertes a condiciones ambientales, etc.) que permiten el flujo de grandes cantidades de energía útil a demanda hacia las sociedades humanas.

Las fuentes de energía renovables, por su parte, están habitualmente caracterizadas por menores niveles de densidad energética (es decir, para un mismo nivel de generación de energía necesitan en general ocupar más superficie, ver Figura 1a), su uso compite con otros procesos de la biosfera y aquellas con mayor potencial, como la eólica o la solar, están considerablemente afectadas por su variabilidad e intermitencia (ver b, aunque existe potencial a nivel de sistema para gestionar/mitigar hasta un cierto punto su variabilidad).

Rangos típicos de densidad energética por tipo de fuente y/o tecnología

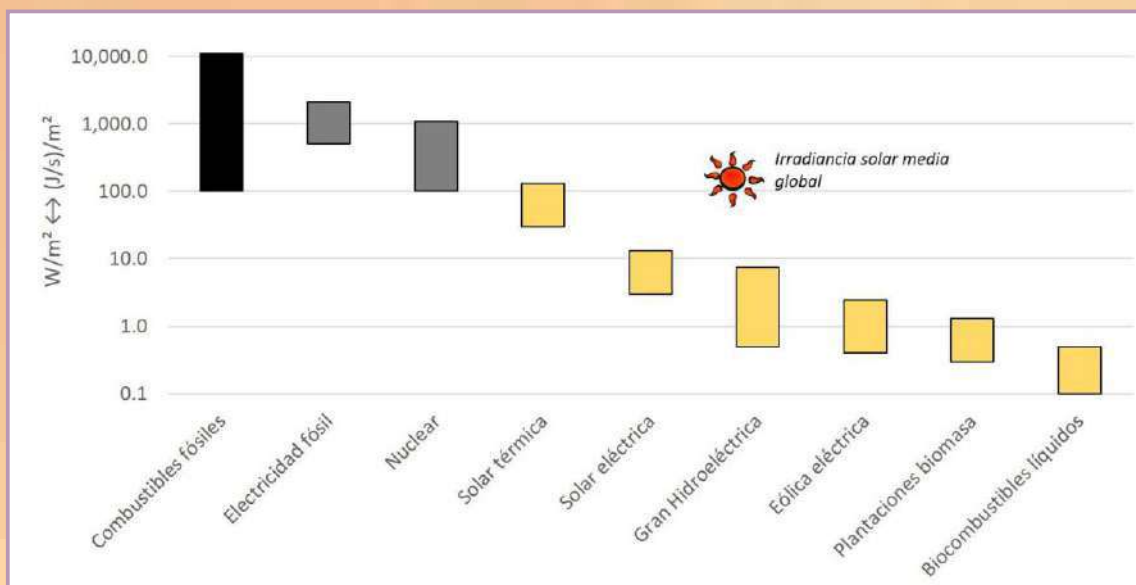


Figura 1:

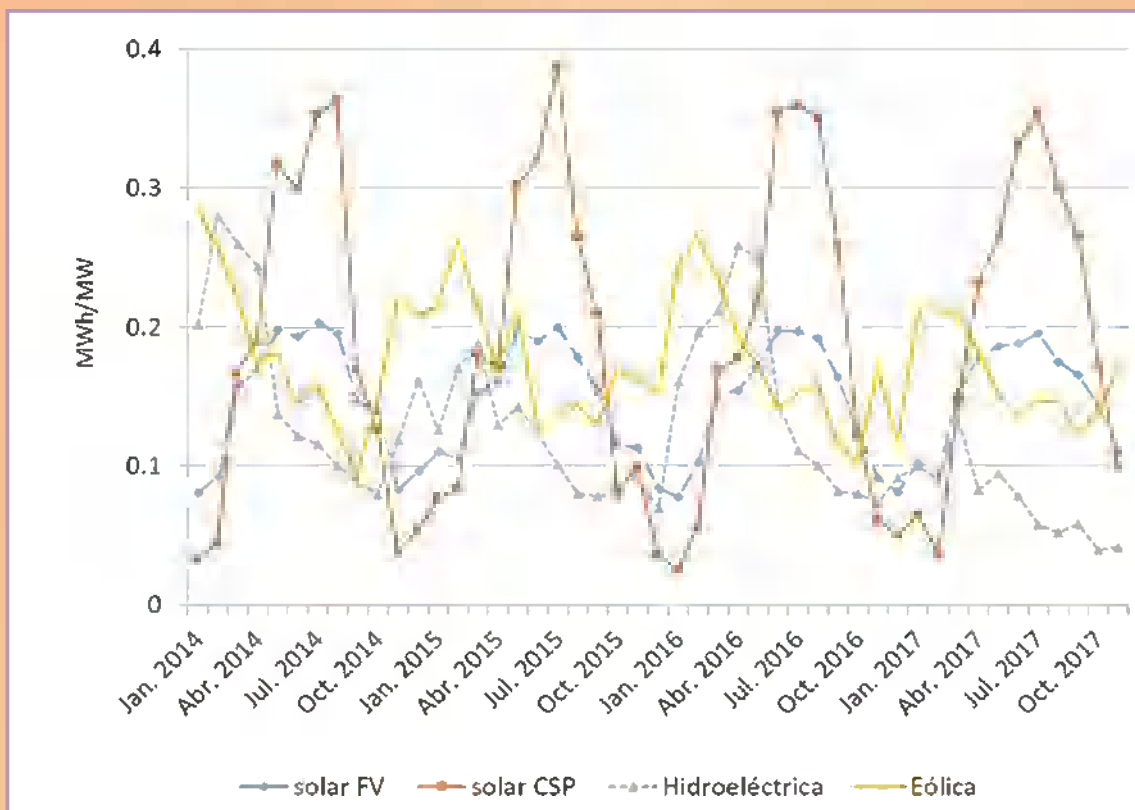
Características biofísicas de las energías renovables: (a) densidad energética neta (W_e/m^2) por fuente energética y/o tecnología (fuente datos: elaboración propia a partir de los datos recopilados por (Smil, 2015)). Como comparación se representa la irradiancia solar media global ($168 W/m^2$), obviamente las leyes de la termodinámica impiden un aprovechamiento del flujo solar superior a esta cifra, de hecho las cifras de aprovechamiento técnicamente posibles están claramente por debajo de esta magnitud (actualmente los paneles solares tiene una eficiencia media de 16-18% pero hay que tener en cuenta que es necesario dejar separación entre módulos por sombras y para dejar paso para operación y mantenimiento). (b) Intermitencia: generación de electricidad mensual en relación a la capacidad total instalada (MWh/MW) por tecnología renovable en España en los años 2014 al 2017 (fuente: elaboración propia a partir de datos de REE compilados en (de Castro and Capellán-Pérez, 2018)).

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

La necesaria y urgente transición a las energías renovables



Producción mensual por potencia instalada renovables (España)



Paradójicamente, las plantas de generación de energías renovables están compuestas de materiales que son recursos no renovables. La combinación de menor densidad energética e intermitencia hace que para la misma generación de energía los sistemas renovables incorporen en general muchos más materiales que las fósiles -excluyendo el propio material que se quema en la combustión que es enorme-, tanto en cantidad (entre entorno a dos veces y un orden de magnitud más) como en diversidad, (Capellán-Pérez et al., 2019b). Y aunque en principio muchos de estos puedan ser reciclados, principalmente minerales, en la práctica, aspectos como la falta de cultura e incentivos apropiados, así como el diseño centrado en optimizar el rendimiento de los equipos en vez de en el reciclado de sus numerosos minerales valiosos, hace que las tasas de reciclado de la mayoría de minerales de las tecnologías electrónicas y energéticas modernas sean muy bajas.

Éste es el caso por ejemplo del litio, del que se estima que se recicla actualmente a tasas de reciclado (en contenido de los inputs) de entorno del 15% (de Blas et al., 2020). Por otra parte, el escalado de las plantas de energías renovables

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

La necesaria y urgente transición a las energías renovables



requerirá grandes cantidades de minerales para instalar, fabricar y mantener todas las nuevas plantas y componentes asociados de generación de energías renovables, minerales que en grandes proporciones no se encuentran actualmente dentro de la economía y que por lo tanto a la fuerza deberán de ser minados.

Otros materiales como el cemento u hormigón no pueden ser reciclados y hoy en día no existen sustitutos sostenibles a nivel comercial. Así, la transición a energías renovables depende en gran medida de las energías fósiles para la extracción y procesado de materiales, la construcción de los dispositivos y centrales, su transporte, así como la operación y mantenimiento. No se trata tan sólo de que las renovables en un país como España tan sólo supongan entorno al 20% de la energía final, sino que existen diversos procesos para los que no existen actualmente alternativas comerciales no basadas en combustibles fósiles (diésel para transporte pesado, carbón para la fabricación del acero, plásticos, cemento y hormigón, etc). En palabras de Vaclav Smil:

“Ninguna estructura representa un símbolo más obvio de la generación de electricidad “verde” que las grandes turbinas eólicas, pero sus cimientos son de hormigón armado, sus torres, góndolas y rotores son de acero, y sus enormes aspas consumen mucha energía y son difíciles de reciclar: resinas plásticas, y todas estas piezas gigantes deben llevarse a los sitios de instalación en camiones (o barcos) de gran tamaño y montarse con grandes grúas de acero, y las cajas de engranajes de las turbinas deben lubricarse repetidamente con aceite. Estas turbinas generarían electricidad verdaderamente verde solo si todos estos materiales se fabricaran sin combustibles fósiles.” (Smil, 2022)

Aunque para la fabricación de acero, plásticos, cemento y hormigón se están planteando alternativas basadas en hidrógeno y bioplásticos, éstas enfrentan sus propias barreras y no son el objeto de este informe, que se centra principalmente en el análisis de los requerimientos minerales, que se refieren a cualquier material inorgánico natural que tiene una composición química (más o menos) definida y propiedades físicas características.

Para estimar correctamente el impacto neto en relación a la demanda de materiales de la transición energética, sería necesario restar aquella minería asociada a los combustibles fósiles que se dejarán de extraer en el futuro. Teniendo en cuenta que, mientras que en los depósitos de combustibles fósiles los materiales energéticos, ya se encuentran habitualmente altamente concentrados, para el caso de los minerales nos encontramos exactamente en la situación opuesta, ya que para la mayoría de minerales su ley de mena es baja (<20%) y para muchos elementos clave como el cobre, níquel, oro es <5% y habitualmente <1%.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

La necesaria y urgente transición a las energías renovables



Por ello tras la extracción son necesarios procesos metalúrgicos de concentración y refinado hasta llegar a materiales de alta pureza que son los usados en los procesos industriales. Además, la tendencia futura será decreciente por el agotamiento de aquellas menas de mayor ley, lo que puede reducir en varios factores y hasta uno o dos órdenes de magnitud la ley de mena de algunos de los minerales clave (Calvo et al., 2016; UNEP, 2013a).

Por otro lado, los impactos ambientales de un pozo de petróleo crudo convencional son muy diferentes a los asociados a la minería a cielo abierto del carbón, que también difieren sustancialmente de los asociados a la minería metálica, por lo que el impacto social y ambiental no es proporcional a la masa de materiales removida. Todos estos factores hacen que la comparación sea en la práctica compleja, y aunque algunos estudios anteriores lo han afrontado, lo han hecho deficientemente al no incluir todos estos factores en el análisis (por ejemplo: (Mathieu and Mattea, 2021)).

Así, la demanda esperada de minerales para ejecutar la transición energética plantea interrogantes en dos grandes campos:

(1) ¿Hasta qué punto la demanda de minerales para sistemas renovables incrementará la demanda de minerales respecto del total de toda la economía? ¿Podría, y en qué casos y bajo qué circunstancias, disparar la demanda de forma que en el futuro se produjera un problema de disponibilidad de minerales, bien por escasez geológica o porque la resistencia social a su extracción redujera las reservas efectivas?

(2) ¿Qué implicaciones socio-ambientales tendría la extracción de mayor cantidad de minerales en un mundo en el que la minería ya es un grave problema (UNEP, 2013a)? ¿De dónde se extraerán, qué poblaciones se beneficiarán y cuáles sufrirán sus impactos? ¿Podrían reproducirse esquemas de desigualdad y dominación Norte-Sur como los ya existentes actualmente? ¿Podría llegarse al extremo de que las guerras por el petróleo sean sustituidas por el cobre o litio?

El análisis de los requerimientos minerales de la transición energética es un campo incipiente pero que ya está indicando que podría incrementar sustancialmente la extracción de minerales y en algunos casos enfrentarse a restricciones de disponibilidad. Incluso instituciones como la Agencia Internacional de la Energía, WWF y la OECD se han interesado recientemente por esta temática, con un informe específico detallado en el que también prevén el incremento de la extracción masiva de materiales tanto metálicos como no metálicos en las próximas décadas (IEA, 2021; OECD, 2019; Simas et al.,

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

La necesaria y urgente transición a las energías renovables



2022).

La criticidad de los materiales es una prioridad en las políticas de la UE: <https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical> (ver lista actualizada en 2020 de la EU Critical Raw Materials (que combina aspectos de criticidad material y económica): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>). Como se puede ver en la figura de síntesis del informe (EU JRC 2020) **Figura 2**, tanto las renovables como la movilidad eléctrica aparecen entre las tecnologías y sectores considerados por la UE como estratégicos y para los que se tiene consciencia de su dependencia de una serie de materiales críticos.

Figura 2

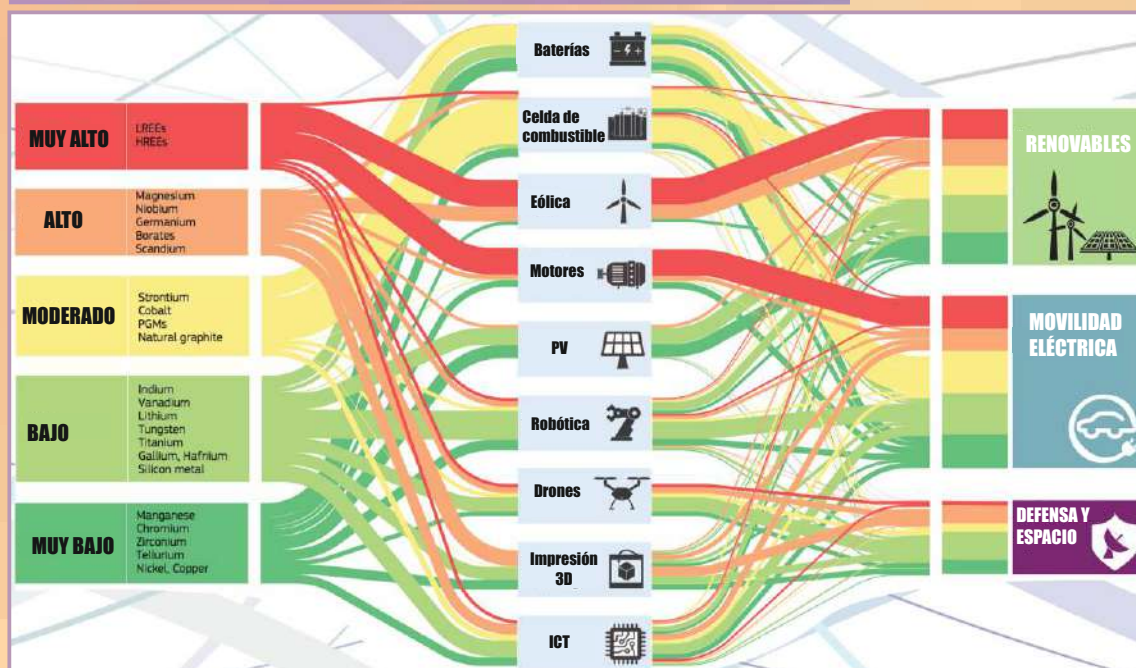


Figura 2 :

Representación semicuantitativa de los flujos de materias primas y sus riesgos de suministro actuales a las nueve tecnologías seleccionadas y tres sectores (basado en 25 materias primas seleccionadas). Fuente: (EU JRC, 2020).

La mayoría de los estudios se realizan desde un enfoque ingenieril en el que habitualmente queda fuera la temática de análisis de potenciales impactos socio-ambientales locales. Sin embargo, es claro que los resultados de los primeros serán la base de futuros trabajos en el segundo campo de investigación antes mencionado.

El presente informe se enmarca dentro de la primera categoría. Contribuimos al

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

La necesaria y urgente transición a las energías renovables



debate reportando resultados de un análisis realizado con un modelo de simulación energía-economía-medio ambiente a nivel mundial (MEDEAS-World) (Capellán-Pérez et al., 2020). Este modelo representa las relaciones principales entre demanda de bienes y servicios, energía, minerales, emisiones de efecto invernadero y cambio climático aplicado con el objetivo de estudiar las consecuencias de aplicar diferentes políticas.

En este estudio, se analiza qué ocurriría con la demanda a nivel mundial de una serie de minerales clave para la transición energética en el caso de que se implementaran dos estrategias de transición: **Crecimiento Verde** y **Decrecimiento**.

Asumiendo que se mejoran sustancialmente las tasas de reciclado actuales, se estiman las demandas primarias (a extraer de la mina) y secundarias (procedentes del reciclado). Es necesario tener en cuenta que existen diferentes definiciones de la criticidad de los materiales. Por ejemplo, la UE considera una amplia gama de factores que incluyen factores geopolíticos (estabilidad de los países exportadores de materiales), nivel de autosuficiencia de la UE, criticidad para sectores clave de la economía de EU, etc.

El presente trabajo no aborda cuestiones de comercio bilateral ni geopolíticas dada la ausencia de datos e información necesarios para realizar proyecciones robustas, así como la naturaleza del modelo usado (mundial agregado), y se centra en evaluar los requerimientos materiales para diferentes escenarios y la comparación con los niveles de reservas y recursos actualmente reportados.

Se finaliza el informe con una batería de propuestas y recomendaciones políticas.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

Estimando la demanda de minerales asociada a la transición energética



Para realizar estimaciones cuantitativas de las posibles demandas de materiales asociadas a la transición energética aplicamos en este estudio el modelo **MEDEAS-World**. Los modelos MEDEAS son un conjunto de modelos dinámicos y recursivos de simulación que han sido diseñado por el Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid ([GEEDS-UVa](https://geeds.uva.es)), desarrollados dentro del proyecto europeo de mismo nombre “*Modelling the Energy Development under Environmental And Socioeconomic constraints*” que tenía como meta proporcionar a los encargados de formular políticas nuevos instrumentos de modelización para evaluar mejor los impactos y limitaciones de la transición del sistema energético de la UE a uno más sostenible.

El objetivo de los modelos MEDEAS es entonces facilitar la evaluación de políticas que estudian la viabilidad de diferentes modelos de transición energética durante las próximas décadas. MEDEAS pertenece a la categoría de Modelo de Evaluación Integrada (MEI), llamados así porque aspiran a integrar todas las dimensiones relevantes de la interacción entre humanidad y naturaleza.

Para más información sobre el modelo ver el Anexo Metodológico I. MEDEAS ha sido ya aplicado al análisis de políticas de descarbonización del transporte (de Blas et al., 2020) (trabajo sobre el que nos basaremos aquí para la elaboración de escenarios), el impacto macroeconómico de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Nieto et al., 2020) o el impacto de la transición rápida a las renovables sobre la energía neta final que llega a la sociedad (o en otras palabras, la Tasa de Retorno Energética dinámica del sistema) (Capellán-Pérez et al., 2019b).

Otro objetivo de los modelos MEDEAS es facilitar a los ciudadanos la comprensión del problema de la sostenibilidad global, con el doble propósito de concienciarlos sobre la gravedad del problema y ayudarlos a comprender mejor la complejidad de las soluciones.

Para ello basado en los modelos MEDEAS se han diseñado distintas herramientas como por ejemplo el juego de simulación participativa *Crossroads* (Capellán-Pérez et al., 2019a) <https://geeds.es/global-sustainability-crossroads/>.

La **Figura 3** representa cómo se computa la demanda primaria de minerales (a extraer de la mina) en el modelo usado en este informe (MEDEAS-World): el crecimiento económico per cápita y el nivel de población determinan la demanda de bienes y servicios, que a su vez determinan una determinada demanda de energía y de minerales.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Estimando la demanda de minerales asociada a la transición energética

Por otro lado, el incremento de la capacidad de energías renovables instalada también contribuye al aumento de la demanda de minerales. Dependiendo de la tasa de reciclado de cada uno de ellos, se puede entonces computar la demanda primaria de cada mineral



Rangos típicos de densidad energética por tipo de fuente y/o tecnología

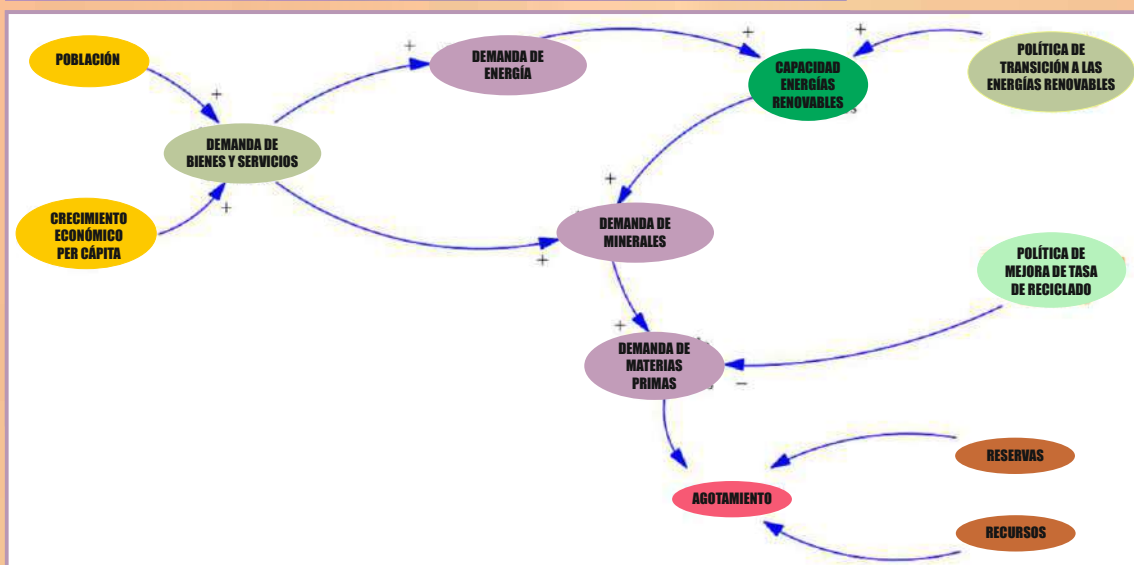


Figura3:

Diagrama simplificado que representa el modo de computación de la demanda primaria de minerales en el modelo MEDEAS-World, y la evaluación del eventual agotamiento (en rojo) de las reservas y recursos. En naranja se muestran las variables afectadas por políticas, y los símbolos (+) y (-) representan una relación positiva y negativa, respectivamente, entre variables.

Los requerimientos minerales asociados a las renovables se estiman a partir de una revisión detallada de la literatura para las tecnologías que tienen un mayor potencial techno-sostenible (IPCC, 2011; Smil, 2010) solar fotovoltaica (FV), solar de concentración (CSP), eólica terrestre y eólica marina; así como de las baterías para vehículos eléctricos (VE). Para la solar CSP y eólicas se considera una tecnología representativa, es decir, una tecnología actualmente dominante en el mercado y que se estima seguirá siéndolo en el futuro por sus buenas prestaciones técnicas. Sin embargo, para FV y baterías de vehículos eléctricos se baja a un nivel mayor de desagregación, ya que diferentes subtecnologías existentes en el mercado y con relevante potencial futuro tienen muy diferentes intensidades materiales para diferentes elementos.

Por otro lado, dadas las incertidumbres y carencias de datos a nivel mundial, se asume que la demanda de minerales del resto de la economía depende del PIB per cápita (cf. metodología aplicada en (Capellán-Pérez et al., 2019b)).

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Estimando la demanda de minerales asociada a la transición energética



Por simplicidad, se asume un tiempo de residencia medio en la sociedad de 40 años para todos los metales (datos inicializados procedentes del WORLD7), pasado este tiempo la chatarra es reciclada según tasas de reciclado correspondientes con la proporción de mineral reciclado al final de vida de los productos (EOL, “end-of-life”), considerando como nivel actual mundial la media del rango dado por la UNEP (UNEP, 2011a) (excepto para el litio como arriba enunciado). Es decir, una tasa de reciclado EOL de un mineral del 25% significa que, de cada 100 kg de residuo de este mineral, 25% son reciclados y 75% van a vertedero. Asumimos también por simplicidad una sustitución 1 a 1 de producción primaria por material reciclado, lo que también es optimista ya que en realidad en los procesos de reciclado se producen pérdidas materiales, además, no siempre el proceso de reciclado consigue obtener minerales de una pureza tan alta como es posible a partir de minerales vírgenes.

Los requerimientos materiales acumulados a lo largo del tiempo se comparan con los niveles de reservas y recursos estimados existentes actualmente. Generalmente el término “recursos” representa la cantidad de mineral (probado o geológicamente posible), que se supone se encuentran bajo tierra pero que no puede ser extraídos hoy en día por restricciones tecnológicas o económicas, pero que sí podrían serlo quizá en el futuro.

“Reservas” se refiere a la fracción de los “recursos” que se estima son recuperables con la tecnología y contexto económico actual. Como referencia se usan los datos de la USGS (USGS, 2017) complementados con otras fuentes (Emsley, 2001; Frenzel et al., 2016, 2014; Sverdrup and Ragnarsdottir, 2014; USGS, 2015) (ver Apéndice B en (Capellán-Pérez et al., 2019c) para más detalles).

Existe gran incertidumbre en relación a la futura disponibilidad de minerales; las estimaciones de reservas y recursos de minerales son aún más problemáticas que las de los combustibles fósiles (Capellán-Pérez et al., 2016), como pone de manifiesto para el caso español el informe “Minería Especulativa en España” (Ecologistas en Acción, 2019) Estimaciones que se puedan considerar relativamente robustas se encuentran limitadas a algunos minerales concretos que se han estudiado con más profundidad (por ejemplo el cobre (Northey et al., 2014)).

De hecho, aunque el concepto de “pico de petróleo” y otros combustibles fósiles se ha explorado y debatido en la literatura de forma extensa (Kerschner and Capellán-Pérez, 2017), ha habido en comparación mucha menos investigación centrada en el concepto de los picos de los minerales (Bardi, 2014; Bardi and Pagani, 2007; Valero and Valero, 2010). Estas limitaciones de datos e

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Estimando la demanda de minerales asociada a la transición energética



información nos llevan a realizar tres simplificaciones clave en el modelado que implican que los resultados obtenidos subestimen los potenciales impactos de la problemática de los minerales: **(1)** el modelo no considera posibles limitaciones de flujos (extracción anual), limitándose a considerar las reservas y recursos estáticos; **(2)** la eventual escasez de minerales no restringe el desarrollo económico en los modelos MEDEAS, al contrario del caso de los combustibles fósiles para los que existen fuentes de datos más fiables (Capellán-Pérez et al., 2020; de Blas et al., 2019; Nieto et al., 2019) y **(3)** al no considerar ningún límite a la extracción de materiales, estamos implícitamente asumiendo que nos podemos acercar e incluso agotar los recursos identificados actuales presuponiendo un hipotético avance permanente de la economía y la tecnología. Por otro lado, siempre existe un margen de incertidumbre en relación a posibles mejoras de la tecnología, que es abordado específicamente en la sección .

Para aplicar un escenario al modelo MEDEAS es necesario en primer lugar definir una narrativa futura con un horizonte temporal definido (en este caso 2050), y acorde con ella parametrizar los parámetros de escenarios, que son entradas externas editables por el usuario. La definición e implementación de esta narrativa debe ser lo más coherente posible. Así, es necesario parametrizar parámetros de muy diferente naturaleza:

- **Socioeconómicos:** los relacionados con economía y demografía, como por ejemplo, qué incremento de población se espera o incremento del PIB deseado, que distribución de las rentas entre capital y trabajo, con qué estructura económica e intensidad energética sectorial, etc.,
- **Energéticos:** los relacionados con el sistema energético, como por ejemplo el incremento que se desea impulsar de las diferentes tecnologías renovables para electricidad, calor y líquidos, incluyendo biocombustibles, así como qué restricciones de disponibilidad de recursos fósiles futuros se esperan. Para el caso de las tecnologías FV y de vehículos eléctricos, la asignación de subtecnologías es endógena dependiendo de la tasa de retorno energética y de la escasez relativa de materiales de cada una.
- **Materiales:** principalmente qué tasas de reciclado al final de la vida útil se piensa que se pueden alcanzar en el periodo estudiado.

Tanto el modelo estándar MEDEAS-World como todos los datos están libremente disponibles online (Pulido-Sánchez, 2022), aunque para la elaboración de este informe se ha construido una versión específica que incluye sobre la versión estándar las subtecnologías solares (Pulido-Sánchez, 2022) y de baterías eléctricas (Pulido-Sánchez et al., 2022).

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Requerimientos de minerales para selección de tecnologías energéticas

En esta sección se describen las tecnologías energéticas cuyos requerimientos materiales se estudian en detalle en este informe. Dado que existen cientos de tecnologías alternativas, es necesaria una simplificación para abordar el modelado futuro de la evolución del sistema energético tratando de capturar las tendencias principales y más representativas. Así, la selección se ha realizado en base a los siguientes criterios: **(1)** tecnologías renovables con mayor potencial (solar y eólica) (IPCC, 2011) y **(2)** sistemas auxiliares muy intensivos en materiales como redes de conexión y baterías para movilidad eléctrica.

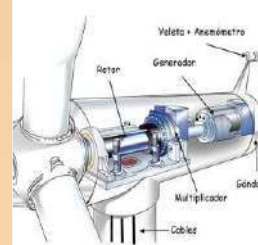
3.1. Selección tecnologías energéticas

Existe una gran diversidad de tecnologías y subtecnologías energéticas. Identificamos como subtecnología a una familia de tecnologías que generan el mismo tipo de energía bajo el mismo principio físico principal. Esta diferenciación es clave para analizar la criticidad de los materiales porque estas diferentes subtecnologías pueden tener muy diferentes intensidades de materiales (en cantidades y tipos de materiales), así como también rendimiento técnico (eficiencias, etc.).

Por ejemplo, las baterías de iones de litio contienen un ánodo de grafito (grafito flake, en escamas) y un cátodo que contiene litio. Los cátodos comunes incluyen LiMnO₂ (LMO) (que actualmente es una tecnología obsoleta pero que fue protagonista en los primeros vehículos eléctricos comerciales), y cuatro tipos que hoy han alcanzado la etapa comercial: dos tipos de NMC (622 y 811), NCA y LFP (las letras son las iniciales de los símbolos químicos de los minerales que incorporan: níquel (Ni), manganeso (Mn), cobalto (Co), aluminio (Al), Li (litio), Fe (hierro) y fósforo (P)). Dentro de las tecnologías fotovoltaicas, existen silicio (poli y mono) cristalino, diferentes tipos de películas delgadas (que no contienen silicio, pero sí una serie de metales críticos), etc.

A continuación, describimos la selección de tecnologías aplicada en este trabajo:

Las turbinas eólicas están caracterizadas por los siguientes elementos: torre, aspas unidas solidariamente al rotor, regulador de velocidad y orientación, y habitualmente un tren de potencia. Existen diferentes subtecnologías, agrupadas en dos grandes familias: generador asíncrono y generadores síncronos de imanes permanentes (Junne et al., 2020). Así, se utilizan los siguientes minerales: aluminio y cobre para el cableado interno y el rotor;



Las turbinas eólicas están caracterizadas por los siguientes elementos: torre, aspas unidas solidariamente al rotor, regulador de velocidad y orientación, y habitualmente un tren de potencia. Existen diferentes subtecnologías, agrupadas en dos grandes familias: generador asíncrono y generadores síncronos de imanes permanentes.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Requerimientos de minerales para selección de tecnologías energéticas

hierro, níquel y cromo para el acero inoxidable; así como las tierras raras disprosio y neodimio para los imanes permanentes. En este análisis asumimos la media ponderada de las tecnologías actuales para la eólica terrestre, y se asume como tecnología representativa de la eólica marina los generadores síncronos de imanes permanentes. Los imanes permanentes requieren de grandes cantidades de tierras raras para alcanzar mejor eficiencia y sobre todo una menor frecuencia de mantenimiento, lo que es especialmente interesante para la marina dada su peor accesibilidad.

Además, la eólica marina requiere generalmente de más inputs que la terrestre por su peor accesibilidad y mayor desgaste por la corrosión marina. La descripción detallada de los parámetros técnicos e intensidades materiales empleados para la eólica terrestre y marina se encuentra en (de Castro and Capellán-Pérez, 2020).

Un **parque fotovoltaico** está compuesto básicamente de módulos fotovoltaicos (que consisten en semiconductores que son capaces de convertir energía solar en electricidad), estructuras de soporte, y cableado tanto interno como de conexión a la red. Existen diferentes tecnologías de módulos fotovoltaicos. Hoy en día, la mayor parte (>90%) de las células FVs son fabricadas mediante silicio (principalmente mono y policristalino), que requieren de plata, cadmio, cobre, galio, indio, magnesio, níquel, plomo, selenio, estaño, telurio y por supuesto silicio (extraído de arena).

También existen otras tecnologías que permiten aligerar sustancialmente el peso de los módulos que consisten en una delgada capa semiconductor como la FV de telurio de cadmio (CdTe) o los CIGS (Copper Indium Gallium Selenide), que sin embargo no alcanzan en conjunto el 10% del mercado (ISE, 2019) Estas tecnologías de capa fina han aumentado significativamente los requerimientos de minerales como el cobre, indio, galio, selenio, cadmio, molibdeno y telurio.

Además, se requiere aluminio para las estructuras, para los marcos de los paneles, para los inversores y transformadores; hierro, níquel y cromo para los aceros inoxidables; magnesio y zinc para otras aleaciones; cobre para el cableado interno, inversores y transformadores. Así, para la FV, se realiza una selección de tecnologías basándose en la importancia de las tecnologías actuales, previsiones de futuro de las más relevantes, y que hayan alcanzado cierta madurez tecnológica.

De este modo se seleccionan cuatro subtecnologías, distinguiendo entre los diferentes requerimientos materiales de la FV sobre suelo y sobre tejado: silicio policristalino (poli-Si), silicio monocristalino (mono-Si) y dos de capa fina:



Un parque fotovoltaico está compuesto básicamente de módulos fotovoltaicos (que consisten en semiconductores que son capaces de convertir energía solar en electricidad), estructuras de soporte, y cableado tanto interno como de conexión a la red. Existen diferentes tecnologías de módulos fotovoltaicos.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Requerimientos de minerales para selección de tecnologías energéticas

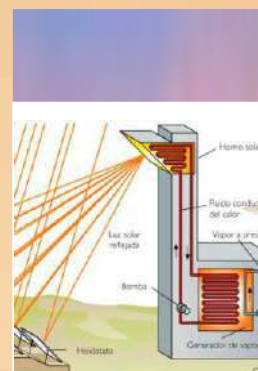
paneles de Indio cobre galio diseleniuro (CIGS) y de telurio de cadmio (CdTe). Se incluyen además de los materiales para los paneles fotovoltaicos, los materiales para inversores y transformadores, el montaje de los paneles y el cableado y conexiones.

Actualmente se están investigando otras tecnologías novedosas, como las perovskitas, denominadas así porque incluyen un compuesto estructurado de perovskita, que se espera serán baratas de producir y sencillas de fabricar, o las células orgánicas, que utilizan electrónica orgánica, una rama de la electrónica que trata con polímeros orgánicos conductores o pequeñas moléculas orgánicas, por lo que está potencialmente sujeta a bajos costos de producción. Sin embargo, ambas tecnologías aún deben superar barreras técnicas sustanciales en términos de estabilidad y eficiencia antes de ingresar a la etapa de mercado.

Mientras, los diferentes prototipos tienen diferentes intensidades materiales y la información no es transparente, por lo que son excluidas de este análisis. La descripción detallada de los parámetros técnicos e intensidades materiales empleados para la solar fotovoltaica se encuentra en (Pulido-Sánchez, 2022), que supone una mejora respecto del MEDEAS-World estándar que incluía una única tecnología que representaba la media ponderada de los requerimientos materiales de las subtecnologías actuales teniendo en cuenta su cuota de mercado (de Castro and Capellán-Pérez, 2020).

Las **plantas termosolares de concentración** se llaman así porque mediante espejos concentran los rayos de sol en un área pequeña, donde ese calor es usado para evaporar agua que se turbinan para obtener electricidad. Su ventaja respecto de la solar FV es que cuando se acopla un sistema de almacenamiento térmico son capaces de mantener una producción eléctrica durante horas tras la puesta del sol. No obstante, como muestra la **Figura 1b** la variabilidad estacional es incluso mayor que para el resto de renovables. Existen diferentes tecnologías: cilíndrico parabólico, discos Stirling, reflector fresnel lineal compacto y torre de energía solar. En este trabajo hemos tomado como referencia para estimar los requerimientos materiales la tecnología cilíndrico parabólica. De nuevo, en cuanto a requerimientos minerales, son necesarios acero/hierro aleado para las estructuras, aluminio para los reflectores, etc. La descripción detallada de los parámetros técnicos e intensidades materiales empleados para las plantas termosolares de concentración se encuentra en (de Castro and Capellán-Pérez, 2020).

Respecto de las baterías para movilidad eléctrica, se estiman los requerimientos minerales para cinco subtecnologías de almacenamiento de energía



Las plantas termosolares de concentración se llaman así porque mediante espejos concentran los rayos de sol en un área pequeña, donde ese calor es usado para evaporar agua que se turbinan para obtener electricidad. Su ventaja respecto de la solar FV es que cuando se acopla un sistema de almacenamiento térmico son capaces de mantener una producción eléctrica durante horas tras la puesta del sol.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Requerimientos de minerales para selección de tecnologías energéticas

eléctrica de litio (LMO, NMC622, NMC822, NCA y LFP) que se han considerado más relevantes en el transporte electrificado (teniendo en cuenta factores como las eficiencias, cuotas de mercado actuales y esperadas futuras, madurez tecnológica y disponibilidad de datos en abierto, etc.), así como para líneas de alta tensión adicionales para transportar la electricidad. Se incluyen en el análisis además aquellos elementos auxiliares que son imprescindibles para la carga de estas baterías como son los cargadores y las líneas eléctricas adicionales para unir los cargadores a la red ya existente, así como el cobre adicional que incorporan los vehículos eléctricos respecto de los de combustión interna debido a que incorporan elementos como el inversor, motor eléctrico, más cableado, etc. La descripción detallada de los parámetros técnicos e intensidades materiales empleados para las baterías de ion litio y sus sistemas auxiliares se encuentra en (Pulido-Sánchez et al., 2022), que supone una mejora respecto del MEDEAS-World estándar en el que sólo se incluía la tecnología LMO como tecnología representativa y sin sistemas auxiliares (Capellán-Pérez et al., 2020; de Blas et al., 2020).

Además de los requerimientos minerales, es importante tener en cuenta que para las centrales energéticas existen otros importantes inputs materiales en forma de cemento, plásticos (en los dispositivos electrónicos, cableados y otras estructuras), petróleo para el transporte de piezas, aceites para lubricantes de elementos móviles como rotores eólicos y seguidores solares, etc. que no son tan relevantes desde el punto de vista de la criticidad de los materiales y por ello no son estudiados aquí, pero sí lo son para analizar otras cuestiones como la Tasa de Retorno Energética de estas tecnologías y del sistema en su conjunto.

La **Tabla 1** muestra las fuentes dónde se puede encontrar la descripción detallada de los parámetros técnicos e intensidades materiales empleados para cada tecnología.

Tabla 1

Tecnología	Subtecnologías	Fuente
Solar fotovoltaica (FV)	mono-Si, poli-Si, CdTe, CIGS	(Pulido-Sánchez, 2022)
Solar CSP	Tecnología representativa: cilíndrico parabólica con almacenamiento térmico con sales	(de Castro and Capellán-Pérez, 2020)
Eólica terrestre	Media ponderada tecnologías actuales generadores síncronos y asíncronos	(de Castro and Capellán-Pérez, 2020)
Eólica marina	Tecnología representativa: generadores síncronos de imanes permanentes	(de Castro and Capellán-Pérez, 2020)
Baterías vehículos eléctricos	LMO, NMC622, NMC822, NCA, LFP	(Pulido-Sánchez et al., 2022)

Tabla 1:
Fuentes usadas para cada tecnología para los parámetros técnicos e intensidades materiales.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Requerimientos de minerales para selección de tecnologías energéticas

3.2. Intensidades materiales de las principales tecnologías energéticas

El modelo incluye datos en términos de kg/MW para cada tecnología energética modelada para más de 60 materiales, de los cuales nos centramos en este informe en los 22 más relevantes por razones de criticidad: aluminio, cadmio, cromo, cobalto, cobre, estaño, galio, grafito, indio, hierro/acero, litio, magnesio, manganeso, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio, telurio, titanio, vanadio y zinc.

La **Tabla 2** muestra los requerimientos para la selección de minerales analizados en este estudio en kg por cada MW instalado para cada tecnología de generación eléctrica incluyendo sus elementos auxiliares más significativos. Para la solar FV se muestran los requerimientos de las subtecnologías de silicio monocristalino y la de capa fina de telurio de cadmio (CdTe) sobre suelo como ejemplo, y se refiere a la **Tabla 17** de (Pulido-Sánchez, 2022) para la relación completa de intensidades materiales para todas las opciones analizadas.

Las intensidades FV incluyen los paneles fotovoltaicos, los materiales para inversores y transformadores, el montaje de los paneles y el cableado y conexiones.

Tabla 2

kg/MW	FV monocristalino suelo	FV CdTe suelo	Solar concentración CSP	Eólica terrestre	Eólica marina
Aluminio (Al)	13082	12976	2326	2823	10193
Cadmio (Cd)	0	85	0	0	0
Cobalto (Co)	0	0	0	0	0
Cobre (Cu)	2215	1642	3200	2700	22200
Cromo (Cr)	190	245	43200	0	0
Disproσιο (Dy)*	0	0	0	5	15
Estaño (Sn)	110	7	0	0	0
Galio (Ga)	0	0	0	0	0
Grafito	0	0	0	0	0
Hierro (Fe)	35017	44216	827600	211050	486000
Indio (In)	0	16	0	0	0
Litio (Li)	0	0	0	0	0
Magnesio (Mg)	6709	0	3000	0	0
Manganeso (Mn)	500	500	2000	0	0
Molibdeno (Mo)	0	21	200	109	99
Neodimio (Nd)*	0	0	0	61	183
Níquel (Ni)	1	0	19200	0	0
Plata (Ag)	21	0	13	0	0
Plomo (Pb)	62	0	21	21	21
Selenio (Se)	0	0	0	0	0
Telurio (Te)	0	98	0	0	0
Vanadio (V)	0	0	2	0	0
Zinc (Zn)	1135	1458	682	5044	10000
TOTAL	59043	61263	901444	221813	528711

Tabla 2: Intensidad material por unidad de capacidad instalada (kg/MW) para la construcción a lo largo de su vida útil de plantas FV, solar concentración, eólica terrestre y marina. Fuentes: (de Castro and Capellán-Pérez, 2020; Pulido-Sánchez, 2022).

*MEDEAS computa los requerimientos de Nd y Dy para eólica pero debido a la falta de datos disponibles, no la demanda del resto de la economía y por esta razón es excluida de los resultados de este informe.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Requerimientos de minerales para selección de tecnologías energéticas

Para las tecnologías solares, la primera observación a la vista de la **Tabla 2** es que estas plantas requieren de una mayor diversidad de minerales que la eólica. La segunda observación es que en términos relativos por MW instalado, en general, la solar de concentración es más intensiva que las otras tecnologías, y la eólica más intensiva en materiales que la solar FV sobre suelo.

Para la eólica, se observa que la tecnología marina requiere de muchos más materiales que la terrestre, tanto debido a que las estructuras deben de ser instaladas en lugares menos accesibles (mayor longitud de cableado y necesitan una estructura mayor y más robusta porque se anclan al suelo y tienen que salvar la profundidad del mar).

Así, el hierro/acero supone la mayor cantidad de minerales para construir las estructuras, seguidos del cobre y el aluminio y finalmente se necesitan minerales en menor cantidad como es el caso del níquel, neodimio y disprosio.

Para un megaparque eólico marino de 100 MW estaríamos hablando de órdenes de decenas de miles de toneladas para el hierro/acero, de miles de toneladas de aluminio, cobre y zinc, y de varias toneladas de varios otros materiales como molibdeno, neodimio o plomo.

Por otro lado, una planta típica solar fotovoltaica de 100 MW de un tamaño similar a las que se están planteando construir actualmente por toda nuestra geografía, requeriría del orden de miles de toneladas de hierro/acero y aluminio, centenares de toneladas de cobre, magnesio y zinc, decenas de toneladas de manganeso, estaño, níquel, así como otros numerosos minerales en menores cantidades. Para la CdTe se observa que es la única tecnología que demanda cadmio y telurio.

La **Tabla 3** muestra las intensidades materiales de los diferentes tipos de baterías consideradas.

Se puede ver que la batería LMO que actualmente ya es obsoleta pesa entorno al doble que las NMC y NCA, siendo la LFP la más pesada de entre las comerciales actuales. Respecto de su composición, se ve que la LMO y LFP no usan níquel ni cobalto, a costa de usar grandes cantidades de manganeso (LMO) y hierro y fósforo (LFP).

El modelo computa que diferentes vehículos necesitan baterías de diferentes tamaños en función del modo de transporte (bici eléctrica vs vehículo privado vs autobús de pasajeros).



Para la construcción de un megaparque eólico marino de 100 MW estaríamos hablando de órdenes de decenas de miles de toneladas para el hierro/acero, de miles de toneladas de aluminio, cobre y zinc, y de varias toneladas de varios otros materiales como molibdeno, neodimio o plomo.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Requerimientos de minerales para selección de tecnologías energéticas



Tabla 3

kg/MW	LMO	NMC-622	NMC- 811	NCA	LFP
Aluminio	1396,5	756	756	759,1	939
Cobre	807,2	468	468	463	543
Hierro	0	0	0	0	486
Litio	96	78	66	48	61
Manganeso	1422	120	60	0	0
Níquel	0	367	451	402	0
Cobalto	0	120	60	63	0
Fósforo	0	0	0	0	270
Grafito flake	865,8	442	442	385	524
Resto (plásticos, electrónica...)	1933,5	915,8	989,5	1168,8	1560,2
Oxígeno*	829,03	333,23	307,58	274,16	556,96
TOTAL	7350	3600	3600,1	3563,1	4940,1

Tabla 3: Intensidades materiales (kg/MW) de las baterías EV seleccionadas; basadas en una batería de 60 kWh con una potencia de 100 kW.

Fuente: (Pulido-Sánchez et al., 2022).

*La masa de oxígeno se ha encontrado por estequiometría de la composición de cada batería.

A mayores de las baterías para los vehículos eléctricos, y se consideran los materiales de los cargadores (cobre y hierro) y las líneas eléctricas adicionales (cobre, aluminio y acero) para unir los cargadores a la red ya existente, así como el cobre adicional que incorporan los vehículos eléctricos respecto de los de combustión interna (inversor, motor eléctrico, más cableado, etc.). Para detalles consultar (Pulido-Sánchez et al., 2022).



Una planta típica solar fotovoltaica de 100 MW de un tamaño similar a las que se están planteando construir actualmente por toda nuestra geografía, requeriría del orden de miles de toneladas de hierro/acero y aluminio, centenares de toneladas de cobre, magnesio y zinc, decenas de toneladas de manganeso, estaño, níquel, así como otros numerosos minerales en menores cantidades cada batería.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial

Una vez identificadas las intensidades materiales de las tecnologías más relevantes, surge la pregunta de cuál sería el requerimiento total de minerales para alcanzar un sistema 100% renovable. Existen diferentes respuestas a esta pregunta dependiendo del tipo de transición energética que se implemente. Por un lado, existen estrategias generales de sostenibilidad muy diferentes, como el paradigma del Crecimiento Verde vs. el del Decrecimiento, que incluyen también diferencias significativas a nivel técnico, como las existentes entre un modelo centralizado y descentralizado de generación de energía (Bauknecht et al., 2020).

4.1. Aplicación de escenarios a Modelos de Evaluación Integrada

MEDEAS es un modelo que representa muchas dimensiones: económica, energía, uso de la tierra, materiales, etc. a largo plazo. Esto hace que las simulaciones realizadas con el modelo estén inherentemente sujetas a un alto grado de incertidumbre proveniente de estas y otras dimensiones no incluidas en el modelo (basta pensar en el COVID o el impacto sobre la geopolítica mundial del resultado de las elecciones en EE.UU.). Además, como es bien sabido, cuanto más miramos hacia el futuro, la certidumbre se reduce.

Realizar simulaciones con modelos del tamaño de MEDEAS puede ser una tarea extremadamente complicada debido al alto número de parámetros e hipótesis de evolución incierta, así como una casi infinita combinación posible de medidas de política que pueden variar al mismo tiempo. En este sentido, la “metodología de escenarios” ofrece un enfoque para lidiar con el conocimiento limitado, la incertidumbre y la complejidad de las ciencias naturales y sociales y, aplicada a este tipo de modelos, puede usarse para agrupar las diferentes posibilidades futuras en escenarios coherentes y significativos.

Cada escenario se basa en una historia que representa una visión (cualitativa) arquetípica y coherente del futuro que puede ser vista positivamente por algunas personas y negativamente por otras. Cada una de estas líneas argumentales ya incluye implícitamente algunas hipótesis y políticas. Además, cada una de estas historias está impulsada por ciertas lógicas y motivaciones que son los drivers del modelo. Un ejemplo clásico dentro de los MEIs sería la búsqueda de un crecimiento del PIBpc del 2-3% anual con convergencia regional.

En un segundo paso, los escenarios de políticas se diseñan sobre los escenarios de referencia para agregar o mejorar los objetivos y medidas de políticas para



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial

alcanzar un conjunto ampliado predefinido de objetivos generales más allá de los que impulsan la historia. En los MEIs climáticos, un objetivo general ampliado predefinido típico es mantenerse por debajo de los 2°C para 2100. Esta metodología de escenarios ha sido ampliamente utilizada en Evaluaciones Ambientales Globales como la Evaluación de Ecosistemas del Milenio, la Perspectiva Ambiental Global del PNUMA o los sucesivos informes del IPCC - SRES , SSPs- (por ejemplo, (MEA, 2005; Riahi et al., 2017; SSP db, 2018; van Vuuren et al., 2012)).

Sin embargo, también debemos tener en cuenta que en estos marcos institucionales los gobiernos tienen voz (p. ej., derecho de veto en el IPCC) y los escenarios que surgen de estos procesos institucionales no pueden, por lo tanto, considerarse como resultados científicos "puramente" imparciales (p. ej., (Girod et al., 2009)). Por lo tanto, esto también debe tenerse en cuenta al desarrollar escenarios.

Es clave comprender que el poder de los IAM no es el poder predictivo, sino más bien la comparación de los resultados obtenidos al aplicar diferentes políticas en diferentes contextos plausibles y evaluar cuáles serían las más beneficiosas en una sucesión de ejercicios hipotéticos. Los modelos MEDEAS funcionan bajo la lógica de "escenarios adaptativos": al comienzo de la simulación hay algunas tendencias + políticas actuales que se espera que sucedan dentro de un contexto general determinado (argumento), pero luego las realimentaciones pueden o no permitir que las tendencias y políticas actuales realmente se prolonguen hacia el futuro.

En este sentido, como ya se ha comentado, los modelos MEDEAS se centran especialmente en las limitaciones biofísicas (p. ej., disponibilidad de tierra, agua, minerales y energía) y socioeconómicas (p. ej., estructura económica, ingresos disponibles). Su aplicación permite identificar posibles cuellos de botella, límites, vías imposibles o irrealistas, incoherencias de las narrativas o las políticas con los objetivos pre-establecidos, etc.

Por supuesto, es imposible desarrollar un modelo con pleno poder predictivo ni pretendemos lograrlo, y además en el mundo real si la narrativa pasa a ser inviable en un punto dado del futuro habrá cambios en el entorno sociocultural (que nuestro modelo no está preparado ni pretende capturar) que desviará la trama de la establecida inicialmente.

Sin embargo, este tipo de cambios están más allá del alcance de esta herramienta de los MEI y pertenecen a la discusión sobre los límites del modelado para el asesoramiento de políticas.



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial

4.2. Definición de escenarios de transición a 2050

Para ejecutar MEDEAS en el contexto de los requerimientos materiales de la transición energética, sugerimos tomar tres narrativas como puntos de referencia, un escenario de continuación de tendencias actuales, uno basado en los principios del Crecimiento Verde, y otro basado en las ideas del Decrecimiento.

Se configurarán ambos escenarios alternativos buscando la mayor coherencia con sus principios y medidas políticas, de forma que por diferentes caminos lleguen a alcanzar al menos un 90% de la electricidad y un 70% del total de energía final de origen renovable en 2050. En este estudio se desactivan los impactos climáticos con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados.

La estrategia del Crecimiento Verde se basa en incentivos de mercado y la hipótesis de que el crecimiento de la riqueza general irá repercutiendo en todos los agentes económicos (globalización, concentración de empresas para lograr economías de escala, reglas de equilibrio público bastante estrictas, etc.), una mejora sustancial de la eficiencia y tasas de reciclado, electrificación del transporte, etc. En suma, un escenario como el habitualmente propuesto por las instituciones como solución a la crisis ambiental (European Commission, 2011; OECD, 2018, 2011; UNEP, 2011b; World Bank, 2012).

Por otro lado, las ideas del Decrecimiento se basan en la crítica a la viabilidad de la estrategia del Crecimiento Verde (relación entre crecimiento económico e impactos ambientales, efecto rebote generalizado tras mejoras de eficiencia, y el cambio de paradigma que supone vivir en un “mundo lleno” vs “mundo vacío” de la abundancia) y proponen la transición, a través de la reducción gradual y equitativa del rendimiento material, a una economía cuantitativamente más pequeña y cualitativamente diferente (incluidas las políticas fuera del mercado) que respeta el medio ambiente, aumenta el bienestar humano y busca la equidad social (D'Alessandro et al., 2020; Hickel et al., 2021; Keyßer and Lenzen, 2021; Wiedmann et al., 2020).

La propuesta de esta estrategia está más centrada en países de altos ingresos y gran consumo energético y material dado que a nivel mundial, entorno al 20% de la población vive en los países más ricos (donde por cierto la correlación entre la actividad económica/rendimiento material y el bienestar se rompió hace mucho tiempo) siendo ampliamente responsable del ~80% del consumo de recursos y los impactos ambientales a nivel mundial. Las ideas decrecentistas también beben de fuentes de países más pobres como el post-desarrollo



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial

(Gerber and Raina, 2018).

Es necesario remarcar que, hasta muy recientemente, la comunidad de modelos de evaluación integrada y el IPCC no han considerado probables los escenarios de postcrecimiento debido al hecho de que son políticamente más radicales y a priori más difíciles de implementar dado el contexto actual (Hickel et al., 2021).

4.3. Parametrización de escenarios

Para ser analizadas mediante herramientas cuantitativas como un MEI, es necesario traducir de forma coherente estas narrativas conceptuales en números. Cada modelo tiene dos tipos de entradas: parámetros del modelo (que se asumen constantes en todas las simulaciones y representan su estructura fija), y parámetros de escenarios (que son aquellos que nos permiten simular diferentes hipótesis y políticas). Entre los parámetros de escenarios, asumimos para los tres escenarios simulados algunas

- Entradas y supuestos comunes para todos los escenarios (ver Anexo Metodológico II): tendencias de población medias, estructura económica, potenciales energéticos, etc.
- Entradas y supuestos diferentes para cada escenario. Se han diseñado tres escenarios que combinan diferentes niveles de penetración de energías renovables y vehículos eléctricos hasta el 2050.

Los tres escenarios simulados se pueden describir como sigue:

1- Tendencias: se proyectan las tendencias actuales para todos los parámetros de escenarios del modelo. Este es el escenario que sirve de referencia para evaluar el desempeño de los escenarios alternativos propuestos.

2- Crecimiento Verde: continuación del crecimiento económico, una mejora sustancial de la eficiencia y tasas de reciclado, se acelera la implantación de infraestructuras de captación de energía renovable, etc. Este es un escenario hipotético de muy alta electrificación en el transporte terrestre. Para 2050, se supone que todos los automóviles, autobuses y motocicletas personales, así como los vehículos livianos, serán reemplazados por vehículos eléctricos de batería y que el 80% de los vehículos pesados serán híbridos. Para solar FV se asume que se seguirá dando prioridad a las instalaciones sobre suelo y que los

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial

paneles del futuro alcanzarán muy altas eficiencias.

4- Decrecimiento: este escenario asume la reducción de la demanda general de transporte de pasajeros y carga para las personas más acomodadas (que concentran hoy la mayor parte de la demanda de transporte a nivel mundial), combinado con un cambio modal de transporte privado a modos ligero y público y tren para mercancías (Alexander and Yacoumis, 2018; Cosme et al., 2017; Kerschner et al., 2018; Moriarty and Honnery, 2008)

Este escenario promueve la movilidad personal basada principalmente en vehículos eléctricos muy livianos. La mayoría de los automóviles personales son reemplazados por vehículos eléctricos de dos ruedas (60%), bicicletas eléctricas (20%) y modos no motorizados (8%). Los vehículos ligeros pasan a la electricidad. Los vehículos de camiones pesados todavía se basan en combustibles líquidos debido a las limitaciones para generalizar baterías pesadas a gran escala, pero se asume un cambio modal de camiones pesados ICE a ferrocarril eléctrico del 30%, por lo que la participación de la actividad de transporte de carga cubierta por ferrocarril eléctrico aumenta del 30% al 60% actual para 2050.

La demanda de transporte doméstico se reduce considerablemente respecto de los dos escenarios anteriores debido a cambios profundos asumidos en los patrones de movilidad cultural (reducción promedio del 60 % para el transporte terrestre y marítimo, y del 85 % para el transporte aviación vs demanda de hogares 2020). También se implementa un cambio modal de camiones pesados a ferrocarril.

En cuanto a solar FV, se da prioridad a las instalaciones sobre tejado y se asume que se instalarán tecnologías más sencillas por lo que se alcanzará una eficiencia de los paneles como en el escenario de tendencias actuales. Este escenario asume el contexto de un futuro donde se realizan esfuerzos serios y coordinados para cambiar la actual economía orientada al crecimiento hacia una que satisfaga las necesidades humanas sin la necesidad de un crecimiento continuo, como el que defiende el paradigma científico del Decrecimiento.

Este escenario apunta a una economía de estado estacionario de \$5,500 en promedio global per cápita para 2050. Los cambios en la planificación urbana no se modelan dada la escala global del modelo aplicado, que no representa explícitamente las ciudades y la estructura de las áreas urbanas.

Además, en los dos escenarios alternativos de Crecimiento Verde y Decrecimiento se asume que las tasas actuales de reciclaje de EOL (tomadas de



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial

(UNEP, 2011a), ver **Tabla 4**, se duplicarán en 2050 con la excepción de los que actualmente están por debajo del 10% para los que se establecen una meta del 30%; considerando un máximo para todos ellos del 85% para tener en cuenta límites termodinámicos y dificultades técnicas para alcanzar 100% reciclaje para todos los productos y procesos. Suponemos que una combinación de tecnologías de reciclaje llegaría a fase comercial para generar las tasas de reciclaje objetivo para cada metal.

La **Tabla 4** recoge los principales supuestos específicos para cada escenario simula.

Tabla 4

		Tendencias	Crecimiento Verde	Decrecimiento
SOCIOECONOMÍA Y GESTIÓN DE LA DEMANDA				
PIBpc planeado (crecimiento anual)		1.4%/año	1.4%/año	Economía de estado estacionario en ~5.500 2009 US\$ per capita***
Gestión demanda transporte hogares (porcentaje vs demanda hogares de 2020)	Terrestre	No	No	-60%
	Marino y fluvial	No	No	-60%
	Aéreo	No	No	-85%
ENERGÍA				
Mejoras en la eficiencia energética final por sector (intensidad energética final)		Tendencias actuales	Aceleración media	Tendencias actuales
Potencial tecno-sostenible solar (Mha)		100	200	100
Eficiencia paneles FV (%)		Media	Alta	Media
Crecimiento potencia instalada renovables		Tendencias actuales	Más rápido	Más rápido
Crecimiento biocombustibles (tierras agrícolas, tierras marginales y residuos)		Tendencias actuales	Más rápido	Tendencias actuales
Almacenamiento eléctrico: bombeo hidráulico (TWe*)		0.25	0.5	0.25

Tabla 4: Entradas y supuestos específicos para cada escenario simulado (las metas corresponden al año 2050). Ver Anexo II para las entradas y supuestos comunes a todos los escenarios. Parametrización como en De Blas et al. (De Blas et al., 2020), excepto los ítems marcados con “ψ”. Las cuotas representan el porcentaje del número de vehículos.

TRANSPORTE					
Vehículos de los hogares (%)	4-ruedas	líquidos	15.0%	0.0%	2.2%
		eléctricos	35.0%	66.0%	9.6%
		híbridos	10.0%	0.0%	0.1%
		gas	6.0%	0.0%	0.1%
	2-ruedas	líquidos	6.8%	0.0%	0.0%
		eléctricos	27.2%	34.0%	60.0%
	Sustitución adicional	bicis eléctricas	0.0%	0.0%	20.0%
No-motorizados		0.0%	0.0%	8.0%	
Transporte mercancías pesado carretera (%)	líquidos	99.8%	20.0%	98.0%	
	híbridos	0.1%	80.0%	1.0%	
	gas	0.1%	0.0%	1.0%	
Transporte mercancías ligero carretera (%)	líquidos	23.0%	0.0%	18.0%	
	eléctricos	53.0%	100.0%	80.0%	
	híbridos	15.0%	0.0%	1.0%	
	gas	9.0%	0.0%	1.0%	
Autobuses (%)	líquidos	23.0%	0.0%	19.0%	
	eléctricos	53.0%	100.0%	40.0%	
	híbridos	15.0%	0.0%	40.0%	
	gas	9.0%	0.0%	1.0%	
Trenes (%)	líquidos	50.0%	0.0%	0.0%	
	eléctricos	50.0%	100.0%	100.0%	
Cambio modal transporte modal carretera (% incremento trenes)			0.0%	0.0%	30.0%

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial



Tabla 4

PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS				
Incremento anual eficiencia paneles (%)		+0.3%/yr	+0.4%/yr	+0.3%/yr
Proporción deseada de instalaciones en tejado vs total (%)		25%	25%	75%
MATERIALES				
Tasa de reciclado fin de vida EOL(%)	Aluminio (Al)	56.0%	85.0%	85.0%
	Cadmio (Cd)	15.0%	30.0%	30.0%
	Cobalto (Co)	32.0%	64.0%	64.0%
	Cobre (Cu)	48.0%	85.0%	85.0%
	Cromo (Cr)	85.0%	85.0%	85.0%
	Estaño (Sn)	75.0%	85.0%	85.0%
	Galio (Ga)	0.5%	30.0%	30.0%
	Grafito	0.5%	30.0%	30.0%
	Indio (In)	0.5%	30.0%	30.0%
	Hierro/acero (Fe)	71.0%	85.0%	85.0%
	Litio (Li)	15.0%	30.0%	30.0%
	Magnesio (Mg)	39.0%	78.0%	78.0%
	Manganeso (Mn)	53.0%	85.0%	85.0%
	Molibdeno (Mo)	30.0%	60.0%	60.0%
	Niquel (Ni)	60.0%	85.0%	85.0%
	Plata (Ag)	63.5%	85.0%	85.0%
	Plomo (Pb)	73.50%	85.0%	85.0%
	Telurio (Te)	0.5%	30.0%	30.0%
	Vanadio (V)	0.5%	30.0%	30.0%
	Selenio (Se)	0.5%	30.0%	30.0%
Zinc (Zn)	39.5%	79.0%	79.0%	

*1 TWe = 8760 TWh en un año.

4.4. Resultados

En primer lugar, la **Figura 4** muestra la evolución de las capacidades totales de las tecnologías que analizamos en este informe para cada escenario simulado hasta 2050.

Se pueden observar grandes diferencias entre diferentes escenarios y tecnologías. El escenario de Crecimiento Verde es aquel que aumenta más la capacidad instalada, sobre todo de solar FV y de baterías eléctricas.

Entre aquellas para la generación de energía destaca la solar FV con en torno a 75, 45 y 35 TW instalados en 2050 para los escenarios de Crecimiento Verde, Tendencias y Decrecimiento, respectivamente.

Hasta aproximadamente el año 2035 se mantiene la proporción del 50% para solar FV sobre tejado y sobre suelo, cuando se satura el potencial sobre tejado (compartido con solar térmica) y entonces baja hasta una proporción de 1/3 en el de decrecimiento y 15% en los de crecimiento.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial

El gran ritmo de crecimiento de la eólica le hace alcanzar su potencial tecnosostenible¹ mundial hacia el año 2040, lo que se traduce en entre 5 y 6 TW instalados (frente al actual 1 TW). La CSP es una tecnología minoritaria en todos los escenarios simulados dada su baja TRE. Las diferentes estrategias de descarbonización del transporte se visualizan en la potencia agregada de las baterías eléctricas de los vehículos de transporte. El escenario de Crecimiento Verde alcanza los 300 TW en 2050 y el de Decrecimiento también crece sustancialmente prácticamente alcanzando 50 TW en 2050.

Figura 4

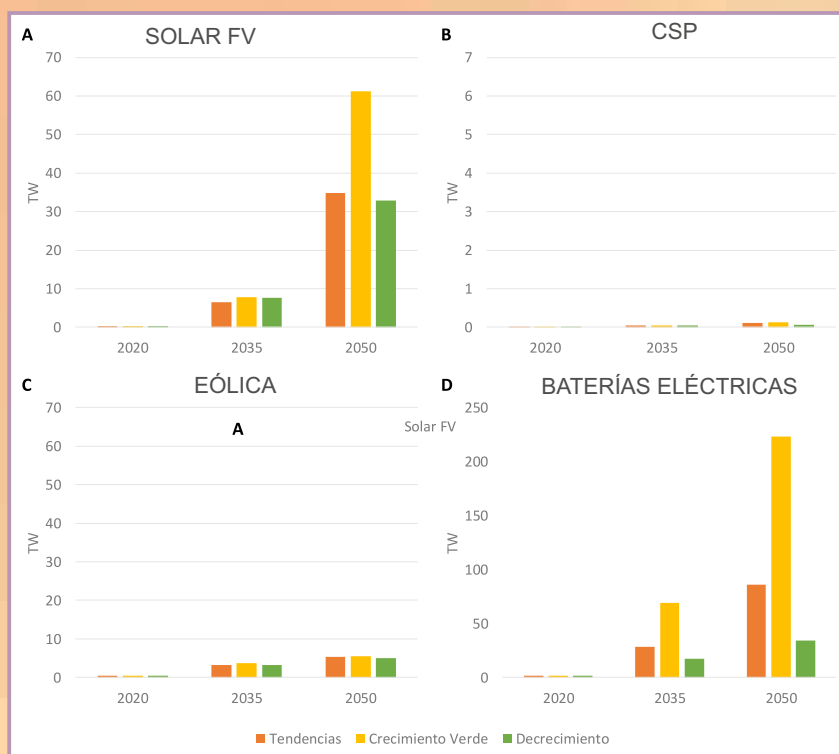


Figura 4: Capacidades anuales en operación para las tecnologías estudiadas y cada escenario. Gráficas tienen diferente escala en el eje Y. La capacidad de solar FV incluye tanto suelo como tejado, así como 4 subtecnologías de paneles estudiadas: silicio policristalino, silicio monocristalino, indio cobre galio diseleniuro (CIGS) y telurio de cadmio (CdTe). Las baterías eléctricas son exclusivamente para movilidad eléctrica e incluyen las 5 subtecnologías estudiadas: LMO, NMC-622, NMC- 811, NCA y LFP.

¹ Se pueden definir diferentes tipos de potenciales para las energías renovables. Potencial tecnosostenible es aquel que combina tanto restricciones técnicas como de sostenibilidad. El potencial teórico es el flujo de energía teóricamente disponible en toda la Tierra (por ejemplo, el contenido de energía de las velocidades del viento o la radiación solar a escala global) y consiste en el límite superior físico de la energía de una determinada fuente sin restricciones; el potencial geográfico es el potencial teórico en áreas que se consideran aptas y disponibles para esta producción, es decir, en áreas que no están excluidas por otros usos/coberturas del suelo incompatibles y/o por restricciones establecidas en las características locales, como la elevación y el viento promedio mínimo. El potencial técnico es el potencial geográfico después de tener en cuenta las pérdidas de la conversión del flujo de energía primaria extraíble a portadores o formas de energía secundaria (electricidad, combustible) considerando las tecnologías actuales y/o previsibles; y el potencial sostenible cubre todos los aspectos de la sostenibilidad, que normalmente requiere una cuidadosa consideración y evaluación de diferentes aspectos ecológicos y socioeconómicos. La diferenciación del potencial sostenible se desdibuja, ya que los aspectos ecológicos pueden ya haber sido considerados para el potencial tecnológico o económico, según el autor. Da cuenta de criterios de sostenibilidad como la conservación de la biodiversidad (ejemplos típicos serían la exclusión de áreas protegidas y/o áreas sensibles para especies amenazadas) o la limitación de los impactos ambientales asociados cuando se amplía significativamente una tecnología FER determinada.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial

Para entender la demanda de materiales de aquellas tecnologías para las que se han considerado endógenamente subtecnologías, la solar PV y baterías de vehículos eléctricos, se representa la contribución acumulada para 2030 y 2050 de cada una de ellas.

La **Figura 5** muestra la contribución acumulada de cada subtecnología de batería eléctrica para vehículos eléctricos por escenario para 2030 y 2050. El modelo proyecta a 2030 un reparto bastante repartido entre las tecnologías existentes hoy en día, incluyendo el de decrecimiento más LFP y LMO. A 2050 la tecnología dominante en todos los escenarios es la LFP debido a que evita aquellos minerales más críticos (níquel y cobalto) y tiene un mejor rendimiento de almacenamiento energético (Energy Stored on energy Invested, ESOI, el equivalente a la TRE para el almacenamiento) que la LMO.

Figura 5

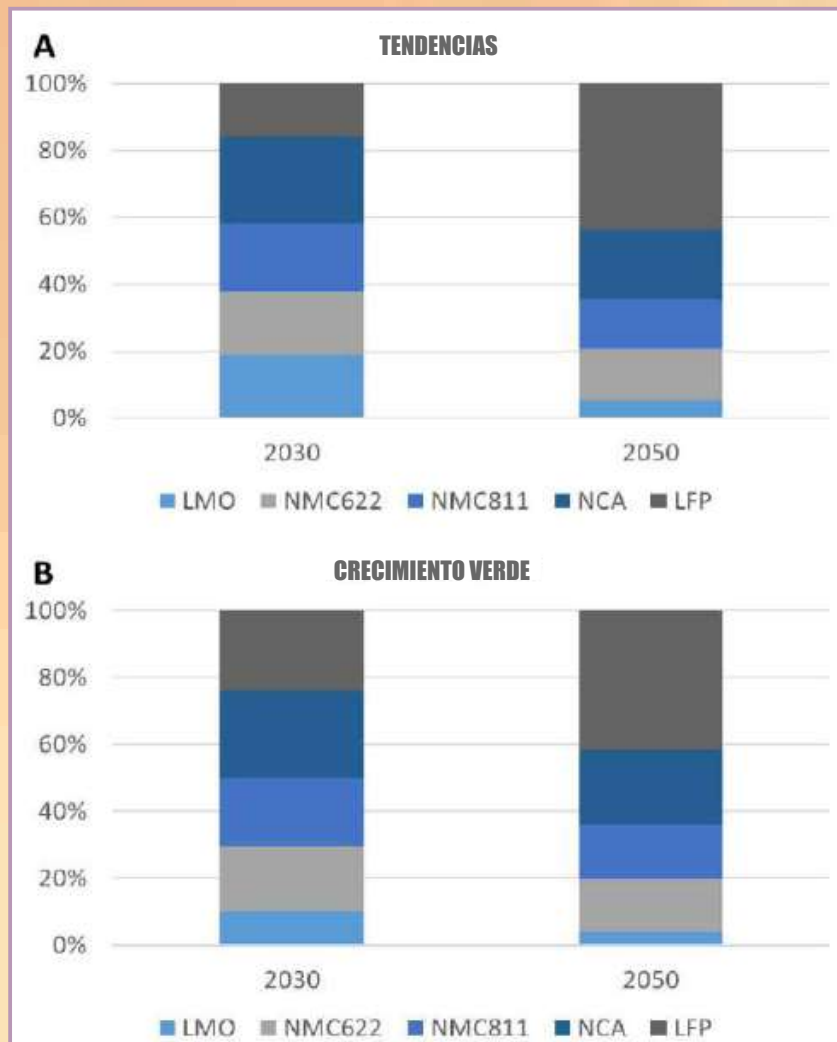


Figura 5:

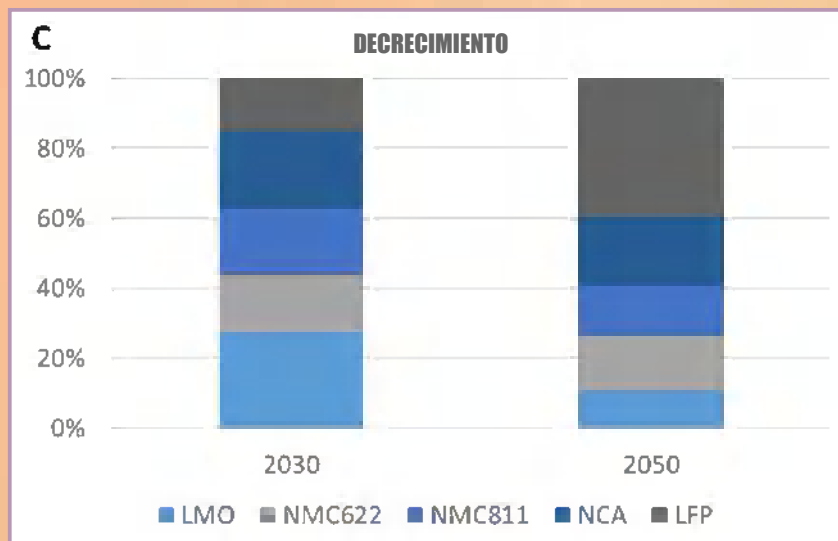
Contribución acumulada de cada subtecnología de batería eléctrica para vehículos eléctricos por escenario para 2030 y 2050

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial

Figura 5



La **Figura 6** muestra la contribución acumulada de cada subtecnología de solar fotovoltaica sobre suelo por escenario para 2030 y 2050. El reparto para solar fotovoltaica sobre tejado es similar que para suelo (<5% para la mayoría de casos) dado que la mayor contribución a la función de asignación la realiza la escasez mineral frente al diferente EROI de FV sobre tejado y suelo.

A 2030 se mantiene el predominio de las tecnologías basadas en silicio, sin embargo para 2050 las de capa fina aumentan su contribución.

Esto es debido a que todas las subtecnologías solares sufren de escasez de minerales relevantes y por el mejor EROI de las de capa fina el modelo proyecta una penetración de éstas últimas.

No obstante, es necesario remarcar que la función de asignación no tiene en cuenta características particulares de los paneles FV de capa fina como su mayor precio actual que contribuyen a que aunque teniendo mejor EROI su cuota de mercado sea reducida y limitada principalmente a una serie de usos específicos, dado que el modelo no estima precios de las tecnologías a futuro la contribución de este factor a futuro es una incógnita.

Como se ha explicado en la sección metodológica, para poder identificar potenciales riesgos de escasez futura, en este trabajo comparamos la extracción primaria acumulada (a extraer de la mina) durante el periodo estudiado con los niveles de reservas y recursos estimados actualmente.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial



Figura 6

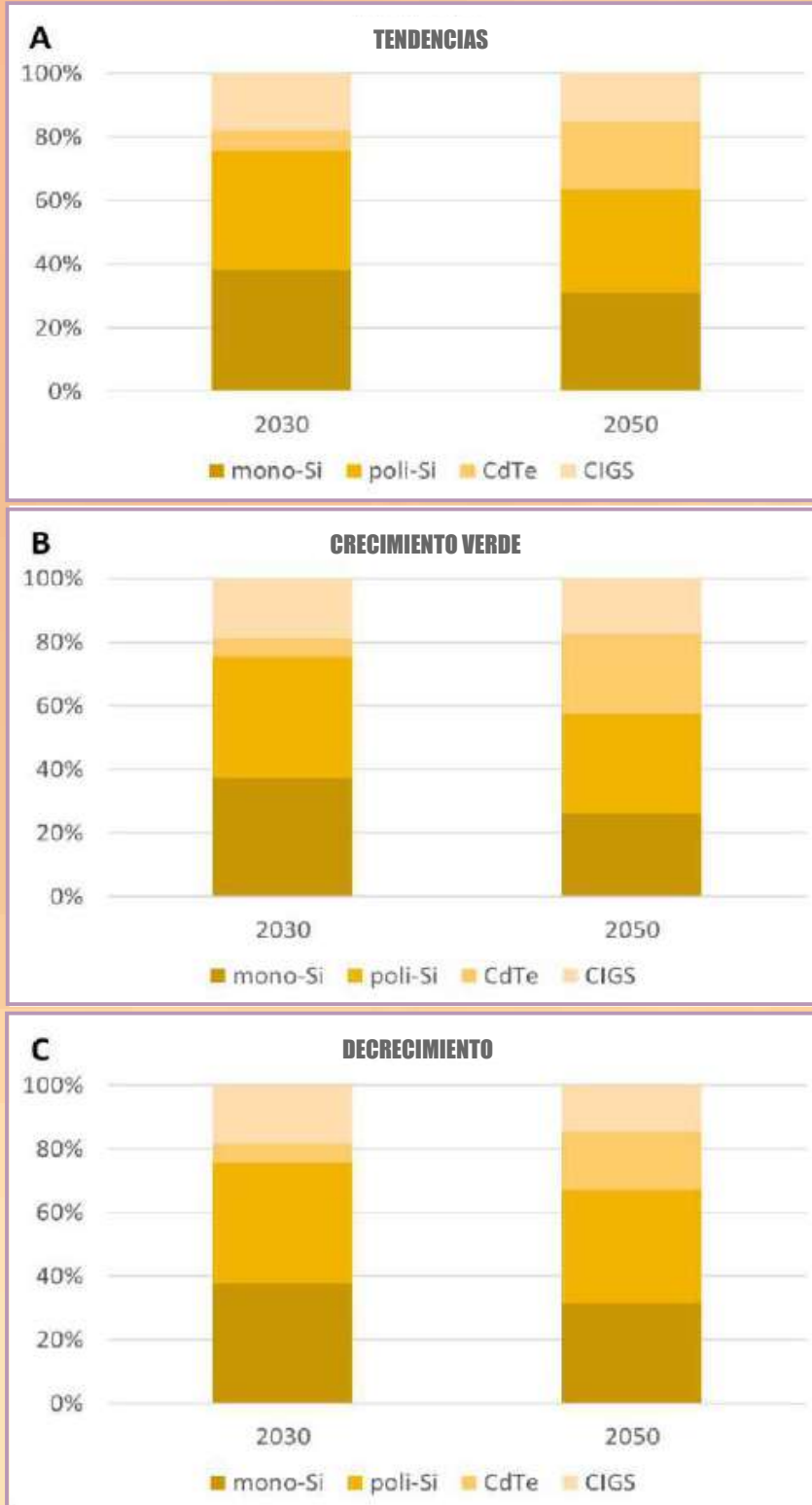


Figura 6:

Contribución acumulada de cada subtecnología de solar fotovoltaica sobre suelo por escenario para 2030 y 2050. El reparto para solar fotovoltaica sobre tejado es similar (<5% para la mayoría de casos) dado que la mayor contribución a la función de asignación la realiza la escasez mineral frente a la diferente EROI de FV sobre tejado y suelo.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial

Recordamos también, que, dadas las limitaciones de datos, por simplicidad se consideran las reservas y recursos estáticos y la disponibilidad de minerales no restringe el desarrollo económico en los modelos MEDEAS, al contrario del caso de los combustibles fósiles donde sí se representa en el modelo que la eventual escasez energética afecte a la producción económica.

La **Figura 7** y **Figura 8** muestran la extracción acumulada (2015-2050) de materiales desagregada para tecnologías energéticas (solar CSP, solar FV, eólica y baterías eléctricas) y resto de la economía en comparación al nivel de reservas y recursos estimados actualmente para cada escenario: **(A)** Tendencias, **(B)** Crecimiento Verde y **(C)** Decrecimiento. Recordamos que cada escenario ha sido configurado buscando la mayor coherencia con sus principios y medidas políticas, de forma que por diferentes caminos lleguen a alcanzar al menos un 90% de la electricidad y un 70% del total de energía final de origen renovable. De estas figuras se pueden extraer las siguientes consideraciones:

Requerimientos materiales totales vs disponibilidad. En los 3 escenarios:

- Para 3 materiales la extracción acumulada superaría el actual nivel de recursos: indio, telurio y selenio. Estos materiales se usan en las tecnologías solares de capa fina CIGS y CdTe, pero no en las de silicio cristalino.
- Para 14 materiales la extracción acumulada superaría el actual nivel de reservas. Además del indio, telurio y selenio: cadmio, cobalto, cobre, estaño, galio, grafito flake, manganeso, molibdeno, níquel, plomo y zinc. Estos materiales son requeridos por todas las tecnologías estudiadas en este informe.
- Cobre: la transición a las tecnologías renovables intensificará particularmente la demanda de cobre, la base de la infraestructura de comunicaciones en las sociedades modernas, requiriendo entorno al 25% de las actuales reservas y 10% de los recursos globales. Sin embargo, nuestro análisis no ha considerado el total de los requerimientos de materiales para nuevas líneas de alta tensión; su consideración habría aumentado esas ratios (Deetman et al., 2021). Por ejemplo, García-Olivares et al., – encontraron considerando este efecto que se podrían necesitar entorno al 60-70% de las actuales reservas.

Por tecnología energética respecto de la demanda total de la economía:

- La solar FV representa una parte relevante de los requerimientos totales de galio, indio, magnesio, plata, selenio y telurio (principalmente tierras de las

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial

tecnologías de capa fina),), y en menor medida de aluminio, cadmio y estaño. Por ejemplo, un estudio reciente concluyó que existe una relación estadísticamente significativa entre la expansión de los parques fotovoltaicos por todo el mundo en los últimos años y el incremento del precio de la plata (Apergis and Apergis, 2019). De hecho, nuestros resultados indican que aproximadamente un 18% de la demanda global de plata en 2016 fue para fotovoltaica.

- Las baterías eléctricas representan una parte relevante de los requerimientos de litio, grafito flake, y en menor medida de cobalto, cobre y níquel.
- La eólica sólo representa una parte muy reducida de los materiales estudiados en este informe. Otros estudios que han incorporado el neodimio y el disprosio sí concluyen que esta tecnología podría ser afectada por su escasez, aunque como se enunció anteriormente existen tecnologías eólicas que no requieren de estos elementos.
- Dada la reducida expansión que MEDEAS-W proyecta para la CSP, ésta no aparece como una tecnología relevante.

Importancia de la demanda del resto de la economía: para la mayor parte de metales los requerimientos acumulados dependen también en gran medida de la evolución del resto de la economía. En particular, encontramos que para entorno a la mitad de ellos (aluminio, cromo, estaño, hierro, manganeso, molibdeno, níquel, plata, plomo, vanadio y zinc) la demanda del resto de la economía es mayor que la de las tecnologías energéticas. Este resultado es lógico ya que la mayoría de ellos pertenecen al denominado como grupo de metales de base, que son la base del metabolismo económico industrial para la construcción de numerosas infraestructuras y productos (Vidal et al., 2022)

- El cobalto, galio, magnesio, grafito e indio están en la lista de 27 minerales críticos identificados por la UE dada su importancia para las tecnologías digitales. Para determinar la criticidad de un material se utilizan dos parámetros principales: la importancia económica y el riesgo de suministro (determinado por la concentración de la extracción, los procesos de concentración y refinado así como los fabricantes de componentes) para la UE y los cálculos se basan en un promedio de los datos de los últimos 5 años (Directorate-General for Internal Market et al., 2017).
- Para algunos de los elementos identificados en el estudio de proyección a 2050 de (EU JRC, 2020) como de muy baja criticidad como el cobre, níquel o el manganeso (en verde en la Figura 2), siguiendo el enfoque de criticidad de



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial

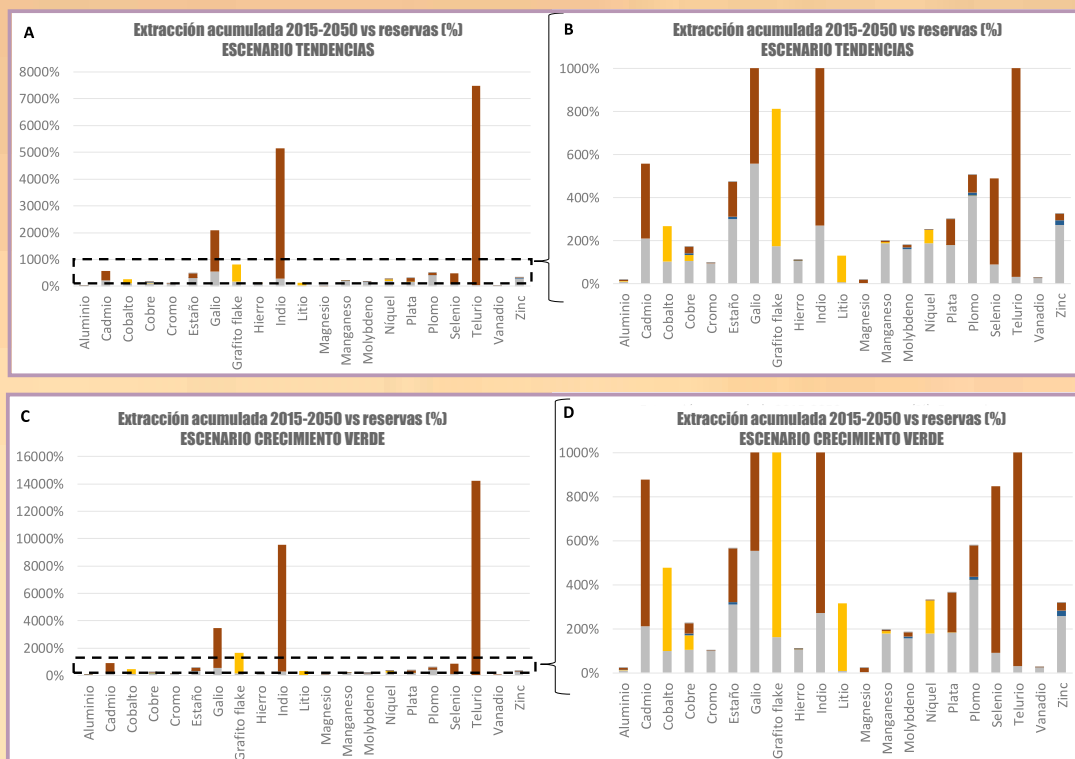
la UE, obtenemos en este trabajo que la extracción acumulada superaría el actual nivel de reservas.

Por escenarios:

- El escenario de Decrecimiento supone menos presión sobre las reservas y recursos minerales que el escenario de Crecimiento Verde, no obstante, para 2050 todavía para muchos materiales se superarían los niveles actuales de reservas (cadmio, cobalto, cobre, estaño, grafito flake, indio, manganeso, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio, telurio y zinc) y para 5 más se superaría el nivel actual de recursos (indio, molibdeno, níquel, selenio y telurio).
- El escenario de Decrecimiento implica otra ventaja respecto al escenario de Crecimiento Verde que no es visible en los resultados de los materiales, pero que es crítica en la comparación del desempeño de ambos escenarios: en el periodo simulado, el modelo no detecta escasez energética para el escenario de Decrecimiento, mientras que sí detecta escasez energética estructural durante el periodo estudiado para el caso de continuación de las Tendencias y Crecimiento Verde.



Figura 7



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial



Figura 7: Extracción acumulada (2015-2050) de materiales desagregada para tecnologías energéticas (solar CSP, solar FV, eólica y baterías eléctricas) y resto de la economía en comparación al nivel de reservas actuales para cada escenario: Tendencias (A y B), Crecimiento Verde (C y D) y Decrecimiento (E y F). Los paneles de la derecha son una ampliación que se centra en ratios < 1000% (10 veces).

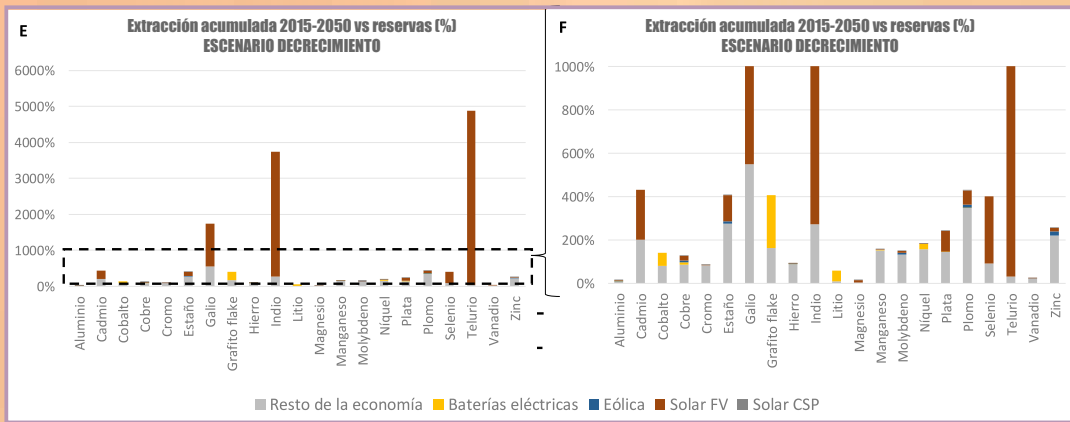
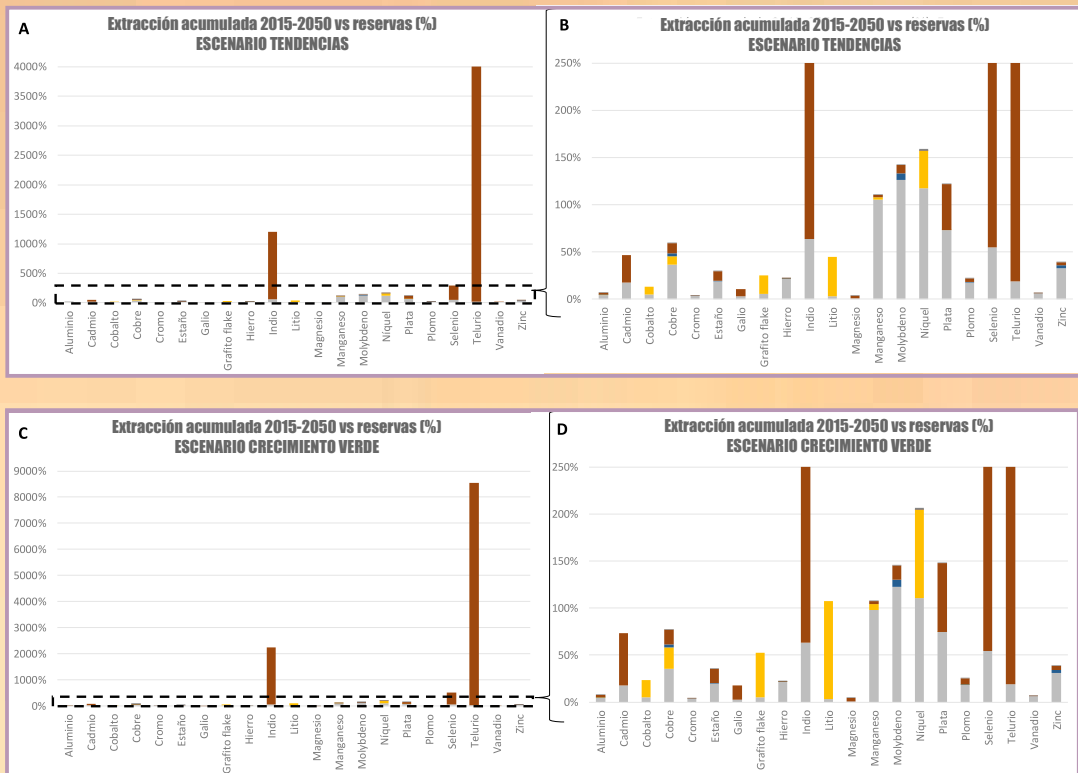


Figura 8

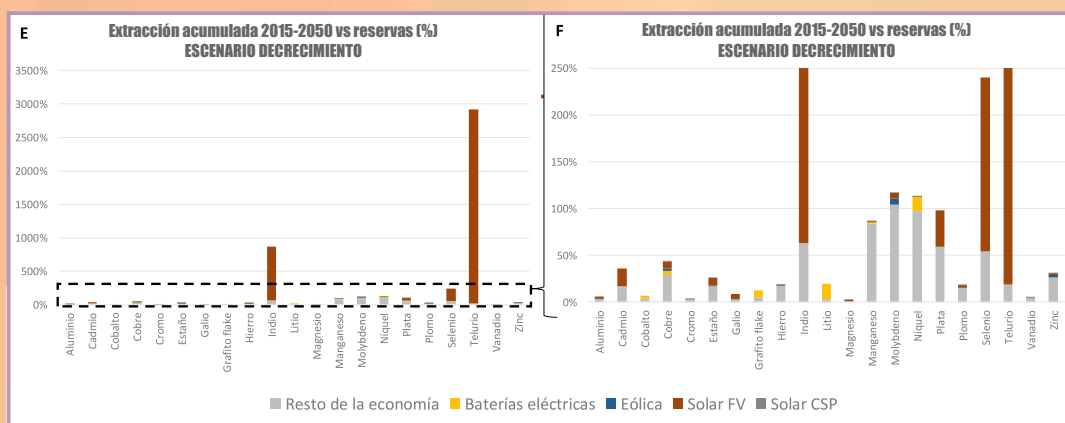


Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Implicaciones de escalar la transición energética a nivel mundial

Figura 8: Extracción acumulada (2015-2050) de materiales desagregada para tecnologías energéticas (solar CSP, solar FV, eólica y baterías eléctricas) y resto de la economía en comparación al nivel de recursos actuales para cada escenario: Tendencias (A y B), Crecimiento Verde (C y D) y Decrecimiento (E y F). Los paneles de la derecha son una ampliación que se centra en ratios < 250% (2.5 veces).



Terminamos la exposición de resultados exponiendo dos cautelas. En primer lugar, en relación al método aplicado, cabe destacar que se trata de un estudio sectorial que por definición excluye la dinámica actual y posibles sustituciones en otros sectores de lo que hemos llamado “el resto de la economía”. Por lo tanto, los resultados para la economía total obtenidos deben tomarse con cautela.

En particular, lo que ocurra en otros sectores materialmente intensivos como la construcción, militar (London Mining Network, 2020), manufacturas, etc. Por otro lado, los objetivos de escenarios de políticas se han impuesto en términos de penetración renovable en porcentaje, sin embargo, esto implica diferentes niveles de emisiones a 2050, siendo más altas en el caso del Crecimiento Verde.

Puesto que en este informe se han desactivado los impactos del cambio climático para facilitar la interpretación de los resultados en términos de materiales, en el caso de haberlos incluido se habría producido una realimentación en la que, a mayores impactos económicos, menor demanda de bienes y servicios y por lo tanto menor demanda de materiales.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

¿Qué podemos esperar de las futuras mejoras tecnológicas?

No hay duda de que en las últimas tres décadas la mayoría de tecnologías renovables, y sobre todo aquellas con más potencial tecno-sostenible como las solares y eólicas, han pasado de ser opciones caras y con relativa baja eficiencia, a sistemas de costes competitivos en un proceso de continua mejora de eficiencia y reducciones de las intensidades materiales para algunos de los materiales críticos. Ante esta situación, cabe preguntarse en qué medida efectos dinámicos y límites no considerados en las simulaciones presentadas en las secciones anteriores podrían cambiar los ratios de demanda y disponibilidad.

Quizá convendría empezar por matizar que las recientes reducciones de costes de las tecnologías renovables modernas no se deben exclusivamente a cuestiones de mejora tecnológica, y que el papel de efectos económicos y financieros coyunturales (por ejemplo, periodo histórico de bajas tasas de interés que facilitan las inversiones intensivas en capital como son las de las renovables, economías de escala al aumentar la producción, subcontratación a países con salarios más bajos y legislación laboral y ambiental menos estricta, etc.).

Adicionalmente, el precio de las materias primas está sujeto a múltiples influencias (marco institucional, estructura oligopólica del mercado, etc.) lo que hace errática su evolución a largo plazo. Por ejemplo, para el caso de la energía solar fotovoltaica, se ha encontrado que la reducción en el costo promedio de producción y el precio de los paneles solares ha sido impulsada principalmente por factores como la reducción en el precio del silicio policristalino, la creciente penetración de mercado de empresas de menores costes de China, el tamaño cada vez mayor de las instalaciones y los aumentos en la inversión de la industria, además de la mejora tecnológica principalmente en la forma de la reducción en el uso de silicio policristalino y la mejora de la eficiencia de los paneles principalmente (Nemet, 2006; Pillai, 2015).

Aunque existe cierta interacción entre el tamaño de la demanda futura y la magnitud del recurso subterráneo que se puede esperar que sea extraíble vía efectos de precios, que pueden incentivar la exploración de nuevos yacimientos, así como la demanda dispuesta a pagar un precio mayor, generalmente se entiende que las restricciones geológicas y termodinámicas dominan la disponibilidad de minerales a mediano plazo (Calvo et al., 2017; Henckens et al., 2016; Vidal et al., 2022)

Los efectos de los precios pueden tener una influencia limitada por el hecho de que la mayoría de los metales se obtienen de hecho como co-productos en procesos de producción múltiple (Nuss and Eckelman, 2014). Además, la



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

¿Qué podemos esperar de las futuras mejoras tecnológicas?

sustitución de metal por metal a gran escala solo es posible con un metal que se produce en cantidades mayores que el que se pretende reemplazar. Además, si el material de sustitución es escaso en su propia oferta, una sustitución sustancial puede agravar aún más la escasez.

La sustitución de tecnología por tecnología es más compleja que las sustituciones de componente por componente o metal por metal, porque tales sustituciones a menudo requieren un conjunto diferente de conocimientos y procesos de fabricación y, por lo tanto, generalmente toman más tiempo para implementar, como muestra (Curtius, 2018) para el caso de la energía FV integrada en edificios.

Hay que tener en cuenta que las sustituciones de metal por metal dirigidas a utilizar materiales más abundantes tienden a reducir el rendimiento de los sistemas de energía, por ejemplo, la sustitución de plata por aluminio en CSP reduciría la reflectividad del espejo del 97% a menos del 88% (de Castro and Capellán-Pérez, 2018); telurio en películas delgadas (de Castro et al., 2013); neodimio en imanes permanentes (Pavel et al., 2017); de manera similar, reemplazar plata por cobre como elementos conductores en células solares de silicio cristalino tendería a reducir su eficiencia (Moreau et al., 2019).

Por tanto, esto tendería a producir un efecto rebote de la demanda total de algunos minerales para lograr la misma producción. Por ejemplo, históricamente se ha observado la reducción en las intensidades materiales de algunos materiales de la solar FV, en concreto para la plata, el silicio y el estaño. Es de reseñar la situación de la plata, que además de reducir su intensidad en las células de silicio de forma independiente, se ha buscado sustituirla por cobre (García-Olivares, 2015).

Aun así, referencias como la ITRPV (ITRPV, 2019) no estiman ya una mejora significativa en las intensidades minerales de plata por parte de los paneles de silicio. Para el caso de las baterías de los vehículos eléctricos, la mejora en las intensidades materiales es visible en las nuevas generaciones de sub-tecnologías, como las NMC811 que representa una mejora respecto de las NMC622 en relación a la cantidad de litio, manganeso y cobalto, no obstante requiriendo incrementarse la cantidad de níquel (cf. Tabla 3).

Por otro lado, es necesario también tener presente que a medida que la capacidad instalada de las energías renovables sigue creciendo a alto ritmo y alcancen una participación sustancial en el mix energético, habrá algunos factores muy relevantes que tenderán a contrarrestar las posibles mejoras técnicas y que tampoco se han tenido en cuenta en las simulaciones mostradas



La sustitución de tecnología por tecnología es más compleja que las sustituciones de componente por componente o metal por metal, porque tales sustituciones a menudo requieren un conjunto diferente de conocimientos y procesos de fabricación y, por lo tanto, generalmente toman más tiempo para implementar, como muestra (Curtius, 2018) para el caso de la energía FV integrada en edificios.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

¿Qué podemos esperar de las futuras mejoras tecnológicas?



anteriormente:

- Inversiones energéticas adicionales y pérdidas relacionadas con la gestión de la intermitencia de las renovables variables como la capacidad de almacenamiento (bombeo hidráulico, baterías eléctricas, hidrógeno, etc.), power-to-X (conversión de electricidad en combustible sintéticos partiendo de la producción de hidrógeno en electrolizadores), redes de transporte adicionales y cortes a la generación que redundan en reducciones del factor de planta (horas de funcionamiento dividido entre las horas que podrían estar en funcionamiento), etc.
- El efecto de los rendimientos decrecientes en el potencial de las energías renovables, es decir, después de que se ocupan los mejores lugares, es necesario trasladarse a sitios con menor rentabilidad económica (por ejemplo menores vientos o radiación solar) (Dupont et al., 2020, 2018), fenómenos que pueden empeorar en algunos casos por las limitaciones de disponibilidad de la tierra (Capellán-Pérez et al., 2017; Van de Ven et al., 2021),
- El aumento en los requisitos de energía para el procesamiento de minerales relacionado con la disminución de la ley de los minerales debido al aumento de la extracción acumulada (Valero, 2014).
- Límites a las tasas de reciclaje (que no sean termodinámicos): la mayoría de los procesos de mecanizado requieren algún material virgen o puro porque la chatarra reciclada no se puede reutilizar por complet.,
- Límites termodinámicos desde el lado de la generación, como por ejemplo el hecho de que existen límites absolutos a la altura de los rotores para el viento o la ley de Benz (las grandes turbinas eólicas modernas ya alcanzan coeficientes de rendimiento máximos en el rango de 45-50% que es bastante cerca del límite teórico del 59,26% (Dupont et al., 2018)), o los límites en la conversión de la luz solar en electricidad, como el límite de Schokley-Queisser para células solares de unión única. Aunque este último límite podría superarse con tecnologías multiunión, la pregunta general clave es qué tan realista es considerando que las tecnologías más sofisticadas -también relacionadas con el punto anterior- son realmente escalables a un nivel significativo en comparación con la demanda total de energía, o si en el futuro seguirán siendo marginales.

Por todo lo anterior, a medio y largo plazo es difícil afirmar si las futuras mejoras tecnológicas serán capaces de compensar todos los efectos negativos arriba mencionados.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Propuestas y recomendaciones políticas

En general, las tendencias actuales de expansión económica global y aumento en la producción de bienes y servicios, urbanización, aumento del transporte, telecomunicaciones, digitalización, etc. van en la dirección de aumentar la demanda de minerales en el futuro. Como se ha mostrado en los apartados anteriores, la transición energética será un factor más que tienda a aumentar esas demandas, aunque se pueden distinguir dos casos en función de si la transición energética afecta (o no) sustancialmente la demanda de materiales de la economía total.

Por ejemplo, el níquel se usa hoy en día principalmente para hacer que el acero inoxidable y otras aleaciones sean más fuertes y capaces de soportar temperaturas extremas y ambientes corrosivos. El cobre tiene características conductoras únicas (calor y electricidad), y como tal se usa masivamente en equipos eléctricos como cableado y motores, teniendo también usos en maquinaria industrial y de construcción. El aluminio tiene baja densidad, no es tóxico, tiene una alta conductividad térmica, tiene una excelente resistencia a la corrosión y se puede moldear, mecanizar y moldear fácilmente y, por lo tanto, se usa en una gran variedad de productos cuando la ligereza es importante, así como también como revestimiento altamente reflectante.

En este sentido, las propuestas y recomendaciones para abordar la problemática de la criticidad de los materiales en la transición energética pasan por el diseño de una política integral y transversal que tenga en cuenta todos los sectores y demandas de bienes y servicios de la economía a escala mundial puesto que las reservas y los mercados de materiales son hoy en día mayormente internacionales.

En este sentido, para reducir la demanda de extracción primaria de materiales, se pueden proponer las siguientes líneas estratégicas de acción en las esferas sociocultural, político-económica, de consumo y técnica, ya que toda acción resultante en una reducción de la demanda de energía redundará en último término en una reducción de la demanda de materiales; así como una serie de medidas más concretas en el sector de gestión de materiales.

Las siguientes secciones enumeran una serie de medidas mínimas que se necesitarían poner en funcionamiento de forma conjunta y coordinada. Una implementación selectiva de ellas derivaría en efectos rebote y dinámicas perversas dadas las interconexiones entre los diferentes sectores económicos y países.

Su efectividad debería de ser además evaluada progresivamente con el fin de que la práctica permita ir las ajustando y complementando con medidas



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Propuestas y recomendaciones políticas

adicionales.



6.1. Medidas en las esferas sociocultural, político-económica y de consumo

✓ **Sistema económico no dependiente del crecimiento económico.** El sistema económico hoy en día en la mayoría de países del mundo requiere de un sistema económico en crecimiento para ser funcional (generar empleo, estabilidad, etc.) (Aghion and Howitt, 2008). La mejora de eficiencia energética, para las cuales existe un gran potencial técnico (ver por ejemplo (IEA, 2018)) es la política más habitualmente tenida en cuenta para reducir la demanda energética. Lo que rara vez se considera es que en un sistema económico basado en el crecimiento económico las mejoras de eficiencia tienden a ser compensadas en cierta medida (o más que compensadas en algunos casos) por efectos de rebote consecuencia del gasto en último término de los ahorros de energía iniciales en otros bienes, servicios o inversión (Font Vivanco et al., 2016; Freire-González, 2020, 2017; Hickel and Kallis, 2019; Parrique et al., 2019).

Sin embargo, hay que tener en cuenta que existen umbrales de energía per cápita para alimentar el actual sistema industrial moderno (Arto et al., 2016), aunque por supuesto hay espacio para la diversidad social y la deliberación (Brand-Correa et al., 2018). Una alternativa que permitiría eludir estos umbrales de energía per cápita sería reducir la demanda de energía como parte de una reducción global de toda la economía hacia un sistema de postcrecimiento basado en principios radicalmente diferentes a los de las economías modernas actuales, lo que redundaría en cambios estructurales con fuertes implicaciones sobre la intensidad material de la provisión de bienes y servicios cuestionando el actual sistema capitalista como sistema socio-económico-político (Floyd et al., 2020; Moriarty and Honnery, 2016, 2012; Trainer, 2021). La puesta en marcha de una economía postcrecientista implicaría en sí grandes cambios estructurales y medidas políticas transversales en las que no entramos en este informe pero que han sido estudiadas en detalle por ejemplo aquí: (Fitzpatrick et al., 2022).

✓ **Control poblacional:** De forma similar al punto anterior, el consumo de energía y materiales es proporcional al tamaño de la población, por lo que las políticas de población y de control democrático de la población son un elemento clave de cualquier escenario de sostenibilidad a largo plazo (de Silva and Tenreiro, 2017; Lee et al., 1998; Meadows et al., 2004) La lógica sería pues

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Propuestas y recomendaciones políticas

la misma que para el decrecimiento, control poblacional de quien consume e impacta mucho primero, e ir reduciendo paulatinamente hasta así llegar a quien quizás pueda aumentar algo. En todo caso, es fundamental tener muy cuenta que los impactos ambientales dependen mucho más de los niveles de consumo per cápita que de la población total (Krausmann et al., 2009).

✓ **Reducción intensidad material via cambios de comportamiento:** Transición hacia provisión de bienes y servicios mediante cambios de comportamiento que permitan superar en órdenes de magnitud aquellas mejoras “técnicas”, incrementales, de eficiencia material en los procesos industriales y de fabricación. Existen una variedad de medidas en esta dirección, como por ejemplo en el caso del transporte, favoreciendo la marcha a pie o modos de transporte ligeros (bici, patinete, etc.) (Creutzig et al., 2018), fomentando los usos compartidos vs propiedad privada (modelo basado en servicios vs propiedad privada): como por ejemplo fomentando el transporte público vs vehículo privado, los espacios y equipos comunes en los edificios residenciales, etc. en lo que ha venido en llamarse economía colaborativa, compartida o de intercambio.

La idea básica es que compartir aumenta el factor de utilización de los activos (máquinas, pisos, automóviles, dispositivos, etc.) por lo que menos de ellos cubren la misma demanda, con implicaciones positivas para la sostenibilidad en general (menos energía y materiales involucrados en la fabricación, construcción, etc. de estos activos. Estudios que han medido de forma cuantitativa el impacto ambiental de comunidades intencionales (es decir, aquellas que tienen objetivos explícitos de vivir de una manera ambientalmente sostenible), han demostrado que estas iniciativas pueden alcanzar importantes reducciones en la huella ambiental respecto de las medias nacionales (Daly, 2017; Villamor et al., 2022).

6.2. Medidas en la esfera técnica

✓ **Promoción de la I+D de tecnologías basadas en materiales abundantes** para la fabricación de todo tipo de dispositivos (no sólo los relacionados con la energía). La abundancia debería ser un parámetro que se midiera a nivel regional de forma que diferentes regiones podrían aprovechar sus recursos localmente de forma diferente (como ocurre con los potenciales de las energías renovables). Se debe tener en cuenta que el uso de materiales tecnológicos permite aumentar la eficiencia y prestaciones de los dispositivos en los que se emplean, por lo que un uso de materiales más abundantes podría llevar a un



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Propuestas y recomendaciones políticas

empeoramiento de éstas, lo que a su vez tendría implicaciones de segundo orden (más necesidad de infraestructura para generar la misma energía, lo que derivaría en mayor ocupación de suelo, etc.). Ya que la electrificación requiere de grandes cantidades materiales y tiende a disminuir mucho la TRE del sistema, una línea de investigación relevante sería estudiar el potencial de la promoción de usos no eléctricos siempre que se pueda de las fuentes energéticas: solar para dar calor, molinos para usos mecánicos y de presión, etc.

✓ **Ecodiseño y estandarización de productos:** considerar la etapa final de gestión de los productos (en particular la necesidad del reciclaje y la recuperación de minerales) desde el propio proceso de diseño de los dispositivos con el objetivo de alargar su tiempo de vida (es decir eliminando obsolescencia programada (Maitre-Ekern and Dalhammar, 2016)), facilitar su reparación (modularidad así como facilitando información entre fabricantes y recicladores) y reciclado posterior, etc. (UNEP, 2013b). Es necesario considerar que diferentes metales son más o menos difíciles de separar de las aleaciones de las que forman parte, lo que requeriría también de investigación de procesos de separación. (Lallana Santos and Evans Pim, 2022) realizan una revisión exhaustiva de las medidas para mejorar el diseño de productos en dirección a la eficiencia material, poniendo el énfasis en: establecer contenidos mínimos obligatorios de metales secundarios y políticas de sustitución, diseño de productos para facilitar la reparación y reciclaje, etiquetado obligatorio de contenido reciclado y reciclabilidad, exigencia de contenido mínimo de metales secundarios y reciclabilidad en licitaciones públicas y medidas para la reparabilidad y extensión de la vida útil de los productos.

Es necesario tener en cuenta, que en el paradigma actual cuando se diseñan productos los parámetros a optimizar son la rentabilidad monetaria de la venta, así como sus características técnicas, mientras que la dimensión ambiental no entra en las cuentas dado que en el sistema actual no se pagan los impactos ambientales como tales (y por ello se denominan en la jerga economista como “externalidades”). En general, las políticas dirigidas a alcanzar un sistema de consumo sostenible (Sanne, 2002).

✓ **Mejora de los procesos industriales para reducir la generación de residuos** materiales y/o reintegrarlos en los procesos de la fabricación de piezas y equipos, evitando que la mejora en la eficiencia de un proceso concreto no sea a costa de la eficiencia global.

✓ **Extensión de la vida útil de los componentes:** mayor tiempo de uso redundaría en retrasar el final de vida útil y por lo tanto dar más margen para



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

Propuestas y recomendaciones políticas

que se puedan reciclar mejor estos materiales. Sin embargo, favorecer mayores duraciones podría afectar a parámetros de eficiencia y reducciones de costes que son los dominantes en el diseño hoy en día.



6.3. Medidas en la esfera de extracción y uso de materiales

✓ **Medidas que impulsen la recuperación y aprovechamiento de metales secundarios** (Lallana Santos and Evans Pim, 2022): Medidas regulatorias y fiscales que permitan incrementar las tasas de reciclado al final de la vida útil. Fomento de la minería urbana: la concentración con la que se encuentran presentes algunos elementos en residuos tecnológicos es mucho más elevada que la concentración de los yacimientos minerales. Establecimiento de contenidos mínimos obligatorios de metales secundarios en la fabricación de los nuevos dispositivos. Este punto está estrechamente relacionado con algunas de las medidas técnicas, puesto que sin ecodiseño, el reciclado de muchos de los componentes al final de la vida útil puede ser imposible en la práctica - o extremadamente caro. Otra barrera es que, en la práctica, para la fabricación de componentes, a menudo se requieren metales de alta pureza que son difícilmente obtenibles del reciclado de chatarra.

✓ **Creación de empresas públicas que impulsen la investigación e industria de la recuperación y el reciclaje de minerales** como un sector estratégico.

✓ **Restricciones comercio:** Medidas políticas que impongan restricciones sobre la basura electrónica que se exporta y los minerales primarios que se importan (Lallana Santos and Evans Pim, 2022).

✓ **Medidas para controlar y limitar la extracción primaria:** Actualmente, los impactos de la extracción y procesado de metales procedentes de la minería convencional son sustancialmente mayores que los de los metales recuperados o secundarios. Los bajos precios de la minería ocultan los negativos impactos que tiene esta actividad sobre los territorios y las comunidades en las que se desarrolla. Factores como las emisiones generadas, la energía y el agua consumida o los contaminantes liberados son mucho más altos en la extracción primaria que en la recuperación de metales (OECD, 2019). La sustitución de tecnología por tecnología es más compleja que las sustituciones de componente por componente o metal por metal, porque tales sustituciones a menudo requieren un conjunto diferente de conocimientos y procesos de fabricación y, por lo tanto, generalmente toman más tiempo para implementar,



Los bajos precios de la minería ocultan los negativos impactos que tiene esta actividad sobre los territorios y las comunidades en las que se desarrolla. Factores como las emisiones generadas, la energía y el agua consumida o los contaminantes liberados son mucho más altos en la extracción primaria que en la recuperación de metales (OECD, 2019).

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

Propuestas y recomendaciones políticas

como muestra (Curtius, 2018) para el caso de la energía FV integrada en edificios.

La sustitución de tecnología por tecnología es más compleja que las sustituciones de componente por componente o metal por metal, porque tales sustituciones a menudo requieren un conjunto diferente de conocimientos y procesos de fabricación y, por lo tanto, generalmente toman más tiempo para implementar, como muestra (Curtius, 2018) para el caso de la energía FV integrada en edificios.

Puesto que una cierta actividad de minería parece inevitable para realizar la transición a nivel global, aún en los escenarios de menor consumo de bienes y servicios, sería recomendable que aquellos proyectos de minería que sean imprescindibles se lleven a cabo siguiendo las más estrictas normativas de seguridad ambiental y de salud para los trabajadores, así como de respeto a las comunidades y poblaciones locales. Esto además tendería a incrementar el coste monetario de venta de las materias primas vírgenes, lo que junto a eliminar todas las subvenciones a la extracción primaria, contribuiría significativamente a reducir la brecha actualmente existente entre el coste de muchos metales vírgenes y reciclados.



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ESFERA SOCIOCULTURAL Y POLÍTICA

Sistema económico no dependiente del crecimiento económico.

Control poblacional.

Reducción intensidad material via cambios de comportamiento.

ESFERA TÉCNICA

Promoción de la I+D de tecnologías basadas en materiales abundantes .

Ecodiseño y estandarización de productos.

Mejora de los procesos industriales para reducir la generación de residuos.

Extensión de la vida útil de los componentes.

ESFERA MATERIALES

Medidas que impulsen la recuperación y aprovechamiento de metales.

Creación de empresas públicas que impulsen la investigación e industria de la recuperación y el reciclaje de minerales secundarios.

Restricciones comercio.

Medidas para controlar y limitar la extracción primaria.

CONCLUSIONES

Dada la actual situación de crisis ambiental multidimensional, la transición a las energías renovables es una condición necesaria, aunque no suficiente, para alcanzar sociedades sostenibles. Las energías renovables presentan grandes ventajas respecto a las fósiles como su renovabilidad y la no generación de muchos menos contaminantes durante su fabricación y funcionamiento; sin embargo, también presentan algunas desventajas, como son una generalmente mayor densidad energética, intermitencia y competencia con la biosfera. En relación al tema central de este informe, las plantas de generación de energías renovables y baterías eléctricas dependen, paradójicamente, de recursos no renovables para su funcionamiento. La cuestión de la abundancia o escasez de minerales es siempre relativa a la demanda que hagamos de ellos y la disponibilidad que haya en la corteza terrestre y cómo de accesible sea extraerlos con la tecnología y el contexto económico dados.

En este informe se aplica un modelo de evaluación integrada mundial para proyectar las demandas de minerales asociadas a las principales tecnologías energéticas solar fotovoltaica, solar de concentración, eólica y baterías eléctricas en 3 escenarios de futuro con el horizonte de 2050. Nos centramos en este informe en los 22 minerales más relevantes por razones de criticidad: aluminio, cadmio, cromo, cobalto, cobre, estaño, galio, grafito, indio, hierro/acero, litio, magnesio, manganeso, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio, telurio, titanio, vanadio y zinc.

Durante estos 25 años se debería haber realizado el grueso de la transición energética mundial si queremos evitar los peores escenarios de impactos climáticos y desequilibrio de la biosfera. Además, se trata de un horizonte razonable para proyectar actuales tecnologías, ya que el desarrollo y difusión de nuevas tecnologías es un proceso con una considerable inercia; como para que los actuales valores de reservas y recursos minerales nos sirvan de referencia útil.

Como se demuestra con las estimaciones mostrados en este informe, en un escenario de "Crecimiento Verde", muchos de estos minerales dispararían su demanda extraordinariamente para suministrar minerales para la construcción de nuevas infraestructuras de captación de energías renovables y almacenamiento eléctrico.

Para algunos de estos minerales podrían incluso no satisfacerse su demanda esperada mundial en las próximas décadas, lo que concuerda en general con resultados de otros trabajos publicados (de Koning et al., 2018; EC, 2010; Elshkaki and Graedel, 2013; García-Olivares et al., 2012; Kleijn et al., 2011; Prior et al., 2012; Tokimatsu et al., 2017; Valero et al., 2018). Así, estos resultados



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

CONCLUSIONES

arrojan dudas sobre la viabilidad a la transición a las energías renovables tal y como se plantea actualmente desde las instituciones nacionales e internacionales principales.

Aunque es también reseñable que éste es un tema incipiente y algunas de estas instituciones, como la Agencia Internacional de la Energía, la OECD, WWF y la UE desde hace algo más de tiempo, están cada vez más concienciados de esta problemática. Sin embargo, la visión planteada por estas instituciones no es sistémica, y como hacen para otros problemas a los que nos enfrentamos, se plantean soluciones para problemáticas aisladas sin ver que en realidad forman parte de un todo acoplado.

Así, desde el punto de vista de la visión hegemónica del **“Crecimiento Verde”** se pone el énfasis en la promoción de la **“Economía Circular”** para resolver futuras potenciales escaseces minerales, es decir, cerrar los ciclos y aumentar todo lo posible las tasas de reciclado mediante buenas prácticas y ecodiseños. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que existe una incompatibilidad entre una transición muy rápida y la mejora de las tasas de reciclado, puesto que es necesario cambios profundos en los procesos de diseño y productivos además de los culturales y sistémicos (fomentando por ejemplo diseños que permitan la recuperación de minerales en vez de mejores prestaciones técnicas o menor coste).

En palabras de Carlos de Castro, quién ha investigado los procesos que Gaia y el cuerpo humano emplean para alcanzar muy altas tasas de reciclado (próximas al 99%), concluyendo lo lejos que se encuentra la tecnología humana actual: *“El proceso no es lineal. Es fácil comprenderlo. Pasar del 25% al 50% de tasa de reciclado es relativamente fácil respecto a pasar del 75% al 95%. Aunque la tasa del 100% es un imposible (no se nos podría escapar ni un solo átomo del sistema), el problema es que reciclar con tasas del 99% requeriría una energía y coordinación enormes sobre todo si pensamos en los materiales importantes para una civilización: agua, suelos (carbono, fósforo, nitrógeno) y en nuestro caso: plásticos, metales... El grado de complejidad tecnológica sería también enorme, desde el propio diseño de los útiles hasta la organización de la larga cadena de procesos implicados desde la cuna hasta la cuna”* (e Castro, 2019, 2015)

Por otro lado, la eventual sustitución por otros minerales de menor rendimiento y más abundantes podría implicar aumentar el número de instalaciones, lo que a su vez tendería a empeorar otros problemas potenciales como son la ocupación de suelo para tecnologías como la solar o los biocombustibles (Capellán-Pérez et al., 2017).



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

CONCLUSIONES



El escenario de “Decrecimiento” representa una opción mucho menos intensiva en materiales pero que todavía requeriría de una importante actividad minera para cubrir las necesidades de materiales que aún no están dentro de la economía, o que también tienen otros usos. En particular, no se evitaría la superación de las reservas estimadas actualmente para algunos materiales importantes como el cobalto, cobre, níquel o plata, y para varios recursos como indio, molibdeno, níquel, selenio y telurio. Otras de las ventajas del escenario de Decrecimiento respecto del de Crecimiento Verde son que produce menos emisiones GEI y no se detectan escaseces energéticas (es decir, situaciones en las que la demanda no puede ser satisfecha por falta de oferta) durante el periodo simulado.

Los resultados presentados en este trabajo tienen dos lecturas principales: por un lado, la transición a las energías renovables incrementará la presión para la extracción de recursos mineros, con todos los graves problemas que el extractivismo acarrea en las poblaciones locales como la contaminación por metales pesados de agua y suelo agrícola, afectación a la salud de los trabajadores y las comunidades vecinas, desplazamientos forzados de la población, asesinatos, pérdida de biodiversidad, etc. (UNEP, 2013a).

Por otro lado, la insuficiencia de las actuales reservas conocidas para cubrir la futura demanda de algunos de los minerales actualmente empleados incrementará las presiones para hacer avanzar la frontera extractiva a otras zonas (conde, 2017; Sánchez Vázquez et al., 2022), como está de hecho ocurriendo recientemente en la UE y España (Grupo Minería EeA, 2017; Solís, 2017).

Ambos problemas serían mucho más acuciantes en el caso del escenario basado en el “Crecimiento Verde”. Aunque la minería asociada a hidrocarburos se reducirá en escenarios de transición, la comparación con los materiales no es directa debido a que para la mayoría de minerales de mena su ley es muy baja y a que los impactos ambientales de un pozo de petróleo crudo convencional son muy diferentes a los asociados a la minería a cielo abierto del carbón, que también difieren sustancialmente de los asociados a la minería metálica. Además, el modelo tampoco considera opciones de sustitución de plásticos procedentes de combustibles fósiles por bioplásticos, que tenderían a incrementar la superficie cultivable.

Aún quedan muchas preguntas por responder ¿dónde es más probable que se abran las futuras minas, en qué condiciones, y qué aspectos ambientales y sociales se verían más afectados? ¿quién se beneficiará de los minerales extraídos, tanto desde la perspectiva del “usuario final”, como de las

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

CONCLUSIONES

comunidades locales en las que se realiza la extracción? La experiencia indica que en caso de realizarse la transición a las energías renovables sin un cambio profundo en las estructuras económicas y sociales globales que rigen actualmente el comercio y economía globales, ésta podría ser un factor más que viniera a agravar las condiciones de vida de numerosas personas del Sur global y destruir sus ecosistemas, como ya ocurre hoy en día con los biocombustibles exportados a los países ricos desde áreas tropicales, o muchos minerales como el coltán, del que el tantalio se usa como condensadores en los equipos electrónicos (UNEP, 2013a).

Esta necesidad de cambio de modelo es reforzada por el hecho de que, al menos hasta la fecha, los certificados que tratan de asegurar una “minería responsable” (en analogía a los productos de comercio justo), se han mostrado muy insuficientes (Childs, 2014; Hilson, 2014; Spiegel, 2015).

Conviene tener presente el alcance y limitaciones del presente estudio. En primer lugar, tener presentes las simplificaciones aplicadas por las limitaciones de datos e información al modelo: no considerar posibles limitaciones de flujos (extracción anual), limitándose a considerar las reservas y recursos estáticos, la eventual escasez de minerales no restringe el desarrollo económico y no considerar ningún límite a la extracción de materiales.

En segundo lugar, un análisis sólido y completo de la posible escasez de materiales en el futuro debería revisar las posibilidades realistas de sustitución de materiales en los sectores actuales con mayor intensidad de materiales, lo que requeriría cubrir en detalle más sectores que los energéticos. En tercer lugar, la implementación del escenario de postgrowth se ha realizado de una forma estilizada dadas las restricciones del modelo empleado, faltando importantes políticas y cambios estructurales que este cambio de paradigma implicaría. Además, existen diferentes interpretaciones del postcrecimiento (Wiedmann et al., 2020), aquí hemos tratado de replicar una versión más reformista que radical.

Por último, en cuarto lugar, es posible que en el futuro aparezcan nuevas tecnologías con diferentes dependencias materiales y con aceptable eficiencia. Obviamente, es imposible adivinar el futuro y el hecho de que haya mucha investigación dedicada no implica que se vayan a obtener los resultados deseados a tiempo de que se puedan convertir en tecnologías clave para la transición, especialmente en un contexto en el que cada vez hay menos tiempo.

En este sentido se suelen mencionar las perovskitas y las células orgánicas para la solar FV, y las baterías de estado sólido para el almacenamiento eléctrico. Así,



La experiencia indica que en caso de realizarse la transición a las energías renovables sin un cambio profundo en las estructuras económicas y sociales globales que rigen actualmente el comercio y economía globales, ésta podría ser un factor más que viniera a agravar las condiciones de vida de numerosas personas del Sur global y destruir sus ecosistemas, como ya ocurre hoy en día con los biocombustibles exportados a los países ricos desde áreas tropicales.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

CONCLUSIONES

es importante actualizar las evaluaciones de criticidad de materiales a medida que vaya apareciendo nueva información relevante y contrastada. Por último, cabe señalar que los Modelos de Evaluación Integrada permiten realizar proyecciones y no predicciones.

De hecho, uno de los puntos fuertes de este tipo de análisis es precisamente permitir anticipar futuros cuellos de botella materiales, dado que el desarrollo tecnológico requiere tiempo. En este sentido, por ejemplo, las decenas de publicaciones que han venido advirtiendo en la última década sobre la posible escasez de plata en fotovoltaica probablemente tengan alguna responsabilidad en la intensa carrera actual por desarrollar tecnologías alternativas que no la utilizan o reducen radicalmente su uso.

Existen una serie de medidas políticas que se podrían poner en marcha para reducir todo lo posible la demanda de materiales primarios (a extraer de la mina), y en caso de no poder evitarse, minimizar los impactos ambientales y sociales. Todas ellas pasan por el diseño de una política integral y transversal que tenga en cuenta todos los sectores y demandas de bienes y servicios de la economía; y obviamente a grandes escalas geográficas puesto que las reservas y los mercados de materiales son hoy en día mayormente internacionales.

En este sentido, para reducir la demanda de extracción primaria de materiales, se pueden proponer las siguientes líneas estratégicas de acción en las esferas sociocultural, político-económica, de consumo y técnica, ya toda acción resultante en una reducción de la demanda de energía redundará en último término en una reducción de la demanda de materiales; así como una serie de medidas más concretas en el sector de gestión de materiales, como por ejemplo, promover la I+D de tecnologías basadas en materiales abundantes, fomentar el ecodiseño y estandarización de productos para facilitar la reparabilidad y reciclaje, la mejora de los procesos industriales para reducir el residuo durante la fabricación de piezas y equipos, el incremento de las tasas de reciclado al final de la vida útil y establecimiento de contenidos mínimos obligatorios de metales secundarios en la fabricación de los nuevos dispositivos, el fomento de la minería urbana, la creación de empresas públicas que impulsen la industria de la recuperación y el reciclaje de minerales para afrontar el hecho de que hoy en día los metales vírgenes son más económicos que los reciclados, medidas fiscales, restricciones al comercio internacional o medidas para controlar y limitar la extracción primaria.

Es necesario además complementar la dimensión social de los impactos de la transición a las energías renovables con la dimensión geopolítica, pues muchos de los territorios de mayor potencial de fuentes de energía renovable (como los



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

CONCLUSIONES

desiertos cálidos) están alejados de los principales centros de consumo. Dado que al ser más dispersas y requerir líneas de transmisión más amplias, ¿hasta qué punto son más frágiles ante ataques, guerras, revueltas, etc. que los centros de extracción y producción fósiles, que al estar más concentrados son más fáciles de defender?

En conclusión, las plantas de generación de energías renovables y las baterías eléctricas son capaces de generar y almacenar electricidad y calor con menores niveles de emisiones de efecto invernadero en comparación con las fósiles, pero no están libres de impactos ambientales ni consideraciones geopolíticas y siguen sujetas a los límites biofísicos del planeta.

Así, tener en cuenta la dimensión material aporta otro argumento más para que la transición energética se produzca en un escenario de decrecimiento material y energético, incluyendo cambios radicales en el modo en el que las materias primas llegan hasta los consumidores actualmente.

Así, el diseño de políticas de transición energética debería de tener como un objetivo básico asegurar el bienestar de la población minimizando el consumo de energía



Es imprescindible fomentar el incremento de las tasas de reciclado al final de la vida útil y establecimiento de contenidos mínimos obligatorios de metales secundarios en la fabricación de los nuevos dispositivos, el fomento de la minería urbana, la creación de empresas públicas que impulsen la industria de la recuperación y el reciclaje de minerales para afrontar el hecho de que hoy en día los metales vírgenes son más económicos que los reciclados, medidas fiscales, restricciones al comercio internacional o medidas para controlar y limitar la extracción primaria

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

ANEXOS

Anexo metodológico I: Modelos MEDEAS

Los modelos MEDEAS son un conjunto de modelos agregados de economía, energía y medio ambiente (o Modelos de Evaluación Integrada, IAM). Han sido diseñados utilizando la dinámica de sistemas, la cual facilita la integración del conocimiento desde diferentes perspectivas. La dinámica de sistemas es una metodología utilizada para analizar y modelar el comportamiento temporal en entornos complejos debido a su capacidad para representar explícita y dinámicamente realimentaciones, retrasos existentes en el sistema y no linealidades.

El conjunto de modelos de simulación MEDEAS está compuesto por modelos en tres diferentes escalas geográficas: global (MEDEAS-W), Unión Europea (MEDEAS-EU) y país (MEDEAS-AUT y MEDEAS-BGR). Por simplicidad, la integración entre modelos es secuencial (una sola dirección): los modelos “padre” (W, EU) proporcionan entradas a los modelos “hijo” (EU, país).

Todos los modelos tienen una estructura modular y flexible en la que cada módulo se puede modificar. Los modelos están estructurados en nueve módulos principales: economía, demanda de energía, disponibilidad de energía, infraestructuras energéticas y tasa de retorno energético, minerales, uso de la tierra, agua, clima y emisiones e indicadores de impactos sociales y medioambientales. La muestra el esquema conceptual del modelo MEDEAS-W incluyendo las principales relaciones entre los módulos. Las principales características de cada módulo son:

Tabla 4

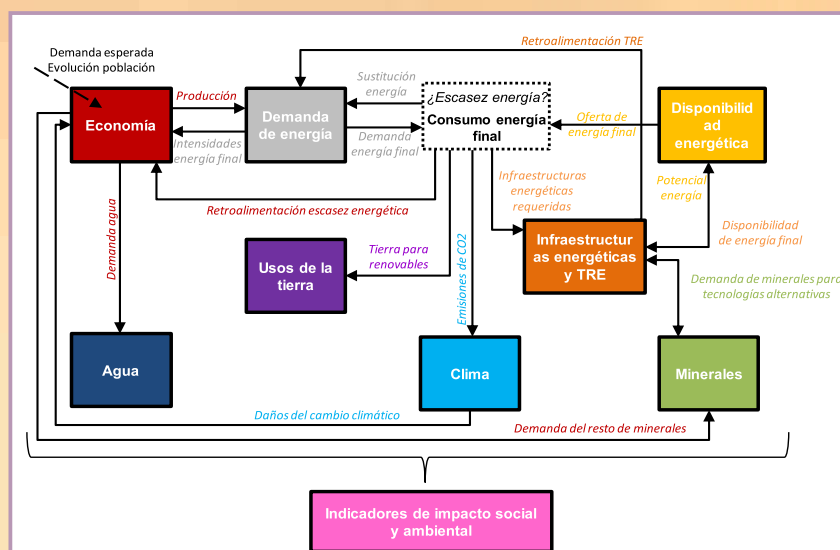


Figura 9:

Esquema general de los módulos de MEDEAS-W y sus relaciones. Fuente: (Capellán-Pérez et al., 2020)

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

ANEXOS

Economía: Está modelado siguiendo un enfoque post-keynesiano de desequilibrio (los mercados no están obligados a vaciarse, como es habitual en economía convencional) y donde el crecimiento económico depende del nivel de demanda de los 35 sectores económicos considerados y los hogares. La estructura económica está representada a través de Tablas Input-Output (TIO).

Demanda de energía: La demanda final de energía, por sector y de los hogares, se estima a través de las proyecciones de manera sectorial de la producción económica y de las intensidades energéticas finales. La evolución de las intensidades energéticas finales tiene en cuenta las mejoras de eficiencia y la sustitución energética generada tanto por políticas como por la escasez de recursos.

Disponibilidad energética: En este módulo se estima la disponibilidad de recursos de las energías renovables y no renovables teniendo en cuenta las limitaciones biofísicas y temporales. En total, se tienen en cuenta 25 fuentes y tecnologías primarias de energía y 5 energías finales (electricidad, calor, sólidos, gases y líquidos). La intermitencia de las energías renovables en el modelo se computa endógenamente a través de las sobrecapacidades y el almacenamiento de energía, dependiendo de la penetración de las tecnologías energéticas variables.

Infraestructuras de energía y tasa de retorno energético (TRE): Este módulo estima las capacidades para generar electricidad y calor teniendo en cuenta los tiempos de planificación y construcción. Las inversiones en energía para que las energías renovables generen electricidad se modelan de forma endógena y dinámica, de modo que se puede estimar la TRE de las tecnologías individuales y de todo el sistema energético. La demanda de energía varía en función del TRE del sistema. El transporte se modela detalladamente diferenciando entre clases de vehículos para los hogares y para transporte terrestre de mercancías y de pasajeros.

Minerales: Se estiman los recursos necesarios para toda la economía, especialmente los utilizados para la construcción, operación y mantenimiento de tecnologías alternativas de energía. También se consideran las políticas de reciclaje.

Uso de la tierra: Este módulo estima fundamentalmente los requerimientos de tierra adicionales debido al uso de las energías renovables.

Agua: Este módulo proyecta el uso del agua por tipo (azul, verde y gris) y por sector económico y para uso en los hogares.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

ANEXOS

Clima: El modelo global estima los efectos de cambio climático a partir de las emisiones de GEI emitidas por la sociedad. Este módulo incluye una función de daño que transforma los efectos de cambio climático en daños al sistema económico.

Indicadores de impacto social y ambiental: en este módulo los resultados “biofísicos” se trasladan en impactos sociales y ambientales. Su objetivo es explorar las repercusiones para la sociedad humana en términos de bienestar e impactos ambientales.

Una descripción más completa de los módulos de MEDEAS y los resultados obtenidos en el modelo se puede encontrar en –. Documentación más detallada de los modelos con los datos y ecuaciones utilizadas en ellos se puede obtener en la web del proyecto MEDEAS (www.medeas.eu/). Los modelos han sido desarrollados con el software Vensim DSS y trasladados a Python. Los modelos están disponibles para cualquier usuario de manera gratuita en <https://www.medeas.eu/model/medeas-model> y futuras actualizaciones se encontrarán en la página web del grupo www.geeds.es.

Anexo metodológico II: Entradas y supuestos comunes para todos los escenarios

Tabla 5

SOCIOECONOMÍA

- **Crecimiento de la población:** SSP2 (~9,200 millones de personas en 2050 y estabilización en ~10,000 en 2100)
- **PIBpc previsto:** dependiente del escenario
- **Participación laboral sobre el capital (2050)** 52%
- **Matriz A (coeficientes técnicos):** constante según la estructura mundial de 2009

ENERGÍA

- **Potenciales tecno-sostenibles fuentes de energía renovable para la electricidad**
 - Hidroeléctrica: 1TWe*
 - Geotérmica para electricidad: 0,3TWe
 - Oceánica: 0,05TWe
 - Eólica terrestre: 1TWe
 - Eólica marina: 0,25TWe
 - Solar fotovoltaica y CSP sobre suelo: según escenario
 - Solar en zonas urbanas (principalmente sobre tejado):
 - solar FV + térmica: 2.5% disponible del total de áreas urbanas. Reparto al 50% entre ambas tecnologías
- **Almacenamiento eléctrico:** según escenario diferentes niveles de bombeo hidráulico. No se considera el uso de baterías de vehículos eléctricos como almacenamiento del sistema
- **Capacidad objetivo de las fuentes de energía renovable para el calor (2050) (comercial y no comercial)** 4,4TWth
- **Bioenergía**
 - Potencial tecno-sostenible compartido de bioenergía para calor, líquidos y electricidad en tierras de cultivo y marginales
 - Potencial biocombustibles en tierras agrícolas: 100 Mha
 - Tierras marginales: 386 MHa (Field et al., 2008)

Tabla 5:

Resumen de los supuestos e inputs globales más relevantes comunes para todos los escenarios simulados. Son los mismos que en (de Blas et al., 2020).

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

ANEXOS

- Potencial residuos: 11 EJ/año
- Capacidad nuclear instalada: constante en los niveles actuales

MATERIALES

- Tasas de reciclaje (EOL): dependientes del escenario
- Intensidades materiales de tecnologías energéticas: constantes
- Curvas de agotamiento de las energías no renovables
 - Petróleo (Laherrère, 2018)
 - Gas (Laherrère, 2018)
 - Carbón (Mohr et al., 2015)
 - Uranio (EWG, 2013)
- Recursos y reservas materiales: Task 2.2.c.2 (MEDEAS, 2016), excepto para grafito *flake* (Pulido-Sánchez et al., 2022) y Selenio (Pulido-Sánchez, 2022)

USOS DE LA TIERRA

- ¿Programa global de reforestación? No

Interruptores

- Impactos del cambio climático: no activado
- Retroalimentación de la TRE: activado (Capellán-Pérez et al., 2019c)
- Retroalimentación de los límites de la energía: activado (Nieto et al., 2019)
- Sustituciones de energías finales entre otras energías finales: activado (de Blas et al., 2019)

*1 TWe = 8760 TWh en un año.

Anexo resultados I: Tablas de extracción acumulada 2015-2050 vs reservas y recursos por escenario

Extracción acumulada (2015-2050) de materiales desagregada para tecnologías energéticas (solar CSP, solar FV, eólica y baterías eléctricas) y resto de la economía, así como nivel de reservas y recursos actuales para cada escenario: Tendencias, Crecimiento Verde y Dcrecimiento. Millones de toneladas (Mt).

Extracción acumulada 2015-2050 vs reservas y recursos. Escenario Tendencias

Mt	Reservas	Recursos	Resto de la economía	Baterías eléctricas	Eólica	Solar FV	Solar CSP
Aluminio	28000.00	75000.00	3373.49	203.02	99.77	1535.90	1.71
Cadmio	0.50	6.00	1.05	0.00	0.00	1.75	0.00
Cobalto	7.20	145.00	7.57	11.71	0.00	0.00	0.00
Cobre	720.00	2100.00	766.88	190.55	57.45	231.73	0.89
Cromo	480.00	12000.00	460.16	0.00	0.00	8.01	6.07
Estaño	4.80	76.20	14.48	0.00	0.51	7.70	0.01
Galio	0.01	1.00	0.03	0.00	0.00	0.08	0.00
Grafito <i>flake</i>	21.00	670.00	36.63	134.25	0.00	0.00	0.00
Hierro	160000.00	800000.00	172370.08	59.89	2090.65	2933.51	127.67
Indio	0.01	0.05	0.03	0.00	0.00	0.54	0.00
Litio	13.50	39.50	1.23	16.59	0.00	0.00	0.00
Magnesio	2400.00	12000.00	59.57	0.00	0.00	397.17	0.61
Manganeso	570.00	1030.00	1084.06	25.41	0.00	27.04	0.32
Molibdeno	11.00	14.00	17.67	0.00	1.01	1.23	0.04
Níquel	81.00	130.00	152.49	51.81	0.00	0.03	2.96
Plata	0.53	1.31	0.96	0.00	0.00	0.64	0.00
Plomo	87.00	2000.00	356.23	0.00	11.99	73.64	0.23
Selenio	0.12	0.20	0.11	0.00	0.00	0.48	0.00
Telurio	0.02	0.04	0.01	0.00	0.00	1.79	0.00
Vanadio	15.00	63.00	3.96	0.00	0.00	0.03	0.00
Zinc	230.00	1900.00	626.64	0.00	51.68	68.17	0.15

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

ANEXOS

Extracción acumulada 2015-2050 vs reservas y recursos. Escenario Crecimiento Verde

Mt	Reservas	Recursos	Resto de la economía	Baterías eléctricas	Eólica	Solar FV	Solar CSP
Aluminio	28000.00	75000.00	3331.63	505.50	104.27	1975.69	1.63
Cadmio	0.50	6.00	1.05	0.00	0.00	3.34	0.00
Cobalto	7.20	145.00	7.11	27.20	0.00	0.00	0.00
Cobre	720.00	2100.00	746.75	478.37	64.33	327.28	0.83
Cromo	480.00	12000.00	472.05	0.00	0.00	10.34	6.09
Estaño	4.80	76.20	14.85	0.00	0.55	11.77	0.01
Galio	0.01	1.00	0.03	0.00	0.00	0.15	0.00
Grafito flake	21.00	670.00	34.20	316.00	0.00	0.00	0.00
Hierro	160000.00	800000.00	171301.36	157.71	2237.61	4099.93	122.96
Indio	0.01	0.05	0.03	0.00	0.00	1.02	0.00
Litio	13.50	39.50	1.19	41.23	0.00	0.00	0.00
Magnesio	2400.00	12000.00	60.27	0.00	0.00	480.01	0.59
Manganeso	570.00	1030.00	1012.32	63.97	0.00	28.88	0.28
Molibdeno	11.00	14.00	17.18	0.00	1.01	2.17	0.03
Níquel	81.00	130.00	143.85	122.11	0.00	0.05	2.69
Plata	0.53	1.31	0.97	0.01	0.00	0.96	0.00
Plomo	87.00	2000.00	366.55	0.00	12.71	124.19	0.23
Selenio	0.12	0.20	0.11	0.00	0.00	0.91	0.00
Telurio	0.02	0.04	0.01	0.00	0.00	3.41	0.00
Vanadio	15.00	63.00	3.84	0.00	0.00	0.04	0.00
Zinc	230.00	1900.00	595.01	0.00	52.67	82.57	0.14

Extracción acumulada 2015-2050 vs reservas y recursos. Escenario Decrecimiento

Mt	Reservas	Recursos	Resto de la economía	Baterías eléctricas	Eólica	Solar FV	Solar CSP
Aluminio	28000.00	75000.00	2781.01	77.35	92.95	1074.47	0.99
Cadmio	0.50	6.00	1.01	0.00	0.00	1.14	0.00
Cobalto	7.20	145.00	5.83	4.27	0.00	0.00	0.00
Cobre	720.00	2100.00	615.93	88.79	54.99	158.52	0.48
Cromo	480.00	12000.00	402.65	0.00	0.00	4.80	3.73
Estaño	4.80	76.20	13.21	0.00	0.48	5.90	0.01
Galio	0.01	1.00	0.03	0.00	0.00	0.06	0.00
Grafito flake	21.00	670.00	34.21	50.97	0.00	0.00	0.00
Hierro	160000.00	800000.00	143133.20	17.93	1958.83	1936.84	75.19
Indio	0.01	0.05	0.03	0.00	0.00	0.38	0.00
Litio	13.50	39.50	1.17	6.54	0.00	0.00	0.00
Magnesio	2400.00	12000.00	53.48	0.00	0.00	282.43	0.36
Manganeso	570.00	1030.00	866.83	10.32	0.00	15.76	0.18
Molibdeno	11.00	14.00	14.59	0.00	0.90	0.83	0.02
Níquel	81.00	130.00	126.72	19.49	0.00	0.03	1.71
Plata	0.53	1.31	0.77	0.00	0.00	0.50	0.00
Plomo	87.00	2000.00	304.48	0.00	11.03	56.71	0.14
Selenio	0.12	0.20	0.11	0.00	0.00	0.37	0.00
Telurio	0.02	0.04	0.01	0.00	0.00	1.16	0.00
Vanadio	15.00	63.00	3.29	0.00	0.00	0.02	0.00
Zinc	230.00	1900.00	506.88	0.00	46.48	36.55	0.09

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

REFERENCIAS

Aghion, P., Howitt, P.W., 2008. The Economics of Growth. MIT Press, Cambridge, Massachusetts & London, England. Alexander, S., Yacoumis, P., 2018. Degrowth, energy descent, and 'low-tech' living: Potential pathways for increased resilience in times of crisis. *Journal of Cleaner Production* 197, 1840–1848.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.100>

Apergis, I., Apergis, N., 2019. Silver prices and solar energy production. *Environ Sci Pollut Res* 26, 8525–8532. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04357-1>

Arto, I., Capellán-Pérez, I., Lago, R., Bueno, G., Bermejo, R., 2016. The energy requirements of a developed world. *Energy for Sustainable Development* 33, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.04.001>

Bardi, U., 2014. *Extracted: How the Quest for Mineral Wealth Is Plundering the Planet.* Chelsea Green Publishing, White River Junction, Vermont.

Bardi, U., Pagani, M., 2007. Peak minerals. *The Oil Drum* 15.

Bauknecht, D., Funcke, S., Vogel, M., 2020. Is small beautiful? A framework for assessing decentralised electricity systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 118, 109543. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109543>

Brand-Correa, L.I., Martin-Ortega, J., Steinberger, J.K., 2018. Human Scale Energy Services: Untangling a 'golden thread.' *Energy Research & Social Science* 38, 178–187.

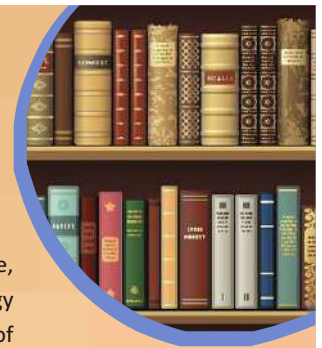
Calvo, G., Mudd, G., Valero, Alicia, Valero, Antonio, 2016. Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality? *Resources* 5, 36. <https://doi.org/10.3390/resources5040036>

Calvo, G., Valero, Alicia, Valero, Antonio, 2017. Assessing maximum production peak and resource availability of non-fuel mineral resources: Analyzing the influence of extractable global resources. *Resources, Conservation and Recycling* 125, 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.009>

Capellán-Pérez, I., Álvarez-Antelo, D., Miguel, L.J., 2019a. Global Sustainability Crossroads: A Participatory Simulation Game to Educate in the Energy and Sustainability Challenges of the 21st Century. *Sustainability* 11, 3672. <https://doi.org/10.3390/su11133672>

Capellán-Pérez, I., Arto, I., Polanco-Martínez, J.M., González-Eguino, M., Neumann, M.B., 2016. Likelihood of climate change pathways under uncertainty on fossil fuel resource availability. *Energy Environ. Sci* 9, 2482–2496. <https://doi.org/10.1039/C6EE01008C>

Capellán-Pérez, I., Blas, I. de, Nieto, J., Castro, C. de, 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



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

REFERENCIAS

socioeconomic constraints. *Energy Environ. Sci.* 13, 986–1017.

<https://doi.org/10.1039/C9EE02627D>

Capellán-Pérez, I., de Castro, C., Arto, I., 2017. Assessing vulnerabilities and limits in the transition to renewable energies: Land requirements under 100% solar energy scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77, 760–782

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.137>

Capellán-Pérez, I., de Castro, C., Miguel González, L.J., 2019b. Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strategy Reviews* 26, 100399.

<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>

Capellán-Pérez, I., de Castro, C., Miguel González, L.J., 2019c. Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strategy Reviews* 26, 100399.

<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>

Childs, J., 2014. From 'criminals of the earth' to 'stewards of the environment': The social and environmental justice of Fair Trade gold. *Geoforum* 57, 129–137.

<https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2014.08.016>

Conde, M., 2017. Resistance to Mining. A Review. *Ecological Economics* 132, 80–90.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.08.025>

Cosme, I., Santos, R., O'Neill, D.W., 2017. Assessing the degrowth discourse: A review and analysis of academic degrowth policy proposals. *Journal of Cleaner Production* 149, 321–334.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.016>

Creutzig, F., Roy, J., Lamb, W.F., Azevedo, I.M.L., Bruin, W.B. de, Dalkmann, H., Edelenbosch, O.Y., Geels, F.W., Grubler, A., Hepburn, C., Hertwich, E.G., Khosla, R., Mattauch, L., Minx, J.C., Ramakrishnan, A., Rao, N.D., Steinberger, J.K., Tavoni, M., Ürge-Vorsatz, D., Weber, E.U., 2018. Towards demand-side solutions for mitigating climate change. *Nature Climate Change* 8, 260.

<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0121-1>

Curtius, H.C., 2018. The adoption of building-integrated photovoltaics: barriers and facilitators. *Renewable Energy* 126, 783–790.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.001>

D'Alessandro, S., Cieplinski, A., Distefano, T., Dittmer, K., 2020. Feasible alternatives to green growth. *Nat Sustain* 3, 329–335.

<https://doi.org/10.1038/s41893-020-0484-y>

Daly, M., 2017. Quantifying the environmental impact of ecovillages and co-housing communities: a systematic literature review. *Local Environment* 22, 1358–1377.

<https://doi.org/10.1080/13549839.2017.1348342>

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA



REFERENCIAS

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, 100543. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100543>

de Blas, I., Miguel, L.J., Capellán-Pérez, I., 2019. Modelling of sectoral energy demand through energy intensities in MEDEAS integrated assessment model. *Energy Strategy Reviews* 26, 100419. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100419>

de Castro, C., 2019. *Reencontrando a Gaia: A hombros de James Lovelock y Lynn Margulis*. Ediciones del Genal.

de Castro, C., 2015. Durante y tras el colapso: La Revolución Solidaria (1a parte). 15/15\15. URL [https://www.15-15-15.org/webzine/2015/12/14/durante-y-tras-el-colapso-la-revolucion-solidaria-1a-parte/\(accessed 1.7.23\)](https://www.15-15-15.org/webzine/2015/12/14/durante-y-tras-el-colapso-la-revolucion-solidaria-1a-parte/(accessed%201.7.23)).

de Castro, C., Capellán-Pérez, I., 2020. Standard, Point of Use, and Extended Energy Return on Energy Invested (EROI) from Comprehensive Material Requirements of Present Global Wind, Solar, and Hydro Power Technologies. *Energies* 13, 3036. <https://doi.org/10.3390/en13123036>

de Castro, C., Capellán-Pérez, I., 2018. Concentrated Solar Power: Actual Performance and Foreseeable Future in High Penetration Scenarios of Renewable Energies. *Biophys Econ Resour Qual* 3, 14. <https://doi.org/10.1007/s41247-018-0043-6>

de Castro, C., Mediavilla, M., Miguel, L.J., Frechoso, F., 2013. Global solar electric potential: A review of their technical and sustainable limits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28, 824–835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.040>

de Koning, A., Kleijn, R., Huppel, G., Sprecher, B., van Engelen, G., Tukker, A., 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>

de Silva, T., Tenreyro, S., 2017. Population Control Policies and Fertility Convergence. *Journal of Economic Perspectives* 31, 205–228. <https://doi.org/10.1257/jep.31.4.205>

Deetman, S., de Boer, H.S., Van Engelenburg, M., van der Voet, E., van Vuuren, D.P., 2021. Projected material requirements for the global electricity infrastructure – generation, transmission and storage. *Resources, Conservation and Recycling* 164, 105200. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105200>

Directorate-General for Internal Market, I., Pennington, D., Tzimas, E., Branzelli, C., Dewulf, J., Manfredi, S., Nuss, P., Grohol, M., Van Maercke, A., Kayam, Y., Solar, S.,

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

REFERENCIAS

Vidal-Legaz, B., Talens Peirò, L., Mancini, L., Ciupagea, C., Godlewska, L., Dias, P., Pavel, C., Blagoeva, D., Blengini, G.A., Nita, V., Latunussa, C.E.L., Torres De Matos, C., Mathieux, F., Marmier, A., 2017. Methodology for establishing the EU list of critical raw materials: guidelines. Publications Office of the European Union, LU.

Dupont, E., Koppelaar, R., Jeanmart, H., 2020. Global available solar energy under physical and energy return on investment constraints. Applied Energy 257, 113968. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113968>

Dupont, E., Koppelaar, R., Jeanmart, H., 2018. Global available wind energy with physical and energy return on investment constraints. Applied Energy 209, 322–338. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.085>

EC, 2010. Critical raw materials for the UE. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. European Commission.

Ecologistas en Acción, 2019. Minería Especulativa en España.

Elshkaki, A., Graedel, T.E., 2013. Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies. Journal of Cleaner Production 59, 260–273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.003>

Emsley, J., 2001. Nature's Building Blocks: An A–Z Guide to the Elements. Oxford, England, UK: Oxford University Press.

EU JRC, 2020. Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU - A Foresight Study,. European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.

European Commission, 2011. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, Brussels.

EWG, 2013. Fossil and Nuclear Fuels – the Supply Outlook (No. 2013/03/18 LBST). Energy Watch Group.

Fernández Durán, R., González Reyes, L., 2018. En la espiral de la energía, 2a edición. ed. Libros en Acción, <https://www.ecologistasenaccion.org/?p=29055>.

Field, C.B., Campbell, J.E., Lobell, D.B., 2008. Biomass energy: the scale of the potential resource. Trends in Ecology & Evolution 23, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.12.001>

Fitzpatrick, N., Parrique, T., Cosme, I., 2022. Exploring degrowth policy proposals: A systematic mapping with thematic synthesis. Journal of Cleaner Production 365, 132764. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132764>

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

REFERENCIAS

Floyd, J., Alexander, S., Lenzen, M., Moriarty, P., Palmer, G., Chandra-Shekeran, S., Foran, B., Keyßer, L., 2020. Energy descent as a post-carbon transition scenario: How 'knowledge humility' reshapes energy futures for post-normal times. *Futures* 122, 102565.

<https://doi.org/10.1016/j.futures.2020.102565>

Font Vivanco, D., Kemp, R., van der Voet, E., 2016. How to deal with the rebound effect? A policy-oriented approach. *Energy Policy* 94, 114–125.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.054>

Freire-González, J., 2020. Energy taxation policies can counteract the rebound effect: analysis within a general equilibrium framework. *Energy Efficiency* 13, 69–78.

<https://doi.org/10.1007/s12053-019-09830-x>

Freire-González, J., 2017. Evidence of direct and indirect rebound effect in households in EU-27 countries. *Energy Policy* 102, 270–276.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.002>

Frenzel, M., Kertris, M.P., Gutzmer, J., 2014. On the geological availability of germanium. *Mineralium deposita* 49, 471–486.

Frenzel, M., Ketris, M.P., Seifert, T., Gutzmer, J., 2016. On the current and future availability of gallium. *Resources Policy* 47, 38–50.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.11.005>

García-Olivares, A., 2015. Substituting silver in solar photovoltaics is feasible and allows for decentralization in smart regional grids. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 17, 15–21.

<https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.05.004>

García-Olivares, A., Ballabrera-Poy, J., García-Ladona, E., Turiel, A., 2012. A global renewable mix with proven technologies and common materials. *Energy Policy* 41, 561–574. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.018>

Gerber, J.-F., Raina, R.S., 2018. Post-Growth in the Global South? Some Reflections from India and Bhutan. *Ecological Economics* 150, 353–358.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.02.020>

Girod, B., Wiek, A., Mieg, H., Hulme, M., 2009. The evolution of the IPCC's emissions scenarios. *Environmental Science & Policy* 12, 103–118.

<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2008.12.006>

Grupo Minería EeA, 2017. El 'boom' de la minería en España. *El Ecologista* 94.

Henckens, M.L.C.M., van Ierland, E.C., Driessen, P.P.J., Worrell, E., 2016. Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations. *Resources Policy* 49, 102–111.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

REFERENCIAS

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.04.012>

Hickel, J., Brockway, P., Kallis, G., Keyßer, L., Lenzen, M., Slameršak, A., Steinberger, J., Ürge-Vorsatz, D., 2021. Urgent need for post-growth climate mitigation scenarios. *Nat Energy* 6, 766–768. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00884-9>

Hickel, J., Kallis, G., 2019. Is Green Growth Possible? *New Political Economy* 0, 1–18. <https://doi.org/10.1080/13563467.2019.1598964>

Hilson, G., 2014. 'Constructing' Ethical Mineral Supply Chains in Sub-Saharan Africa: The Case of Malawian Fair Trade Rubies. *Development and Change* 45, 53–78. <https://doi.org/10.1111/dech.12069>

IEA, 2021. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions – Analysis. IEA.

IEA, 2018. Energy Efficiency 2018. Analysis and outlooks to 2040, Market Report Series. International Energy Agency.

IPBES, 2019. Resumen para los Encargados De La Formulación De Políticas Del Informe De La Evaluación Mundial De La Ipbes Sobre La Diversidad Biológica Y Los Servicios De Los Ecosistemas.

IPCC, 2019. Calentamiento global de 1,5 °C. Resumen para responsables de políticas. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

IPCC, 2011. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge University Press, United Kingdom and New York (USA).

ISE, 2019. Photovoltaics Report. Fraunhofer ISE, Freiburg.

ITRPV, 2019. ITRPV (2019) International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV): 2018 Results (10th Edition).

Junne, T., Wulff, N., Breyer, C., Naegler, T., 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>

Kerschner, C., Capellán-Pérez, I., 2017. Peak-Oil and Ecological Economics, in: Spash, C.L. (Ed.), *Routledge Handbook of Ecological Economics: Nature and Society*. Abingdon, pp. 425–435.

Kerschner, C., Wächter, P., Nierling, L., Ehlers, M.-H., 2018. Degrowth and Technology: Towards feasible, viable, appropriate and convivial imaginaries. *Journal of Cleaner Production, Technology and Degrowth* 197, 1619–1636. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.147>

Keyßer, L.T., Lenzen, M., 2021. 1.5 °C degrowth scenarios suggest the need for new



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

REFERENCIAS

mitigation pathways. *Nat Commun* 12, 2676. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22884-9>

Kleijn, R., van der Voet, E., Kramer, G.J., van Oers, L., van der Giesen, C., 2011. Metal requirements of low-carbon power generation. *Energy* 36, 5640–5648. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.003>

Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H., Fischer-Kowalski, M., 2009. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics* 68, 2696–2705. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007>

Laherrère, J., 2018. Oil & gas production forecasts (1900–2200) (Personal communication (April 2018)).

Lallana Santos, M., Evans Pim, J., 2022. Reciclaje de metales. la alternativa a la minería. *Ecologistas en Acción*, Madrid.

Lee, K., Lush, L., Walt, G., Cleland, J., 1998. Family planning policies and programmes in eight low-income countries: A comparative policy analysis. *Social Science & Medicine* 47, 949–959. [https://doi.org/10.1016/S0277-9536\(98\)00168-3](https://doi.org/10.1016/S0277-9536(98)00168-3)

Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S., Schellnhuber, H.J., 2008. Tipping elements in the Earth's climate system. *PNAS* 105, 1786–1793. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>

London Mining Network, 2020. *Martial Mining*. London Mining Network.

Maitre-Ekern, E., Dalhammar, C., 2016. Regulating Planned Obsolescence: A Review of Legal Approaches to Increase Product Durability and Reparability in Europe. *Review of European, Comparative & International Environmental Law* 25, 378–394. <https://doi.org/10.1111/reel.12182>

Mathieu, L., Mattea, C., 2021. Batteries vs oil: A comparison of raw material needs. *Transport & Environment*.

MEA, 2005. *Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Scenarios*, Global Assessment Reports. Island Press, Washington DC (USA).

Meadows, D.H., Randers, J., Meadows, D.L., 2004. *The limits to growth: the 30-year update*. Chelsea Green Publishing Company, White River Junction, Vt.

MEDEAS, 2016. Deliverable D2.2 (Deliverable MEDEAS project). CIRCE, BSERC, MU, UVa, IIASA, ICM-CSIC & AEA.

Mohr, S.H., Wang, J., Ellem, G., Ward, J., Giurco, D., 2015. Projection of world fossil fuels by country. *Fuel* 141, 120–135. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.030>



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

REFERENCIAS

Moreau, V., Dos Reis, P.C., Vuille, F., 2019. Enough Metals? Resource Constraints to Supply a Fully Renewable Energy System. Resources 8, 29.

<https://doi.org/10.3390/resources8010029>

Moriarty, P., Honnery, D., 2016. Can renewable energy power the future? Energy Policy 93, 3–7. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.051>

Moriarty, P., Honnery, D., 2012. Preparing for a low-energy future. Futures 44, 883–892. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2012.08.002>

Moriarty, P., Honnery, D., 2008. Low-mobility: The future of transport. Futures 40, 865–872. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2008.07.021>

National Geographic, 2021. **Nueve puntos de no retorno del cambio climático con el Mediterráneo como termómetro.**

Nemet, G.F., 2006. Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics. Energy Policy 34, 3218–3232.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.06.020>

Nieto, J., Carpintero, Ó., Lobejón, L.F., Miguel, L.J., 2020. An ecological macroeconomics model: The energy transition in the EU. Energy Policy 145, 111726.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111726>

Nieto, J., Carpintero, Ó., Miguel, L.J., de Blas, I., 2019. Macroeconomic modelling under energy constraints: Global low carbon transition scenarios. Energy Policy 111090.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111090>

Northey, S., Mohr, S., Mudd, G., Weng, Z., Giurco, D., 2014. Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. Resources, Conservation and Recycling 83, 190–201.

Nuss, P., Eckelman, M.J., 2014. Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. PLOS ONE 9, e101298.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298>

OECD, 2019. Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences. OECD Publishing, Paris (France).

OECD, 2018. OECD work on green growth. OECD, <http://www.oecd.org/greengrowth/oecdworkongreengrowth.htm> (Retrieved 12-3-2018).

OECD, 2011. Towards green growth. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA



REFERENCIAS

Parrique, T., Barth, J., Briens, F., Kerschner, C., Kraus-Polk, A., Kuokkanen, A., Spangenberg, J.H., 2019. Decoupling debunked - Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability (No. <https://eeb.org/library/decoupling-debunked/>). European Environmental Bureau (EEB), Brussels, Belgium.

Pavel, C.C., Lacal-Arántegui, R., Marmier, A., Schüler, D., Tzimas, E., Buchert, M., Jenseit, W., Blagoeva, D., 2017. Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines. *Resources Policy* 52, 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.04.010>

Pillai, U., 2015. Drivers of cost reduction in solar photovoltaics. *Energy Economics* 50, 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.05.015>

Prior, T., Giurco, D., Mudd, G., Mason, L., Behrisch, J., 2012. Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. *Global Environmental Change, Global transformations, social metabolism and the dynamics of socio-environmental conflicts* 22, 577–587. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.08.009>

Pulido-Sánchez, D., 2022. Requerimientos materiales y EROI de las tecnologías fotovoltaicas en la transición energética (Trabajo Fin de Máster). Universidad de Valladolid.

Pulido-Sánchez, D., Capellán-Pérez, I., Castro, C. de, Frechoso, F., 2022. Material and energy requirements of transport electrification. *Energy Environ. Sci.* <https://doi.org/10.1039/D2EE00802E>

Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J.C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L.A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J.C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., Tavoni, M., 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change* 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

Sánchez Vázquez, L., Oliveri, C., Escalante Moreno, H., Velázquez Pérez, M. (Eds.), 2022. *Minería y Extractivismos*. Universidad de Granada, Granada.

Sanne, C., 2002. Willing consumers—or locked-in? Policies for a sustainable consumption. *Ecological Economics* 42, 273–287. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00086-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00086-1)

Simas, M., Rocha Aponte, F., Wiebe, K.S., 2022. The Future is Circular - Circular Economy and Critical Minerals for the Green Transition. SINTEF Industri.



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

REFERENCIAS

Smil, V., 2022. The Modern World Can't Exist Without These Four Ingredients. They All Require Fossil Fuels [WWW Document]. Time. URL

<https://time.com/6175734/reliance-on-fossil-fuels/> (accessed 12.29.22).

Smil, V., 2015. Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Smil, V., 2010. Energy Transitions: History, Requirements, Prospects. Praeger, Santa Barbara, California, USA.

Solís, E., 2017. Euroextractivismo, o cómo la Comisión Europea impulsa los proyectos mineros. El Ecologista 94.

Spiegel, S.J., 2015. Contested Diamond Certification: Reconfiguring Global and National Interests in Zimbabwe's Marange Fields, in: Grynberg, R., Mbayi, L. (Eds.), The Global Diamond Industry: Economics and Development Volume II. Palgrave Macmillan UK, London, pp. 153–180.

https://doi.org/10.1057/9781137537614_7

SSP db, 2018. SSP Database (Shared Socioeconomic Pathways) - Version 2.0 (December 2018). Available at: <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb>.

Sverdrup, H., Olafsdottir, A.H., Ragnarsdottir, K.V., Stjernquist, I., Schlyter, P., Parker, J., 2019. Development of the WORLD7 global integrated assessment model (Deliverable 4.3 ADAPTECON II).

Sverdrup, H.U., Ragnarsdottir, K.V., 2014. Natural resources in a planetary perspective. Geochemical Perspectives, volume 3, number 2.

Tokimatsu, K., Wachtmeister, H., McLellan, B., Davidsson, S., Murakami, S., Höök, M., Yasuoka, R., Nishio, M., 2017. Energy modeling approach to the global energy-mineral nexus: A first look at metal requirements and the 2°C target. Applied Energy, Transformative Innovations for a Sustainable Future – Part II 207, 494–509.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.151>

Trainer, T., 2021. Degrowth: How Much is Needed? Biophys Econ Sust 6, 5.

<https://doi.org/10.1007/s41247-021-00087-6>

UNEP, 2013a. Environmental risks and Challenges of anthropogenic metals flows and cycles. International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.

UNEP, 2013b. Metal recycling: Opportunities, limits, infrastructure. International Resource Panel. United Nations Environment Programme.

UNEP, 2011a. Recycling rates of metals. A status report. International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA

REFERENCIAS

UNEP, 2011b. Towards a Green Economy: Pathways to sustainable development and poverty eradication. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.

USGS, 2017. Mineral Commodity Summaries 2017. United States Geological Survey, <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>.

USGS, 2015. Mineral Commodity Summaries 2015. United States Geological Service.

Valero, A., 2014. Límites a la disponibilidad de minerales. *El Ecologista*.

Valero, Alicia, Valero, Antonio, 2010. Physical geonomics: Combining the exergy and Hubbert peak analysis for predicting mineral resources depletion. *Resources, Conservation and Recycling* 54, 1074–1083.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.02.010>

Valero, Alicia, Valero, Antonio, Calvo, G., Ortego, A., 2018. Material bottlenecks in the future development of green technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93, 178–200.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.041>

Van de Ven, D.-J., Capellán-Pérez, I., Arto, I., Cazarro, I., De Castro, C., Patel, P., González-Eguino, M., 2021. The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy. *Scientific Reports* 11, 2907.

<https://doi.org/10.1038/s41598-021-82042-5>

van Vuuren, D.P., Kok, M.T.J., Girod, B., Lucas, P.L., de Vries, B., 2012. Scenarios in Global Environmental Assessments: Key characteristics and lessons for future use. *Global Environmental Change* 22, 884–895.

<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.06.001>

Vidal, O., Le Boulzec, H., Andrieu, B., Verzier, F., 2022. Modelling the Demand and Access of Mineral Resources in a Changing World. *Sustainability* 14, 11.

<https://doi.org/10.3390/su14010011>

Villamor, E., Akizu-Gardoki, O., Heinonen, J.T., Bueno, G., 2022. Global Multi-Regional Input-Output methodology reveals lower energy footprint in an alternative community project. *Sustainable Production and Consumption* 34, 65–77.

<https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.09.003>

Wiedmann, T., Lenzen, M., Keyßer, L.T., Steinberger, J.K., 2020. Scientists' warning on affluence. *Nat Commun* 11, 3107. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16941-y>

World Bank, 2012. Inclusive green growth: the pathway to sustainable development. World Bank Publications, Washington DC (USA).



Demanda de extracción de minerales en la transición energética

ÁREA DE MINERÍA



Área de Minería de Ecologistas en Acción

mineria@ecologistasenaccion.org

www.ecologistasenaccion.org