

TRANSICIÓN ENERGÉTICA Y MINERALES CRÍTICOS

Mariano Marzo Carpio

Catedrático Emérito de la Universidad de Barcelona.

Facultad de Ciencias de la Tierra.

Departamento de Dinámica de la Tierra y del Océano.

ÍNDICE

1. El hombre del hidrocarburo, el cambio climático y la transición energética	5
<hr/>	
2. Transición energética y minerales críticos	7
<hr/>	
3. El imperativo de una transición extractiva acelerada y sostenible	10
<hr/>	
4. El “trilema energético” y el nuevo concepto de seguridad energética	12
<hr/>	
5. La seguridad de suministro de minerales críticos: principales desafíos	14
<hr/>	
6. Recomendaciones para reforzar la seguridad de suministro de los minerales críticos	18
<hr/>	
7. Minerales críticos y la nueva geopolítica energética	19
<hr/>	
8. Resumen de conclusiones	23
<hr/>	
Referencias	26

Mariano Marzo Carpio

Catedrático Emérito de la
Universidad de Barcelona.

Facultad de Ciencias de la Tierra.

Departamento de Dinámica
de la Tierra y del Océano.

Junio 2023



La transición a un sistema energético bajo en emisiones de carbono está en marcha. Una realidad que, sin duda, tiene serias repercusiones globales sobre las economías y la geopolítica. A medida que la nueva economía energética toma forma, muchas naciones compiten entre sí para fortalecer y diversificar sus cadenas de suministro de tecnologías bajas en carbono cuya manufactura depende en última instancia de una serie de minerales, denominados críticos. Estos contienen una serie de elementos químicos, metálicos o no metálicos, que son esenciales para las tecnologías modernas, las economías y la seguridad nacional, pero cuyas cadenas de suministro presentan riesgo de interrupción, sea por escasez geológica, cuestiones geopolíticas, decisiones comerciales u otros factores.

Sin cadenas de suministro seguras y resilientes de estos minerales y sus productos derivados, las transiciones energéticas corren el riesgo de volverse más lentas y costosas. Además, en muchos países industrializados, y en particular en los estados miembros de la Unión Europea, las ambiciones de descarbonización crecen en paralelo a la preocupación por una excesiva dependencia de las importaciones. Para mitigar futuras perturbaciones se hace necesaria una estrategia que aúne inversión, innovación, reciclaje y estándares de sostenibilidad rigurosos. Estos objetivos pueden impulsarse mediante una serie de decisiones políticas encaminadas a racionalizar los procedimientos de concesión de permisos mineros y de construcción de plantas de procesamiento, así como a reducir los riesgos de inversión y a facilitar el comercio internacional con proveedores diversificados.

En este contexto, las líneas que siguen pretenden aportar una visión general, introductoria, acerca de los desafíos planteados por los minerales críticos, poniendo especial énfasis en la problemática existente en torno a su seguridad de suministro.

1. El hombre del hidrocarburo, el cambio climático y la transición energética

Con anterioridad a la revolución industrial, el desarrollo de las sociedades humanas quedaba acotado por la tasa a la que estas eran capaces de aprovechar la radiación solar y sus transformaciones al incidir sobre nuestro planeta. Los rendimientos medios de los cultivos eran bajos, ocasionando desnutrición crónica y hambrunas recurrentes, mientras que el almacenamiento de la energía estaba seriamente coartado por la baja densidad energética de la biomasa. Aun así, las sociedades antiguas fueron capaces de aumentar gradualmente el uso per cápita de la energía, aprovechando el agua y el viento y desplegando una creciente fuerza de trabajo, mayoritariamente integrada por esclavos y animales.

La extracción a gran escala y la combustión de carbón, petróleo y gas natural significaron un cambio fundamental en el tipo e intensidad de los usos de la energía. La madre naturaleza ha posibilitado, a través de la fotosíntesis y

de un largo y complejo proceso geológico, el almacenamiento de la energía solar en los enlaces químicos de los átomos de hidrógeno y carbono que integran las moléculas de los hidrocarburos o combustibles fósiles.

Esta herencia solar nos ha dado acceso a unos recursos energéticos muy concentrados y fáciles de almacenar y que han podido ser utilizados a un ritmo creciente. El uso de los combustibles fósiles ha permitido a los humanos superar los límites al consumo de energía impuestos por la baja eficiencia de la fotosíntesis y por los bajos rendimientos de las corrientes de agua y aire. Como resultado, y gracias a la aportación de los hidrocarburos, el consumo energético global ha aumentado a unos niveles sin precedentes: el uso de energía primaria (biomasa, combustibles fósiles, renovables y nuclear) se ha multiplicado casi por sesenta, pasando de algo más de 10 exajulios en 1750 a 619 exajulios en 2019.

Desde 1950 hasta 2019, el mundo ha multiplicado por más de cinco su consumo energético, reflejando la aspiración de los habitantes del planeta a vivir mejor y, también, las crecientes necesidades energéticas derivadas del crecimiento de la población mundial. Durante el periodo de





tiempo mencionado, el PIB mundial se ha multiplicado por un factor cercano a siete y la población mundial, por más de dos.

Todo esto ha sido posible gracias a los combustibles fósiles, que, según datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2021a), en 2019 representaban casi el 81% del total de la energía primaria consumida en el mundo: petróleo (30,9%), gas natural (23,2%) y carbón (26,8%). Unos porcentajes que en 2021, según BP Statistical Review of World Energy (2022), habrían alcanzado algo más del 82% del total arriba mencionado, con el petróleo situándose en torno al 30,9%, el gas natural en el 24,4% y el carbón en el 26,9%. Centrándonos en ámbitos geográficos y económicos que nos son más próximos, los datos de Eurostat (2023) nos dicen que en la UE, en 2022, el porcentaje de la demanda cubierto por combustibles fósiles fue del 69% (34% petróleo y derivados, 23% gas natural y 12% combustibles sólidos que incluyen diversos tipos de carbón y productos derivados) mientras que en España, según la misma fuente y para la misma fecha, dicho porcentaje fue del 72% (45,7%, 23,4% y 2,9% respectivamente).

Nuestra civilización depende en demasía de fuentes energéticas ricas en carbono,

cuya combustión en cantidades crecientes ha situado a la humanidad frente a un inesperado desafío: las elevadas cantidades de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero (GEI) emitidas a la atmósfera están sobrecalentado el planeta. Hoy en día existe un amplio consenso científico sobre el hecho de que, desde la revolución industrial, y muy particularmente desde mediados del siglo XX, los humanos hemos forzado el calentamiento del planeta más allá de los ciclos climáticos naturales. Lo que implica que ha llegado el momento de encontrar la manera de “regular el termostato” utilizando nuestro ingenio y capacidad de cooperación. Estamos ante una verdadera situación de emergencia que se está traduciendo en una gran movilización internacional para mitigar los ya palpables efectos de este fenómeno que, a medio-largo plazo, se prevén catastróficos.

Dicha mitigación pasa por la denominada transición energética. Y esta comporta: 1) desacoplar crecimiento económico y demográfico del aumento de las emisiones de CO₂ y otros GEI; 2) avanzar a marchas forzadas hacia una economía de baja intensidad energética (eficiente) y descarbonizada (impulsada por un

mix bajo en carbono); y 3) desplegar, a gran escala, tecnologías que permitan la retirada y reutilización del carbono de la atmósfera, propiciando una economía circular del CO₂. Una tarea épica que requiere de un gran pacto o coalición, basado en la ciencia y la tecnología, que incluya a gobiernos, entidades financieras, inversores, empresas y a todos los sectores sociales y ciudadanos comprometidos en la lucha contra el cambio climático.

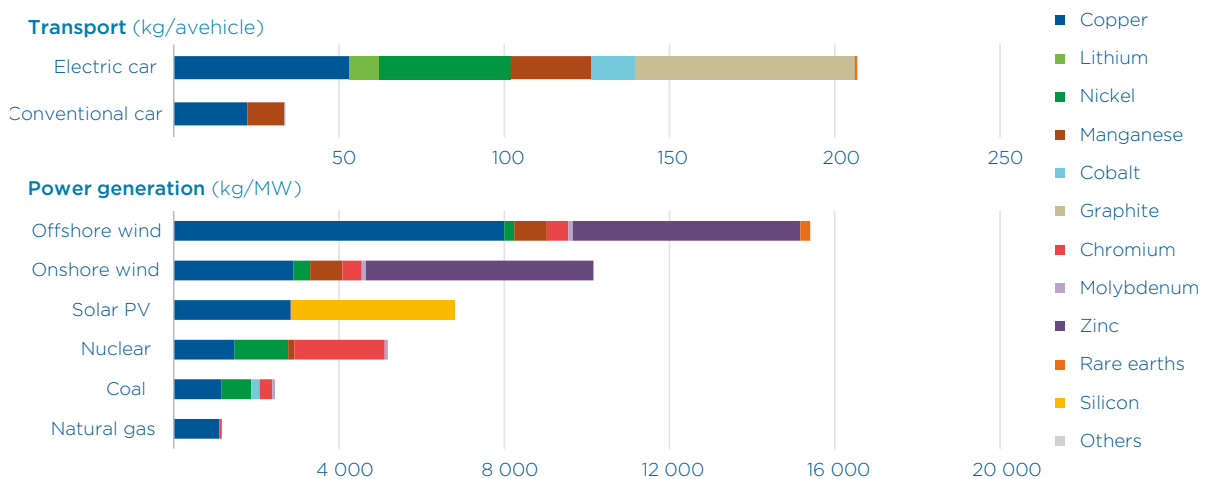
2. Transición energética y minerales críticos

Un sistema energético basado en tecnologías bajas en emisiones de carbono difiere profundamente de uno,

como el actual, básicamente alimentado por carbón, petróleo y gas natural. Una de las principales diferencias es que las instalaciones solares fotovoltaicas y eólicas generadoras de electricidad, o los vehículos eléctricos, por citar tres ejemplos significativos de dichas tecnologías, requieren más recursos minerales que sus equivalentes alimentados por combustibles fósiles (IEA, 2022a). Así, un coche eléctrico multiplica por seis las materias primas minerales utilizadas por un automóvil convencional (con motor de combustión interna) y una planta eólica requiere nueve veces más minerales que una central de ciclo combinado de gas natural (ver figura 1). Por esta razón, desde 2010, a medida que el porcentaje de renovables en el mix energético global ha ido aumentando, la cantidad promedio de minerales necesarios por unidad de capacidad de generación eléctrica ha aumentado en un 50%.

Figura 1. El despliegue de las tecnologías energéticas bajas en emisiones de carbono implica un aumento significativo de la demanda de minerales. Fuente: IEA (2022a).

Minerals used in selected clean energy technologies



Notes: kg = kilogramme; MW = megawatt. The values for vehicles are for the entire vehicle including batteries, motors and glider. The intensities for an electric car are based on a 75 kWh NMC (nickel manganese cobalt) 622 cathode and graphite-based anode. The values for offshore wind and onshore wind are based on the direct-drive permanent magnet synchronous generator system (including array cables) and the doubly-fed induction generator system respectively. The values for coal and natural gas are based on ultra-supercritical plants and combined-cycle gas turbines. Actual consumption can vary by project depending on technology choice, project size and installation environment.

Los tipos de recursos minerales utilizados varían según la tecnología (*ver figura 2*). Litio, níquel, cobalto, manganeso y grafito son cruciales para el rendimiento, longevidad y densidad energética de las baterías. Los elementos de las tierras raras son esenciales para los imanes permanentes que resultan vitales para las turbinas eólicas y los motores de los vehículos eléctricos. Las redes eléctricas necesitan una gran cantidad de cobre y aluminio, siendo el primero de estos dos elementos químicos una piedra angular para todas las tecnologías relacionadas con la electricidad.

El cambio a un sistema energético descarbonizado requerirá, por tanto, un gran aumento en la demanda de estos minerales. Dependiendo del escenario que se considere, en 2040 y a escala global, esta podría multiplicarse entre cuatro a seis veces respecto a la actual (*ver figura 3*), de forma que el sector energético se configuraría como una importante fuerza impulsora de los mercados de minerales (IEA, 2022a, 2022b, 2023). Hasta mediados de la década de 2010, dicho sector solo representó una pequeña parte de la demanda total de la mayoría

Figura 2. Las necesidades de minerales críticos varían según la tecnología que se considere. La importancia de cada mineral viene indicada por los círculos azul oscuro, azul claro y blancos, que se corresponden, respectivamente, con una importancia alta, moderada o baja. Fuente: IEA (2022a).

Critical mineral needs for clean energy technologies

	Copper	Cobalt	Nickel	Lithium	REEs	Chromium	Zinc	PGMs	Aluminium*
Solar PV	●	○	○	○	○	○	○	○	●
Wind	●	○	●	○	●	●	●	○	●
Hydro	●	○	○	○	○	●	●	○	●
CSP	●	○	●	○	○	●	●	○	●
Bioenergy	●	○	○	○	○	○	●	○	●
Geothermal	○	○	●	○	○	●	○	○	○
Nuclear	●	○	●	○	○	●	○	○	○
Electricity networks	●	○	○	○	○	○	○	○	●
EVs and battery storage	●	●	●	●	●	○	○	○	●
Hydrogen	○	○	●	○	●	○	○	●	●

Notes: Shading indicates the relative importance of minerals for a particular clean energy technology (● = high; ● = moderate; ○ = low), which are discussed in their respective sections in this chapter.

CSP = concentrating solar power; PGM = platinum group metals.

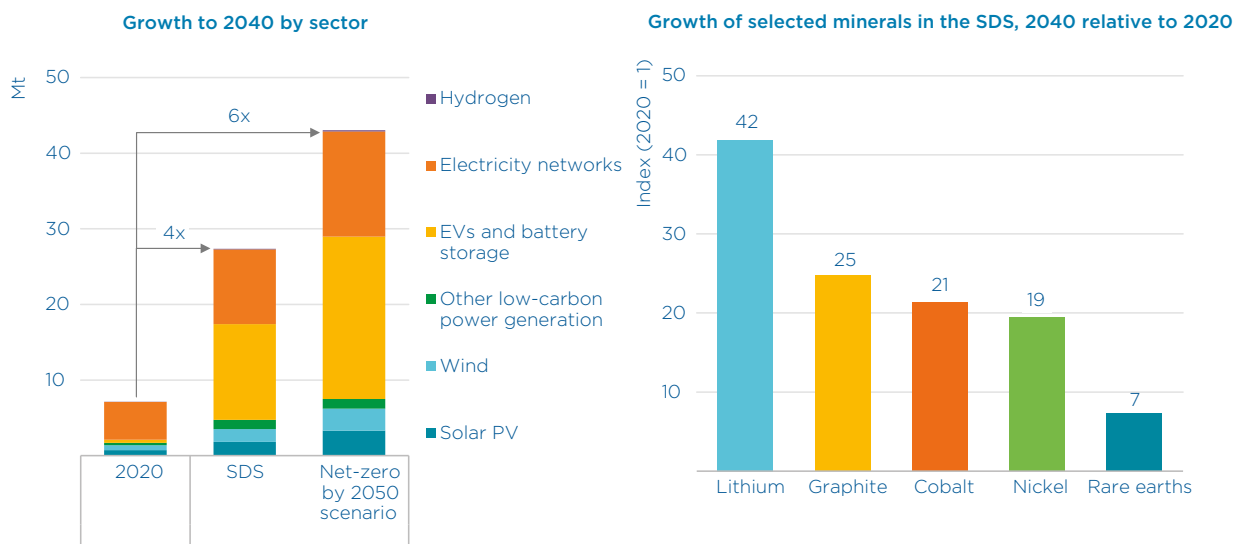
*In this report, aluminium demand is assessed for electricity networks only and is not included in the aggregate demand projections.

de los minerales. Sin embargo, a medida que la transición energética se acelera, las tecnologías bajas en emisiones de carbono se están convirtiendo en el segmento de dicha demanda que experimenta un crecimiento más rápido. De acuerdo con las fuentes anteriormente citadas en este mismo párrafo, en un escenario que cumpla con los objetivos del Acuerdo de París, la participación de dichas tecnologías en la demanda total de minerales aumenta significativamente en las próximas dos décadas: más del 40% para el cobre y los elementos de las tierras

raras, 60-70% para el níquel y cobalto, y casi 90% para el litio. Los vehículos eléctricos y el almacenamiento de electricidad en baterías ya han desplazado a la electrónica de consumo para convertirse en las principales tecnologías consumidoras de litio, mientras que las proyecciones apuntan a que en 2040 también desplazarán al acero inoxidable como el mayor usuario final de níquel.

Figura 3. Desde 2020 hasta 2040, para cumplir los objetivos climáticos, la demanda de minerales para tecnologías energéticas bajas en emisiones de carbono aumentaría entre cuatro y seis veces, con un crecimiento particularmente alto en el caso de los minerales relacionados con los vehículos eléctricos. En la figura de la izquierda se muestra el crecimiento de la demanda por sector y en el de la derecha por mineral. En la figura de la izquierda el crecimiento de la demanda a 2040 es diferente según se considere el escenario SDS (Sustainable Development Scenario) o el escenario NZE 2050 (Net Zero Emissions by 2050). Las características de ambos escenarios pueden consultarse en IEA (2020). Fuente: IEA (2022a).

Mineral demand for clean energy technologies by scenario



Notes: Mt = million tonnes. Includes all minerals in the scope of this report, but does not include steel and aluminium. See Annex for a full list of minerals.

3. El imperativo de una transición extractiva acelerada y sostenible

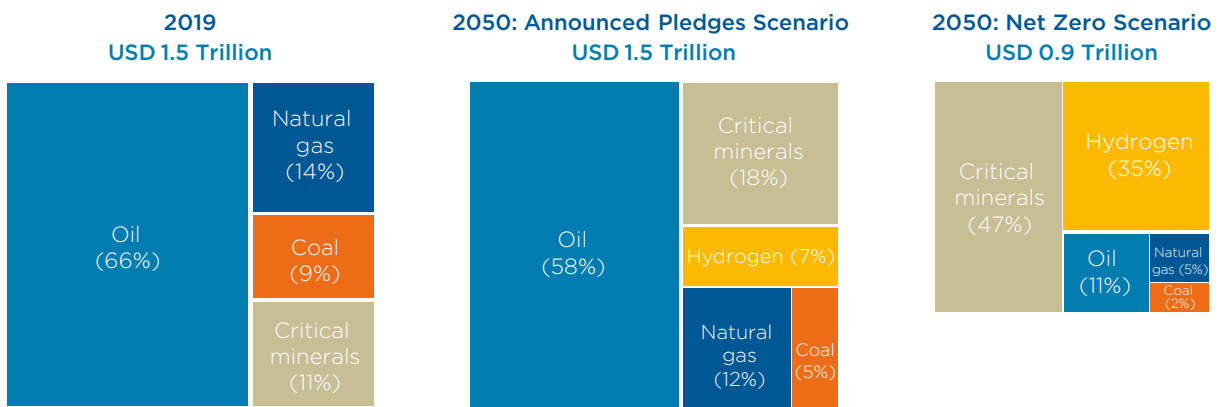
El comercio internacional de materias primas desempeña un papel crucial en la economía energética mundial. En la actualidad dicho comercio está dominado por los combustibles fósiles, petróleo, gas natural y carbón. Sin embargo, los cambios en los patrones de consumo previstos a futuro en los diferentes escenarios de transición energética, como por ejemplo los de la Agencia Internacional de la Energía, permiten vislumbrar importantes cambios. Entre estos, según el organismo citado (IEA, 2021b), cabe destacar el espectacular vuelco que experimentaría el comercio internacional de materias primas energéticas, en el caso de que el mundo se situara en la senda que conduce al objetivo climático de alcanzar las cero emisiones netas hacia mitad de este siglo. De este

modo, tal y como se ilustra en la *figura 4*, los minerales críticos y el hidrógeno bajo en carbono estarían llamados a adquirir un protagonismo dominante, relegando a los combustibles fósiles a un papel secundario. En particular, los minerales críticos pasarían de representar un 11% del total del valor del comercio internacional de materias primas energéticas en 2019, al 47% de dicho total en 2050, mientras que los combustibles fósiles evolucionarían en sentido inverso, pasando de un 89% en 2019 a un 18% en 2050.

Está claro que la transición energética lleva aparejada una transición extractiva, de los hidrocarburos a los minerales críticos, la cual debería concretarse en unas pocas décadas. Y, sin duda, la gestión de los impactos ambientales, económicos, sociales y geopolíticos generados a lo largo de toda la cadena de valor de las nuevas materias primas necesarias para la transición energética, desde su extracción y procesado hasta su reciclado final, constituye un enorme desafío.

Figura 4. Auge del comercio internacional de minerales críticos y retroceso del de los hidrocarburos: compárense los porcentajes relativos de dichas materias primas en 2019 (a la izquierda) y en 2050 en un escenario climáticamente muy ambicioso como es el de Cero Emisiones Netas (a la derecha). Las características de los dos escenarios mencionados en la figura (Announced Pledges Scenario y Net Zero Scenario) pueden consultarse en IEA (2021b). Fuente: IEA (2021c).

Value of international energy-related resource trade



Diversos estudios concluyen que producir los materiales necesarios para la transición energética será una tarea ardua. Como ya se ha indicado con anterioridad, la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2022a) pronostica que mantener al mundo en una senda compatible con los objetivos del Acuerdo Climático de París requerirá multiplicar por seis la producción de dichos materiales entre 2020 y 2040, hasta alcanzar 43 millones de toneladas por año. Una cifra que, a primera vista, puede parecer pequeña si se la compara con la de la industria de los combustibles fósiles, que a escala global y solo en 2020 movilizó aproximadamente 15.000 millones de toneladas de carbón, petróleo y gas natural, cuya combustión comportó la emisión de 32.000 millones de toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera. Sin embargo, como señala Turner (2022), la tarea será más difícil de lo que parece. El níquel, el cobalto y el cobre, junto a muchos otros materiales relevantes para el sector energético, se encuentran en minerales de baja ley, implicando mucha más actividad extractiva, procesamiento y desechos que los combustibles fósiles. Asegurar los millones de toneladas de materiales elaborados necesarios para la transición requerirá extraer cientos o miles de veces más cantidad de mineral en bruto. Y aunque la transición pueda en última instancia reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, en la medida que los procesos mineros se apoyen cada vez más en energías renovables, el cambio de modelo energético requerirá el procesamiento de minerales metálicos a una escala que rivaliza con el flujo de materias primas de las actuales industrias de los combustibles fósiles.

Los impactos negativos potenciales de la transición extractiva son considerables. La minería a gran escala afecta a los ecosistemas, amenaza el suministro de agua y, en ocasiones, está vinculada a malas condiciones de trabajo, corrupción y abusos contra los derechos humanos. Pero incrementar la minería para impulsar la transición a fuentes energéticas bajas en carbono también ofrece la oportunidad de reformar la producción de materiales,

haciéndola social y ambientalmente más justa y sostenible. Sin duda, los países desarrollados, que a menudo han externalizado la extracción de minerales en el extranjero, deben ayudar a asumir estas cargas y a implementar vías de desarrollo responsables. Por otro lado, para afrontar el desafío global de la transición energética se necesitan políticas gubernamentales que apoyen las inversiones de los sectores público y privado en cada etapa de la extracción y el procesamiento de los minerales críticos. Esto significa impulso a la exploración, procedimientos simplificados de concesión de permisos mineros, investigación de nuevas tecnologías, apoyo para expandir la capacidad de procesamiento y acuerdos comerciales internacionales que garanticen el suministro. Durante la última década, China ha priorizado tales inversiones público-privadas desde la mina hasta la fábrica. Y más recientemente los Estados Unidos y la Unión Europea han comenzado a adoptar políticas similares, destinadas a desarrollar cadenas de suministro propias y diversificar las fuentes internacionales de materiales relevantes para la energía.

Como ya se ha comentado, la transición energética pasa por una transición extractiva: del petróleo, gas y carbón a una amplia gama de minerales. A medio-largo plazo, la innovación ayudará a superar parte de los desafíos planteados por este tránsito, pero no eliminará la naturaleza intensiva en materiales de las tecnologías bajas en carbono. Hay que tener muy presente esta nueva realidad y aprestarse a gestionar los múltiples desafíos y oportunidades que conlleva. Y uno de estos desafíos es el de garantizar la seguridad de las cadenas de suministro de los minerales críticos. Esto constituye una verdadera condición sine qua non, es decir, indispensable, para la posterior manufactura y despliegue de las tecnologías energéticas bajas en emisiones de carbono. Los apartados que siguen se centran en este desafío, localizado en el primer eslabón de toda la cadena de valor de la transición energética.

4. El “trilema energético” y el nuevo concepto de seguridad energética

La sostenibilidad energética de una comunidad no solo se mide por el impacto ambiental de todas y cada una de las múltiples y variadas facetas que integran su sistema energético. Además del impacto ambiental, también hay que analizar las repercusiones de dicho sistema sobre la economía y el poder adquisitivo de los ciudadanos, así como sobre la seguridad del suministro.

Es decir, que la batalla de la sostenibilidad energética se dirime en tres frentes simultáneos. Para simplificar, podemos convenir que estos dibujan un triángulo de vértices definidos por: 1) el medio

ambiente, considerando impactos tanto a escala global, como local; 2) la economía, incluyendo preocupaciones que van desde las grandes cuentas del estado a la pobreza energética, pasando por la competitividad de las empresas; y 3) la seguridad, fiabilidad y calidad de los suministros. Una complejidad, conocida como el “trilema energético”, que la política convencional aconseja abordar tratando de buscar un equilibrio, más o menos dinámico, adaptado a cada caso concreto y a la coyuntura entre los tres vértices comentados. Si adoptamos actuaciones muy decantadas hacia uno de ellos, se corre el riesgo de descuidar los otros dos frentes y perder la batalla. Esto quiere decir que debemos aspirar a un sistema energético lo más limpio, barato y seguro posible. No nos podemos conformar con un suministro seguro y relativamente barato, aunque



medioambientalmente sucio. Pero tampoco resulta recomendable aspirar a un suministro limpio, a costa de descuidar la seguridad y/o los costes.

La actual crisis energética que atraviesa la Unión Europea pone de manifiesto, en toda su crudeza, las consecuencias de descuidar una gestión conjunta de las tres facetas que integran el “trilema energético”. Ciertamente, la crisis se ha visto agravada por la guerra de Ucrania, pero eso no oculta el hecho de que la Unión Europea haya centrado preferentemente su política energética en afrontar la innegable emergencia climática, relegando a un segundo plano los frentes de la economía y la seguridad de suministro. Algo que en este último aspecto resulta sorprendente por cuanto era bien conocido que la dependencia de las importaciones de hidrocarburos constituía (y constituye) una importante vulnerabilidad estratégica de la Unión Europea (Marzo, 2022).

Para paliar la situación, Europa se ha propuesto acelerar la transición energética. Sin embargo, esta opción, además de no aportar soluciones inmediatas, tampoco obvia las presiones sobre su seguridad energética a medio y largo plazo. Presiones que quizás no estén tan centradas, como hasta ahora, sobre el suministro de combustibles fósiles, pero que, tal y como se ha justificado en páginas precedentes (y puede visualizarse en las *figuras 7 y 8*, referidas más adelante en el apartado 7), si lo estarán sobre el suministro de los minerales críticos necesarios para la transición energética.

De hecho, tal y como ha señalado la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2021d) en el camino hacia las cero emisiones netas que la Unión Europea y buena parte del mundo han emprendido, el concepto de seguridad energética está llamado a experimentar grandes cambios. Además de no descuidar la seguridad del suministro de hidrocarburos, habrá que prestar una especial atención a otros temas emergentes de importancia creciente, tales como, por ejemplo,

la flexibilidad del sistema eléctrico, la ciberseguridad y la seguridad de las cadenas de suministro, tanto de la energía, como de las tecnologías bajas en emisiones de carbono.

En relación con este último aspecto, la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2023) considera que los eslabones que integran las cadenas de suministro de tales tecnologías están representados por los diferentes pasos necesarios para instalarlas, incluyendo los correspondientes insumos de materiales, componentes y servicios involucrados en cada paso. En el caso de las tecnologías de energía bajas en emisiones de carbono, los principales eslabones de su cadena de suministro incluyen, de principio a fin, la extracción de minerales, el procesamiento de estos para convertirlos en materiales utilizables, la fabricación de componentes, su montaje en equipos, la instalación de ese equipo, su funcionamiento, su desmantelamiento y la reutilización o reciclaje de determinados componentes. Estas tecnologías incluyen tanto equipos de generación de energía, por ejemplo, sistemas solares fotovoltaicos (que pueden variar en escala desde sistemas domésticos hasta grandes plantas) o electrolizadores para producir hidrógeno, como equipamientos de uso final de la energía, entre los que a modo de ejemplo cabe mencionar los vehículos eléctricos, las bombas de calor o los vehículos de pila de combustible impulsados por hidrógeno.

Ciertamente, estamos ante un entramado muy complejo, no solo por la suma de desafíos que supone considerar los múltiples eslabones que componen las cadenas de suministro de las tecnologías bajas en emisiones de carbono, sino, también, por la diversidad y especificidad de los retos inherentes a cada eslabón. Este último aspecto queda perfectamente ilustrado en el apartado que sigue, esencialmente centrado en el primero y, en menor medida, en el segundo de tales eslabones, es decir la extracción y el procesamiento de minerales críticos.

5. La seguridad de suministro de minerales críticos: principales desafíos

Al mismo tiempo que los países aceleran sus esfuerzos para mitigar el cambio climático y mejorar la calidad del aire en las ciudades, también deben asegurarse de que sus sistemas energéticos permanecen resilientes y seguros. Sin embargo, los actuales mecanismos internacionales de seguridad energética están diseñados para ofrecer una respuesta rápida frente a posibles interrupciones en el suministro de hidrocarburos o a subidas puntuales de los precios de estos, muy particularmente del petróleo. En este sentido, los minerales presentan un conjunto de desafíos diferente y muy específico, de modo que los responsables de las políticas energéticas deben ampliar sus horizontes de análisis y actuación, considerando las nuevas vulnerabilidades asociadas a la creciente importancia del suministro de minerales para la descarbonización del sistema energético. Sería ingenuo pensar que en un sistema electrificado y con un gran protagonismo de las renovables las preocupaciones sobre la volatilidad de los precios y la seguridad del suministro van a desaparecer.

De hecho, la perspectiva de un rápido aumento de la demanda de minerales críticos suscita importantes interrogantes acerca de su disponibilidad y fiabilidad de suministro. En el pasado, las tensiones en el balance oferta-demanda de diversos

minerales propiciaron un aumento de las inversiones y la implementación de medidas sustitutivas para moderar la demanda. Pero estas repuestas llegaron con un cierto retraso en el tiempo y se vieron acompañadas por una considerable volatilidad en los precios. La ocurrencia de episodios similares en el futuro podría retrasar la transición hacia el uso de energías más limpias y provocar subidas de precios. Y en un contexto de emergencia climática, en la que resulta urgente reducir emisiones, esta es una posibilidad que el mundo no puede permitirse y debe saber gestionar.

Conviene tener muy presente que las materias primas representan un elemento significativo en la estructura de costes de muchas de las tecnologías requeridas por la transición energética. En el caso de las baterías de ion de litio, el aprendizaje tecnológico y las economías de escala han rebajado los costes totales en cerca del 90% durante la última década. Sin embargo, el coste de las materias primas también es ahora mayor, representando en torno al 50-70% del total de los costes de una batería, cuando cinco años atrás dicho porcentaje era del 40-50%. Por tanto, unos precios más altos de los minerales pueden tener repercusiones significativas. Así, por ejemplo, duplicar los precios del litio o del níquel se traduciría en un incremento del 6% en el coste de las baterías. Y si los precios de ambos se duplicaran al mismo tiempo, esto anularía toda la reducción de costes unitarios resultante de duplicar la capacidad de producción de baterías. En el caso de las redes eléctricas, el cobre y el aluminio representan en la actualidad alrededor del 20% del total de los costes de inversión,



de modo que unos precios más altos de ambos elementos, ligada a limitaciones del suministro, tendría un gran impacto sobre el nivel de inversión en redes.

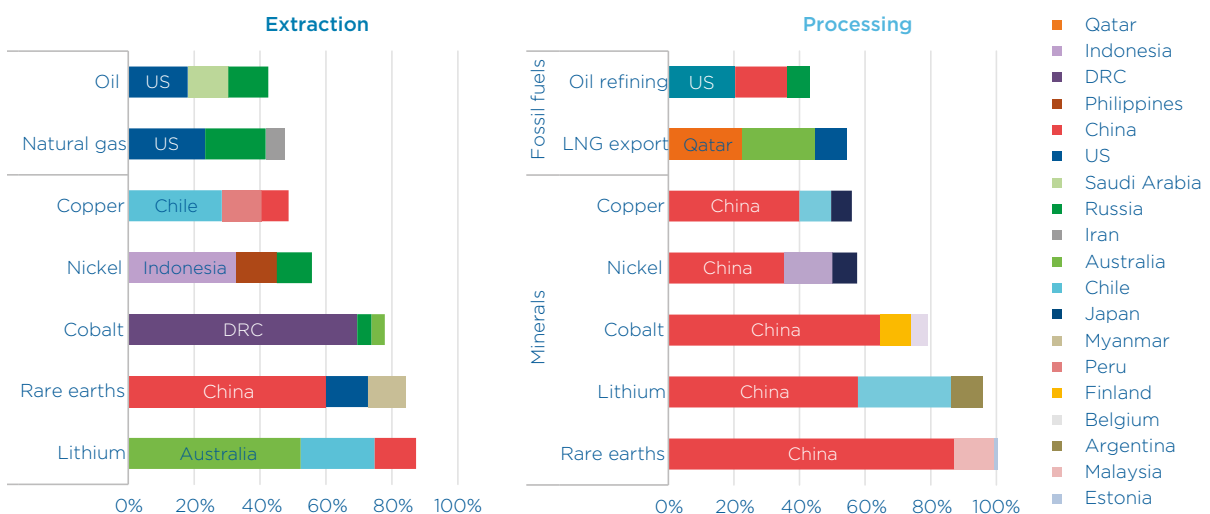
En este contexto, la realidad es que, hoy en día, los planes de suministro e inversión en minerales críticos a escala global contemplan una actuación gradual, a todas luces insuficiente para mitigar el cambio climático. Estos planes no están pensados para impulsar una transición energética acelerada. Además, aunque existen un buen número de proyectos en diferentes estadios de desarrollo, estos presentan múltiples vulnerabilidades que podrían incrementar las tensiones en los mercados y la volatilidad de precios. Entre estos puntos débiles cabe destacar los siguientes (IEA, 2022a).

• **La concentración geográfica de la producción y el procesado es muy alta.**

Aunque pueda resultar sorprendente, la realidad es que las actividades de explotación y procesado de muchos minerales necesarios para la transición energética están más concentradas que las de petróleo y gas natural (ver figura 5). Así, en el caso del litio, el cobalto y los elementos de las tierras raras, los tres primeros países en el ranking de países productores controlan más de tres cuartas partes de la extracción global y, en algunos casos, un solo país monopoliza más de la mitad del total mundial. Por ejemplo, en 2019, la República Democrática del Congo (RDC) y China contabilizaron cerca del 70% y del 60% de la explotación mundial de cobalto y de elementos de las tierras

Figura 5. Hoy en día, tanto la extracción como el posterior procesado de muchos minerales necesarios para la transición energética están más concentrados geográficamente que en el caso del petróleo y el gas natural. Las barras horizontales a la izquierda muestran el porcentaje de la extracción global de petróleo y gas natural, así como de diversos minerales críticos, cubierto por los tres primeros países del ranking mundial de países productores en 2019. Las barras horizontales a la derecha muestran el mismo porcentaje pero en relación con el procesado-refino. Fuente: IEA (2022a).

Share of top three producing countries in production of selected minerals and fossil fuels, 2019

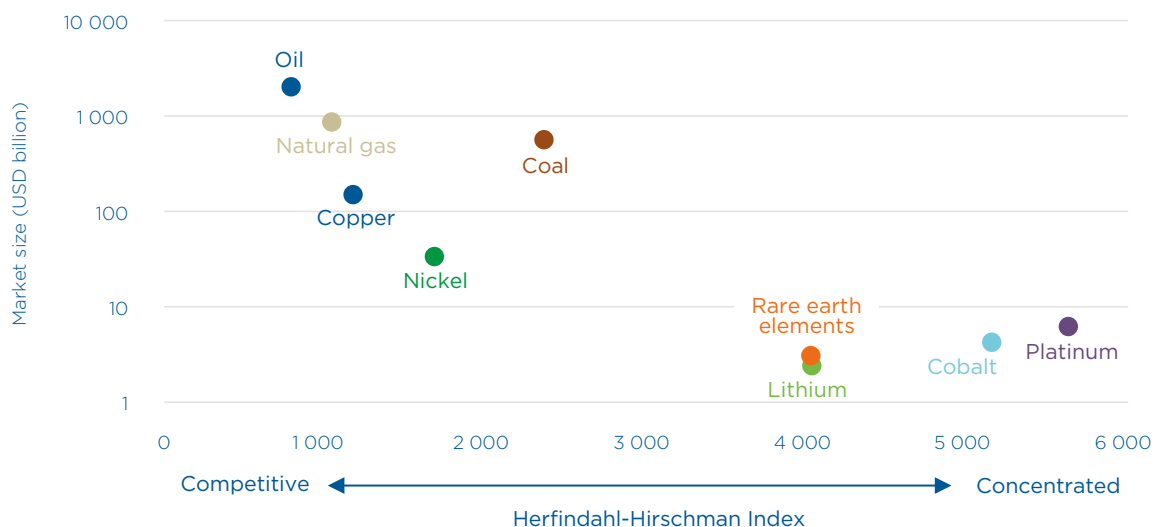


Notes: LNG = liquefied natural gas; US = United States. The values for copper processing are for refining operations.
Sources: IEA (2020a); USGS (2021), World Bureau of Metal Statistics (2020); Adamas Intelligence (2020).

raras, respectivamente. Y el grado de concentración es incluso mayor para las operaciones de procesado, donde China tiene una fuerte presencia en todos los ámbitos. La participación de China en el refinado de minerales a escala mundial ronda el 35% para el níquel, el 50-70% para el litio y el cobalto, y casi el 90% para los elementos de las tierras raras. Además, las empresas chinas también han realizado importantes inversiones en Australia, Chile, RDC e Indonesia. Sin duda, tal y como se ilustra en la *figura 6*, hoy en día, los mercados de minerales críticos son por lo general, mucho más pequeños, están geográficamente más concentrados y son menos competitivos que los de hidrocarburos. Todo ello, agravado por la complejidad de las cadenas de suministro, aumenta los riesgos que podrían derivarse de disrupciones físicas, restricciones comerciales u otros acontecimientos en los principales países productores.

- **El desarrollo de nuevos proyectos mineros requiere mucho tiempo.** Se estima que, desde el momento del descubrimiento de un yacimiento hasta su puesta en producción transcurren, de media, unos 16 años. Este dilatado periodo de tiempo suscita interrogantes sobre la capacidad de los suministradores de incrementar su oferta para cubrir adecuadamente una aceleración de la demanda. Si las compañías mineras esperan a que se materialice un déficit de oferta antes de embarcarse en nuevos proyectos, podrían generarse prolongados periodos de escasez y volatilidad de precios en los mercados.
- **La calidad de los recursos está en declive.** Las preocupaciones sobre los recursos minerales críticos para la transición energética se relacionan más con la calidad que con la cantidad. No existe una carestía inminente de recursos, pero en los últimos años, la calidad de los depósitos de diversas materias primas

Figura 6. Tamaño del mercado y grado de concentración-competitividad para diversas materias primas energéticas en 2019. El índice de Herfindahl-Hirschman (HHI), referido en la parte inferior de la figura, es una medida de la concentración y competitividad de un mercado. Un HHI de menos de 1500 se considera un mercado competitivo, y un HHI de 2500 o superior sería un mercado altamente concentrado y poco competitivo. El HHI para minerales críticos se calcula en función de las operaciones mineras. Los valores para las operaciones de refinado son generalmente más altos que los de la minería. Fuente: IEA (2021b).



minerales ha experimentado un descenso continuado. Por ejemplo, en Chile, la ley media del mineral de cobre (grado de concentración de este elemento en el mineral de un yacimiento) ha declinado en un 30% en los últimos 15 años. Extraer un metal de un yacimiento de menor grado requiere del uso de más energía, lo que se traduce en un aumento de los costes de producción, de las emisiones de gases de efecto invernadero y del volumen de residuos.

- **El escrutinio del desempeño ambiental y social de las empresas es cada vez más exigente.** La producción y procesado de los recursos minerales tiene una serie de impactos ambientales y sociales que, mal gestionados, pueden perjudicar a las comunidades locales e interrumpir el suministro. Cada vez más, consumidores e inversores piden que las empresas aseguren un suministro de minerales producidos de forma responsable y sostenible. En caso contrario, el mercado puede dar la espalda a aquellas que no cumplan determinados estándares y esto podría tensionar las cadenas de suministro.

- **La exposición a riesgos derivados del cambio climático aumenta.** Los activos mineros están muy expuestos a los riesgos climáticos. Por ejemplo, las explotaciones de cobre y litio son particularmente vulnerables al estrés hídrico dadas sus altas necesidades de agua y, en la actualidad, más del 50% de la producción de ambos elementos se encuentra concentrada en áreas en que dicho estrés es alto. Por otra parte, algunas de las principales regiones productoras de minerales críticos para la transición energética, como es el caso de Australia, China y África, también presentan un alto riesgo de calor extremo o inundaciones, lo que supone un desafío potencial a la hora de garantizar unos suministros fiables y sostenibles.

Todos estos riesgos son gestionables, pero eso no los hacen menos reales. Sin duda, la manera como gobiernos y empresas respondan al desafío determinará si los minerales críticos devienen facilitadores del cambio hacia un modelo energético más limpio o, por contra, un cuello de botella en dicho proceso.



6. Recomendaciones para reforzar la seguridad de suministro de los minerales críticos

En relación con la disyuntiva planteada al final del párrafo anterior, para avanzar en la transición hacia un modelo energético bajo en emisiones de carbono, la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2022a) recomienda las siguientes seis actuaciones clave:

- **Asegurar una inversión adecuada en nuevas fuentes de suministro.** Los gobiernos pueden desempeñar un papel importante a la hora de crear las condiciones necesarias para atraer una inversión empresarial creciente y convenientemente diversificada en las cadenas de suministro de minerales.
- **Promover la innovación tecnológica en todos los puntos de la cadena de valor.** Intensificar los esfuerzos de investigación y desarrollo para la innovación tecnológica, tanto desde la perspectiva de la demanda como de la producción, puede permitir un uso más eficiente de los materiales, la sustitución

de estos y desbloquear un volumen importante de nuevos suministros, lo que, por otra parte, aportaría beneficios sustanciales en materia ambiental y de seguridad.

- **Escalar el reciclaje.** Las políticas gubernamentales deben impulsar e incentivar el reciclaje de productos que llegan al final de su vida útil, preparar a la sociedad para un gran crecimiento de los volúmenes de residuos, apoyar aquellas actividades que propicien una recogida y clasificación más eficientes de tales residuos, y financiar la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías de reciclaje.
- **Mejorar la resiliencia de las cadenas de suministro y la transparencia del mercado.** Los responsables políticos deben explorar una serie de medidas para mejorar la resiliencia de las cadenas de suministro de diferentes minerales, desarrollar capacidades de respuesta a posibles interrupciones del suministro y mejorar la transparencia del mercado. Las medidas pueden incluir evaluaciones periódicas del mercado y pruebas de resistencia, así como, en algunos casos, la creación de reservas estratégicas voluntarias.



- **Incorporar normas ambientales, sociales y de gobernanza más estrictas.**

Los esfuerzos para incentivar un mayor desempeño ambiental y social pueden aumentar los volúmenes de minerales extraídos y procesados de manera sostenible y responsable, así como una reducción de costes. Si los actores de la industria con fuertes estándares ambientales y sociales se ven recompensados en el mercado, esto puede traducirse también en la aparición de nuevos proveedores en un mercado más diversificado.

- **Fortalecer la colaboración internacional entre productores y consumidores.**

Un marco internacional global para el diálogo y la coordinación de políticas entre productores y consumidores puede desempeñar un papel muy importante. Tal iniciativa podría incluir medidas para: i) proporcionar datos fiables y transparentes; ii) realizar evaluaciones periódicas de las vulnerabilidades potenciales en las cadenas de suministro y de las posibles respuestas colectivas a las mismas; iii) promover la transferencia de conocimiento y la generación de capacidades para difundir prácticas de desarrollo sostenible y responsable; y iv) fortalecer los estándares de desempeño ambiental y social para garantizar un marco de actuación igualitario.

Obviamente, además de estas consideraciones de carácter general, reforzar la seguridad de suministro de los minerales críticos necesarios para la transición energética constituye un objetivo estratégico para la Unión Europea y cada uno de sus estados miembros. Algo que debe concretarse en estudios, análisis y planes de actuación específicos. En este sentido se hacen imprescindibles tanto los esfuerzos gubernamentales, como los resultantes de la cooperación entre sectores económicos y centros de conocimiento e investigación públicos y privados. Un buen ejemplo de este último tipo de estudios a escala europea es el elaborado por la Universidad Católica de Lovaina a petición de Eurometaux, una asociación metalúrgica europea (Liesbet Gregoir et al., 2022).

7. Minerales críticos y la nueva geopolítica energética

Durante los dos últimos siglos la geopolítica energética ha pivotado en torno a los combustibles fósiles. Sin embargo, el cambio climático y la respuesta internacional a este fenómeno, es decir, la transición energética, están propiciando profundos cambios en la geopolítica energética global. Por dos motivos principales.

En primer lugar, porque el esfuerzo de descarbonización necesario implica que alrededor de dos tercios de las “reservas probadas de carbono” actualmente inventariadas (en forma de reservas probadas de carbón, petróleo o gas) deberían dejarse sin explotar en el subsuelo. Tales reservas, de las cuales cerca del 63% corresponderían al carbón, el 22% al petróleo y el 15% al gas natural, se concentran en cuatro países o regiones que son grandes protagonistas en el actual juego geopolítico (América del Norte, Oriente Medio, China y Rusia), con la particularidad, además, de que el 74% de las mismas son de titularidad estatal. Está claro que la transición energética va a resultar mucho más costosa y difícil para aquellos países que son grandes productores de hidrocarburos, muy particularmente si su PIB deriva en buena medida de la exportación de estos. Y lo contrario sucede con los países que son grandes consumidores e importadores. Estamos por tanto ante una clara contraposición de intereses que, sin duda, exacerbará las tensiones y el juego geopolítico.

En segundo lugar, porque, como ya hemos comentado en páginas precedentes, la transición energética hacia un modelo descarbonizado implica una transición extractiva, de los hidrocarburos a los minerales. Y esto supone la aparición de nuevos actores y patrones en el comercio internacional de la energía, así como un nuevo juego geopolítico.

Hoy en día, ya en plena carrera por el liderazgo de la transición energética, los estados están compitiendo por la fabricación de paneles solares y turbinas eólicas, así como por la producción masiva de baterías, vehículos eléctricos, electrolizadores, etc. Al respecto, a título de ejemplo, no debe pasar inadvertido que en mayo de 2015 el Partido Comunista de China anunció un plan, *Made in China 2025*, cuyo propósito es convertir al país en una superpotencia en la manufactura de alta tecnología, asegurando que el 70% de los recursos básicos necesarios para ello se produzcan en China. Un objetivo que genera preocupación en los principales países industrializados, encabezados por Estados Unidos y sus aliados, entre los que se encuentra la Unión Europea. No en vano, lo que está en juego es la posibilidad de que China llegue a controlar la geopolítica de las cadenas de suministro de los minerales críticos y, por extensión, las de las tecnologías energéticas bajas en carbono. Un supuesto que permitiría al gigante asiático ocupar una posición

de privilegio en el hipotético nuevo orden energético global que podría derivarse de la actual situación de emergencia climática.

Una lectura atenta a la información sintetizada en las *figuras 7 y 8*, permite comprender, sin necesidad de entrar en una prolija y detallada enumeración de datos (las figuras hablan por solas) que los motivos de preocupación comentados en el párrafo anterior están, en buena medida, justificados. En este sentido, los principales países industrializados de nuestro entorno ya han elaborado iniciativas estratégicas para hacer frente a los nuevos desafíos geopolíticos planteados por la transición energética. Por ejemplo, sin ir más lejos, el 16 de marzo de 2023, la Comisión Europea daba a conocer una serie de documentos orientados en esa dirección (European Commission, 2023). Su contenido es una prueba fehaciente de la relevancia adquirida por el binomio “transición energética-minerales críticos”, introducido y tratado de forma muy sucinta en este escrito.



Figura 7. Cadenas de suministro simplificadas para el petróleo y el gas natural comparadas con las de algunas tecnologías energéticas bajas en emisiones de carbono. Para cada concepto (flechas) el orden en el que aparecen los países (círculos con banderas) refleja su posición en el ranking mundial (con el primero situándose más a la izquierda). De la figura se desprende con claridad que la transición a un sistema energético bajo en carbono implica nuevos actores y patrones en el comercio internacional de la energía, así como un nuevo juego geopolítico. DRC: República Democrática del Congo. Fuente: IEA (2022b).

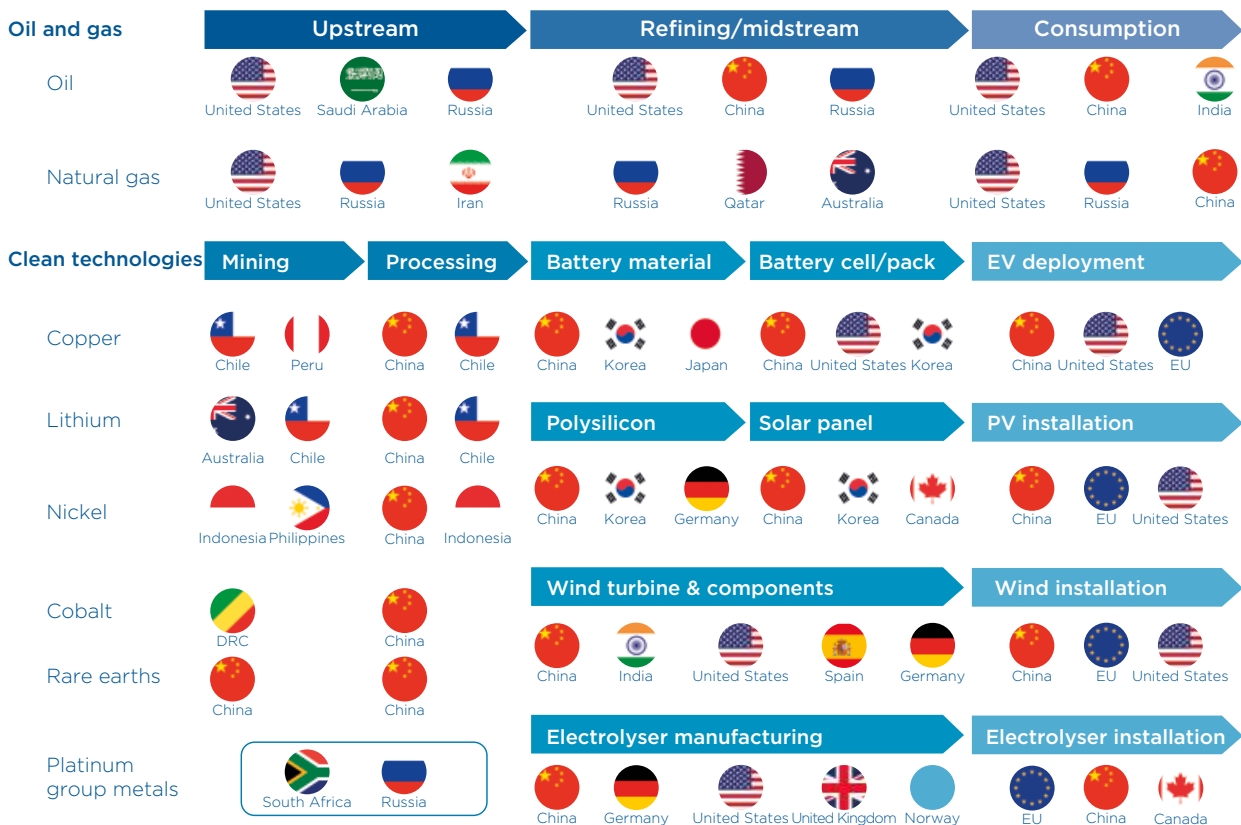
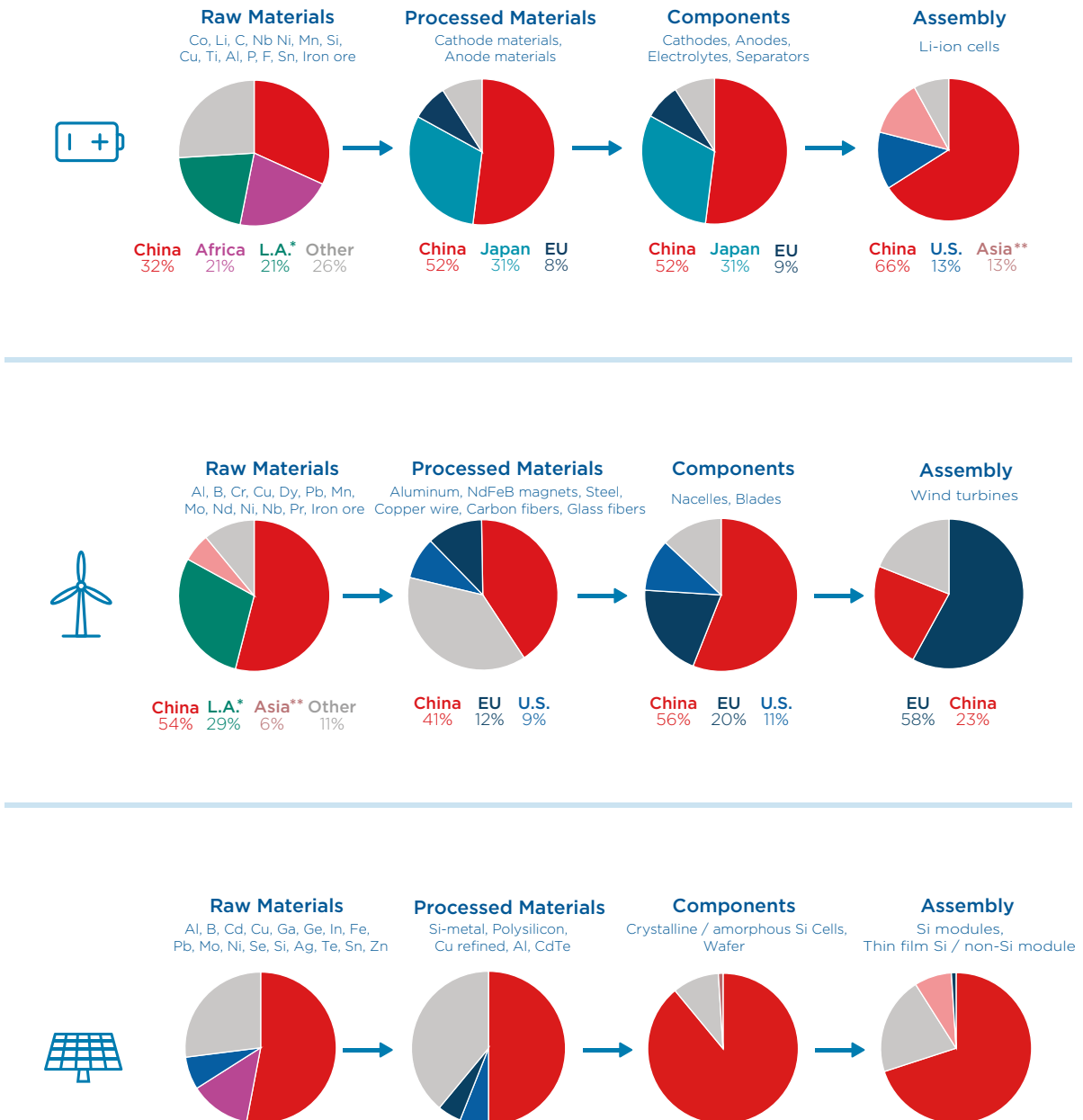


Figura 8. Cadenas de suministro de algunas tecnologías energéticas bajas en emisiones de carbono y principales proveedores mundiales. Obsérvese como en el caso de las baterías, aerogeneradores y placas solares fotovoltaicas, China ocupa, por lo general, una posición destacada, respecto a Estados Unidos y la Unión Europea, en los diversos eslabones que integran las cadenas de suministro: extracción de materias primas minerales, procesado de estas, manufactura de componentes y ensamblaje final de estos. Fuente: Jane Nakano (2021).



* Latin America.

** Excluding China and Japan

Source: Created by Ian Barlow based on data from European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 (Brussels: European Commission, 2020).

8. Resumen de conclusiones



Nuestra civilización depende de fuentes energéticas ricas en carbono, cuya combustión en cantidades crecientes se ha traducido en que los humanos hayamos forzado el calentamiento del planeta más allá de los ciclos climáticos naturales. La mitigación de este fenómeno pasa por la denominada transición energética. Una tarea que requiere de un gran pacto o coalición, basado en la ciencia y la tecnología, que incluya a gobiernos, entidades financieras, inversores, empresas y a todos los sectores sociales y ciudadanos comprometidos en la lucha contra el cambio climático.



Una de las principales diferencias entre el actual sistema energético basado en los combustibles fósiles y otro fundamentado en tecnologías bajas en emisiones de carbono es que el despliegue de estas últimas implica un aumento significativo de la demanda de los denominados minerales críticos. Dependiendo del escenario de transición energética que se considere, en 2040 y a escala global, dicha demanda podría multiplicarse entre cuatro a seis veces respecto a la actual. Los recursos minerales demandados varían en función de los diferentes tipos de tecnologías bajas en carbono.



La transición energética lleva aparejada una transición extractiva que debería concretarse en unas pocas décadas: del petróleo, gas y carbón, a una amplia gama de minerales. La gestión de los impactos ambientales, económicos, sociales y geopolíticos generados a lo largo de toda la cadena de valor de estas materias primas indispensables para la transición energética conlleva multitud de desafíos.



Uno de estos desafíos es el de garantizar la seguridad de las cadenas de suministro de los minerales críticos, aspecto este que constituye una verdadera condición sine qua non para la posterior manufactura y despliegue de las tecnologías energéticas bajas en emisiones de carbono. Mientras los países aceleran sus esfuerzos para mitigar el cambio climático y mejorar la calidad del aire en las ciudades, también deben asegurarse de que sus sistemas energéticos permanecen resilientes y seguros.



Los actuales mecanismos internacionales de seguridad energética están diseñados para ofrecer una respuesta rápida frente a posibles interrupciones en el suministro de hidrocarburos o a subidas puntuales de los precios de estos, muy particularmente del petróleo. Sin embargo, los minerales críticos presentan un conjunto de desafíos diferente y muy específico, de modo que los responsables de las políticas energéticas deben ampliar sus horizontes de análisis y actuación, considerando las nuevas vulnerabilidades.



Actualmente, los planes de suministro e inversión en minerales críticos a escala global contemplan una actuación gradual, a todas luces insuficiente para mitigar el cambio climático. Estos planes no están pensados para impulsar una transición energética acelerada. Además, aunque existen un buen número de proyectos en diferentes estadios de desarrollo, estos presentan múltiples puntos débiles que podrían incrementar las tensiones en los mercados y la volatilidad de precios.



Entre dichos puntos débiles cabe considerar: a) la concentración geográfica de la producción y el procesado de minerales críticos es muy alta, mayor que la de los hidrocarburos; b) el desarrollo de nuevos proyectos mineros requiere, de media, más de una década; c) a corto plazo, no existe una carestía geológica de recursos, pero la calidad de estos está declinando; d) la extracción y procesado de minerales críticos tiene una serie de impactos potencialmente negativos que hacen que las exigencias sobre el desempeño ambiental y social de las empresas sea cada vez mayor; e) en no pocas regiones, los activos mineros están cada vez más expuestos a riesgos climáticos, tales como el estrés hídrico, calor extremo o inundaciones.



Todos estos riesgos son gestionables, pero la manera como gobiernos y empresas respondan al desafío determinará si los minerales críticos devienen facilitadores del cambio hacia un modelo energético más limpio o, por contra, un cuello de botella en dicho proceso. Para resolver esta disyuntiva es recomendable: a) asegurar una inversión adecuada en nuevas fuentes de suministro; b) promover la innovación tecnológica; c) escalar el reciclaje; d) mejorar la resiliencia de las cadenas de suministro y la transparencia del mercado; e) incorporar estándares ambientales, sociales y de gobernanza más estrictos; f) fortalecer la colaboración internacional para el diálogo y la coordinación de políticas entre productores y consumidores.



Durante los dos últimos siglos la geopolítica energética ha pivotado en torno a los combustibles fósiles, pero el cambio climático y las respuestas internacionales a este fenómeno están propiciando profundos cambios en la geopolítica energética global. La transición energética hacia un modelo descarbonizado implica una transición extractiva, de los hidrocarburos a los minerales, y esto supone la aparición de nuevos actores y patrones en el comercio internacional de la energía, así como un nuevo juego geopolítico.



En plena carrera por el liderazgo de la transición energética, los estados están compitiendo por el control de las cadenas de suministro de las tecnologías bajas en emisiones de carbono. En la actualidad, China encabeza de forma destacada esta competición. La posibilidad de que este país llegue a controlar la geopolítica de las cadenas de suministro de los minerales críticos y, por extensión, las de las tecnologías energéticas bajas en carbono, es real. Un supuesto que permitiría al gigante asiático ocupar una posición de privilegio en el hipotético nuevo orden energético global que podría derivarse de la actual situación de emergencia climática. Los países industrializados de nuestro entorno ya están reaccionado frente a esta posibilidad, elaborando planes y diseñando iniciativas estratégicas que deberían ser puestos en práctica de manera coordinada e inmediata.

Referencias

BP Statistical Review of World Energy (2022)

<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>

Eurostat (2023), Energy mix

<https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/energy-2023#energy-mix>

European Commission (2023): Critical Raw Materials: ensuring secure and sustainable supply chains for EU's green and digital future

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661

IEA (International Energy Agency) (2020), World Energy Outlook 2020

<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>

IEA (International Energy Agency) (2021a). Key World Energy Statistics

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf>

IEA (International Energy Agency) (2021b). World Energy Outlook 2021

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf>

IEA (International Energy Agency) (2021c). IEA World Energy Outlook 2021 launch presentation

https://iea.blob.core.windows.net/assets/a8d2f8a1-56b5-48a7-adf2-119e8e069cf9/WEO2021_Launch_Presentation.pdf

IEA (International Energy Agency) (2021d). Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector

https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf

IEA (International Energy Agency) (2022a). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, Revised version, March 2022.

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>

IEA (International Energy Agency) (2022b). World Energy Outlook 2022

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>

IEA (International Energy Agency) (2023). Energy Technology Perspectives 2023

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/a86b480e-2b03-4e25-bae1-da1395e0b620/EnergyTechnologyPerspectives2023.pdf>

Jane Nakano (2021). The Geopolitics of Critical Minerals Supply Chains. Center for Strategic and International Studies (CSIS), March 2021

https://csis-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/publication/210311_Nakano_Critical_Minerals.pdf?VersionId=DR03x5jlrwLnNjmPDD3SZjEkGEZFEcgt

Liesbet Gregoir; Karel van Acker; Simone Beretta; Chris Heron (2022). Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge. KU Leuven.

<https://eurometaux.eu/media/jmxf2qm0/metals-for-clean-energy.pdf>

Marzo, M. (2022). La dependencia energética, el talón de Aquiles de Europa. The Conversation, 17 febrero 2022

La dependencia energética, el talón de Aquiles de Europa (theconversation.com)

Turner, J. M. (2022). The matter of a clean energy future. Science, 24 June 2022, vol. 376, issue 6600, pag.1361

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.add5094>

TRANSICIÓN ENERGÉTICA
Y MINERALES CRÍTICOS

