

## La geopolítica del carbono cero y el papel de los minerales críticos en la transición energética

Miriam-Hermi Zaar 

Universidad de Barcelona

miriamzaar@gmail.com

### La geopolítica del carbono cero y el papel de los minerales críticos en la transición energética (Resumen)

Las innovaciones tecnológicas que posibilitarán alcanzar el *Net Zero Emissions by 2050 Scenario* (NZE) exigen nuevas materias primas, entre ellas los denominados “minerales críticos” (litio, cobalto, cobre, platino, niobio, REE-, etc.), que se han convertido en elementos clave en el actual escenario económico y geopolítico. A su vez, la disponibilidad de estos minerales está vinculada a los recursos naturales -muchas veces concentrados geográficamente- y al desarrollo de nuevas tecnologías, lo que está exigiendo de los Estados, compañías mineras y empresas tecnológicas, la implementación de estrategias que controlen su extracción y procesamiento, y garantice sus cadenas de suministro. El artículo tiene como objetivo analizar este proceso, desde las perspectivas de la geopolítica y la sostenibilidad, aspectos muy relevantes para la transición energética, debido a los conflictos bélicos motivados por intereses estratégicos, y a los problemas medioambientales provocados por la explotación de estos minerales, muy cuestionada, principalmente en países que no cuentan con una legislación laboral y medioambiental específica, y en ecosistemas frágiles, como son los ambientes marinos profundos.

**Palabras clave:** transición energética; minerales críticos; *Net Zero Emissions by 2050 Scenario*; geopolítica; sostenibilidad.

### La geopolítica del carboni zero i el paper dels minerals crítics en la transició energètica (Resum)

Les innovacions tecnològiques que possibilitaran assolir el *Net Zero Emissions by 2050 Scenari* (NZE) exigeixen noves matèries primeres, entre les quals els anomenats “minerals crítics” (liti, cobalt, coure, platí, niobi, REE-, etc.), que s'han convertit en elements clau a l'actual escenari econòmic i geopolític. Alhora, la disponibilitat d'aquests minerals està vinculada als recursos naturals -moltes vegades concentrats geogràficament- i al desenvolupament de noves tecnologies, cosa que està exigint dels Estats, companyies mineres i empreses tecnològiques, la implementació d'estratègies que controlin la seva extracció i processament, i garanteixi les cadenes de subministrament. Aquest article té com a objectiu analitzar aquest procés, des de les perspectives de la geopolítica i la sostenibilitat, aspectes molt rellevants per a la transició energètica, a causa dels conflictes bèl·lics motivats per interessos estratègics

Recepción: 5 de abril de 2024

Aceptación: 15 de abril de 2024



i als problemes mediambientals provocats per l'explotació d'aquests minerals, molt qüestionada, principalment a països que no compten amb una legislació laboral i mediambiental específica, i en ecosistemes fràgils, com són els ambients marins profunds.

**Paraules clau:** transició energètica; minerals crítics; *Net Zero Emissions by 2050 Scenario*; geopolítica; sostenibilitat.

### **The geopolitics of zero carbon and the role of critical minerals in the energy transition (Abstract)**

The technological innovations that will make it possible to achieve the Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE) require new raw materials, including the so-called “critical minerals” (lithium, cobalt, copper, platinum, niobium, REE-, etc.), which have become key elements in the current economic and geopolitical scenario. In turn, the availability of these minerals is linked to natural resources - often geographically concentrated - and to the development of new technologies, which is requiring States, mining companies and technology companies to implement strategies that control their extraction and processing, and guarantee their supply chains. This paper aims to analyze this process, from the perspectives of geopolitics and sustainability, very relevant aspects for the energy transition, due to war conflicts motivated by strategic interests, and the environmental problems caused by the exploitation of these minerals, very questioned, mainly in countries that do not have specific labor and environmental legislation, and in fragile ecosystems, such as deep marine environments.

**Keywords:** energy transition; critical minerals; Net Zero Emissions by 2050 Scenario; geopolitics; sustainability.

## **Introducción**

En la tercera década del siglo XXI, la coyuntura global se caracteriza por dos escenarios preocupantes que se solapan en el tiempo y en el espacio. Uno es la crisis climática y la necesidad apremiante de acelerar la transición energética. El otro es el contexto geopolítico entre occidente y oriente agravado por la invasión rusa de territorios ucranianos y por el conflicto Israel-Palestina.

Respecto a la crisis climática, el último informe del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2023), confirma, una vez más, la responsabilidad de las actividades humanas. El incremento continuo de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> y de otros contaminantes asociado a la utilización de energías derivadas de combustibles fósiles, al cambio de uso del suelo, a los nuevos estilos de vida y patrones de producción y consumo (Friedlingstein et al., 2022) en un modelo de crecimiento sin fin, está incrementando nuestra huella ecológica y provocando extremos meteorológicos y climáticos, impactando directamente en la seguridad alimentaria y del agua, en la salud humana y, por ende, en las economías y en la sociedad (Zaar, 2021).

El mismo Informe también señala que, si el calentamiento actual está causando daños en muchas regiones, en el futuro afectará -mediante la interacción de riesgos climáticos y no climáticos-, “a todos los componentes principales del sistema climático, y cada región experimentará cambios múltiples y simultáneos”, generando “riesgos compuestos entre sectores y regiones” y efectos cada vez más difíciles de gestionar (IPCC, 2023, p. 33).

De este modo, continuar con los patrones actuales de desarrollo ilimitado e insostenible no solo aumentará la vulnerabilidad de los ecosistemas, sino también la de sus habitantes, especialmente en las comunidades económica y socialmente más desfavorecidas.

Es por estas razones que los acuerdos climáticos internacionales buscan agilizar el proceso de descarbonización de la economía, a través de la reducción paulatina hasta la eliminación de los combustibles fósiles, lo que se espera que ocurra no solo desde una masiva inversión en innovación, sino también por medio de una mayor concienciación gubernamental, empresarial y también ciudadana, desde políticas socioterritoriales con enfoques holísticos. Las cumbres sobre el cambio climático van en esta dirección, y a pesar de las críticas de entidades ambientalistas, los resultados de la COP28 pueden ser prometedores si consideramos las palabras del Secretario ejecutivo de ONU Cambio Climático en su clausura “no hemos pasado página a la era de los combustibles fósiles, pero este resultado es el principio del fin” (United Nations, 2023).

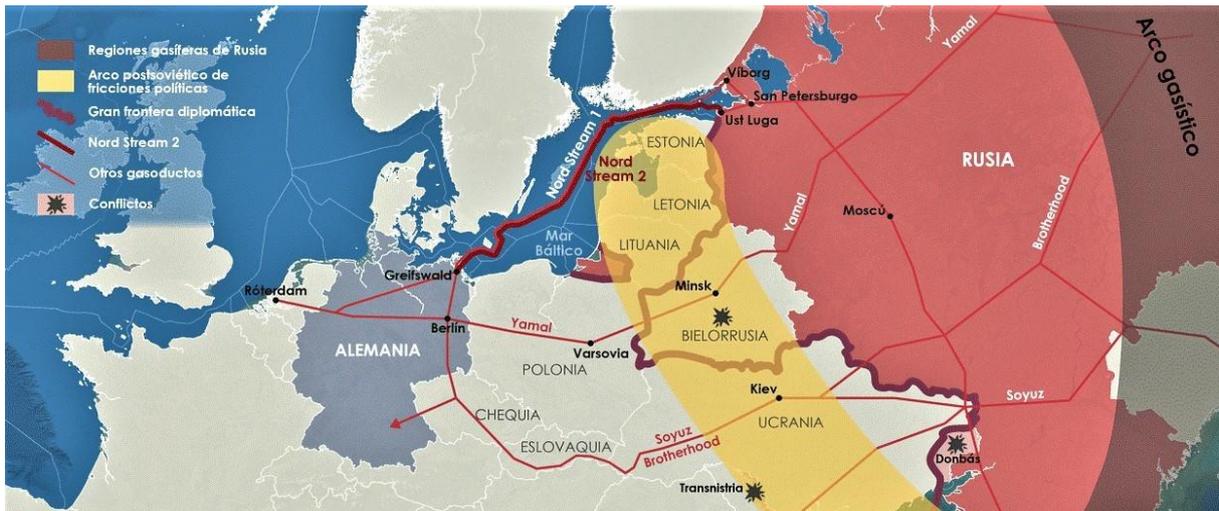
Plantear la mitigación, y a la vez la adaptación al cambio climático, para lograr una sociedad más resiliente, requiere, además de otro modelo de desarrollo, poner en marcha nuevos recursos y capacidades que permitan prepararse, responder y también adaptarse adecuadamente a las nuevas dinámicas cambiantes, a través de la aplicación de un conjunto de medidas multisectoriales, integradas y transversales que abarquen proyectos sociales, económicos y medioambientales inclusivos, desde múltiples niveles de gobernanza (Zaar, 2021, 2023).

Respecto a los actuales conflictos internacionales, según fuentes especializadas en política internacional, además del contexto geopolítico -el acceso al Mar Negro y la ubicación geográfica privilegiada de Ucrania entre Europa y Asia (el denominado *heartland* euroasiático) y la posición estratégica del Mar Rojo en el comercio marítimo mundial-, son relevantes las reservas minerales:

a) los gasoductos rusos Brotherhood-Progress y Soyus atraviesan el territorio ucraniano de este a oeste (Figura 1) viabilizando su exportación a países centro europeos, y en las regiones controladas por Rusia, se concentran la mitad del petróleo de Ucrania, el 72% de su gas natural, gran parte de sus reservas carbón, además de importantes depósitos de otros minerales estratégicos, especialmente litio y elementos raros (REE) como berilio, niobio y tantalio, principalmente en sus regiones orientales (Muggah, *FP News*, 28/04/2022).

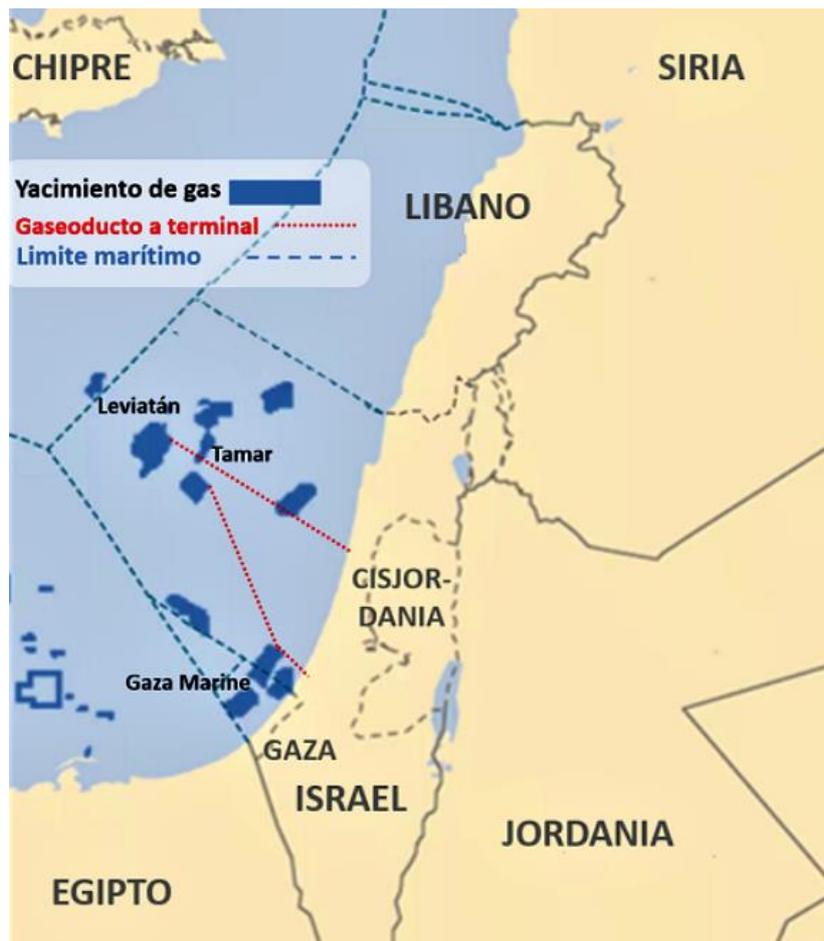
b) en el Mar Levantino hay un gran número de yacimientos de gas y de petróleo offshore, que se sitúa en los territorios marítimos de Israel -exportador de esta materia prima-, y de Gaza -Gaza Marine- (Acuerdos de Oslo de 1993), que con el conflicto bélico que comenzó en 2023, pasó a estar bajo el control de Israel (Ecologistas en Acción, 11/12/2023; Messina, 12/11/2023) (Figura 2).

**Figura 1. La geopolítica del gas y los principales conflictos de intereses**



Fuente: Adaptado por la autora a partir de El Orden Mundial, 2022.

**Figura 2. Yacimientos de gas frente a las costas de Gaza y de Israel**



Fuente: Ecologistas en Acción, 1/12/2023.

Esta nueva coyuntura geopolítica y bélica, de enormes presiones para incrementar la oferta de determinados recursos, ha impulsado dos situaciones opuestas. De un lado, China que, a pesar de defender iniciativas hacia la transición energética, continua con una gran dependencia del carbón, y ha ido incrementando las autorizaciones para la producción de electricidad a partir de este fósil, hasta alcanzar al menos 20,45 gigavatios (GW) en el primer trimestre de 2023, más de los 18,55 GW concedidas en los años 2021 y 2022 (Hayat Gazzane, *Les Echos*, 24/04/2023).

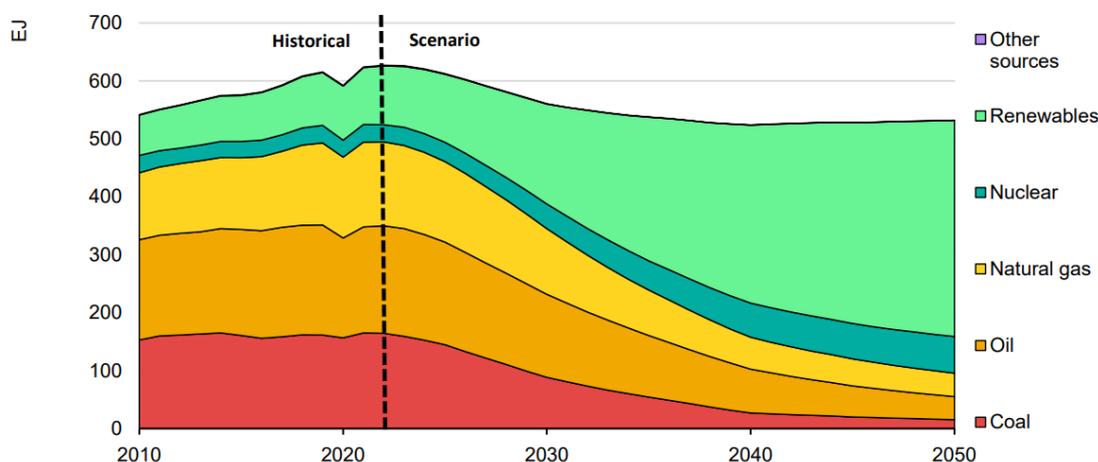
Por otro lado, principalmente los países dependientes de minerales críticos y materias-primas rusas y chinas, han impulsado una mayor inversión en tecnologías de ‘energía limpia’ y en sus respectivas cadenas de suministro, con la puesta en marcha de nuevas políticas energéticas (International Energy Agency, 2023).

Así, aunque en sus inicios las tecnologías para la obtención de ‘energía limpia’ se remontan a la década de 1990, su despliegue se ha acelerado en los últimos años. Entre 2013 y 2022, la capacidad de producción de energías renovables aumentó de 1.567.206MW a 3.381.758MW (International Renewable Energy Agency, 2023), y en 2022 estas representaron el 30 % de la generación de energía mundial, por los aumentos notables en la producción de energía solar fotovoltaica, eólica, hidroeléctrica y bioenergética (International Energy Agency, 2023). Además, algunos datos prevén que las inversiones totales para el período 2023-2025 equivaldrán a siete veces la tasa promedio de la inversión realizada entre los años de 2016 y 2021 (International Energy Agency, 2023).

En este escenario, la crisis climática ha acelerado el proceso de transición energética y muchos gobiernos están trabajando en su desarrollo, y, a su vez, la demanda energética, ha desencadenado conflictos bélicos como los de Rusia y Ucrania y de la Franja de Gaza.

Sin embargo, conseguir cero emisiones netas globales de CO<sub>2</sub> para 2050 (*Net Zero Emissions by 2050 Scenario o NZE*) no será tarea fácil, ya que requiere, además de realizar un cambio radical en la combinación energética mediante nuevas tecnologías que reemplacen la mayor parte del uso de combustibles fósiles (Figura 3), la reducción del crecimiento de la demanda energética.

**Figura 3. Previsión de la evolución de la oferta total de energía para el *Scenario 2050***



Fuente: International Energy Agency (IEA), 2023, p. 42.

En esta carrera hacia tecnologías energéticas libres de carbono, a fines de noviembre de 2022, 87 países y la Unión Europea anunciaron compromisos para reducir sus emisiones de carbono a “cero neto”, hasta dejarlas lo más cerca posible de emisiones nulas. También son muy significativos los anuncios de neutralidad de carbono de la República Popular China para 2060 y el objetivo de India para 2070 de cero emisiones netas (International Energy Agency, 2023).

Asimismo, en diciembre de 2023, con ocasión de la COP 28 celebrada en Dubái, 200 países firmaron un acuerdo histórico que contempla nuevos planes climáticos hacia la transición energética, desde cuatro pilares: a) acelerar una transición energética justa, ordenada y equitativa; b) fijar un financiamiento climático; c) centrarse en las personas, las vidas y los medios de subsistencia; y d) garantizar la participación y la inclusión ciudadana. Todo ello, con un propósito muy claro: la implementación responsable de acciones que involucren a múltiples actores a lo largo de la agenda global de Acción Climática, lo que podría contribuir significativamente para corregir el rumbo y alcanzar los objetivos previstos para esta década (Global Climate Action, 2023).

Es en este contexto que analizamos la geopolítica del carbono cero y el papel de los minerales críticos o materias primas críticas (*critical minerals* o *critical raw materials*), desde la perspectiva de la geoestrategia y también de la sostenibilidad, aspectos relevantes y muy cuestionados en la actual coyuntura de transición energética, mediante una estructura de texto que comprende cuatro apartados, además de esta introducción y de una conclusión. Inicialmente, como punto de partida, se hace una breve reflexión sobre la importancia de los minerales críticos para la transición energética. A continuación, se analiza la concentración geográfica y el control estratégico de la extracción y del procesamiento de los minerales críticos. En un tercer apartado, se reflexiona sobre la sostenibilidad de sus cadenas de suministro, principalmente en países que no cuentan con normativas específicas que regulen esta actividad y que carecen de una legislación laboral y medioambiental apropiada. Finalmente, se cuestiona la viabilidad de la minería en ecosistemas marinos -como lo son los fondos marinos-, con una gran biodiversidad, y especies en su mayor parte desconocidas, partiendo de investigaciones que señalan sus posibles impactos medioambientales.

Este análisis se elabora desde una perspectiva crítica que contempla estudios e informes de expertos como Muriel Rabone et al., Diva Amon et al., Jeffrey Drazen et al., Nedal Nassar et al., Pierre Friedlingstein et al., entre otros; de instituciones gubernamentales como Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), International Energy Agency (IEA), International Renewable Energy Agency (IRENA), Instituto Español de Estudios Estratégicos (IEEE), Real Instituto Elcano y U.S. Geological Survey; de organizaciones no gubernamentales como Amnistía Internacional, Ecologistas en Acción, Global Climate Action, WWF y The Ocean Foundation; y también de artículos periodísticos publicados en El País, BBC News Mundo y Les Eches.

## **Los minerales críticos y su importancia para la transición energética**

Es en este escenario de crisis climática y geopolítica, donde la transición energética gana protagonismo, a través del despliegue récord de tecnologías que está impulsando un crecimiento sin parangón de la demanda de minerales catalogados como críticos, debido, principalmente a su papel clave en los procesos de producción neutros en carbono.

Pero, ¿qué es un mineral crítico? Se considera mineral crítico, cuando el riesgo de que se produzca escasez en su suministro y el impacto de esa escasez sobre la economía, sea mayor que el de cualquier otro mineral o materia prima. Por lo tanto, un mineral crítico es aquel que resulta imprescindible para determinados procesos industriales, que está sometido a una potencial restricción de suministro y cuya falta puede afectar significativamente a la economía de un país (Instituto Español de Estudios Estratégicos -IEEE-, 2023).

De este modo, cualquier mineral puede ser o podría convertirse en crítico, dependiendo de la coyuntura económica y tecnológica -importancia de su empleo y demanda industrial para el desarrollo de nuevos productos-, porque “cuanto más difícil, caro o más tiempo sea necesario para sustituir un mineral en un determinado uso industrial, más crítico es ese mineral para ese determinado uso, o análogamente, mayor es el impacto de la restricción del suministro de ese mineral” (Regueiro y González-Barros, 2014, s/p). También debido a su disponibilidad, casi siempre vinculada a las características geológicas de cada lugar, y a las facilidades de explotación o de importación.

Es por estas razones que el concepto de criticidad es dinámico y puede variar en función de múltiples factores como el periodo de tiempo que se esté analizando, el país en que se aplica, las características de su industria y la complejidad del mercado, condicionados por factores que inciden directamente en el riesgo de interrupción del suministro: concentración de productores, demanda, precio y situación geopolítica de los países productores (Instituto Español de Estudios Estratégicos -IEE-, 2023).

Entre los minerales críticos más demandados se encuentran el Litio (Li), Cobalto (Co), Platino (Pt), Paladio (Pd), Uranio (U), Elementos Raros (REE -*Rare-Earth Elements*-), Níquel (Ni), Aluminio (Al), Boro (B), Silicio (Si), Niobio (Nb), Germanio (Ge), Indio (In), Selenio (Se), Galio (Ga), Manganeseo (Mg), Antimonio (Sb), Bismuto (Bi), Tantalio (Ta), Telurio (Te), Estaño (Sn), Tungsteno (W), Vanadio (V), Iridio (Ir), Rutenio (Ru), Grafito (C), Fluorita ( $\text{CaF}_2$ ), Fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), Fosforita (roca fosfática con más de 50% de apatita).

Respecto a los Elementos Raros (REE) o “tierras raras”, cuyo nombre está asociado a la historia de la química cuando a los óxidos les llamaban “tierras”, son un grupo muy variado de elementos químicos, algunos de ellos bastante abundantes en la corteza terrestre. Los REE están clasificados en ligeros (LREE) y pesados (HREE). El grupo de los LREE comprende los siguientes elementos químicos: Escandio (Sc), Itrio (Y) y los 15 elementos del grupo de los lantánidos -Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr), Neodimio (Nd), Promecio (Pm), Samario (Sm)-; y el de los HREE incluye Europio (Eu), Gadolinio (Gd), Terbio (Tb), Disproscio (Dy), Holmio (Ho), Erblio (Er), Tulio (Tm), Iterbio (Yb) y Lutecio (Lu) (Figura 4).



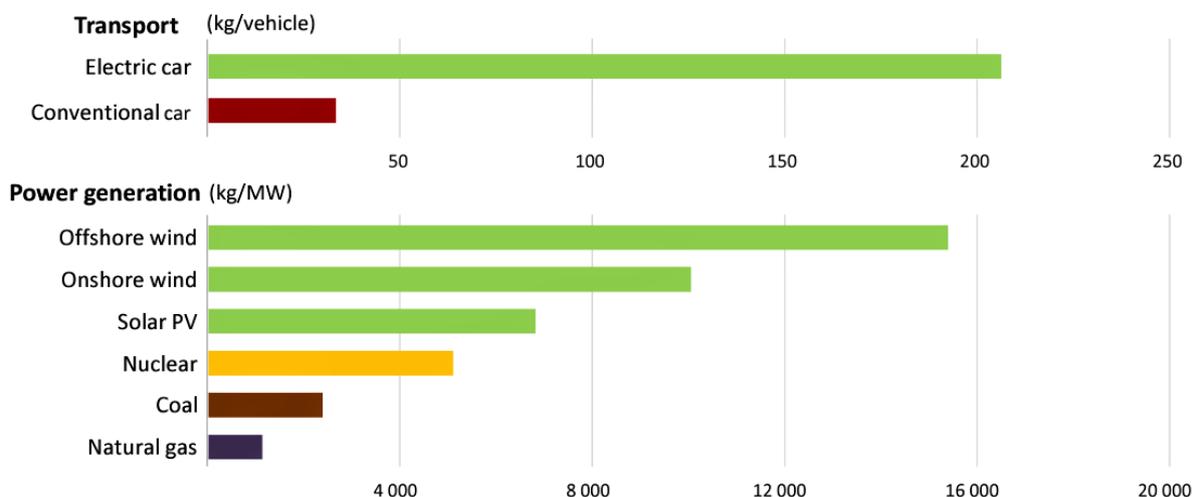
**Cuadro 1. Los minerales críticos y su principal papel en la transición energética**

<i>Minerales críticos</i>	<i>Principal empleo</i>
Cobalto (Co)	Baterías EV
Cobre (Cu)	Red eléctrica, baterías EV, paneles solares PV
Disprosió (Dy)	Motores EV, aerogeneradores
Grafito (C)	Baterías EV
Iridio (Ir)	Electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM)
Litio (Li)	Baterías EV
Manganeso (Mg)	Baterías EV
Neodimio (ND)	Motores EV, aerogeneradores
Níquel (Ni)	Electrolizadores, baterías EV
Platino (Pt)	Electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM)

Fuente: Elaborado por la autora.

Nota: EV (coche eléctrico); PV (fotovoltaico).

La figura 5 compara los *inputs* requeridos por un coche eléctrico y los de un coche convencional, también contrasta los *inputs* esenciales para implantar aerogeneradores en el mar (*offshore wind*) y en tierra (*onshore wind*), y como ambos necesitan muchos más recursos minerales que una planta de energía similar que utilice gas natural.

**Figura 5. Minerales utilizados en tecnologías de energía limpia en comparación con otras fuentes de generación de energía**

Fuente: International Energy Agency (IEA), 5/5/2021.

Así, si comparamos la fabricación de un EV (*Electric Vehicle*) con la de un automóvil ICE (*Internal Combustión Engine*) equivalente, el primero puede emitir, durante su fabricación, incluso un 50 % más de CO<sub>2</sub> que el segundo, pero esta diferencia está muy compensada por las altas emisiones de un vehículo ICE durante su vida útil (International Energy Agency, 2023, p. 132). Esta ventaja seguirá creciendo a medida que, paulatinamente, todos los sistemas eléctricos se descarbonicen.

La gran dependencia de estos minerales y de nuevas tecnologías para su extracción y procesamiento, está llevando a que, algunos de los grandes productores de petróleo amplíen su enfoque económico y conviertan los recursos procedentes del 'oro negro' en inversiones para la extracción y el procesamiento de los minerales calificados “nuevos críticos”. Todo ello con el objetivo de participar activamente en el nuevo escenario geoeconómico mundial.

## **El control estratégico de los principales minerales críticos: extracción y procesamiento**

El equilibrio entre la oferta y la demanda de las materias primas y de minerales específicos, está directamente vinculado a la relación que existe entre a) el desarrollo de altas tecnologías (demanda), y b) la estructura geológica y capacidad de extracción (oferta).

Con relación a los minerales críticos, tanto sus reservas como su procesamiento suelen caracterizarse por una importante concentración geográfica, de modo que algunas empresas o países pueden controlar más de un 50% e incluso, en algunos casos, tres cuartas partes de la producción global. Además, no siempre el país con grandes yacimientos detenta la mayor producción de un mineral, ya que inciden varios factores, como las decisiones gubernamentales y el acceso a las tecnologías -técnicas de extracción y procesamiento- mediante recursos propios o acuerdos con empresas transnacionales.

Para este análisis nos centraremos en algunos minerales fundamentales, como son los imprescindibles para la fabricación de baterías para vehículos eléctricos (EV), que posibilitarán acelerar las etapas hacia una sociedad descarbonizada, y cuyas leyes competitivas impelen a empresas y países a buscar ventajas territoriales y tecnológicas, un proceso que David Harvey (2011) denomina “reestructuración geográfica de la acumulación de capital”.

En este contexto, el litio (*lithium*), es un componente básico para la fabricación de las baterías Li-Ion (ion de litio) y se pronostica que su demanda se duplicará en los próximos cinco años, e incluso podría multiplicarse por ocho hasta 2030.

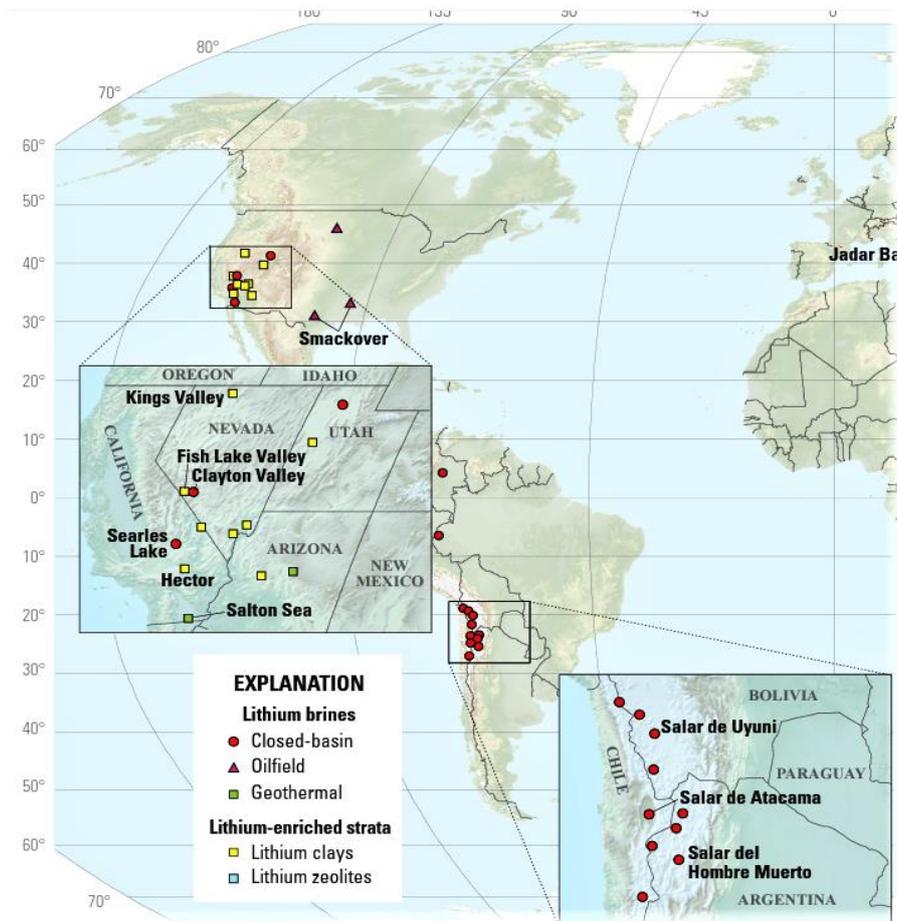
Sus mayores reservas se encuentran en las salmueras del “Triangulo del Litio” formado por Bolivia, Argentina y Chile, y representan cerca del 60% del potencial existente en los yacimientos conocidos, repartidos así: Bolivia con 21 millones de toneladas (en proyecto de explotación), Argentina con 20 millones y Chile con 11 millones (U.S Departamento of the Interior, U.S. Geological Survey, 2023). Este contexto ha despertado el interés de gobiernos, inversores y empresas extractoras de diferentes países, sobre todo de China, Estados Unidos y Australia, aun considerando que ellos también poseen reservas propias significativas, situadas tanto en salmueras como en rocas ígneas pegmatitas de litio-cesio-tántalo (LCT):

- EE.UU. cuenta con 12 millones de toneladas encontradas en salmueras continentales y petrolíferas, arcilla, salmueras geotérmicas y pegmatitas;
- Australia con 7,9 millones de toneladas situadas en rocas pegmatitas;
- China con 6,8 millones localizadas en rocas pegmatitas en su mayoría (U.S Departamento of the Interior, U.S. Geological Survey, 2023).

Además, hay un gran número de países con recursos menos significativos, pero igualmente importantes, como Canadá, Brasil, Mongolia, Afganistán, Etiopía, Zimbabue, países del Golfo de Guinea, y algunos Estados miembros de la Unión Europea.

En la Unión Europea se estima que se pueda extraer hasta el 10% de los recursos mundiales de litio, destacándose Francia (Macizo Central), Alemania (Valle del alto Rin y Sajonia), norte de Chequia (Cinovec), Portugal (Covas do Barroso), España (Extremadura) e Italia (Región de Lacio) (Figuras 6 y 7).

**Figura 6. Principales reservas de litio proveniente de salmueras, arcillas y zeolitas, campos geotérmicos y petrolíferos en 2017**



Fuente: Adaptado por la autora a partir de U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey, 2017, p. k7.

**Figura 7. Principales localizaciones de recursos de litio encontrados en pegmatitas y granitos de litio-cesio-tántalo (LCT) en 2017**



Fuente: U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey, 2017, p. k6.

Nota: Los cuadrados rojos mayores indican pegmatitas que contienen mayores recursos de litio y/o tantalio.

Sin embargo, aunque los mayores productores de litio son Australia, Chile, China y Argentina, de mayor a menor, China, consigue agregar a su producción interna recursos de otros países, y por esta razón acapara más del 50% del producto procesado.

Según World Energy Trade (2021), las cinco compañías que detentan entre el 70% y el 80% de la capacidad minera global de litio, por orden de capitalización bursátil, son estas:

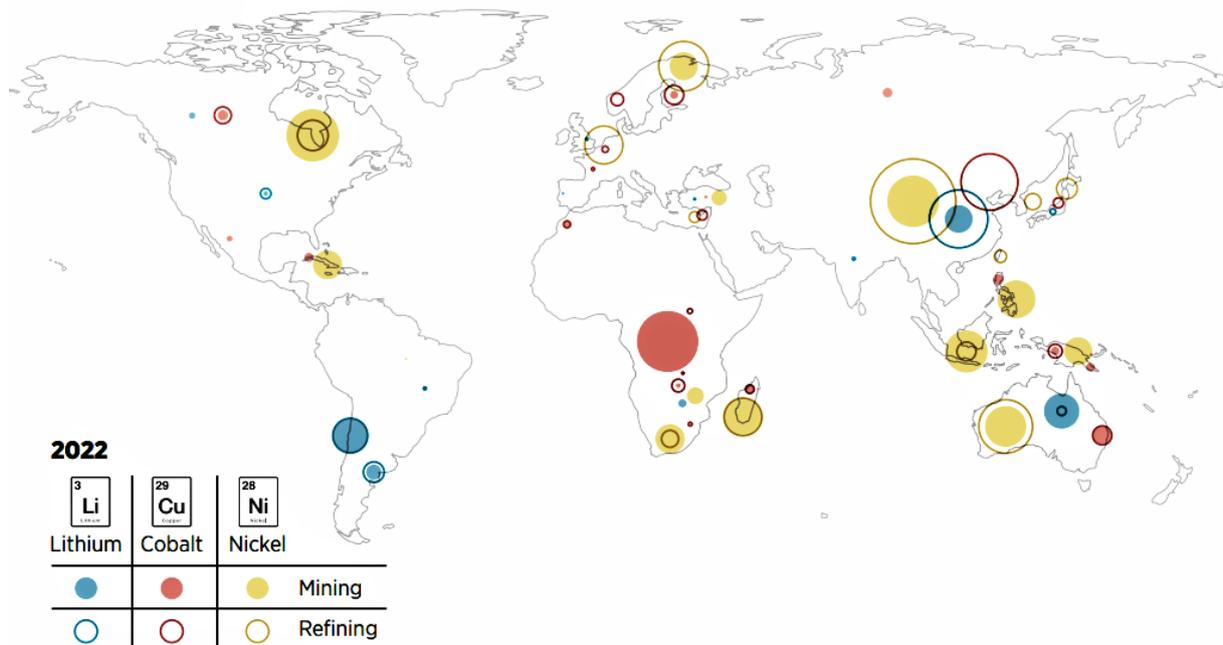
1. La empresa china Jiangxi Ganfeng Lithium es la mayor productora de litio metálico del mundo con tecnologías a escala comercial para extraerlo de salmueras, minerales y materiales reciclados. Posee recursos mineros de litio en Australia, Argentina y México.
2. La estadounidense Albermale es la segunda productora de químicos finos, operando en tres divisiones: litio, especialidades de bromo y catalizadores. Es la mayor proveedora de litio para baterías de vehículos eléctricos, con operaciones en Europa, América del Norte y del Sur, Australia y Asia.
3. La compañía china Tianqi Lithium posee negocios de inversión en recursos mineros de litio, extracción de concentrados y producción de compuestos especiales de este mineral en estado avanzado. Tiene recursos y activos de producción en Australia, Chile y la propia China. Se estima que esta empresa controló hasta el 46% de la producción mundial de litio en 2018.
4. La chilena Sociedad Química y Minera (SQM) es gran productora de carbonato de litio proveniente de su planta de Salar del Carmen, empleado para producir hidróxido de este mineral, indispensable en baterías y colorantes. Debido a esto, Chile procesa casi un tercio del litio disponible en el mercado internacional.

5. La Australiana Mineral Resources Limited es la quinta mayor empresa, y, pretende producir más del 10% del refinado de hidróxido de litio en el mundo entre 2024 y 2027.

Otro mineral fundamental es el cobalto, y la República Democrática del Congo posee el rango de mayor productor, con depósitos situados en el “cinturón del cobre”, en la provincia de Katangaes. Exporta cerca del 70% del total comercializado globalmente, pero, su extracción, procesamiento y exportación están, en gran parte bajo control de: a) empresas chinas con participación en la estatal congoleña Gecamines, y b) la corporación suiza Glencore. Otros grandes productores son Indonesia, Rusia y Australia con el 5% de la cuota de mercado internacional (International Renewable Energy Agency, 2023). Australia además de poseer importantes depósitos de cobalto, extrae este mineral de residuos de sus minas de cobre lo que reduce su coste de explotación. Indonesia incrementó su producción y exportación desde que algunas empresas chinas -como el gigante de la refinación de cobalto, Zhejiang Huayou Cobalt-, invierten en su proceso de extracción (Granados, *El País*, 14/06/2023).

Un tercer mineral, esencial para las baterías de vehículos eléctricos, es el níquel y sus mayores reservas se encuentran en Indonesia, que en 2021 alcanzó el 48,8% de la producción global, con la explotación de sus yacimientos por empresas chinas, coreanas y la brasileña PT Vale. Le siguen, Australia, Brasil y Rusia con importantes reservas. En este último país se sitúa la mayor empresa minera de níquel del mundo -Norilsk Nickel-, también especializada en la extracción de paladio, platino y cobre, en su mayoría del propio territorio ruso (Figura 8).

**Figura 8. Suministro de litio, cobalto y níquel (reservas mineras y procesamiento), 2022**



Fuente: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2023, p. 18.

Otros materiales críticos, también presentan una situación similar, con una alta concentración en ámbitos geográficos específicos. Así, por ejemplo, Australia y Guinea detentan el 53% de la producción global de bauxita, seguidos de China y Brasil; Sudáfrica y Gabón poseen cerca del 60% de manganeso y China procesa un 90% del mismo; Sudáfrica también produce un 90% del iridium y más del 70% del platino; y, China además de poseer importantes reservas, procesa el 50% del neodimio y del disprosio, y casi el 100% del grafito (International Renewable Energy Agency, 2023).

Respecto a las “tierras raras” o elementos raros (REE), los mayores yacimientos están en China con 44 millones de toneladas, abarcando el 60% de su extracción y procesamiento global, aunque podría llegar a un 90% (International Energy Agency, 2023). Le siguen, Brasil y Vietnam con 22 millones de toneladas cada uno, Rusia con 18 millones de toneladas, India con 6,9 millones, Australia con 3,4 millones, EE. UU. con 2,3 millones y Groenlandia con 1,5 millones (U.S Departamento of the Interior, U.S. Geological Survey, 2023). Su mayor productor en 2022 fue China con 200.000 toneladas métricas de *Rare Earth Oxides* (REO), seguida de lejos por EE.UU. con 43.000 toneladas y una demanda muy superior, Australia con 18.000 toneladas, Myanmar con 12.000 toneladas -en su mayoría exportada a China para su refinado-, Tailandia con 7.100 ton., Vietnam con 4.300 ton., India con 2.900 ton., Rusia con 2.600 ton. (Statista, 2023). En Europa, destacamos el reciente hallazgo del depósito Per Geijer en Suecia, que según estimativas del grupo minero público LKAB, puede contener más de un millón de toneladas de REE, por lo que proveería gran parte de la demanda regional cuando estuviera en proceso de explotación (Cabo, BBC News Mundo, 08/02/2023).

Además, China controla alrededor del 70 % de la producción de silicio de grado metalúrgico y el 80 % de la producción de polisilicio, con complejas etapas de refinado para producir silicio policristalino con una pureza del 99,9999%, utilizado en la fabricación de placas solares fotovoltaicas (International Energy Agency, 2023).

Así, China domina la producción de tecnologías y componentes fabricados en masa, gracias a una cadena de suministro integrada desde la extracción, bajos costes de fabricación y un apoyo estatal permanente.

Sin embargo, este escenario puede experimentar cambios dependiendo de las políticas que adopten los países con grandes reservas. Así, por ejemplo:

- a) En Chile, el gobierno pretende recuperar el control de extracción y refinado del litio, mediante la creación de una empresa estatal que procese el mineral y fabrique baterías para vehículos eléctricos, con la finalidad de incrementar su valor agregado.
- b) En Indonesia se están adoptando políticas proteccionistas, limitando e incluso prohibiendo las exportaciones de mineral de níquel, y creando empresas estatales que impulsen su sector industrial, centrado en crear productos finales que aporten valor añadido, como son el ferroníquel, el acero inoxidable y las baterías de iones de litio.

## **Una cuestión a resolver: la sostenibilidad de la cadena de suministro de los minerales críticos**

Los impactos medioambientales de las operaciones y de los *outputs* en general, incluidos los cortes en el suelo de las minas a cielo abierto, las represas de relaves (desechos) y las plantas de extracción, están lejos de ser insignificantes, principalmente en ecosistemas frágiles o en

países pobres con grandes recursos minerales, poca o ninguna tecnología, legislación y controles medioambientales insuficientes. Se trata de un proceso que tiene como consecuencias la pérdida de la biodiversidad, el agotamiento y la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, de los suelos y del aire, mediante procesos de derramamiento, lixiviación, o contaminación atmosférica.

Las primeras etapas de la cadena de suministro de minerales críticos son generalmente las más intensas en el consumo de energía y consecuentemente en emisiones de gases contaminantes, debido, principalmente a la alta temperatura requerida para su procesamiento térmico, y también porque, para ello, aún no están disponibles técnicas alternativas de bajas emisiones como la electricidad (International Energy Agency, 2023). Destacan: a) el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) provenientes de motores de combustión que funcionan con gasolina y diésel y del uso de explosivos; b) el hidrógeno sulfurado (H<sub>2</sub>S) y el anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>) emitidos por la descomposición de la pirita y otros minerales que contienen azufre; c) el metano (CH<sub>4</sub>) que se desprende de las fisuras de los mantos de carbón y de la descomposición de materia orgánica bajo el agua; d) el nitrógeno (N) y el anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) provocados por los disparos, debido a la ausencia y el exceso de oxígeno en el aire, respectivamente. Su presencia en la atmósfera supone la contaminación del aire y sus efectos sobre los seres vivos van desde dificultades para respirar o intoxicación, hasta la pérdida de conocimiento e incluso la muerte, dependiendo de la concentración y del período de exposición a los mismos (Seguridad Minera, 2018).

En este escenario, también son muy preocupantes las necesidades ingentes de agua para la extracción y el procesamiento de los minerales, las dificultades en el tratamiento de las aguas residuales y la eliminación de los desechos mineros, en los que están presentes ácidos y sustancias químicas tóxicas que contaminan, además del medio ambiente, a la población local.

En lo que se refiere a las grandes cantidades de agua dulce que pueden requerir, éstas varían según el mineral. Mientras la extracción de cobre o cobalto exige entre 30 y 60 m<sup>3</sup>/tonelada (International Energy Agency, 2023), la extracción de litio en los salares y rocas ígneas, requiere un promedio 330 m<sup>3</sup> de agua por tonelada de mineral, lo que incrementa el estrés hídrico en regiones con reducido índice pluviométrico, como el desierto de Atacama y su entorno (Fornillo, 2019), y compromete las actividades de subsistencia desarrolladas por las comunidades locales.

Asimismo, la extracción y el procesamiento de los minerales críticos, generan grandes cantidades de desechos distintos del agua, en comparación con otros materiales como el hierro y el aluminio, porque su concentración es mucho más baja (Nassar et al., 2022). La relación roca-metal tiene un promedio de 250 kg de roca por kg de níquel, 860 kg de roca por uno de cobalto y 830.000 kg de roca por cada kg de platino, en comparación con solo 9 kg de roca para el kg de hierro y 7 para el kg de aluminio (International Energy Agency, 2023).

Con relación al proceso de reciclado, con algunas materias primas como el cobre, aluminio y aceros se consiguen porcentajes significativos, no obstante, respecto a otras, no es sencillo y a menudo conllevan un alto coste energético y un procesado poco sostenible:

Algunos de estos materiales tienen una alta tasa de reciclado al final de su ciclo de vida útil, como el vanadio (44 %), el tungsteno (42 %) y el cobalto (35 %). Sin embargo, en el caso de las tierras raras ligeras y pesadas, esta tasa de reciclado cae a valores por debajo del 6 %,

principalmente porque no se cuenta con sistemas de clasificación competitivos para el mercado o porque es imposible recuperar estos elementos cuando se encuentran muy diluidos en los dispositivos, como en el caso del neodimio en aleaciones de imanes permanentes (10 % en contenido) y el indio disperso en las pantallas planas (Pitron, 05/02/2021).

En el caso de las baterías para vehículos eléctricos, la minería y la producción de otras materias primas representan actualmente más del 50 % del total de emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes emitidos durante su producción -cadena ascendiente-, que se equilibran a través de una compensación: la eliminación de emisiones en otras fases o sectores del proceso y del uso del vehículo. Es decir, hay una contrapartida entre las emisiones en las cadenas ascendiente y descendiente.

Se trata, por lo tanto, de superar el principal desafío, que es obtener una producción limpia en todas las etapas de este proceso, y más aún a medida que se incrementa su producción. Además, es imprescindible priorizar el reciclado -economía circular- frente la extracción, así como aumentar el porcentaje de recuperación de estas materias primas invirtiendo en investigación e innovación.

Debido al gran impacto que tienen en el desarrollo de tecnologías de energías renovables, la reutilización, restauración y reciclaje de materiales críticos debe convertirse en una prioridad, tanto para incrementar su disponibilidad a precios menores, como para mantener un abastecimiento sostenible y controles más estrictos sobre las exportaciones de desechos (González-Rodríguez, 2023).

También hay otras alternativas como la Captura, Almacenamiento y Uso del carbono (CCUS por sus siglas en inglés) desde diferentes vías, como la utilización de óxidos sobrantes de procesos industriales, que por ser muy reactivos se asocian de forma natural con el dióxido de carbono, la utilización de equipos, máquinas y vagonetas eléctricas para reducir la contaminación, la utilización de sensores que permiten la digitalización de datos, el sistema digital twins (gemelos digitales) que crea simulaciones en 3D para predecir el funcionamiento de un proceso, entre otros.

Respecto a los efectos sociales, éstos están estrechamente vinculados a los problemas medioambientales y a la destrucción de los paisajes. El cambio de uso del suelo suele destruir el ecosistema original, desestructurar los hábitos y la economía tradicional de las poblaciones locales -que suelen ser un obstáculo para la reproducción del capital- mediante la imposición de otro *modus vivendi*, muy diferente del que conocían, y creando nuevos entornos, repletos de contradicciones. Mucho más si los yacimientos se encuentran en tierras indígenas de las que dependen para su supervivencia, como ocurrió en varios proyectos de minería en la Amazonia.

Sean indígenas o no, estos proyectos afectan sobremanera a los territorios y sus poblaciones, tanto cuando son administrados por grandes empresas que expulsan a los residentes -como ocurre en Kolwezi, RDC (Amnesty International, 2023)-, también cuando adultos y niños trabajan por retribuciones exiguas en condiciones extremadamente precarias y peligrosas en explotaciones mineras informales -por ejemplo, excavando en galerías profundas con grave riesgo de derrumbes y con herramientas muy precarias, e incluso con sus propias manos.

En este contexto, un 20% del cobalto comercializado globalmente procede de las minas informales de la República Democrática del Congo (RDC), un país con poca o ninguna tradición sindical, donde, según Amnistía Internacional y UNICEF, unos 40.000 niños y niñas

trabajan más de 12 horas diarias recogiendo, clasificando, lavando y también transportando sacos con 20 o más kilos de este mineral, sin ningún equipamiento de protección, lo que genera enfermedades como dermatitis (contacto con la piel) e incluso fibrosis pulmonar (inhalación del polvo). Ocurre lo mismo con la extracción del coltán, que en el este de la República Democrática del Congo suele estar bajo el control de grupos armados rebeldes, y este mineral es utilizado como medio de pago a los mineros, que estos a su vez lo usan para la compra de alimentos, herramientas, servicios, etc. (Usanov et al., 2013).

Como explica David Harvey,

El comercio internacional de materias primas conlleva una transferencia real o virtual de insumos (agua, energía, minerales, biomasa y nutrientes, así como los efectos del trabajo humano) de una parte a otra del planeta. Este comercio es el pegamento que mantiene unido el ecosistema capitalista y es su expansión la que extiende e intensifica las actividades que tienen lugar dentro del mismo (2014, p. 250).

Para subsanar o al menos mejorar esta condición de inseguridad social y laboral, el Estado - responsable también en este caso de garantizar la fuerza de trabajo- tiene el deber de erradicar el trabajo infantil, a través de legislación y control eficaces que penalicen a las empresas por emplear mano de obra infantil. Además, debe estimular el reemplazo del trabajo infantil por una política de incremento del número de escuelas públicas y por el apoyo económico a las familias, para que prioricen la educación frente al trabajo infantil.

En el caso específico de la República Democrática del Congo y presionado por Amnistía Internacional y UNICEF, el gobierno se comprometió a acabar con el trabajo infantil en el sector minero para el año 2025, lo que creemos que será imposible si sus familias no encuentran otras opciones de supervivencia.

## **La minería de fondos marinos profundos y sus impactos medioambientales**

Los problemas geopolíticos y las dificultades de acceso a algunos “minerales críticos” impulsa a algunas empresas a defender la idea de que los fondos marinos son una fuente sostenible de metales necesarios para la transición energética. Mientras que grupos de científicos trabajan incesantemente para obtener más conocimientos sobre las zonas marinas profundas, averiguando los posibles daños ecológicos que la minería puede ocasionar, ya que, como afirman Jeffrey Drazen et al. (2020): carecemos de evidencia científica para comprender y gestionar los impactos de la minería en los ecosistemas pelágicos profundos, que constituyen la mayor parte de la biosfera.

La minería de fondos marinos profundos (DSM por sus siglas en inglés), comprende principalmente, la exploración de recursos minerales como manganeso, cobre, cobalto, zinc y elementos raros o “tierras raras”, encontrados en nódulos y sulfuros polimetálicos y cortezas de ferromanganeso ricas en cobalto en tres principales hábitats: las llanuras abisales, los montes submarinos y las fuentes hidrotermales.

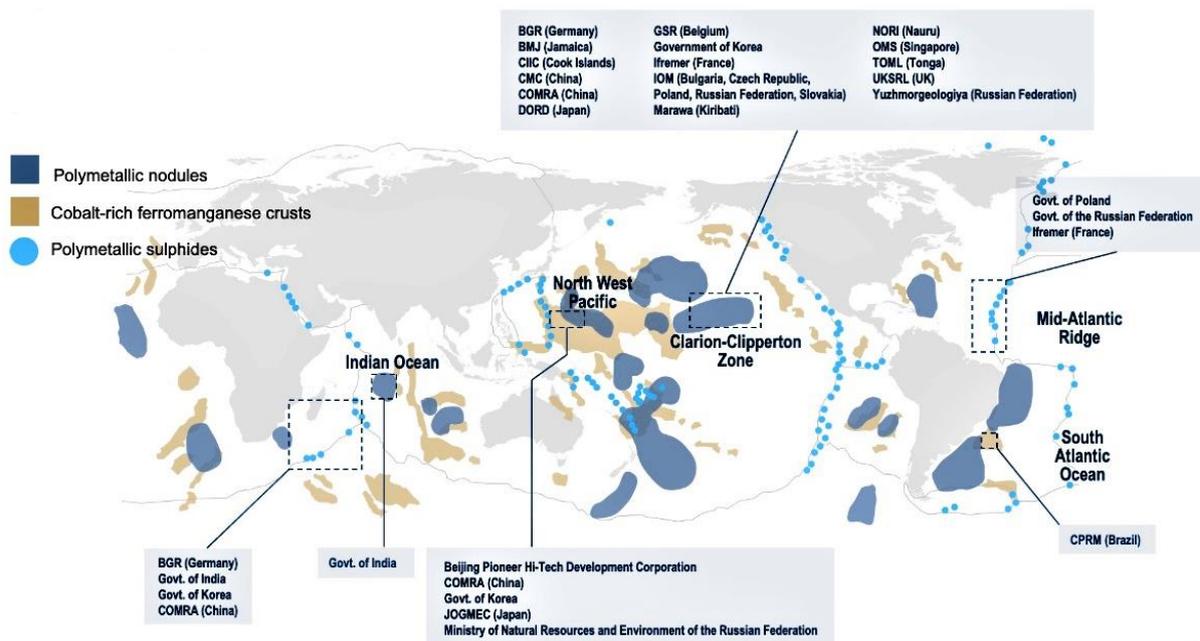
La organización internacional responsable de promover la investigación científica y de regular todas las actividades de exploración en fondos marinos profundos, es decir, mediar entre los

intereses mineros y la protección del medio ambiente, es la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (ISA por sus siglas en inglés), establecida por la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (UNCLOS) de 1982, y el Acuerdo de 1994 relativo a la implementación de la Parte XI de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar. Estas son sus principales competencias:

- Regular la realización de las actividades de exploración de minerales de aguas profundas, incluida la adopción de las medidas necesarias para garantizar la protección efectiva del medio marino contra los efectos nocivos que puedan surgir de dichas actividades;
- Distribuir a los Estados Partícipes contribuciones derivadas de la explotación de recursos no vivos de la plataforma continental más allá de las 200 millas náuticas;
- Promover y fomentar la investigación científica marina y sus recursos, así como coordinar y difundir los resultados de la investigación, con especial énfasis en el impacto ambiental de las actividades;
- Organizar la transferencia de tecnología y desarrollar la capacidad de los Estados tecnológicamente menos avanzados (ISA, 2023).

A pesar de ello, todos los océanos están siendo objeto de licencias para la explotación de minerales, pero la principal área de exploración marina de aguas profundas (potencial) es la zona de fractura denominada Zona Clarion Clipperton (CCZ) situada en aguas internacionales que se extiende desde la costa oeste de México hasta la mitad del Océano Pacífico, al sur de las islas de Hawái, con una longitud de alrededor de unos 7.240 Km (Figura 9).

**Figura 9. Principales áreas de recursos minerales en fondos marinos profundos**



Fuente: Adaptado por la autora a partir de ISA, 2023.

Es principalmente en las llanuras abisales de su lecho marino profundo, cubiertas de sedimentos y depósitos minerales -llamados nódulos polimetálicos- donde la atención está puesta. Según Michael Lodge -secretario de la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos-, esta Zona situada entre 3.500 y 5.500 metros de profundidad, contiene más níquel, manganeso y cobalto que

todos los recursos terrestres juntos, los nódulos polimetálicos poseen, además una amplia variedad de metales como hierro, cobre, plomo y cinc, y pequeñas, aunque apreciables concentraciones de molibdeno, litio, titanio y niobio, entre otros.

A su vez, las chimeneas de sulfuros polimetálicos, que se encuentran a una profundidad de 2.000 metros -en los bordes de las placas tectónicas a lo largo de las dorsales centroceánicas, las crestas de retroarco y los arcos volcánicos activos-, son ricas en cobre, hierro, cinc, plata y oro, que se formaron durante miles de años, por efecto de la actividad hidrotermal, cuya temperatura alcanzaba los 400°C.

También las cortezas cobálticas -costras de ferromanganeso-, que se forman por la precipitación de minerales presentes en el agua de mar, contienen hierro, manganeso, níquel, cobalto, cobre y otros elementos metálicos, además de elementos raros que se acumulan a profundidades marinas entre 400 y 7.000 metros, en costados y en las cimas de las montañas submarinas.

Por otra parte, la Zona Clarion Clipperton (CCZ) es reconocida como un área con gran diversidad vegetal y animal, respecto a otros ambientes submarinos (The Ocean Foundation, s/f). Se estima que en esta Zona el 92% de las especies identificadas son nuevas para la ciencia (436 especies nombradas de un total de 5.578 registradas), razón por la que el conocimiento básico de esta biodiversidad es crucial para una gestión eficaz del impacto ambiental de posibles actividades mineras. Es decir, la investigación y el conocimiento de esta Zona es fundamental para comprender sus procesos ecológicos y los riesgos de pérdida de su biodiversidad (Rabone et al., 2023, p. 2383).

Los principales riesgos están directamente vinculados al delicado equilibrio ecológico de estos sistemas marinos. Greenpeace, en su informe *In Deep Water. The emerging threat of deep sea mining* destaca la importancia de conservar las agujas y chimeneas submarinas de los respiraderos hidrotermales, en las que conviven una gran diversidad de especies endémicas, de las que alrededor del 85% no se encuentran en otros océanos. Además, estos organismos pueden ofrecer pistas científicas sobre los procesos de formación de la vida en la Tierra (s/f, p. 9).

Así, aunque Michael Lodge afirme que los recursos minerales de los fondos marinos podrían contribuir, significativamente al desarrollo sostenible, en especial en países que carecen de fuentes de suministro de minerales y en pequeños Estados insulares, donde hay pocas posibilidades de desarrollo económico (s/f), lo cierto es que teniendo en cuenta los métodos propuestos para su explotación, existe una gran preocupación entre científicos y organismos internacionales con relación a la explotación de los fondos marinos.

Esto es así porque los métodos destinados a la extracción de nódulos polimetálicos incluyen: a) vehículos mineros de grandes dimensiones que mediante bombas hidráulicas aspirarán las cuatro pulgadas superiores del lecho marino y enviarán todo el material -sedimentos, rocas, animales aplastados y nódulos polimetálicos- a una embarcación situada en la superficie; b) barcos en los que se clasificarán los minerales, y cuya suspensión de aguas residuales, sedimentos sobrantes y agentes del procesamiento se devolverán al océano, a través de una columna de descarga, que tendrían serias consecuencias medioambientales para este ecosistema.

Diva Amon et al. (2022) argumentan que, a pesar de las lagunas científicas sobre los impactos de la minería en los fondos marinos profundos -debido a la escasez de datos-, los estudios existentes estiman que los tres tipos principales de minería -una máquina cortadora para aplanar

la topografía y crear bancos, otra para desagregar los bancos, y una tercera que succionará la roca disgregada a través de una bomba y un sistema de elevación-, producirán impactos ambientales en varios ordenes:

- a) La eliminación de la fauna y el estrato primario de la superficie del fondo marino: en los respiraderos hidrotermales, el sustrato principal utilizado por la fauna desaparecerá junto con la misma, lo que probablemente conducirá a la extinción de especies;
- b) La generación de columnas de sedimentos creadas a partir de la perturbación en el fondo marino (“penacho colector”) así como del agua de retorno (“penacho de deshidratación”) pueden enturbiar la columna de agua o cubrir áreas intactas del fondo marino;
- c) Los sedimentos en suspensión de las columnas pueden asfixiar a los organismos (obstruyendo las superficies respiratorias), o perjudicar sus fuentes de alimentación en suspensión, principalmente en aguas intermedias y de los fondos marinos (biota bentónica).
- d) La liberación de sustancias químicas (incluidos metales) y cambios en las propiedades del agua;
- e) El aumento del ruido, la vibración y la luz;

Impactos acumulativos que pueden incluir la pérdida de la integridad del fondo marino, la reducción de las tasas de procesos biogeoquímicos y la biodiversidad, así como el desplazamiento de especies y, a su vez, interacciones tróficas modificadas y pérdida de conectividad, lo que podría conducir a la extinción de especies y la pérdida de funciones y servicios ecosistémicos -recursos o procesos de los ecosistemas naturales que benefician a los seres humanos- (Figura 10).

Según los mismos autores, se estima que una sola operación minera en la Zona Clarion Clipperton podría extraer directamente entre 1 y 2 km<sup>2</sup> por día, devolviendo al océano entre 30.000 y 80.000 m<sup>3</sup> de sedimentos y minerales rotos, lo que provocaría una perturbación del fondo marino de 2 a 4 veces mayor que la huella minera terrestre, debido a la turbidez y la resedimentación de las columnas de los colectores (minería suspendida) (Amon et al., 2022).

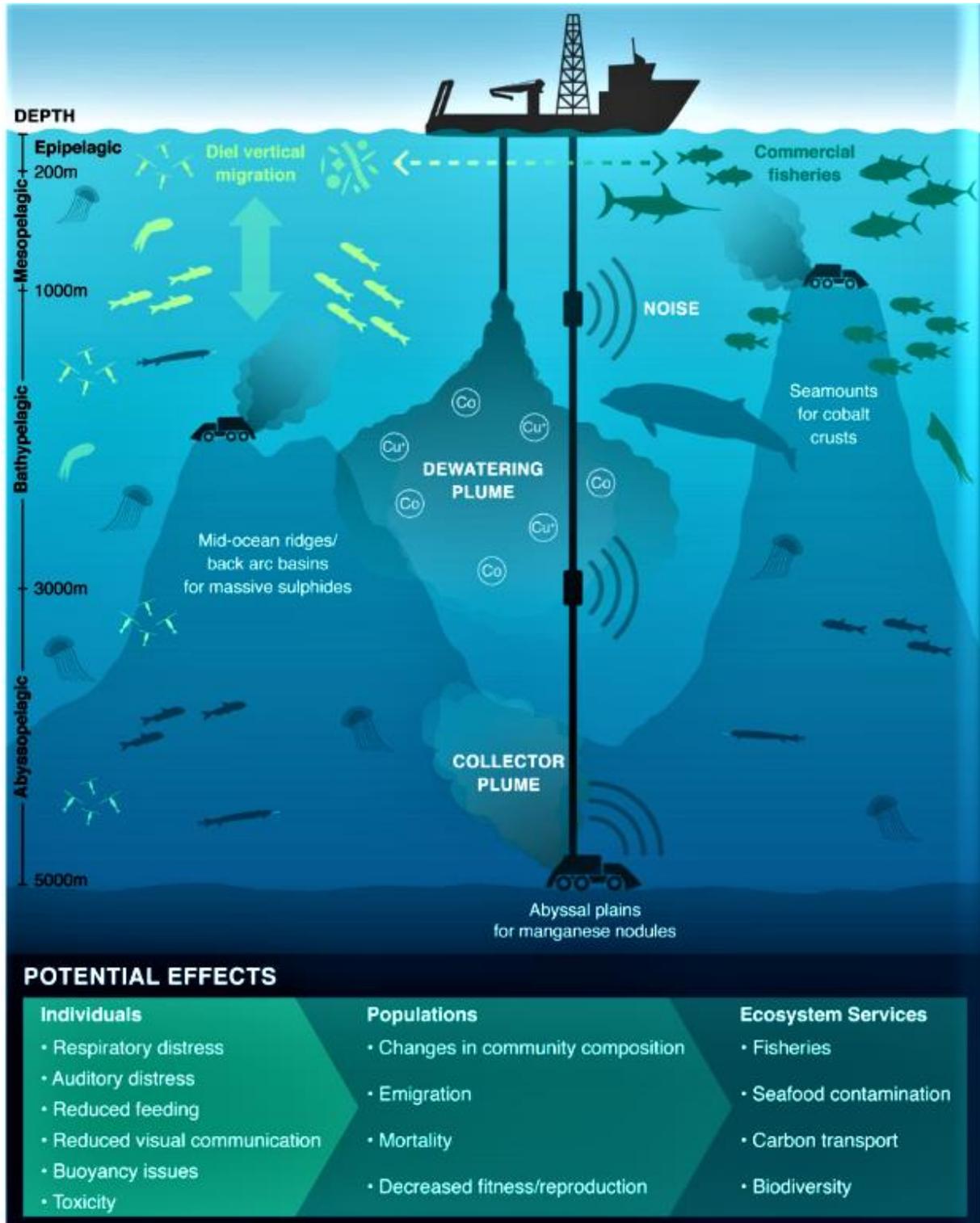
A su vez, Jeffrey Drazen et al. (2020) afirman que:

- a) El ruido de las actividades mineras podría causar trastornos auditivos, estrés fisiológico, además de interferir en el asentamiento de las larvas, la búsqueda de alimento y la comunicación, como ocurre con los mamíferos marinos. Estos efectos, que serían particularmente importante en los montes submarinos, porque concentran poblacionales de peces y mamíferos marinos, provocarían cambios en la composición de las comunidades a causa de la reducción de la fertilidad, aumento de la mortalidad o emigración (tanto horizontal como vertical), lo que conduciría a mayores reducciones en los servicios ecosistémicos.
- b) Las columnas de sedimentos provenientes de la minería absorberían la luz y cambiarían las propiedades de retrodispersión, reduciendo la comunicación visual y la señalización bioluminiscente que son esenciales para la reproducción en los animales de aguas medias.
- c) La reducción de la pesca en las zonas epipelágicas (0 a 200 metros), mesopelágicas (200 a 1000 metros) y batipelágicas (1000 a 4000 metros), debido al cambio en las cadenas alimentarias, o porque la estructura y función de las comunidades microbianas que

regeneran nutrientes esenciales para el ecosistema pelágico, se alterarían como consecuencia del aumento de partículas.

- d) La descarga de sedimentos inorgánicos (metales y otras toxinas) en la zona mesopelágica también contaminaría la pesca marítima (Figura 10).

**Figura 10. Minería en aguas profundas: probables efectos sobre el ecosistema pelágico**



Fuente: Jeffrey Drazen et al., 2020.

Es por estas razones, y porque la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar establece que “ningún daño grave” puede ocurrir por ninguna actividad minera, y que se deben tomar las medidas necesarias para proteger el medio ambiente de cualquier efecto dañino, la carrera geopolítica y geoestratégica para explotar los fondos marinos con tecnología no probada, divide a los líderes mundiales y preocupa a los conservacionistas, que advierten de daños irreversibles en los ecosistemas marinos.

Greenpeace, además de criticar la actuación de la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (ISA) porque está diseñada para priorizar la extracción de recursos, lo que restringe su experiencia en protección y aspectos legales y técnicos, pide una moratoria sobre las aguas marinas y apuesta por el Tratado Oceánico Global firmado en marzo de 2023, que respalda la creación de una red integral de reservas marinas que pueda cubrir al menos el 30% de los océanos para 2030, lo que estimula la creación de santuarios oceánicos que protejan la vida marina frente a las actividades extractivas.

Del mismo modo, World Wide Fund for Nature (WWF) aboga por una moratoria global a actividad minera en fondos marinos, mientras no se conozcan completamente sus efectos y se exploren otras alternativas. También propone que, en las legislaciones nacionales, se prohíban este tipo de minería (WWF, 2022).

A nivel global, los intereses geoestratégicos impiden un consenso amplio entre países. Los hay que defienden una moratoria, con una pausa cautelar e incluso la prohibición de la minería submarina. Es el caso de Brasil, México, Costa Rica, Chile y Ecuador.

En la Unión Europea la falta de unanimidad socava los esfuerzos en favor de una moratoria, ya que sólo siete Estados miembros de la UE -España, Francia, Alemania, Suecia, Irlanda, Finlandia y Portugal- han pedido una pausa en la explotación minera, mientras que Bélgica está preparando una legislación que defina en qué condiciones podría "patrocinar la explotación de una empresa en algún momento futuro". A su vez, Noruega podría convertirse en el primer país del mundo en extraer metales del fondo oceánico (Jones, 01/09/2023), lo que contradice las recomendaciones de sus propios expertos en el asunto.

Asimismo, el Parlamento Europeo, mediante la resolución B9 0095/2024 se opone a la decisión de Noruega de persistir con su propósito de extraer minerales en aguas profundas del Ártico -cuyo sistema ya está bajo una gran presión debido al cambio climático-, e insta a sus miembros a que adopten un enfoque de precaución y de moratoria sobre la minería de aguas profundas (European Parliament, 2024).

Con relación a la actuación de la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos, aunque esta ya ha concedido licencias de explotación, hay un gran número de empresas pendientes de que se concluya el Código de Minería en 2025, y cuyo conjunto de normas, reglamentos y procedimientos regularán todos los aspectos de la minería en aguas profundas -prospección, exploración y explotación- en los fondos marinos internacionales.

Como solución a este proceso de depredación de ecosistemas altamente biodiversos y clave para las ciencias -como son los fondos marinos-, científicos y organismos comprometidos con la preservación de los ecosistemas marinos, plantean varias propuestas.

Diva Amon et al., hacen hincapié en la necesidad de una mayor financiación para ampliar las investigaciones, mediante una mayor recopilación de datos, pruebas de extracción, monitoreo

y análisis, que culminen en planes de seguimiento y una gestión eficaz de riesgos, priorizando a la Zona Clarion Clipperton (CCZ), dado el significativo número de contratos explotación en esta área. Para ello, los autores subrayan que habría que superar el mayor desafío científico al que se enfrenta la investigación de los fondos marinos: la escasez de recursos monetarios y humanos, lo que se podría solucionar mediante una “financiación combinada”. Proponen, además de un uso más eficiente del tiempo, mayores esfuerzos por parte de los grupos interesados, que podrían contribuir donando días asignados para el uso de buques de investigación nacionales o privados (2022, p. 15).

A su vez, Jeffrey Drazen et al. apuntan que la gestión de las aguas medias profundas requiere, además de comprender la biodiversidad y la dinámica de los ecosistemas de aguas intermedias y profundas y su valor para los servicios ecosistémicos, una ampliación de los ecosistemas involucrados para poder evaluar mejor los riesgos ambientales, y la adopción de medidas de gestión preventiva, para evitar daños a estos ecosistemas. Para ello proponen establecer normativas como estas: a) que las descargas de deshidratación estén muy por debajo de la transición mesopelágica/batipelágica (es decir, por debajo de una profundidad de 1.500 a 2.000 metros) o que la descarga se entregue al fondo marino; b) que se reduzca la huella de los impactos sonoros limitando estrictamente las actividades en el canal de fijación y el alcance del sonido (SOFAR) (normalmente a profundidades de 700 a 1.300 metros), que transmite ruidos a lo largo de miles de kilómetros (2020, p. 17459).

Partiendo de este análisis, preguntamos: ¿Estamos dispuestos a destruir los ecosistemas que aún están bastante preservados a cambio de mayores beneficios utilizando los avances tecnológicos? ¿Cuál es la prioridad con relación al cambio climático, mantener los ecosistemas en gran parte desconocidos, o avanzar indefinidamente en la explotación de “minerales críticos”, siempre teniendo en consideración que, además de las consecuencias ya conocidas, surgirán otras imprevisibles?

## Conclusiones

En este escenario -en el que la complejidad de los flujos de suministro de “minerales críticos” y de tecnología se incrementa-, es importante destacar que, aunque los procesos más conocidos para la obtención de ‘energía limpia’, no contemplan -por definición-, la emisión directa de cantidades significativas de contaminantes, sus cadenas de suministro serán más o menos limpias, dependiendo de la emisión de gases y residuos de otros productos químicos, provenientes de las etapas ascendientes de las mismas, como son la minería, el procesamiento, la fabricación y el transporte. Además, las grandes cantidades de agua dulce que estos minerales requieren incrementan el estrés hídrico en regiones con un índice pluviométrico reducido, causando un fuerte impacto en el ecosistema y comprometiendo las actividades de subsistencia.

También es fundamental destacar el grado de desigualdad entre países, respecto al poder de decisión y de negociación sobre la explotación y la comercialización de sus reservas de “minerales críticos”, ante la presión ejercida por los países demandantes de estas materias primas, cuyas estrategias tienen el propósito de incrementar el suministro a empresas propias y rediseñar la actual coyuntura geopolítica global.

Todo ello basado en procesos altamente dinámicos e interdependientes, que se presentan muy relevantes en el rumbo hacia el escenario ‘carbono cero’, inclusive incorporando nuevas lógicas

en los ámbitos tecnológicos y de mercado, que tienen como resultado, cambios territoriales significativos. En este contexto sobresalen, por ejemplo: a) las innovaciones tecnológicas en el sector minero; b) las investigaciones que buscan nuevas fuentes de energía o minerales con mayor capacidad de almacenamiento de energía; c) los avances tecnológicos hacia nuevos productos; d) la presión para que los Estados recuperen el control de la extracción y refinado de sus reservas minerales, agregando un mayor valor a los mismos y legislando a favor de la reducción de la contaminación; y, e) los convenios internacionales.

Así, su evolución hacia una u otra dirección depende no solo de la ciencia, sino también de las decisiones políticas de cada Estado (importancia geoestratégica), casi siempre pauta en acuerdos intergubernamentales y también en intereses particulares (competencia, plus valía, etc.), lo que supone un escenario de gran inestabilidad tecnológica, económica y también política.

Además, el escenario actual de transición energética implica la conservación de los ecosistemas y la inclusión social y económica, aspectos que según nuestra investigación están lejos de alcanzar niveles aceptables, incluso porque, como argumenta David Harvey, “el paisaje geográfico de la acumulación de capital está en perpetua evolución, en gran parte bajo el impulso de las necesidades especulativas de acumulación adicional y solo secundariamente teniendo en cuenta las necesidades de las personas” (2011, p. 152) y, la explotación mineral, como parte de este proceso, tiene consecuencias sociales y medioambientales funestas.

En este contexto, planteamos dos propuestas básicas. Una es el imperativo de poner en práctica políticas que regulen los proyectos de minería en todas sus etapas, tanto en el ámbito terrestre, como en el marino, desde estándares de calidad que garanticen la preservación del modo de vida de las personas que en él participen y también de los ecosistemas afectados y su entorno.

Otra propuesta se basa en la necesidad de informar y concienciar a la ciudadanía sobre la importancia en adquirir productos sostenibles, ecológicos, biodegradables o reutilizables y también de proximidad, creando una legislación que exija que todos los productos consumidos sean etiquetados con informaciones sobre su origen, los recursos utilizados en su producción y su respectiva “huella socio-ecológica”. Esto posibilitaría que el consumidor, al adquirir un artículo o producto, pudiera elegir el que fuera más respetuoso con su entorno en todos los procesos: extracción, procesamiento, manufactura y distribución.

A estas dos, podríamos añadir el ajuste de los impuestos a la huella de carbono, tanto de las materias primas, como de los productos finales.

Solo de este modo los “minerales críticos” y sus respectivas tecnologías, tan esenciales para alcanzar el *Net Zero Emissions by 2050 Scenario* (NZE), cumplirían realmente su papel y estarían en total consonancia con la agenda Acción Climática Global, desde una perspectiva coherente y más resiliente.

## **Bibliografía**

AMNISTÍA INTERNACIONAL. *¿Funciona mi teléfono con trabajo infantil?* Disponible en <https://www.amnesty.org/es/latest/campaigns/2016/06/drc-cobalt-child-labour/> [Consultado en 28/09/2023].

ANNESTY INTERNATIONAL. *DRC: Powering Change or Business as Usual?* 2023. Disponible en <https://www.amnesty.org/es/documents/AFR62/7009/2023/en/> [Consultado en 15/10/2023].

AMON, Diva et al. Assessment of scientific gaps related to the effective environmental management of deep-seabed mining. *Marine Policy*, vol. 138, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105006>. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X22000537?via%3Dihub>.

AUTORIDAD INTERNACIONAL DE LOS FONDOS MARINOS (ISA). *Informe Anual 2023*. Disponible en <https://www.isa.org.jm/secretary-general-annual-report-2023/> [Consultado en 15/02/2024].

CABO, Almudena. Por qué las tierras raras son esenciales y cómo el hallazgo de un yacimiento en Suecia puede ayudar a Europa a cortar su dependencia de China. *BBC News Mundo*, 08/02/2023. Disponible en <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-64554531> [Consultado en 11/11/2023].

CARRALERO, Daniel. *¿Qué materiales requiere la transición energética?* 2021. Disponible en <https://www.climatica.lamarea.com/especial-minerales-criticos-2/> [Consultado en 10/10/2023].

DRAZEN, Jeffrey et al. Midwater ecosystems must be considered when evaluating environmental risk of deep-sea mining. *Biological Sciences*, vol 117, nº 30, junio de 2020, p. 17455-17460. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2011914117>. Disponible en <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2011914117>

ECOLOGISTAS EN ACCIÓN. Yacimientos de gas frente a las costas de Gaza. *Revista nº 118*, 1/12/2023. Disponible en <https://www.ecologistasenaccion.org/309298/yacimientos-de-gas-frente-a-las-costas-de-gaza/> [Consultado en 12/02/2024]

EL ORDEN MUNDIAL, 2022. Disponible en <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/el-mapa-del-nord-stream-2/> [Consultado en 16/02/2024].

EUROPAN PARLIAMENT. *Motion for a Resolution B9-0095/2024*. Motion for a Resolution on Norway's recent decision to advance seabed mining in the Arctic. Disponible en [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/B-9-2024-0095\\_EN.html?redirect](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/B-9-2024-0095_EN.html?redirect) [Consultado en 10/03/2024].

FORNILLO, Bruno (coord.). *Litio en Sudamérica. Geopolítica, energía y territorios*. Buenos Aires: El Colectivo; CLACSO; IEALC - Instituto de Estudios de América Latina y el Caribe, 2019. Disponible en [https://biblioteca-repositorio.clacso.edu.ar/bitstream/CLACSO/15276/1/Litio\\_en\\_Sudamerica.pdf](https://biblioteca-repositorio.clacso.edu.ar/bitstream/CLACSO/15276/1/Litio_en_Sudamerica.pdf) [Consultado en 10/10/2022].

FRIEDLINGSTEIN, Pierre et al. *Gobal Carbon Budget*, 2022. Disponible en <https://essd.copernicus.org/articles/14/4811/2022/> [Consultado en 10/08/2023].

GAZZANE, Hayat. Charbon: la Chine accélère encore, déplore Greenpeace. *Les Echos*, 14/04/2023. Disponible en <https://www.lesechos.fr/monde/chine/charbon-la-chine-accelere-encore-deploire-greenpeace-1937451> [Consultado en 18/09/2023].

GLOBAL CLIMATE ACTION. *Summary of Global Climate Action at COP 28, 2023*. Disponible en [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Summary\\_GCA\\_COP28.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Summary_GCA_COP28.pdf) [Consultado en 15/03/2024].

GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, Jose. Reciclaje y minerales críticos: un juego de tronos entre la geopolítica y la economía. *Resumen Informe al Parlamento Británico*, s/f. Disponible en <https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/26565/Resumen%20para%20RIUMA.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Consultado en 15/08/2023].

GRANADOS, Óscar. Indonesia asalta el mercado de cobalto. *El País* 14/06/2023. Disponible en <https://elpais.com/economia/negocios/2023-06-14/indonesia-asalta-el-mercado-del-cobalto.html> [Consultado en 18/07/2023].

GREENPEACE. Protect the Ocean. In *Deep water: The emerging threat of deep sea mining*, s/f. Disponible en <https://storage.googleapis.com/planet4-international-stateless/2019/06/f5458206-in-deep-water-deep-sea-mining.pdf> [Consultado en 20/03/2024].

HARVEY, David. *O enigma do capital e as fases do capitalismo*. São Paulo: Boitempo, 2011.

HARVEY, David. *Diecisiete contradicciones del capital y el fin del neoliberalismo*. Madrid: Traficante de los Sueños, 2014.

INSTITUTO ESPAÑOL DE ESTUDIOS ESTRATÉGICOS (IEEE). *Los minerales estratégicos*, nº 4, 2023. Disponible en [https://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs\\_marco/2023/DIEEEM04\\_2023\\_ANAPAS\\_Mineral.es.pdf](https://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_marco/2023/DIEEEM04_2023_ANAPAS_Mineral.es.pdf) [Consultado en 10/09/2023].

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. Disponible en <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> [Consultado en 15/09/2023].

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. Paris, 05/05/2021. Disponible en <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9d6f9b13-c478-41c6-9ffe-6a05f3ab73ef/Criticalmineralslaunchslides.pdf> [Consultado en 15/12/2023].

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Energy Technology Perspectives 2023*. Disponible en <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a86b480e-2b03-4e25-bae1-da1395e0b620/EnergyTechnologyPerspectives2023.pdf> [Consultado en 14/08/2023].

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Geopolitics of the energy transition, 2023. Critical minerals*. Disponible en [https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jul/IRENA\\_Geopolitics\\_energy\\_transition\\_critical\\_materials\\_2023.pdf?rev=f289d177cda14b9aaf2d1b4c074798b4](https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jul/IRENA_Geopolitics_energy_transition_critical_materials_2023.pdf?rev=f289d177cda14b9aaf2d1b4c074798b4) [Consultado en 20/10/2023].

JONES, Mared Gwin. El dilema de la UE en aguas profundas: sus vecinos plantean explotar el fondo marino. *EuroNews*, 01/09/2023. Disponible en <https://es.euronews.com/my-europe/2023/09/01/el-dilema-de-la-ue-en-aguas-profundas-sus-vecinos-planean-explotar-el-fondo-marino> [Consultado en 25/03/2024].

LODGE, Michael. La Autoridad Internacional de los Fondos Marinos y la explotación minera de los fondos marinos. *Crónica ONU*, s/f. Disponible en <https://www.un.org/es/chronicle/article/la-autoridad-internacional-de-los-fondos-marinos-y-la-explotacion-minera-de-los-fondos-marinos> [Consultado en 5/03/2024].

MESSINA, Piero. Siga el gas para comprender la guerra entre Israel y Palestina. *Instituto Español de Geopolítica: Geoestrategia.es*, 12/11/2023. Disponible en <https://geoestrategia.es/noticia/41781/geoestrategia/siga-el-gas-para-comprender-la-guerra-entre-israel-y-palestina.html> [Consultado en 15/02/2024].

MUGGAH, Robert. Russia's resource grab in Ukraine: Ukraine's extraordinary riches in energy, minerals, and agriculture are a prize for the Kremlin. *FP News. Analysis*, 28/04/2022. Disponible en <https://foreignpolicy.com/2022/04/28/ukraine-war-russia-resources-energy-oil-gas-commodities-agriculture/> [Consultado en 10/01/2022].

NASSAR, Nedal et al. Rock-to-metal ratio: A foundational metric for understanding mine wastes. *Environmental Science & Technology*. Vol. 56/10, 2022, p. 6710–6721, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c07875> [Consultado en 15/12/2022].

PITRON, Guillaume. El impacto de los minerales raros: profundizando en la transición energética. *Green Europe Journal*, 05/02/2021. Disponible en <https://www.greeneuropeanjournal.eu/el-impacto-de-los-metales-raros-profundizando-en-la-transicion-energetica/> [Consultado en 12/11/2022].

RABONE, Muriel; WIETHASE, Joris; SIMON-LLEDO, Erik; WIKLUND, Helena; HORTON, Tammy; GLOVER, Adrian. How many metazoan species live in the world's largest mineral exploration region? *Current Biology* 33, p. 2383–2396, junio de 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.04.052>

REGUEIRO, Manuel; GONZÁLEZ-BARROS, M. Minerales críticos en Europa: metodología para la evaluación de la criticidad de los minerales. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, nº 19, julio de 2014. Disponible en [https://eprints.ucm.es/id/eprint/34404/1/Regueiro.y.Barros\\_WEB3.pdf](https://eprints.ucm.es/id/eprint/34404/1/Regueiro.y.Barros_WEB3.pdf) [Consultado en 15/12/2022].

SEGURIDAD MINERA. ¿Cómo se generan los gases tóxicos en minería? *Revista Seguridad Minera*, 5 de marzo de 2018. Disponible en <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/como-se-generan-los-gases-toxicos/#:~:text=Gases%20en%20la%20miner%C3%ADa%201%201.%20Mon%C3%B3xido%20de,7%207%20.%20Metano%20Caracter%C3%ADsticas%3A%20Formula%3A%20CH4%20> [Consultado en 10/03/2024].

STATISTA. *Ranking de los principales países productores de tierras raras en 2022*, 2022. Disponible en <https://es.statista.com/estadisticas/600214/paises-lideres-en-la-produccion-de->

tierras-

[raras/#:~:text=Pa%C3%ADses%201%C3%ADderes%20en%20la%20producci%C3%B3n%20de%20tierras%20raras%20en%202022&text=En%202022%2C%20China%20tuvo%20una,Estados%20Unidos%20con%2043.000%20toneladas](#) [Consultado en 15/08/2023].

THE OCEAN FOUNDATION. *Minería de los fondos marinos profundos*. Disponible en [https://oceanfdn.org/es/deep-seabed-mining/#:~:text=La%20miner%C3%ADa%20de%20los%20fondos%20marinos%20profundos%20\(DSM%2C%20por%20sus,y%20metales%20de%20tierras%20raras](https://oceanfdn.org/es/deep-seabed-mining/#:~:text=La%20miner%C3%ADa%20de%20los%20fondos%20marinos%20profundos%20(DSM%2C%20por%20sus,y%20metales%20de%20tierras%20raras) [Consultado en 15/02/2024].

UNITED NATIONS. Climate change. *No hemos pasado página a la era de los combustibles fósiles, pero este resultado es el principio del fin* (Secretario Ejecutivo de ONU Cambio Climático en la clausura de la COP28, 2023). Disponible en <https://unfccc.int/es/news/no-hemos-pasado-pagina-a-la-era-de-los-combustibles-fosiles-pero-este-resultado-es-el-principio-del-0> [Consultado en 10/02/2024].

U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR; U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Lithium. Critical Mineral Resources of the United States. Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*, 2017. Disponible en <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/k/pp1802k.pdf> [Consultado en 10/11/2023].

U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR; U. S. GEOLOGICAL SURVEY. Commodity Summaries, January 2023. Disponible en <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf> [Consultado en 15/10/2023].

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Rare Earths. *Mineral Commodity Summaries*, January 2023. Disponible en <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-rare-earth.pdf> [Consultado en 15/08/2023].

USANOV, Artur; RIDDER, M.; AUPING, W.; LINGEMANN, S. Coltán, Congo & Conflict. Polinares Case Study. *The Hague Centre for Strategic Studies*, nº 20, 03, 2013. DOI: [10.13140/RG.2.2.35662.05441](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35662.05441). Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/317387473\\_Coltan\\_Congo\\_and\\_Conflict](https://www.researchgate.net/publication/317387473_Coltan_Congo_and_Conflict) [Consultado en 15/09/2023].

WORLD ENERGY TRADE. Ranking de las cinco mayores empresas mineras de litio del mundo, 2021. Disponible en <https://www.worldenergytrade.com/metales/litio/ranking-de-las-cinco-mayores-empresas-mineras-de-litio-del-mundo> [Consultado en 15/10/2023].

WORLD WIDE FUND FOR NATURE (WWF). Diez datos sobre la minería en fondo marino y sus riesgos, 02/09/2022. Disponible en <https://www.wwf.org.pe/?378670/Diez-datos-sobre-la-mineria-en-fondos-marinos-y-sus-riesgos> [Consultado en 15/02/2024].

ZAAR, Miriam Hermi. Cambio climático antropogénico y decrecimiento. *Ar@cne. Revista Electrónica de Recursos de Internet sobre Geografía y Ciencias Sociales*. Barcelona: Universidad de Barcelona, 1 de enero de 2021, vol. XXV, nº 250. DOI: <https://doi.org/10.1344/ara2021.250.33232>.

ZAAR, Miriam Hermi. H. La resiliencia ante los riesgos socioecológicos y económicos: conceptos y propuestas. *Revista Geosp*, v. 27, n. 1, e-194172, jan./abr. 2023. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2023.194172>.

Ficha bibliográfica:

ZAAR, Miriam Hermi. La geopolítica del carbono cero y el papel de los minerales críticos en la transición energética. *Ar@cne. Revista Electrónica de Recursos de Internet sobre Geografía y Ciencias Sociales*. Barcelona: Universidad de Barcelona, 1 de mayo de 2024, vol. XXVIII, n° 290. DOI: <http://doi.org/10.1344/ara2024.290.46680>

Menú Geo Crítica