

| VOL. 2 |

JUNIO 2024 |

PERSPECTIVA

MINERÍA SUBMARINA

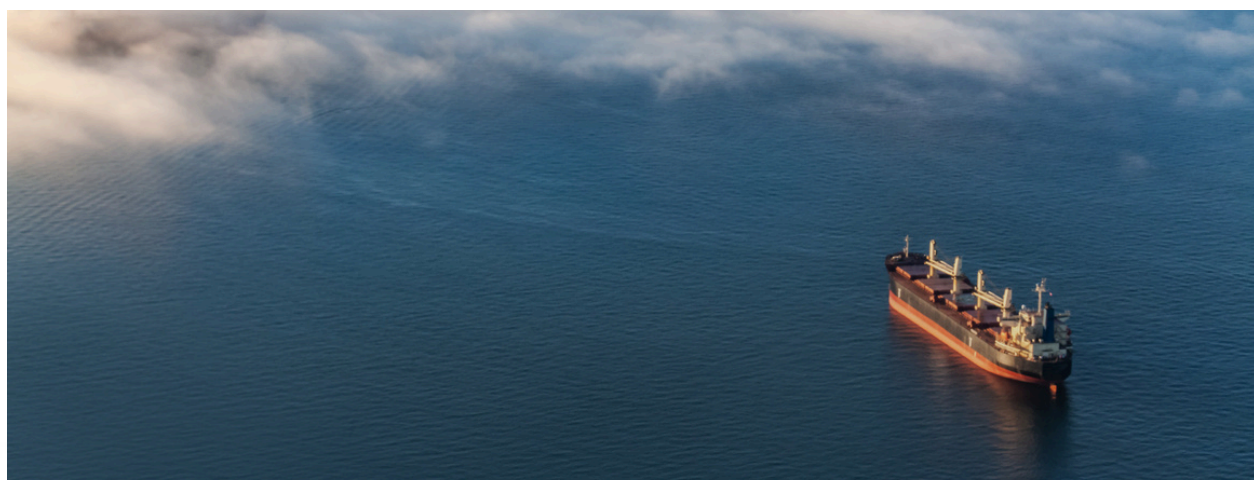
EXPLORANDO LAS
PROFUNDIDADES: EL FUTURO DE
LA MINERÍA SUBMARINA



Paving the way for the future of mining

ÍNDICE

Sobre GEM.....	3
Editorial.....	4
Introducción.....	5
Antecedentes.....	8
Principales desafíos de la minería submarina.....	10
Beneficios y riesgos de la minería submarina.....	11
Conclusiones.....	20
Bibliografía.....	21
Contacto.....	24



SOBRE GEM

Somos una empresa de Ingeniería Industrial especializada en brindar apoyo a la industria minera en asuntos relacionados con gestión y economía. Nuestra experiencia abarca diversos campos, mientras desarrollamos las herramientas más avanzadas aplicadas en el ámbito minero. Con más de 15 años de experiencia y la exitosa implementación de más de 400 proyectos a nivel mundial, nos destacamos por nuestra sólida trayectoria y compromiso con la excelencia en el sector.

MISIÓN

Somos una empresa proveedora de productos y servicios de ingeniería industrial que permiten habilitar el camino para la minería del futuro, a la vez que maximizan el valor del negocio de nuestros clientes. En GEM estamos comprometidos a convertirnos en un faro para la industria minera mundial.

Nuestro núcleo destaca las principales áreas de servicio de GEM, las cuáles incluyen:

Análítica: Uso de herramientas analíticas avanzadas como aprendizaje automático y análisis estadístico.

Capacitación: Provisión de entrenamiento en temas complejos adaptados a casos específicos de minería.

Economía: Generación de estudios de economía mineral, análisis de mercado y análisis econométrico.

Evaluación de Riesgos: Identificación y cuantificación de riesgos con simulaciones Monte Carlo para evaluar su impacto.

Estrategia: Apoyo en la toma de decisiones estratégicas para maximizar el valor empresarial.

Optimización: Utilización de herramientas y lenguajes de programación para encontrar soluciones óptimas.

Además, la imagen central muestra el compromiso de GEM con la minería del futuro, abordando áreas como el cambio climático, la colaboración, la evaluación del impacto social, la naturaleza, la minería submarina y la lixiviación in-situ.



EDITORIAL

La humanidad, enfrenta hoy el desafío de abordar el cambio climático. Para esto, se requieren metales cuya abundancia en la tierra están siendo cada vez más críticos: cobre, níquel, manganeso, cobalto, entre otros. La calidad de los recursos de los minerales que necesitamos para las próximas décadas en la Tierra, está disminuyendo de forma exponencial, haciendo que sus costos sean cada vez mayores.

Por otro lado, la conciencia social y ambiental respecto a las implicancias ambientales que tiene la minería continental está provocando que sea cada vez más difícil desarrollar los proyectos requeridos por la humanidad. De ahí surge la necesidad de empezar a explorar lo que podríamos denominar “minería exoterrestre”, como la minería submarina y la minería espacial (el uso de minería extraterrestre se refiere únicamente a la minería realizada fuera de la Tierra). Ambas ofrecen oportunidades para la humanidad, no solo para reducir la necesidad de minería continental, donde viven las personas y la mayoría de la biota del planeta, sino que también porque eventualmente nos va a permitir avanzar hacia tecnologías que se espera que incluso mejoren las tecnologías mineras actuales y reduzcan el impacto en el medioambiente.

En el presente Perspectiva, mostramos un resumen de los resultados de un estudio que desarrollamos en GEM con el objetivo de entender en mayor profundidad el potencial de la minería submarina. Este estudio, en el cual revisamos el componente técnico, económico y ambiental, nos lleva a concluir que la minería submarina de los Nódulos Polimetálicos no solo es económicamente viable en minerales como el níquel, cobalto y el manganeso, sino que además su huella ambiental en las profundidades del mar estaría relativamente controlada y es definitivamente menor que la huella de la minería continental.



De esta forma, aunque todavía se debe avanzar en estudios científicos y de impacto ambiental, para así obtener la licencia social, la minería submarina muy probablemente forme parte de las fuentes de minerales de las próximas décadas.

En GEM, estamos comprometidos con pavimentar el camino hacia la minería del futuro. Creemos que la minería submarina y espacial serán claves para resolver los desafíos de la humanidad, incluida nuestra sobrevivencia de largo plazo como especie. De aquí que nos encontramos desarrollando las capacidades que nos permitan apoyar a la industria a concretar sustentablemente – en lo económico, ambiental y social – este desafío.

INTRODUCCIÓN

En las próximas décadas se proyecta un aumento sostenido de la demanda de metales críticos y un déficit en la producción a nivel mundial. Este escenario se da junto al impulso global hacia la descarbonización, promoviendo la electromovilidad y tecnologías que reduzcan las emisiones de carbono. En la **Figura 1**, que presenta varios escenarios posibles, se visualiza que la demanda de minerales esenciales para las energías renovables podría aumentar considerablemente. Se estima que para el año 2030, la demanda podría duplicarse con respecto a la del año 2022, y podría triplicarse para el año 2050 (IEA, 2023).

El primer escenario “Stated Policies” (STEPS) considera una trayectoria basada en las políticas actuales del mundo. Luego, el escenario “Announced Pledges” (APS) asume que los objetivos energéticos y de carbono neutralidad se logran, independientemente de si se tienen actualmente las políticas para esto. Finalmente, el tercer escenario “Net Zero Emissions by 2050” (NZE) considera la ruta para que el sector energético alcance la carbono neutralidad al año 2050 (IEA, 2023).

Frente a la preocupación sobre la escasez de minerales críticos en la tierra, se presenta la minería submarina como una potencial alternativa, gracias a la abundancia de depósitos submarinos descubiertos en exploraciones y a avances tecnológicos que han permitido el desarrollo de métodos eficientes de extracción.

Existen tres tipos de depósitos submarinos: Nódulos Polimetálicos (PN), Cortezas ricas en Cobalto (CRC) y Depósitos polimetálicos de sulfuros (Ver **Figura 2**). Los PN se encuentran en llanuras abisales que son áreas planas y extensas en aguas profundas entre 4.000 y 6.000 metros bajo el nivel del mar. Los PN tienen forma de patata con un diámetro entre 4 y 10 [cm] y se estima que su proceso de formación tarda millones de años. Se constituyen principalmente de manganeso (28%), níquel (1,3%), cobre (1,1%), cobalto (0,2%), molibdeno (0,059%) y metales de tierras raras (0,081%). Por su parte, las CRC se forman en las laderas y cimas de montes submarinos y contienen manganeso, hierro y gran variedad de metales traza.

La minería de CRC es más desafiante tecnológicamente que la de PN porque las costras se encuentran adheridas a sustratos rocosos. Finalmente, los SMS se encuentran entre 1.000 y 4.000 [m] de profundidad en fuentes hidrotermales activas e inactivas de hasta 400 °C, que son grietas en el fondo del océano por donde emergen fluidos calientes cargados de minerales, y son el resultado de la actividad volcánica y geotérmica.

Estos tienen un alto contenido de sulfuro, cobre, oro, zinc, plomo, bario y plata. Sin embargo, su minería presenta complicaciones significativas, ya que alrededor del 85% de las especies que habitan en las fuentes hidrotermales se consideran endémicas, es decir, que no se encuentran en ningún otro lugar del mundo. Esta actividad podría tener un impacto negativo en la interconexión y conservación de estas comunidades (Miller et al., 2018).

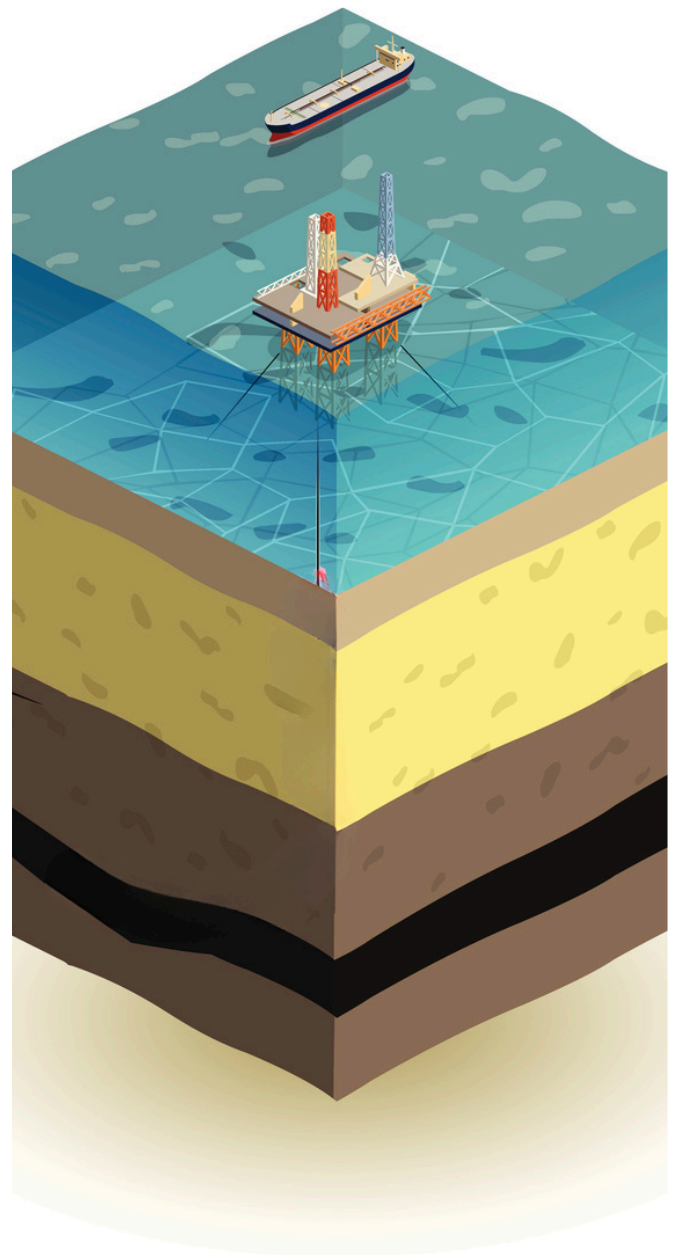
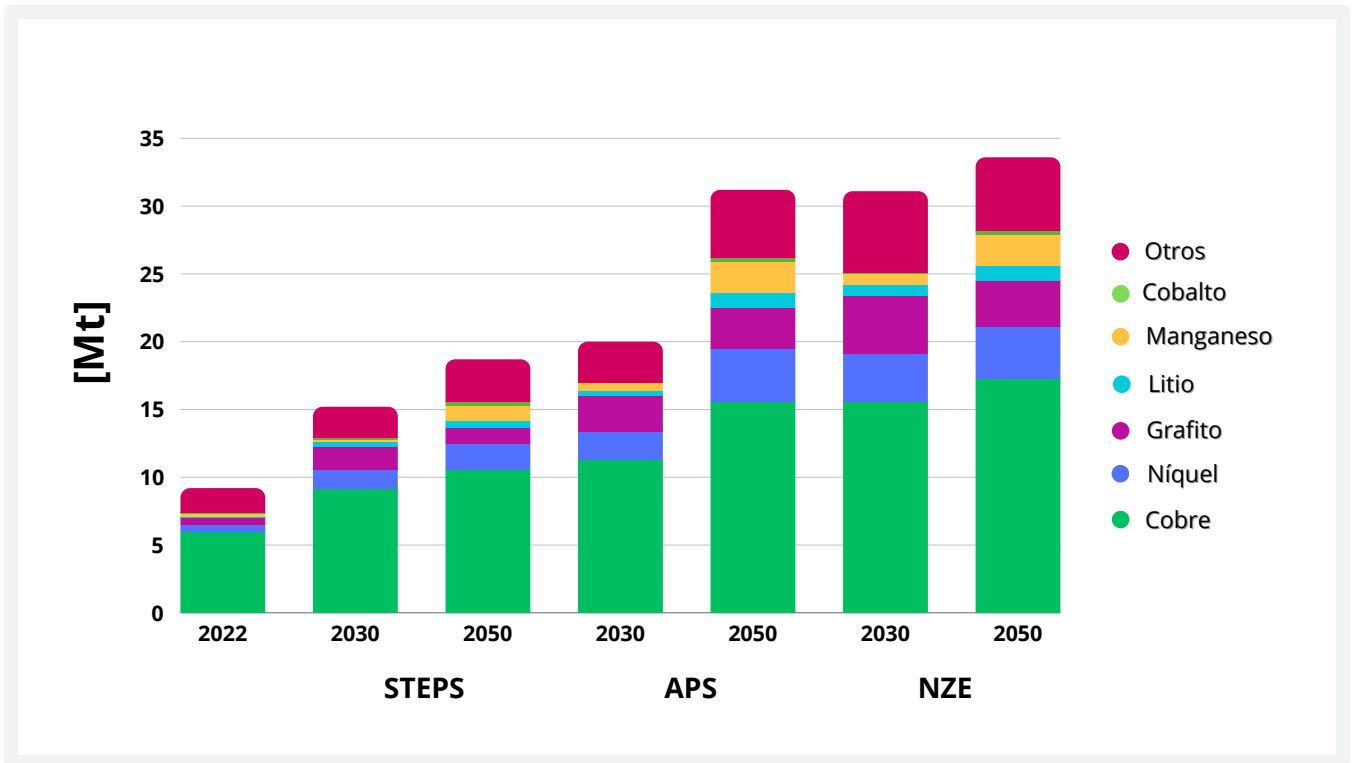
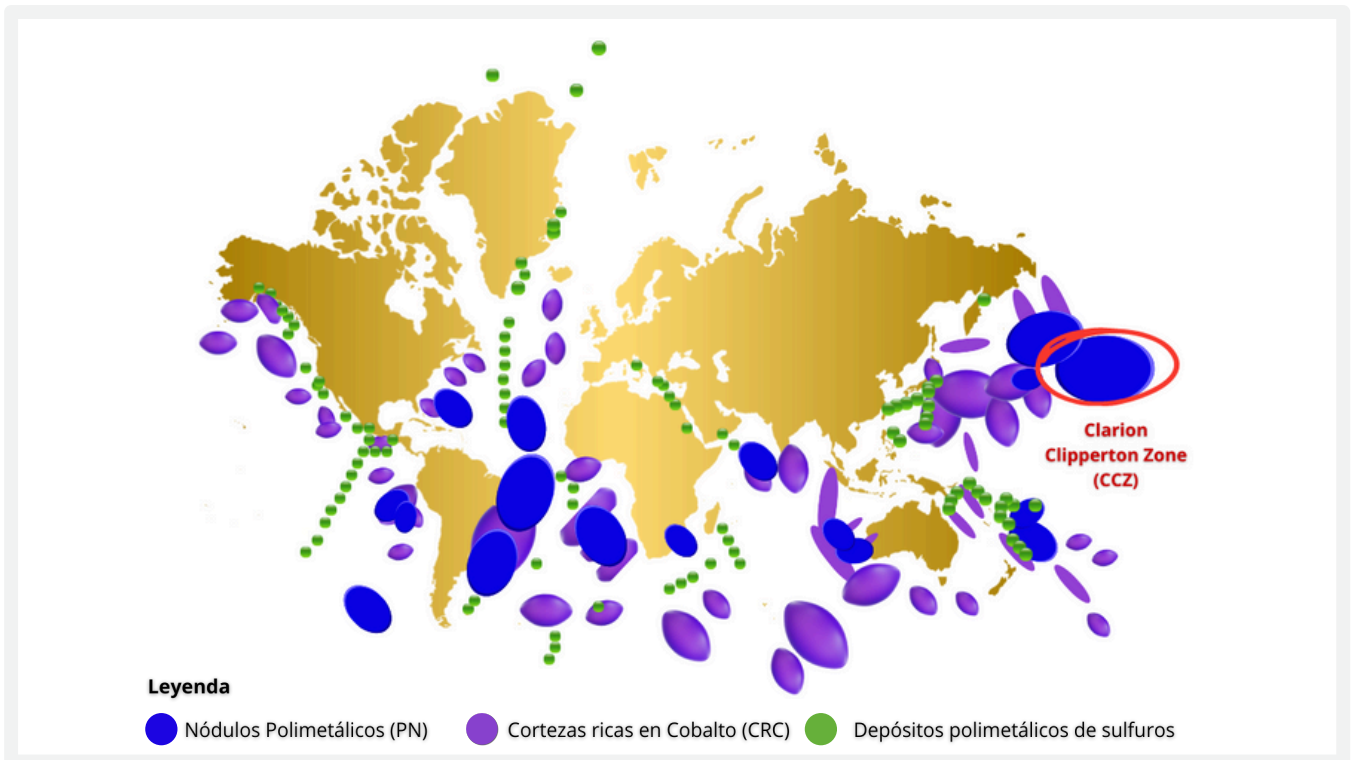


FIGURA 1. DEMANDA DE MINERALES CRÍTICOS PARA ENERGÍAS RENOVABLES



Fuente: GEM en base a international Energy Agency (2023)

FIGURA 2. PRINCIPALES DEPÓSITOS MINERALES SUBMARINOS



Fuente: GEM en base a international Energy Agency (2023)

El presente estudio se enfoca en la minería de Nódulos Polimetálicos, debido a su mayor viabilidad técnica/económica, las características de sus depósitos y el desarrollo de tecnologías de extracción.

El Sistema de Transporte Vertical VTS por sus siglas en inglés, es el esperable a utilizar para la extracción de nódulos, y se ha usado tanto conceptualmente como en pruebas piloto realizadas alrededor del mundo. Este método consiste en elevar los minerales desde un vehículo minero ubicado en el fondo marino hasta un buque en la superficie del mar. Para la elevación generalmente se utiliza un sistema hidráulico que está compuesto por una tubería rígida y una bomba, una estación de amortiguación y una manguera (Ver **Figura 3**).

La tubería rígida conecta el buque con el amortiguador y tiene una bomba que proporciona energía al proceso de elevación. El amortiguador actúa como un espacio de almacenamiento temporal, cuando el vehículo minero recolecta nódulos a una velocidad más alta de la que la bomba puede soportar, para luego transportarlos hacia la superficie a través de la tubería rígida.

Abajo del amortiguador se conecta una manguera que está unida al vehículo minero que se desplaza a lo largo del lecho marino (Wu et al., 2020).

FIGURA 3. ESQUEMA DEL SISTEMA DE TRANSPORTE VERTICAL (VTS) EN MINERÍA SUBMARINA



Fuente: GEM en base a Wu et al. (2020)

ANTECEDENTES

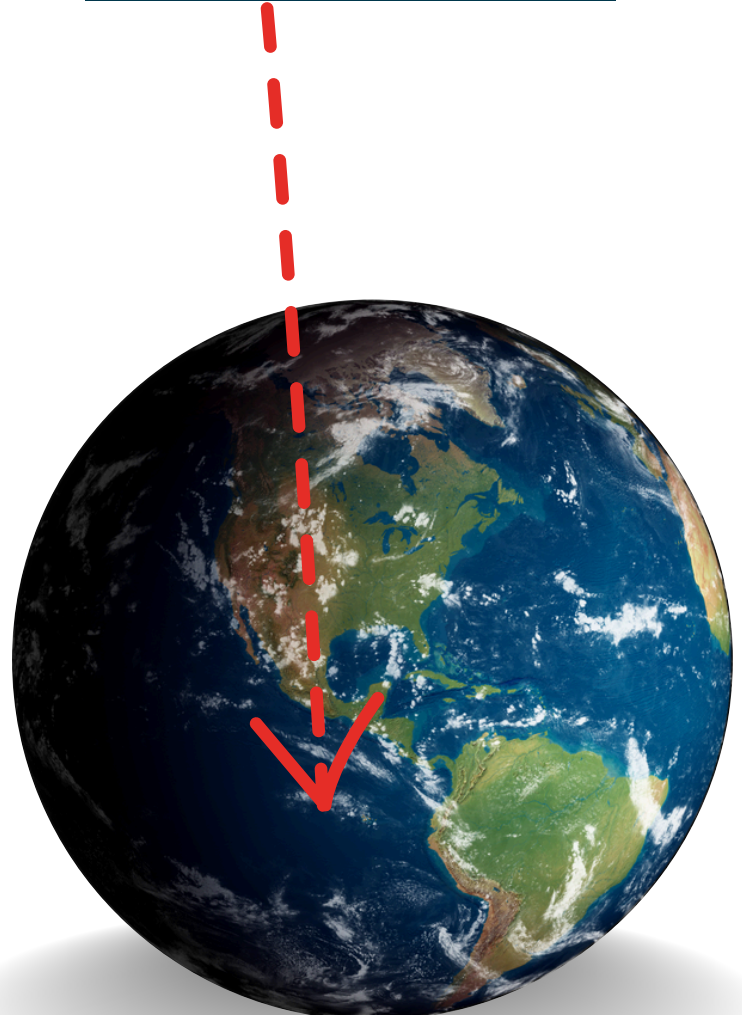
CLARION CLIPPERTONE ZONE

Actualmente, la zona más estudiada que contiene Nódulos Polimetálicos corresponde a la llamada **Clarion-Clippertone Zone (CCZ, de aquí en adelante)**, ubicada en el océano Pacífico, con un área total de 9.000.000 [KM²] y que posee un área de interés minero de 4.500.000 [KM²]. Se estima que posee una abundancia media de nódulos de 13 a 15, equivalente a 5.500 [Mt] (Abramowski et al., 2021).

Cabe destacar que se han llevado a cabo anteriormente operaciones de minería submarina, tales como la extracción de diamantes en Namibia desde el año 2002, a 120 metros bajo el nivel del mar, a través de un buque con una capacidad de 12 [kt], en un área total permitida de 6.000 [km²] (Scott K, 2018). Adicionalmente, el año 2017, la empresa estatal de minería Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC), extrajo zinc a 1.600 metros bajo el nivel del mar, en la costa de Okinawa (Carver et al., 2020).

Respecto a estas operaciones submarinas, se han tomado diferentes posturas alrededor del mundo (ver **Figura 4**), y países como Francia se han declarado en contra de esta actividad, pese a haber patrocinado la exploración en las profundidades (McVeigh, K., & Michael, C. 2023). Por otra parte, alrededor de 21 países han adoptado una postura de pausa por precaución (Chile, Brasil, España, Portugal, entre otros) o de moratoria (Canadá, México, Nueva Zelanda, entre otros).

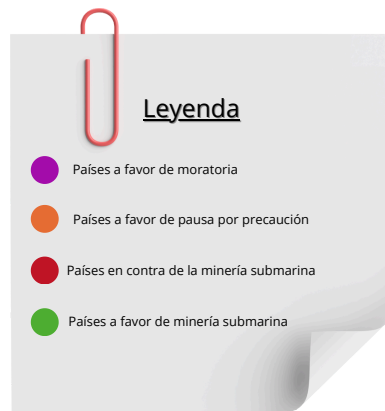
Una pausa por precaución de la minería submarina implicaría que se detiene por un tiempo hasta asegurarse de que no cause daños significativos o irremediables al medio ambiente marino. Por otro lado, una moratoria va más allá y considera posibles daños ambientales, sociales y económicos antes de tomar decisiones sobre la minería submarina, deteniendo la actividad minera temporalmente para evaluar mejor sus impactos antes de continuar (Watson Farley & Williams, 2023).



Sin embargo, países como Rusia, India, Corea del Sur y China han apoyado su desarrollo y han patrocinado o desarrollado exploración submarina (Alberts, E.C. 2023). En cuanto a sus Zonas Económicamente Exclusivas (ZEE), Japón, Reino Unido y Noruega presentan un mayor porcentaje mapeado, de 97,7%, 90,6% y 81,9%, respectivamente (Muñoz, E. 2021). Cabe destacar que, Noruega en el año 2024, se convirtió en el primer país en apoyar y acelerar la minería submarina, abriendo la oportunidad de exploración minera en sus costas (Frost, 2024).

Por otra parte, en Estados Unidos se ingresó al Congreso una propuesta de ley “The Responsible Use of Seafloor Resources Act of 2024”, que destaca la oportunidad de acceder a minerales sin la necesidad de depender de China, solicitando las investigaciones científicas y tecnológicas necesarias para analizar los beneficios de la minería submarina de Nódulos Polimetálicos (Khan, 2024).

FIGURA 4. POSTURA DE PAÍSES RESPECTO AL DESARROLLO DE MINERÍA SUBMARINA



Fuente: Elaboración propia en base a Deep Sea Conservation Coalition (2024), Symons (2023), Seas at Risk (2023) y Reuters (2023)

PRINCIPALES DESAFÍOS DE LA MINERÍA SUBMARINA

La minería submarina se encuentra ante una serie de desafíos originados por diversas causas. En primer lugar, se enfrenta a la complejidad operativa inherente a la exploración y extracción en las zonas más profundas de los océanos, donde se encuentran **los depósitos marinos de interés, como los Nódulos Polimetálicos**. Estos suelen hallarse a profundidades cercanas a los 4.000 metros bajo el nivel del mar, lo que implica el desarrollo de equipos especializados que puedan resistir las presiones que se presentan a tal profundidad.

En segundo lugar, hay que considerar el significativo grado de desconocimiento que la comunidad científica posee sobre las especies marinas que habitan estas zonas. Esta falta de conocimiento abarca tanto la diversidad biológica presente, como el rol que desempeñan estos seres vivos dentro de los ecosistemas marinos.

A su vez, muchas especies aún no han sido identificadas, y las que sí, apenas están comenzando a ser estudiadas. Lo anterior, permite demostrar que existe una falta de comprensión sobre los posibles impactos ecológicos derivados de la alteración del lecho marino y que, si se lleva a cabo la minería submarina, podría tener repercusiones ambientales.

En tercer lugar, es importante considerar que la minería submarina podría provocar fenómenos de sedimentación y el depósito de partículas sólidas en el lecho marino, alterando la manera en que se mueven los sedimentos en el fondo del mar y la distribución de los nutrientes.

Esto podría modificar los hábitats de las especies marinas que dependen de estos nutrientes para su supervivencia, pudiendo tener efectos adversos en la calidad del agua y la salud de los ecosistemas circundantes, amenazando la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que proporcionan. Por esto, es crucial que la minería submarina continúe siendo investigada con el objetivo de comprender plenamente sus posibles consecuencias ambientales, para luego desarrollar estrategias efectivas de mitigación y gestión de impactos ambientales.





BENEFICIOS Y RIESGOS DE LA MINERÍA SUBMARINA

(1) Beneficios de la minería submarina

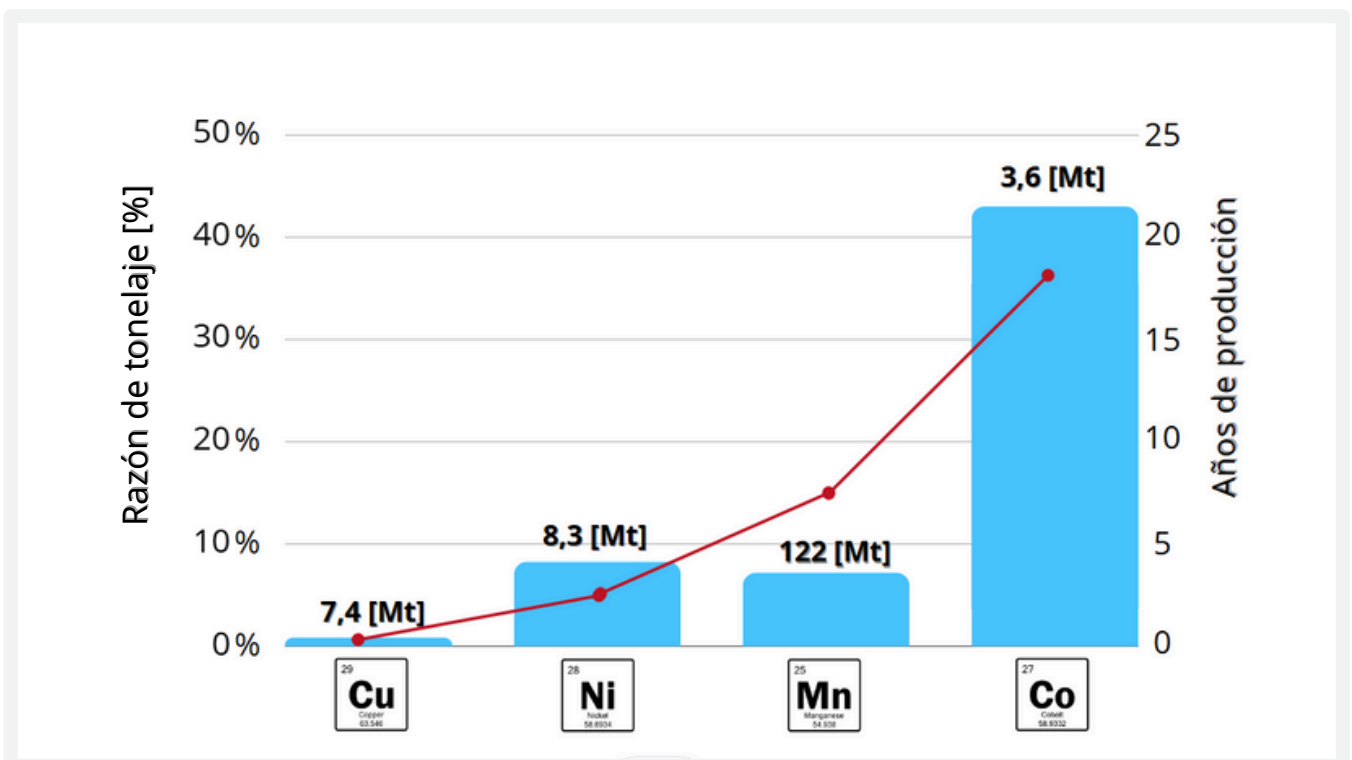
La minería submarina de Nódulos Polimetálicos tiene un gran atractivo al comparar el potencial de los recursos del medio marino con respecto a las reservas terrestres actuales. En particular, los *commodities* con mayor abundancia de recursos serían el cobalto, manganeso y níquel, mientras que el cobre presentaría una menor abundancia como subproducto de la extracción de los otros minerales.

Las reservas mundiales en el lecho marino para cada uno de estos elementos serían de 3,6, 122, 8,3 y 7,4 [Mt], respectivamente (Glasby, 2000; Ministry of Earth Science, 2017; Lipton et al., 2018; Volkmann et al., 2019; Ellefmo et al., 2019; García et al., 2020; Toro et al., 2020; Abramowski et al., 2021; Muñoz, 2021; Kuhn & Rühlemann, 2021; JOGMEC, 2023).

A su vez, estas cifras, representarían una razón de tonelaje del 43,0%, 7,2%, 8,3% y 0,8% respecto de las reservas terrestres actuales de cada uno de los *commodities* antes mencionados.

Considerando los ritmos de producción, lo anterior aseguraría una producción mundial de al menos 18,8 años para el cobalto, 6,1 años para el manganeso, 2,5 años para el níquel y 0,3 años para el cobre, teniendo en cuenta las reservas mapeadas en las profundidades del lecho marino, como se muestra en la **Figura 5**.

FIGURA 5. RAZÓN DE TONELAJE PRESENTE EN EL LECHO MARINO RESPECTO DE LAS RESERVAS TERRESTRES Y AÑOS DE PRODUCCIÓN GARANTIZADOS EN BASE A TONELAJE



Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 5**, las barras representan el porcentaje de la cantidad de cada *commodity* que hay disponible en el mar respecto de lo que hay actualmente reconocido como recursos en la tierra. La línea roja representa los años de producción garantizados al explotar esas cantidades.

Es necesario destacar que las leyes de los minerales de interés en los yacimientos submarinos de CCZ suelen ser mayores en comparación a las leyes de los yacimientos terrestres, es decir, que la concentración del mineral es mayor. Las leyes promedio en el lecho submarino son de 0,16% para el cobalto, 29% para el caso del manganeso, 1,3% para el níquel y de un 1% para el cobre (Hein, 2016).

GEM llevó a cabo un estudio¹ con la finalidad de estimar los precios a largo plazo y precio de incentivo de minerales, que potenciarían el desarrollo de minería submarina (ver **Tabla 1**). Se puede observar que existe una notable discrepancia entre los precios a largo plazo y los precios de incentivo requeridos para que la explotación de reservas sea atractiva bajo las condiciones de mercado actuales.

Además, se observa cómo los precios a largo plazo superarían los precios de incentivo, una razón más para entender el por qué la minería submarina es económicamente viable al operar en zonas a más de 4.000 metros de profundidad.

TABLA 1. BASES DE ESTIMACIÓN DE PRECIOS DE INCENTIVO RESPECTO A LA EXPLOTACIÓN DE COMMODITIES EN EL LECHO MARINO

				
	UNIDAD	CCZIOM CO	CCZIOM NI	CCZIOM MN
 PRECIO INCENTIVO	[US\$/t]	16.800	15.900	460
 PRECIOS DE LARGO PLAZO	[US\$/t]	35.000	25.000	2.750

Fuente: Elaboración propia en base a Abramowski et al. (2021).

De la **Tabla 1**, se puede intuir una entrada al mercado a precios considerablemente más bajos de los pronosticados a futuro sin minería submarina. En particular para el caso del cobalto, esto se debería principalmente gracias al alto tonelaje en los depósitos del lecho marino, en general en cortezas ricas en cobalto, así como también su contenido relativamente alto en Nódulos Polimetálicos.

Para el caso del manganeso, el tonelaje de los recursos submarinos representa alrededor del 7% de la producción mundial actual. Este dato, combinado con el precio de incentivo, sugiere valores significativamente inferiores a los comerciales que habría sin minería submarina. Finalmente, para el caso del níquel, en el largo plazo su contribución en cuanto a la producción actual sería de un 8% extra a la oferta mundial e implicaría la baja en el precio del mineral desde 25.000 [US\$/t] a unos 15.900 [US\$/t], lo cual, finalmente lo convertiría en uno de los *commodities* más prometedores bajo el escenario de la minería submarina.

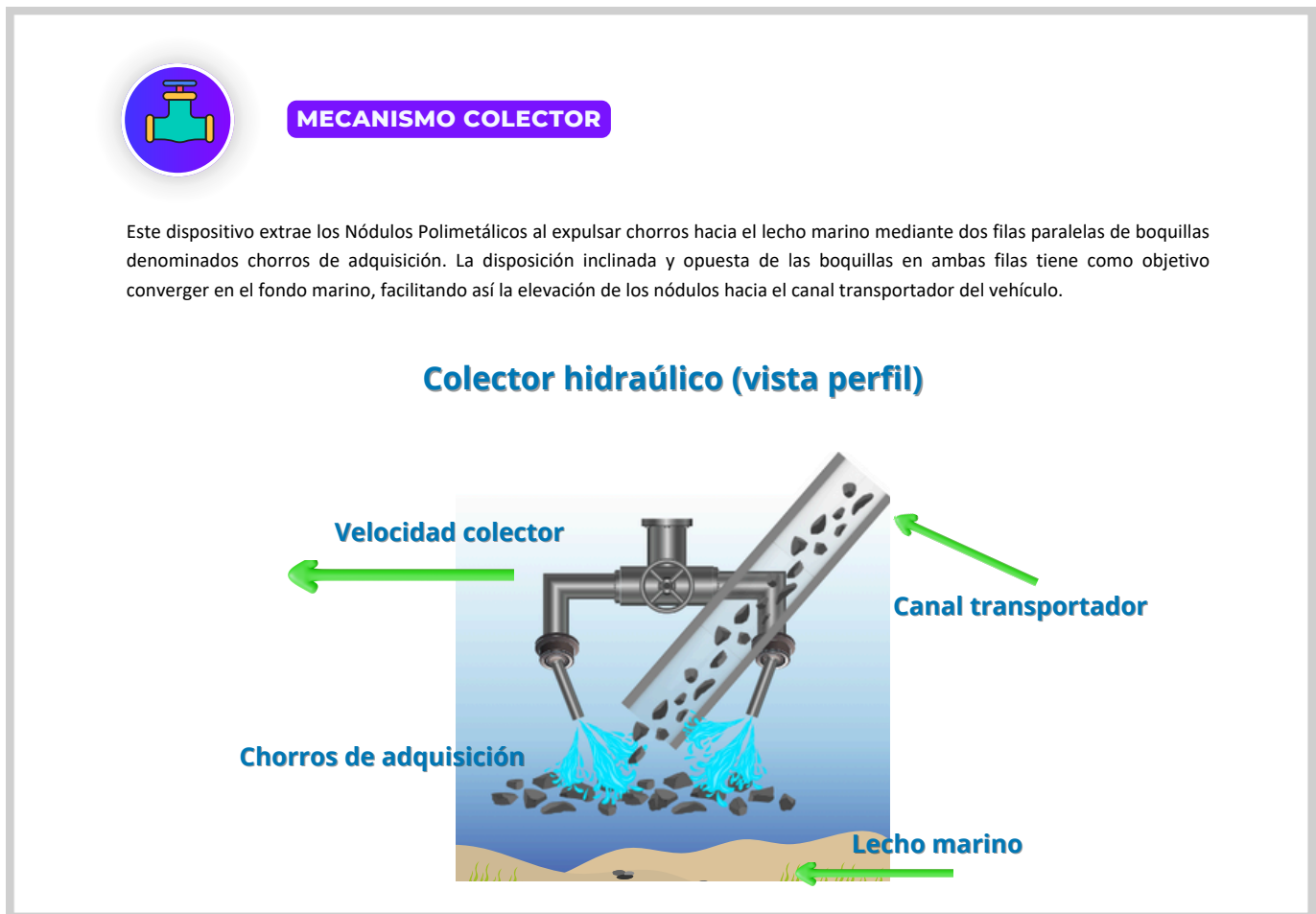
¹ Para más información consultar presentación "Precios de incentivo para la minería submarina" elaborada por GEM.

(2) Riesgos directos de la minería submarina

Los avances científicos en minería submarina coinciden en que el mecanismo más apropiado para la recolección de Nódulos Polimetálicos es el colector hidráulico (ver **Figura 6**), debido a su mayor eficiencia y menor interacción con el suelo marino en comparación con recolectores mecánicos (Wang et al., 2023). El paso de este colector por el lecho marino genera una pluma de sedimentos que se expande detrás de él (ver **Figura 6**). Sin embargo, esta pluma podría alterar el ambiente de los organismos bentónicos², aumentar la concentración de sólidos suspendidos y cambiar las propiedades químicas del agua (Zhang et al., 2024).

Con el fin de estudiar las dimensiones que podría tener la pluma, GEM construyó un modelo energético³ que permite predecir su altura (h) y extensión máxima (L). Utilizando parámetros característicos de la CCZ, los resultados sugieren que la altura máxima de la pluma podría estar entre 2 y 11 [m], mientras que su extensión horizontal podría variar entre 130 [m] y 16 [km].

FIGURA 6. COLECTOR HIDRAÚLICO Y PLUMA DE SEDIMENTOS



Fuente: GEM en base a Wang et al. (2023) y Zhang et al. (2024)

² Seres vivos que habitan en el fondo del océano.

³ Este modelo permite calcular la altura máxima de una partícula a partir del principio de conservación de la energía, y su desplazamiento horizontal a través de la Ley de Stokes y la velocidad de la corriente marina. Para más información consultar "The Fluid Mechanics of Deep-Sea Mining" de Peacock y Ouilon (2023).

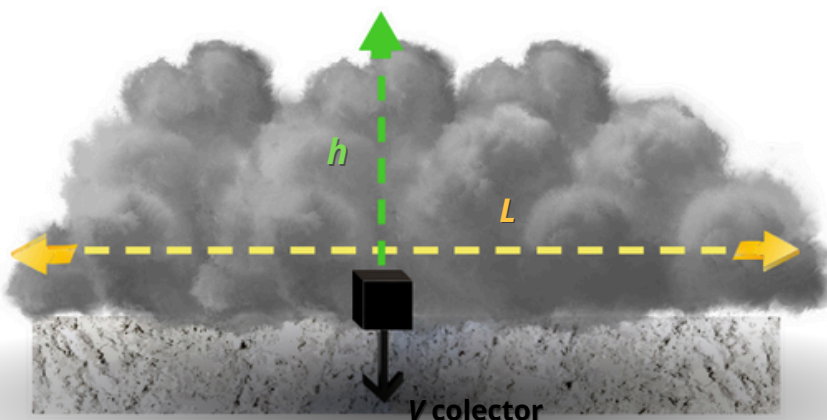
FIGURA 6. COLECTOR HIDRAÚLICO Y PLUMA DE SEDIMENTOS (CONT.)



PLUMA DE SEDIMENTOS

La elevación y desplazamiento de los sedimentos como resultado del impacto de los chorros de adquisición contra el lecho marino resulta en la formación de una pluma que se expande detrás del recolector, como consecuencia de la dispersión de partículas en el mar. Esta pluma tiene una altura máxima h y una extensión horizontal máxima L .

Pluma de sedimentos (vista transversal)



Fuente: GEM en base a Wang et al. (2023) y Zhang et al. (2024)

Según los resultados del modelo, en conjunto con la revisión de antecedentes bibliográficos, se puede concluir que la altura de la pluma no generaría un impacto directo relevante para la zona fótica⁴, dado que la pluma estaría acotada al fondo. Sin embargo, el riesgo podría estar en la extensión horizontal de la pluma debido a su mayor dimensión producto de las corrientes y efectos negativos que podría generar en el ambiente de la fauna del fondo marino.

Para comparar el impacto generado por la contaminación de esta pluma con la de un equipo de minería en tierra, se utilizó el modelo de GEM para calcular la cantidad de contaminantes producida por un camión minero terrestre. Esto se debe a que se ha demostrado que los camiones de extracción generan entre el 78% y el 97% de todas las emisiones de polvo en los sitios mineros en la superficie (Cole & Zapert, 1995).

Los resultados revelan que la pluma generada por minería terrestre es aproximadamente 500 veces mayor en su dimensión vertical y 2.000 veces mayor en su dimensión horizontal respecto de la que se produciría por minería submarina.

Las partículas en suspensión podrían desplazarse hasta 9.100 [km] en la atmósfera; es decir, el polvo generado por la mina de Chuquicamata en Calama podría llegar hasta Nueva York, Estados Unidos.

La continua suspensión de partículas, específicamente MP10, generó que en 2009 la ciudad de Calama en Chile fuese declarada zona saturada. Por lo que, en 2021 se aprobó un Plan de Descontaminación Ambiental (PDA) que establece metas de reducción de emisiones de MP10 en las faenas mineras (BCN, 2022). Finalmente, en 2023 se elaboró un proyecto de ley que plantea que las actividades mineras tengan una distancia mínima de 10 [km] de asentamientos humanos (Cámara de diputados de Chile(2023). Por consiguiente, reducir la nube de polvo generada por los camiones es de vital importancia, ya que afecta directamente la salud y calidad de vida de las personas.

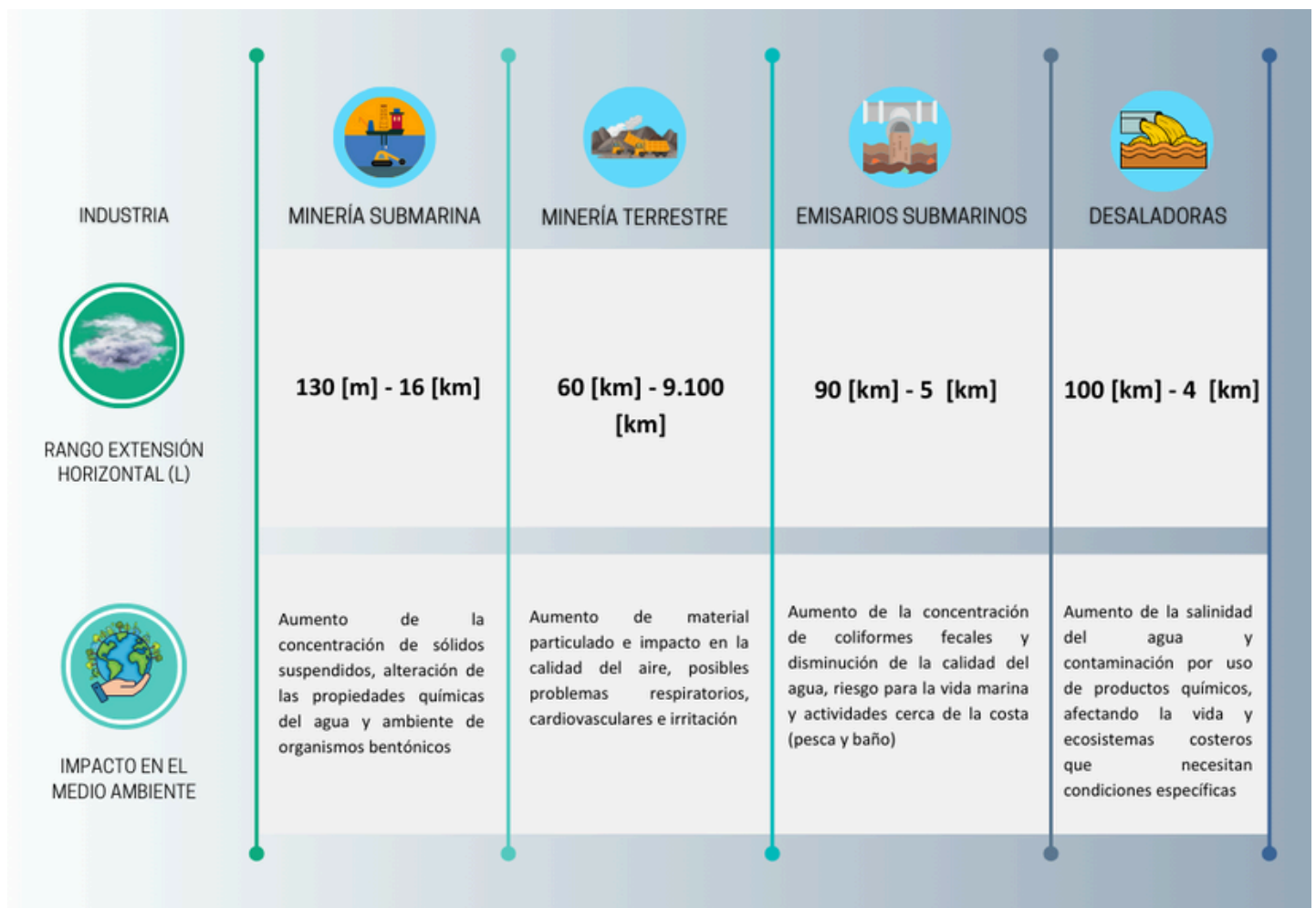
⁴ Corresponde a la zona del océano donde penetra la luz del sol, incluye el estrato epipelágico y mesopelágico, hasta los 200 y 1.000 [m] de profundidad, respectivamente. La mayor biodiversidad y productividad primaria se acumula en esta zona, en los estratos más profundos existen muy pocas especies, muchas de ellas desconocidas hasta la fecha (CONABIO, 2022).

Con objeto de comparar la pluma de la minería submarina con otras actividades industriales en el mar, se estudiaron las plumas de contaminación de emisarios submarinos y desaladoras. Estas plumas llevan aguas residuales y salmuera al mar, afectando la calidad del agua y el ecosistema marino.

Por lo tanto, es posible que el tamaño real de estas plumas esté subestimado al compararlo con el método utilizado por GEM para la minería terrestre y submarina, donde se observa la distancia máxima alcanzada a nivel de partícula.

Aunque las plumas de estas industrias pueden ser menores que las que se generarían en minería submarina, su impacto es notable, ya que se liberan a profundidades menores a 70 [m] y a menos de 4 [km] de la costa (Megías, C, 2021), amenazando la salud humana y la vida marina (ver **Figura 7**). Es importante tener en cuenta que estos estudios se basan en la medición de la pluma hasta alcanzar un nivel considerado aceptable de concentración de contaminantes.

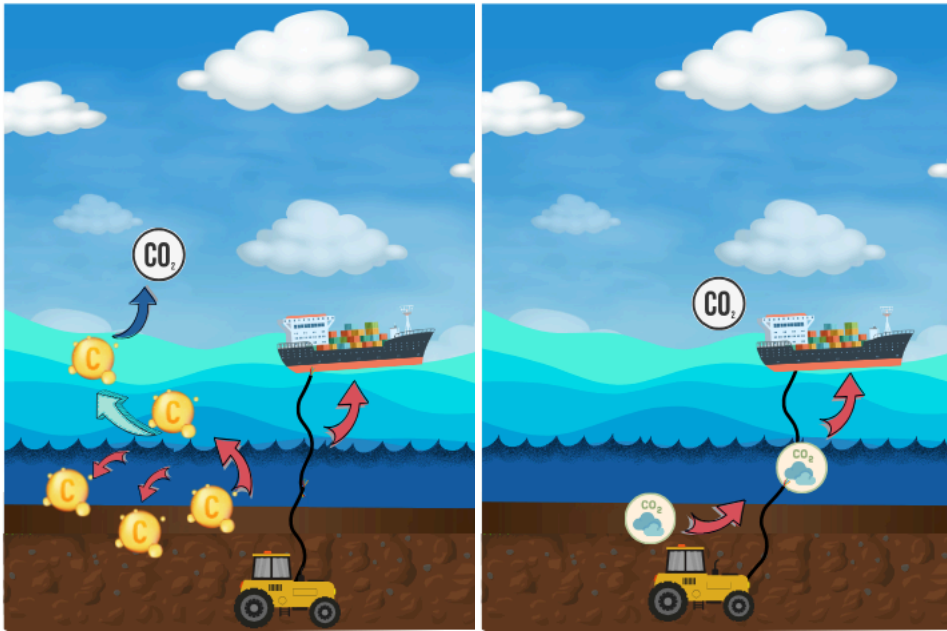
FIGURA 7. COMPARACIÓN DE PLUMAS POR INDUSTRIA



Fuente: GEM en base a Arregui (2012), Macías (2020), Montojo (2016), Muchiut (2016), Roberts et al. (2010) y Zhang et al. (2024)

FIGURA 8. RIESGO DE LIBERACIÓN DE RESERVAS DE CARBONO

Liberación de reservas de carbono



Potencial de emisión de 2,95 [Mt CO₂] a la atmósfera, considerando la extracción para la producción de un millón de baterías de vehículos eléctricos (EV)

Fuente: GEM en base a Paulikas, D, et al. (2020) y Amadi & Mosnier (2023)

(3) Riesgos indirectos de la minería submarina

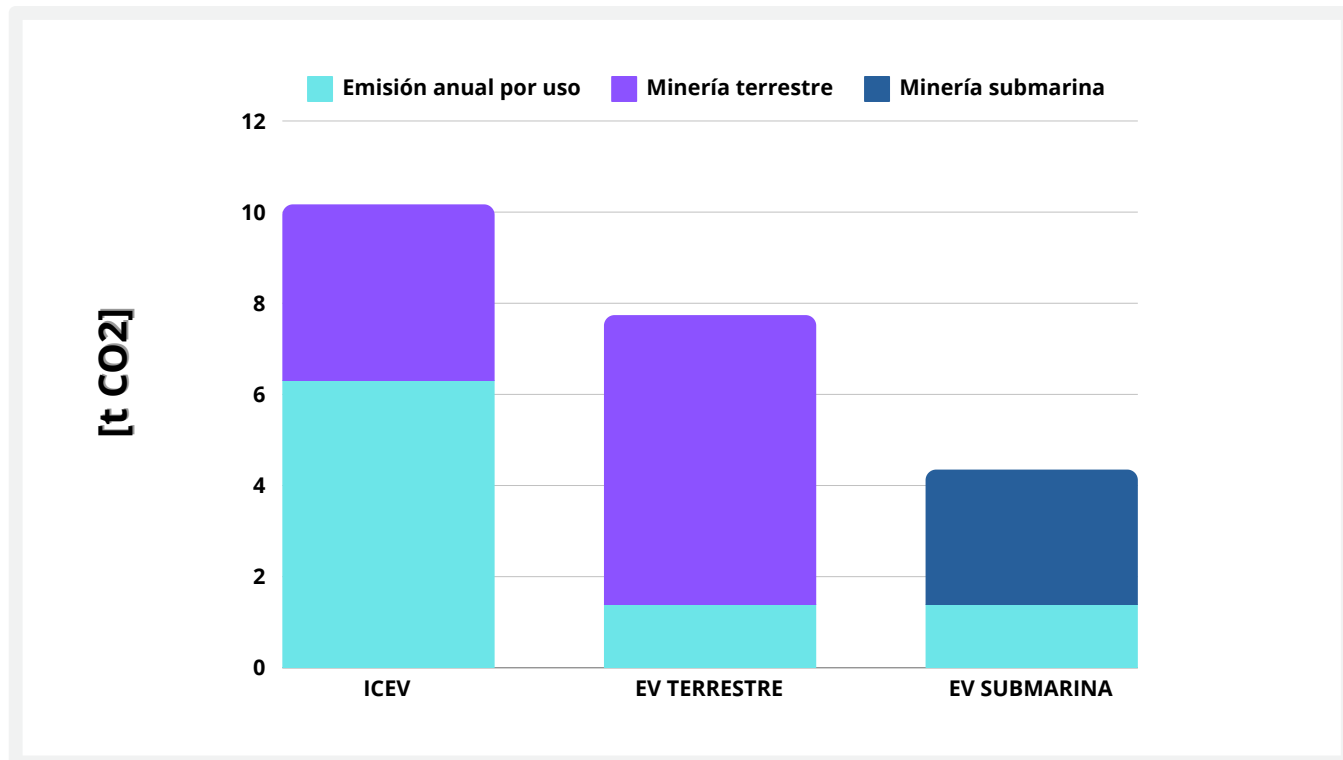
GEM ha identificado cinco riesgos potenciales indirectos relacionados a la minería submarina y el medioambiente: liberación de reservas de carbono (ver **Figura 8**), reducción de actividad microbiana (ver **Figura 10**), difusión de metales traza (ver **Figura 11**), alteración en el ciclo del nitrógeno (ver **Figura 12**) y la pérdida de biodiversidad.

Con respecto al riesgo de liberación de reservas de carbono, se compararon las emisiones anuales de dióxido de carbono a la atmósfera de un vehículo convencional (ICEV), considerado su producción con minería terrestre y uso anual, con las de un vehículo eléctrico (EV) fabricado a partir de minería terrestre y de minería submarina (considerando la liberación de las reservas de carbono del fondo oceánico).

En la **Figura 9**, se puede observar que la producción de un **vehículo eléctrico promedio mediante minería submarina podría reducir en un 59% las emisiones comparado con un vehículo convencional promedio y en un 44% las de un vehículo eléctrico promedio producido por la minería terrestre** (EPA, 2019; Davis & Boundy, 2021; U.S. Department of Energy, 2024b).

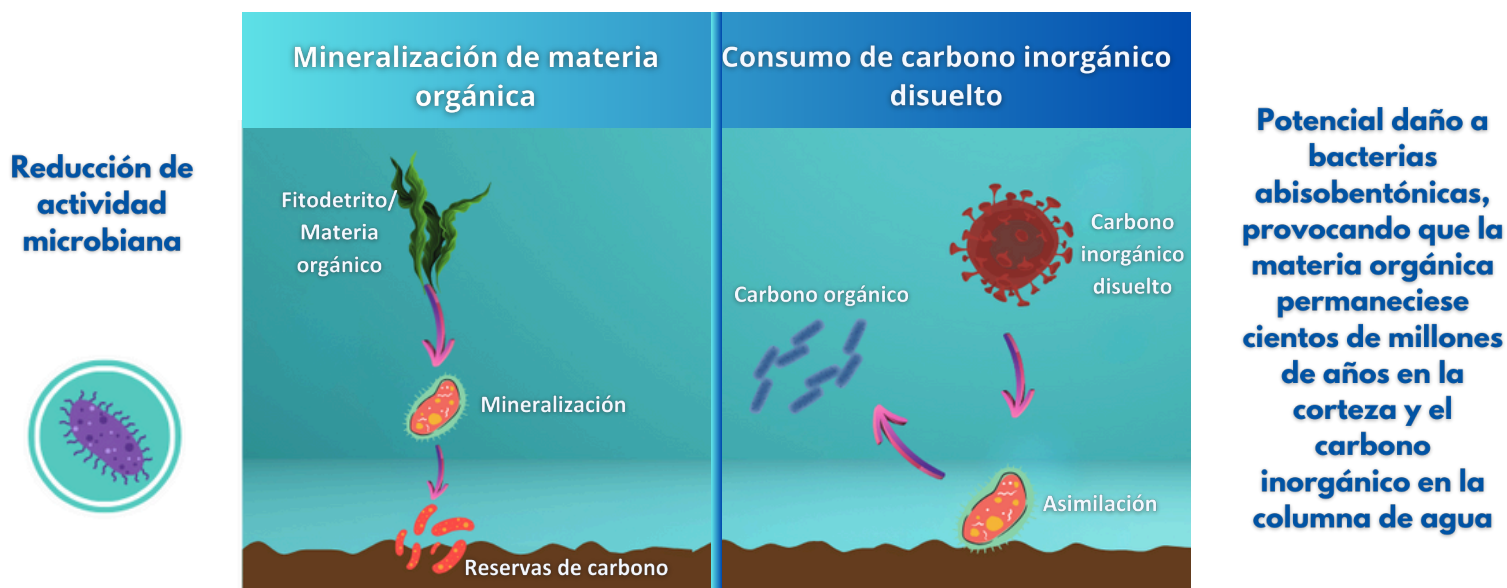


FIGURA 9. COMPARACIÓN DE EMISIONES DE CARBONO POR FUENTE Y TECNOLOGÍA



Fuente: Elaboración propia en base a Paulikas et al. (2020), Guzmán et al. (2022) y U.S. Department of Energy (2024a)

FIGURA 10. RIESGO DE REDUCCIÓN DE ACTIVIDAD MICROBIANA



Fuente: Elaboración propia en base a Paulikas et al. (2020), Guzmán et al. (2022) y U.S. Department of Energy (2024a)

FIGURA 11. RIESGO DE DIFUSIÓN DE METALES TRAZA DESDE CAPA SUBÓXICA

Difusión de metales traza desde capa subóxica

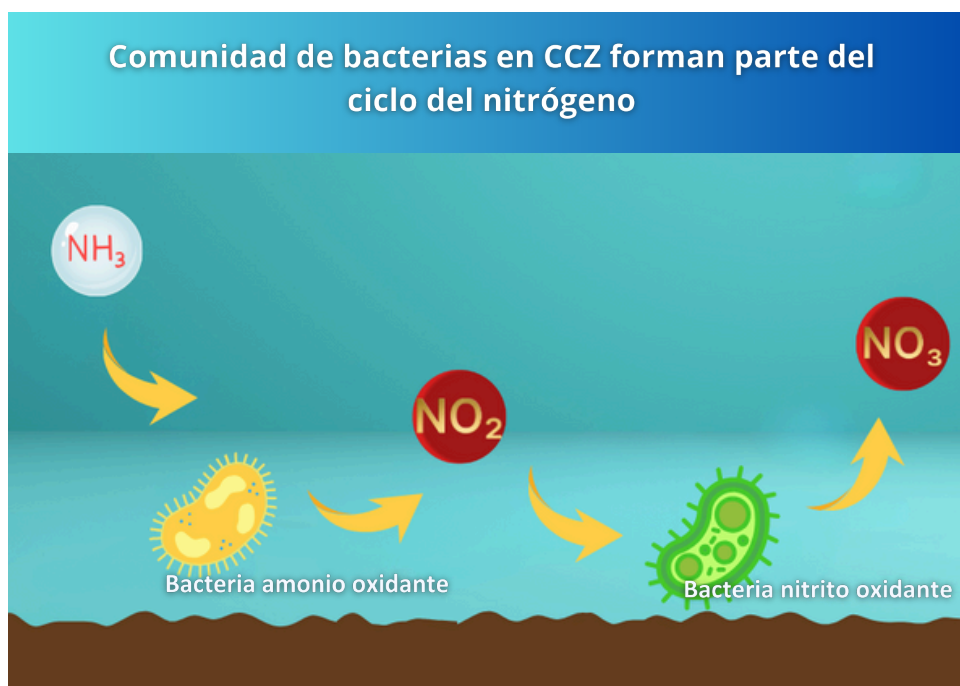


La ascensión de metales traza podría generar reacciones que alterarían la biodisponibilidad de metales ya presentes en el fondo marino, junto a su especiación a niveles tóxicos para el ecosistema

Fuente: Elaboración propia en base a Thiel & Tiefsee-Umweltschutz (2001), Paul et al. (2018), Braeckman et al. (2013), Jorgensen & Katsen (2006), Koschinsky et al. (2003) y Luise (2018)

FIGURA 12. RIESGO DE ALTERACIÓN EN EL CICLO DEL NITRÓGENO

Alteración en el ciclo del nitrógeno



La perturbación de la comunidad microbiana podría conllevar a una acumulación de nitrógeno y eutrofización en el océano, aumentando la concentración de amonio que podría ser tóxico para el ambiente marino

Fuente: Elaboración propia en base a Molari et al. (2020), Hollingsworth et al. (2021) y Franklin & Edward (2018)

En cuanto a la pérdida de la biodiversidad, se han identificado especies en potencial⁵ riesgo, tales como *Xenophyophorea* (organismos unicelulares), *Holothuroidea* (pepino de mar), *Hydrozoa* (medusas), *Ophiuroidea* (estrellas de mar), *Polychaeta* y *Nematoda* (gusanos), *Porifera* y *Anthozoa* (anémonas y esponjas) y *Echinoidea* (erizos de mar) (Ebbe et al., 2010; Vanreusel, A., et al., 2016; Thiel, H., & Tiefsee-Umweltschutz, F.; Stratmann, T., 2023).

Estos forman parte de redes alimenticias, proveen hábitats para otros organismos, reducen la carga orgánica, y potencian la actividad y recuperación de arrecifes de coral (Koporc, 2015; Simoes T., et al., 2019; Hang et al., 2020; Morris & Fautin, 2024; Gornik et al., 2021; Bionity, 2024; Hay, 2024; Myers, P., 2024; Hammond, 2024;). Además, se han identificado bacterias, tales como *Alphaproteobacterias*, *Gammaproteobacterias*, *Thaumarcheotas* y *Alteromonadales*, que forman parte de la oxidación de amonio, del ciclo del manganeso y otros metales (Lindh et al., 2017; Molari et al., 2020; Hollingsworth et al., 2021; Wear et al., 2021).

Es importante señalar que los posibles efectos de la minería submarina han sido informados en términos de sus impactos en la superficie, comparándolos con otras actividades industriales en curso. Estos informes y comparaciones se presentan de manera resumida en la **Tabla 2**, de los cuales los más relevantes son la pérdida de biodiversidad y alteración en el ciclo del nitrógeno, causando eutrofización.

La eutrofización es cuando los nutrientes en exceso, como el nitrógeno y el fósforo, provocan que las plantas acuáticas crezcan más rápido de lo habitual, contaminando y dañando la vida acuática. Específicamente, se consideran las actividades de plantas desalinizadoras (McCaig, A., et al., 1999; Comroy et al., 2005; Naylor, 2005; Holmer, 2010; Zhou, J., Chang, V.W.-C., & Fane, A.G. (2013); Missimer, T., & Maliva, R. (2018); transporte marino (Jagerbrand et al., 2019;); Cornejo et al., 2014), (Goldburg & Kucuksezgin et al., 2021). Emisarios submarinos (Tuholské, C., et al., 2021; Filippos et al., 2023).

TABLA 2. COMPARACIÓN DE IMPACTOS DE LA MINERÍA SUBMARINA CON OTRAS ACTIVIDADES INDUSTRIALES ACTUALES

	 MINERÍA SUBMARINA	 PLANTAS DESALADORAS	 EMISARIOS SUBMARINOS	 PISCICULTURA	 TRANSPORTE MARINO
 CICLO DEL NITRÓGENO	Alteración por remoción de bacterias nitrificadoras	Sin impacto directo según bibliografía	Exceso de nitrógeno, proliferación de algas y eutrofización	Exceso de nitrógeno, potenciando eutrofización	Aumento en nitrógeno biodisponible
 EMISIONES DE CARBONO	Por remoción de sedimentos y agua ascendente	Fuentes de energías no renovables	Sin impacto directo según bibliografía	Sin impacto directo según bibliografía	Sin impacto directo según bibliografía
 PÉRDIDA DE ESPECIES	Pérdida de bacterias y especies	Muerte de organismos marinos	Muerte de especies aledañas	Daño a comunidad bentónica	Muerte de poblaciones
 SUSTANCIAS TÓXICAS	Especiación metales traza por	Altas concentraciones de metales	Coliformes fecales	Fósforo inorgánico	Vidrio, plástico y aguas negras

Fuente: Elaboración propia

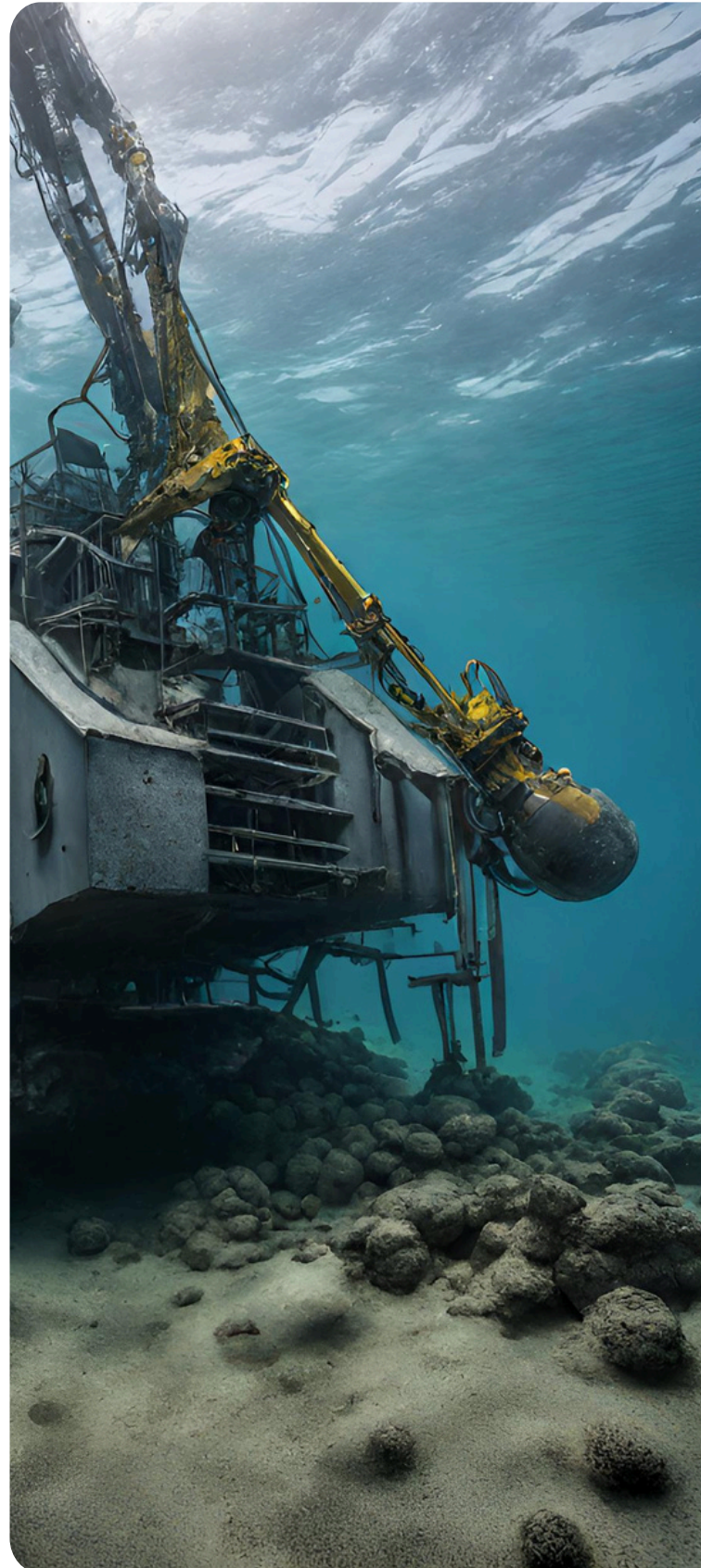
5. Clases de organismos que incluyen varios géneros y especies.

CONCLUSIÓN

En este estudio se concluye que la minería submarina es una actividad económicamente viable en algunos *commodities*, debido a la diferencia entre los precios de incentivo y los precios a largo plazo de los recursos presentes en los **Nódulos Polimetálicos del lecho marino**. Es importante destacar que la minería submarina no es algo nuevo, ya que se ha desarrollado previamente en diferentes partes del mundo, como por ejemplo en la extracción de diamantes en Namibia y de zinc en Japón. Sin embargo, se debe tener en cuenta los potenciales riesgos ambientales asociados a la minería submarina. Aunque el impacto directo puede no ser significativo, existe la posibilidad de un impacto relevante en el ecosistema marino de manera indirecta. **Esto podría manifestarse a través de la liberación de reservas de carbono, la disminución de la actividad microbiana, la dispersión de metales traza, la alteración del ciclo del nitrógeno y la pérdida de biodiversidad.**

Es fundamental realizar una investigación exhaustiva y continua sobre estos riesgos, para cuantificarlos adecuadamente y aplicar medidas efectivas de gestión y mitigación de impactos. A pesar de la falta de conocimiento y los potenciales riesgos que se han identificado, se han realizado algunas estimaciones del impacto ambiental que podría provocar la minería submarina, como las emisiones de carbono y las dimensiones de la pluma de sedimentos generada por estas operaciones. Al comparar estos hallazgos con la minería terrestre, se evidencia la posibilidad de una disminución de hasta un 59% en las emisiones, así como una reducción de la nube de polvo en 2.000 veces. Es importante destacar que esta nube se encontraría en abismos submarinos, a varios kilómetros bajo el nivel del mar, lo que ayudaría a mitigar los problemas causados por el material particulado en la atmósfera y directamente en la calidad de vida humana.

Así, se puede destacar que existen considerables beneficios de la minería submarina, ya que **aportaría minerales críticos para la transición energética y sus impactos directos podrían ser menores a los de la minería terrestre**. No obstante, los impactos medioambientales indirectos deben seguir siendo estudiados, tanto su magnitud como su mitigación, y se deben establecer bases para el desarrollo de la minería submarina orientada a la minería del futuro. Esto, con la intención de desarrollar prácticas más sostenibles y responsables que minimicen los impactos ambientales y sociales, al tiempo que maximizan la eficiencia y rentabilidad.



BIBLIOGRAFÍA

Abramowski, T., Urbanek, M., & Baláz, P. (2021). Structural Economic Assessment of Polymetallic Nodules Mining Project with Updates to Present Market Conditions. *Minerals*, 11, 311. <https://doi.org/10.3390/min11030311>.

Alberts, E.C. (12 de julio, 2023). Calls grow to put the brakes on deep-sea mining as countries discuss rules. *Mongabay*. Recuperado de <https://news.mongabay.com/2023/07/calls-grow-to-put-the-brakes-on-deep-sea-mining-as-countries-discuss-rules/>.

Amadi, E., & Mosnier, F. (Diciembre, 2023). The climate myth of deep sea mining. *Planet Tracker*. Recuperado de <https://planet-tracker.org/wp-content/uploads/2023/12/The-Climite-Myth-of-Deep-Sea-Mining.pdf>.

Arregui Cruz, D.A. (Octubre, 2012). Análisis del comportamiento de la pluma de descarga del emisario submarino de Quintero, mediante la aplicación de modelos numéricos. Universidad de Valparaíso. Recuperado de <https://repositoriobibliotecas.uv.cl/serveruv/api/core/bitstreams/0bc90fdb-3ac3-44b0-a342-7348d5699c9c/content>.

Biblioteca del Congreso Nacional. (12 de mayo, 2022). Decreto 5: Establece Plan de Descontaminación Atmosférica para la ciudad de Calama y su área circundante. Ley Chile. Recuperado de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1175902>.

Bionity. (2024). Xenophyophore. Recuperado de www.bionity.com/en/encyclopedia/Xenophyophore.html#:~:text=Xenophyophores%20may%20be%20an%20important,other%20organisms%20such%20as%20isopods.

Braeckman, U., Vanaverbeke, J., Vincx, M., van Oevelen, D., & Soetaert, K. (2013). Meiofauna Metabolism in Suboxic Sediments: Currently Overestimated. *PLoS ONE* 8, 3. 10.1371/journal.pone.0059289.

Cámara de diputados de Chile. (2023). Proyecto de ley para prohibir el otorgamiento de concesiones mineras en terrenos próximos a asentamientos humanos, establecimientos educacionales y centros de salud (Boletín N° 16011-08). Santiago: Cámara de diputados de Chile.

Carver, R., Childs, J., Steinberg, P., Mabon, L., Matsuda, H., Squire, R., McLellan, B., & Esteban, M. (2020). A critical social perspective on deep sea mining: Lessons from the emergent industry in Japan. *Ocean and Coastal Management*, 193. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105242>.

Cole, C.F., & Zapert, J.G. (1995). Air quality dispersion model validation at three stone quarries. National Stone Association, Washington, DC, 14884.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (21 de octubre, 2022). Ambiente pelágico. Biodiversidad mexicana. Recuperado de <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/ecosismex/ambiente-pelagico>.

Comroy, J., Polytika, C., Nadel, R., & Bulkley, J. (2005). The Environmental Impact of Cruise Ships. *Impacts of Global Climate Change*, p.1-12. 10.1061/40792(173)308.

Cornejo, P., Santana, M., Hokanson, D., Mihelcic, J., & Zhang, Q. (2014). Carbon footprint of water reuse and desalination: A review of greenhouse gas emissions and estimation tools. *Journal of Water Reuse and Desalination* 4, 238. 10.2166/wrd.2014.058.

Davis, S.C., & Boundy, R.G. (Febrero, 2021). Transportation Energy Data Book Edition 39. Oak Ridge National Laboratory. Recuperado de https://tedb.ornl.gov/wp-content/uploads/2021/02/TEDB_Ed_39.pdf#page=99.

Deep Sea Conservation Coalition. (2024). Voices calling for a moratorium. Recuperado de <https://deep-sea-conservation.org/solutions/no-deep-sea-mining/momentum-for-a-moratorium/governments-and-parliamentarians/>.

Deep Sea Conservation Coalition. (2024). Voices calling for a moratorium. Recuperado de <https://deep-sea-conservation.org/solutions/no-deep-sea-mining/momentum-for-a-moratorium/governments-and-parliamentarians/>.

Ebbe, B., Billet, D., Brandt, A., Ellingsen, K., Glover, A., Keller, S., Malyutina, M., Martínez, P., Molodstova, T., Rex, M., Smith, C., & Tselepidis, A. (2010). Diversity of Abyssal Marine Life. *Academia.edu*. Recuperado de https://www.academia.edu/25161854/Diversity_of_Abyssal_Marine_Life.

Ellefmo, S.L., Søreide, F., Cherkashov, G., Juliani, C., Panthi, K.K., Petukhov, S., Poroshina, I., Sinding-Larsen, R. & Snook, B. (2019). Quantifying the unknown: marine mineral resource potential on the Norwegian extended Continental shelf. *Nordic Open Access Scholarly Publishing*. <https://doi.org/10.23865/noasp.81>.

García, M., Correa, J., Maksae, V. & Townley, B. (2020). Potential mineral resources of the Chilean offshore: an overview. *Andean Geology* 47 (1), p.1-13. <http://dx.doi.org/10.5027/andgeov47n1-3260>.

Glasby, G.P. (2000). Lessons learned from deep-sea mining. *Science* 289(5479), p.551-553. 10.1126/science.289.5479.551.

Goldburg, R., & Naylor, R. (2005). Future seascapes, fishing, and fish farming. *Frontiers in Ecology and the Environment* 3, 1, p.21-28. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2005\)003\[0021:FSFAFF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2005)003[0021:FSFAFF]2.0.CO;2).

Gornik, S., Bergheim, B., Morel, B., Stamakis, A., Foulkes, N., & Guse, A. (2021). Photoreceptor Diversification Accompanies the Evolution of Anthozoa. *Molecular Biology and Evolution* 38, p.1744-1760. <https://doi.org/10.1093/molbev/msaa304>.

Guzmán, J.L., Faúndez, P., Jara, J.J., & Retamal, C. (2022). On the source of metals and the environmental sustainability of battery electric vehicles versus internal combustion engine vehicles: The lithium production case study. *Journal of Cleaner Production* 376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133588>.

Hammond, G. (13 de marzo, 2024). Hydrozoa. *Animal Diversity Web*. Recuperado de <https://animaldiversity.org/accounts/Hydrozoa/>.

Hay, F. (2024). Nematodes – the Good, the bad and the ugly. *The American Phytopathological Society*. Recuperado de www.apsnet.org/edcenter/resources/archive/NewsViews/Pages/Nematodes.aspx#:~:text=Many%20species%20of%20nematodes%20are,help%20to%20control%20insect%20pests.

Hang, V., Cheung, P., Fong, C., Mulla, A., Shiu, J., Lin, C., & Nozawa, Y. (2020). Sea urchins play an increasingly important role for coral resilience across reefs in Taiwan. *Frontiers in Marine Science* 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.581945>.

Hein, J.R. (2016). Manganese Nodules. In: Harff, J., Meschede, M., Petersen, S., & Thiede, J. (eds) *Encyclopedia of Marine Geosciences*. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht, p.408-412.

Hollingsworth, A., Jones, D., & Young, R. (2021). Spatial Variability of Abyssal Nitrifying Microbes in the North-Easterb Clarion-Clipperton Zone. *Frontiers in Marine Science* 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.663420>.

Holmer, M. (2010). Environmental issues of fish farming in offshore waters: perspectives, concerns and research needs. *Aquaculture environmental interactions* 1, p.57-70. 10.3354/aei00007.

International Energy Agency. (2023). Critical minerals market review. Recuperado de <https://iea.blob.core.windows.net/assets/afc35261-41b2-47d4-86d6-d5d77fc259be/CriticalMineralsMarketReview2023.pdf>.

Jagerbrand, A.K., Brutemark, A., Svedén, J., & Gren, I. (2019). A review on the environmental impacts of shipping on aquatic and nearshore ecosystems. *Science of the Total Environment*, 695. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133637>.

JOGMEC. (8 de noviembre, 2023). JOGMEC successfully identifies Mineral Resource Potential at 50-million-ton level through resource assessment of seafloor hydrothermal deposits – Steady progress towards development of seafloor hydrothermal deposits in EEZ zone -. Recuperado de https://www.jogmec.go.jp/english/news/release/news_10_00051.html.

Jorgensen, B. & Katsen, S. (2006). Sulfur Cycling and Methane Oxidation. *Marine Geochemistry*. 10.1007/3-540-32144-6_8.

Khan, Y. (12 de marzo, 2024). U.S. Lawmakers push for deep-sea mining funding in New Bill. *Dow Jones & Company*. Recuperado de <https://www.wsj.com/articles/u-s-lawmakers-to-push-for-deep-sea-mining-funding-in-new-bill-cc020f7d>.

Koporc, C. (16 de abril, 2015). Porifera Part Two. *Organismal Diversity*. Recuperado de <https://u.osu.edu/eob3320/category/sponges/>.

BIBLIOGRAFÍA

Koschinsky, A., Halbach, P., & Borowski, C. (2003). Reactions of the Heavy Metal Cycle to Industrial Activities in the Deep Sea: An Ecological Assessment. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* 88 (1), p.102-127. 10.1002/iroh.200390000.

Kucuksezgin, F., Pazi, I., Tolga Gonul, L., Kocak, F., Eronat, C., Sayin, E., & Talas, E. (2021). The impact of fish farming on the water column and marine sediments in three coastal regions from Eastern Aegean coast. *Environmental Science and Pollution Research* 28 (23), p.29564-29580. 10.1007/s11356-021-12695-2.

Kuhn, T. & Rühlemann, C. (2021). Exploration of polymetallic nodules and resource assessment: A case study from the German contract area in the Clarion-Clipperton Zone of the tropical Northeast Pacific. *Minerals* 11 (6), p.618. <https://doi.org/10.3390/min11060618>.

Lindh, M., Maillot, B., Shulze, C., Gooday, A., Amon, D., Smith, C., & Church, M. (2017). From the Surface to the deep-sea: Bacterial Distributions across Polymetallic Nodule Fields in the Clarion-Clipperton Zone of the Pacific Ocean. *Frontiers in Microbiology* 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01696>.

Lipton, I., Gleeson, E. & Munro, P. (2018). Preliminary economic assessment of the Solwara project. *Nautilus Minerals Niugini Ltd.* https://www.miningnewsfeed.com/reports/Solwara_1_PEA_02272018.pdf.

Luisse, S. (2018). Biogeochemistry of Pacific deep-sea sediments and potential impacts of deep-sea polymetallic nodule mining. *Jacobs University.* Recuperado de <https://d-nb.info/1190888157/34>.

Macías, C.A. (Mayo, 2020). Propuesta de diseño de emisario submarino para la Ciudad de Manta, Ecuador. *Universitat Politècnica de Valencia.* Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/146797/Mac%C3%ADas%20-%20PROPUESTA%20DE%20DISE%C3%91O%20DE%20EMISARIO%20SUBMARINO%20PARA%20LA%20CIUDAD%20DE%20MANTA%2C%20ECUADOR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

McCaig, A., Philips, C., Stephen, J., Kowalchuk, G., Harvey, S., Herbert, R., Embley, T., & Prosser, J. (1999). Nitrogen cycling and community structure of proteobacterial B-Subgroup ammonia-oxidizing bacteria within polluted marine fish farm sediments. *Applied and Environmental Microbiology* 65, 1, p.213-220. 10.1128/aem.65.1.213-220.1999.

McVeigh, K., & Michael, C. (11 de julio, 2023). More Nations Are Growing Wary of Deep Sea Mining. *Mother Jones.* Recuperado de <https://www.motherjones.com/politics/2023/07/deep-sea-mining-opposition-moratorium-ireland-sweden-un-minerals/>.

Megías, C. (22 de octubre, 2021). Guía Emisarios Submarinos. *Ecologistas en acción.* Recuperado de <https://www.ecologistasenaccion.org/182194/>.

Miller, K.A., Thompson, K.F., Johnston, P. & Santillo, D. (2018). An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps. *Frontiers in Marine Science*, 4, p.312755. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00418>.

Ministry of Earth Science (21 de Agosto, 2017). India's Exclusive Rights to Explore Polymetallic Nodules from Central Indian Ocean Seabed Basin Extended by Five Years. *Recuperado de https://pib.gov.in/newsite/PrintRelease.aspx?relid=170138.*

Missimer, T., & Maliva, R. (2018). Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. *Desalination* 434, p.198-215. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.012>.

Molari, M., Janssen, F., Vonnahme, T., Wenzhofer, F., & Boetius, A. (2020). Microbial communities associated with sediments and polymetallic nodules of the Peru Basin. *Biogeosciences* 17, p.3203-3222. <https://doi.org/10.5194/bg-2020-11>.

Montojo, J.M. (Marzo, 2016). Estudio de dilución y programa de vigilancia ambiental del vertido del efluente de la EDAR de Alcúdia en la Bahía de Alcúdia mediante emisario submarino. *Ajuntament D'Alcúdia.* Recuperado de <https://www.caib.es/sites/comissiodiambient/f/301238>.

Morris, M., & Fautin, D. (2024). *Ophiuroidea.* University of Michigan. Recuperado de <https://animaldiversity.org/accounts/Ophiuroidea/#:~:text=Ophiuroids%20lack%20eyes%20but%20the,of%20many%20crustaceans%20and%20fishes>.

Muchiut, J. (2016). Diseño de emisario submarino en el sistema Mar Chiquita (Mar de Ansenúza), Córdoba, Argentina. *Universidad Nacional de Córdoba.* Recuperado de <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/4628/PS%20-%20JM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Muñoz, E. (Abril, 2021). Análisis comparativo del potencial de extracción de reservas submarinas en Chile. *Universidad de Concepción.* Recuperado de <http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/6487/1/TESIS%20ANALISIS%20COMPARATIVO%20DEL%20POTENCIAL.Image.Marked.pdf>.

Myers, P. (2024). *Polychaeta.* University of Michigan. Recuperado de <https://animaldiversity.org/accounts/Polychaeta/#:~:text=Polychaetes%20are%20extremely%20abundant%20in,for%20fish%20and%20large%20invertebrates>.

Peacock, T. & Ouillon, R. (2023). The fluid mechanics of deep-sea mining. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 55, p.403-430. 10.1146/annurev-fluid-031822-010257.

Paul, S., Gaye, B., Haeckel, M., Katsen, S., & Koschinsky, A. (2018). Biogeochemical Regeneration of a Nodule Mining Disturbance Site: Trace Metals, DOC and Amino Acids in Deep-Sea Sediments and Pore Waters. *Frontiers in Marine Science* 5, 117. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00117>.

Paulikas, D., Katona, S., Ilves, E., & Ali, S. (2020). Life cycle climate change impacts of producing battery metals from land ores versus deep-sea polymetallic nodules. *Journal of Cleaner Production* 275. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123822>.

Reuters. (17 de abril, 2023). The main players in the push towards deep-sea mining. *Recuperado de https://www.reuters.com/business/environment/main-players-push-towards-deep-sea-mining-2023-04-14/*

Roberts, D.A., Johnston, E.L. & Knott, N.A. (2010). Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: A critical review of published studies. *Water research*, 44 (18), p.5117-5128. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.04.036>.

Toro, N., Jeldres, R.I., Órdenes, J.A., Robles, P. & Navarra, A. (2020). Manganese nodules in Chile, an alternative for the production of Co and Mn in the future—A review. *Minerals* 10 (8), p.674. <https://doi.org/10.3390/min10080674>.

Scott, K. (4 de septiembre, 2018). Diamonds in the deep: how gems are mined from the bottom of the ocean. *CNN.* Recuperado de <https://edition.cnn.com/2018/09/03/africa/marine-diamond-mining-namibia/index.html>.

Seas at Risk. (2 de agosto, 2023). Deep-sea mining moratorium takes centre stage at International Seabed Authority meetings. *Recuperado de https://seas-at-risk.org/general-news/deep-sea-mining-moratorium-takes-centre-stage-at-international-seabed-authority-meetings/*

Simoës, T., Azevedo, F., Sousa, J., Brito, A., Pombo, A., Venancio, E., & Félix, P. (2019). Ecological traits of sea cucumbers with commercial relevance from the North-Eastern Atlantic coast. *Frontiers in Marine Science.* 10.3389/conf.FMARS.2018.06.00147.

Stratmann, T. (2023). Role of polymetallic-nodule dependent fauna on carbon cycling in the Eastern Clarion-Clipperton Fracture Zone (Pacific). *Frontiers in Marine Science* 10. 10.3389/fmars.2023.1151442.

Stratmann, T., Lins, L., Purser, A., Marcon, Y., Rodrigues, C., Ravara, A., Cunha, M., & Simon-Lledó, E., Jones, D., Sweetmann, A., Koser, K., & van Oevelen, D. (2018). Abyssal plain faunal carbon flows remain depressed 26 years after a simulated deep-sea mining disturbance. *Biogeosciences* 15, p.4131-4145. <https://doi.org/10.5194/bg-15-4131-2018>.

BIBLIOGRAFÍA

Sweetman, A., Smith, C., Shulse, C., Maillot, B., Lindh, M., Church, M., Meyer, K., van Oevelen, D., Stratmann, T., & Gooday, A. (2019). Key role of bacteria in the short-term cycling of carbon at the abyssal seafloor in a low particulate organic carbon flux region of the Eastern Pacific Ocean. *Limnology and oceanography* 64, p.694-713. 10.1002/lno.11069.

Symons, A. (2 de agosto, 2023). Deep sea mining: Here's which countries oppose and support the controversial practice. *Euronews.green*. Recuperado de <https://www.euronews.com/green/2023/08/02/deep-sea-mining-heres-which-countries-oppose-and-support-the-controversial-practice>.

Thiel, H., & Tiefsee-Umweltschutz, F. (2001). Evaluation of the environmental consequences of polymetallic nodule mining based on the results of the TUSCH Research Association. *Deep-Sea Research II* 48, p.3433-3452.

Tuholské, C., Halpern, B., Blasco, G., Villasenor, J.C., Frazier, M., & Caylor, K. (2021). Mapping global inputs and impacts from of human sewage in coastal ecosystems. *PLoS ONE* 16 (11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258898>.

United States Environmental Protection Agency. (Marzo, 2020). The 2019 EPA Automotive Trends Report. Recuperado de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100YVFS.pdf>.

U.S. Department of Energy. (2024a). Emissions from Electric Vehicles. Recuperado de https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_emissions.html.

U.S. Department of Energy. (2024b). Data sources and assumptions for the electricity sources and fuel-cycle emissions tool. Recuperado de https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_emissions_sources.html.

Vanreusel, A., Hilario, A., Ribeiro, P., Menot, L. & Martínez, P. (2016). Threatened by mining, polymetallic nodules are required to preserve abyssal epifauna. *Scientific Reports* 6. 10.1038/srep26808.

Volkman, S.E., Lehnen, F. & Kukla, P.A. (2019). Estimating the economics of a mining project on seafloor manganese nodules. *Mineral Economics* 32 (3), p.287-306. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00169-4>.

Vonnahme, T., Molari, M., Janssen, F., Wenzhofer, F., Haeckel, M., Titschack, J., & Boetius, A. (2020). Effects of a deep-sea mining experiment on seafloor microbial communities and functions after 26 years. *Science Advances* 6, 18. 10.1126/sciadv.aaz5922.

Wang, P.J., Li, L., Wei, Q.N. & Wu, J.B. (2023). Study on Collection Performance of Hydraulic Polymetallic Nodule Collector Based on Solid-Liquid Two-Phase Flow Numerical Simulation. *Applied Sciences*, 13(23), p.12729. <https://doi.org/10.3390/app132312729>.

Watson Farley & Williams. (15 de agosto, 2023). Deep seabed mining insights: potential pitfalls with a "precautionary pause" to deep seabed mining. Recuperado de <https://www.wfw.com/articles/deep-seabed-mining-insights-potential-pitfalls-with-a-precautionary-pause-to-deep-seabed-mining/#:~:text=third%2C%20a%20conditional%20moratorium%20or,to%20the%20marine%20environment%E2%80%9D.%C2%B3>.

Wear, E.K., Church, M., Orcutt, B., Shulse, C., Lindh, M., & Smith, C. (2021). Bacterial and Archaeal Communities in Polymetallic Nodules, Sediments, and Bottom Waters of the Abyssal Clarion-Clipperton Zone: Emerging Patterns and Future Monitoring Considerations. *Frontiers in Marine Science* 8. 10.3389/fmars.2021.634803.

Wu, Q., Yang, J., Lu, H., Lu, W. & Liu, L. (2020). Effects of heave motion on the dynamic performance of vertical transport system for deep sea mining. *Applied Ocean Research*, 101, p.102188. 10.1016/j.apor.2020.102188.

Zhang, F., Chen, X., Wei, J., Zhang, Y., Xu, W. & Li, H. (2024). Experimental investigation of the inhibition of deep-sea mining sediment plumes by polyaluminum chloride. *International Journal of Mining Science and Technology*, 34 (1), p.91-104. 10.1016/j.ijmst.2023.12.002.

Zhou, J., Chang, V.W.-C., & Fane, A.G. (2013). An improved life cycle impact assessment (LCIA) approach for assessing aquatic eco-toxic impact of brine disposal from seawater desalination plants. *Desalination* 308, p.233-241. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.039>

Para más información
sobre GEM



Escanea aquí

AUTORES



PAULINA CÁ CERES

Ingeniera Analista
pcaceres@gem-mc.com



DIEGO ORPINAS

Ingeniero Analista
dorpinas@gem-mc.com



MARÍA JESÚS OVALLE

Ingeniera Analista
mjovalle@gem-mc.com

EDICIÓN

MERY-ANN GIESE

Jefa de Administración y
Marketing
magiese@gem-mc.com

JAVIERA ALEMPARTE

Encargada de Prensa
jalemparte@gem-mc.com

CONTACTO



JUAN IGNACIO GUZMÁN

Chief Executive Officer

jjguzman@gem-mc.com



Chile: Las Condes 12.461,
torre 3, oficinas 805-806,
Las Condes, Santiago

Singapur: 1 Raffles Place #40-02 One
Raffles Place Singapore (048616)

<https://www.gem-mining-consulting.com>



Cualquier distribución, copia, duplicación, reproducción o venta no autorizada (total o parcial) del contenido de este documento, ya sea para uso personal o comercial, constituirá una infracción de derechos de autor. Cualquier forma de reproducción total o parcial de su contenido está estrictamente prohibida a menos que se solicite autorización expresa.