

Capítulo 3.5
Depósitos de minerales marinos
en el Atlántico Sudoccidental

Imagen de video de nódulos polimetálicos tomada por un ROV (vehículo submarino operado en forma remota), en la zona económica exclusiva de las Islas Cook. Fuente: CIC Ltd.

Capítulo 3.5

Depósitos de minerales marinos en el Atlántico Sudoccidental

Daniel R. McConnell¹

¹ Geomarine Resources PLLC

Fundamento

Los países están incorporando los océanos a sus planes de desarrollo sustentable. A escala mundial, se estima que la “economía azul” tiene un valor agregado bruto de 1.500.000 millones de dólares y que se duplicará para 2030 (OCDE, 2016). Se espera crecimiento en sectores ya existentes, como la pesca, el transporte marítimo, los puertos, el petróleo y el gas costa afuera, la investigación marina, el turismo marítimo y costero, y en nuevos sectores, como la acuicultura, la energía eólica marina, la biotecnología marina y el objeto de este capítulo: los minerales marinos.

La comprensión de los minerales marinos es un nexo para las ciencias oceánicas en desarrollo, para comprender los biosistemas profundos y los sistemas oceánicos actuales y antiguos y el vínculo con el cambio climático. Hace sesenta años que se reconoce el potencial mineral del mar, en especial de los fondos marinos, pero esto se aceleró en el siglo XXI, debido a la combinación de tecnologías en aguas profundas, el reconocimiento del cambio climático y la necesidad de transiciones energéticas.

Minerales críticos para la economía verde

Los minerales definidos como de alta tecnología tuvieron una rápida expansión en los últimos cuarenta años. En la década de los ochenta, se utilizaban 12 minerales o sus elementos de la tabla periódica para la fabricación de chips de computadora. En los noventa, el número ascendió a 16 minerales o elementos. En la actualidad, se utilizan más de 60 minerales o elementos en circuitos integrados de alta capacidad y otras aplicaciones de alta tecnología, y prácticamente todos los elementos de la tabla periódica tienen usos industriales (Schulz *et al.*, 2017).

En general, los pronósticos de demanda de minerales se correlacionan con el crecimiento poblacional y la necesidad derivada de un mayor estándar de vida. Hace veinte años, el suministro mundial de reservas de minerales terrestres se consideraba adecuado para cincuenta a cien años, con la salvedad de que el suministro de algunos minerales en específico podría no satisfacer la demanda.

Esta postura de que las reservas existentes podrían satisfacer la demanda fue revisada

en profundidad, con el consenso de varios analistas en que el ágil despliegue de tecnologías de energía verde aumentará con rapidez la demanda de minerales a niveles que exceden el suministro de algunos minerales (IEA, 2022a).

Las energías denominadas “limpias”, como la solar, la hidráulica, la bioenergía, la geotermal, la nuclear, las redes eléctricas, las baterías de vehículos, los acumuladores eléctricos y el hidrógeno requieren importantes suministros de más de un mineral, como cobre, cobalto, níquel, litio, tierras raras, cromo, zinc, grupo del platino y aluminio. Se estima que en 2040 la demanda de minerales utilizados en las tecnologías de energías limpias triplicará la demanda de 2020 (IEA, 2022a).

Uruguay tiene una historia minera desde el descubrimiento y la explotación de cobre, plomo, zinc y oro en la región de Minas en el siglo XIX, con mayor desarrollo y explotación en el siglo XX (Bossi y Navarro, 2000; Baumann, 2017; Cernuschi *et al.*, 2018). Sin embargo, hay poco escrito sobre el potencial de los minerales marinos en la ZEE uruguaya y áreas cercanas.

Breve reseña histórica de los minerales marinos

La búsqueda de placeres en cursos de agua para identificar vetas ricas en oro es un método de exploración con siglos de antigüedad. Los prospectores de oro en Alaska también encontraron oro en planicies de cordones litorales formados cuando el nivel del mar era superior y paralelo a las playas modernas (McKelvey, 1986). El concepto de

transporte fluvial y separación por gravedad y concentración de minerales pesados en arenas de playas se reportó por primera vez en 1897 (Dick, 1887). La minería de minerales pesados como la monacita, la ilmenita y el rutilo empezó en el siglo XX, a partir de la necesidad de fuentes de torio, tierras raras, zircón y titanio.

La necesidad del fosfato como mineral fue identificada cuando las ciencias de la agricultura empezaron a comprender la química básica de los fertilizantes: nitrógeno, potasio y fósforo. En Inglaterra, en 1847, se descubrieron rocas de fosforita adecuadas para minería. La minería de rocas fosfáticas a gran escala se inició en Florida, Estados Unidos, en 1883 y continúa hasta la actualidad. Los grandes depósitos en Inglaterra y Bone Valley, Florida, fueron identificados como biolititos que se formaron en mares someros y se componen de fosfatos provenientes de huesos y materia fecal fosilizada. Posteriormente, se reconocieron a las rocas fosfáticas genéticamente asociadas a corrientes surgentes o ascendentes (*upwelling*) y escasa sedimentación en la zona de la plataforma. Las corrientes del tipo *upwelling* provienen de las profundidades de las cuencas marinas, son frías y ricas en nutrientes. En su desarrollo inciden una alta productividad orgánica y la presencia masiva de fitoplancton y otros organismos. Actualmente, se reconocen acumulaciones de fosfatos en los márgenes continentales y montes submarinos.

Los primeros minerales marinos de aguas profundas que fueron descubiertos durante la campaña oceanográfica global del HMS Challenger entre 1872 y 1876 fueron las fosforitas, comentadas anteriormente, y los

nódulos y costras polimetálicos. Al tomar muestras del fondo, los científicos se sorprendieron por la cantidad de “cuerpos peculiares negros de aproximadamente una pulgada de longitud” que determinaron eran casi “totalmente peróxido de manganeso”. Las implicancias para los usos económicos de estos materiales se perdieron en los informes científicos del siglo XIX, aun cuando se determinó que contenían níquel y hierro. Los análisis de testigos extraídos en aguas profundas durante la Segunda Guerra Mundial ayudaron a empezar a entender las relaciones químicas entre el hierro, el níquel y los óxidos de cobalto y manganeso. Sin embargo, fue el trabajo de John Mero y su publicación en 1965 de *The mineral resources of the sea* (Mero, 1965) lo que despertó el interés de empresas de minería de níquel, empresas de tecnología y gobiernos en iniciar la investigación y la cartografía de recursos minerales en aguas profundas.

Los sulfuros masivos del fondo marino (SMS, por sus siglas en inglés *seafloor massive sulfides*), también conocidos como sulfuros masivos polimetálicos (PMS, *polimetallic massive sulfides*), fueron los últimos tipos de depósitos minerales del fondo marino profundo en ser descubiertos. En 1976, científicos descubrieron un sistema de fuentes hidrotermales a lo largo del *rift* de Galápagos, utilizando un sistema de arrastre profundo, y un año más tarde volvieron para observar estas fuentes hidrotermales desde el submarino tripulado Alvin. Rápidamente, otros científicos documentaron fuentes hidrotermales (fumarolas) en dorsales mesoocéánicas y determinaron que la actividad hidrotermal conducía sulfuros de oro, plata y zinc desde cuerpos magmáticos someros, que precipitaban

rápidamente en el fondo marino cuando los fluidos calientes se mezclaban con las frías aguas oceánicas (Herzig *et al.*, 2002). El descubrimiento de sistemas hidrotermales activos en el fondo del mar actual llevó a una re-evaluación de sulfuros masivos volcano-génicos, que eran depósitos identificados en áreas continentales, y trajo nuevas perspectivas sobre cómo se formaron estos depósitos originalmente en el suelo marino antiguo (Franklin *et al.*, 2005).

Minería marina actual

Muchas operaciones mineras de arenas negras se realizan en depósitos de playas y planicies de cordones litorales. Los mayores productores son totalmente terrestres, por ejemplo, en la Cuenca Murray, Australia. Algunas de estas operaciones, como la Operación de Arenas Minerales de Tormin, en Sudáfrica, también tienen un componente marítimo que no está explotado en la actualidad. La mina de Guaju, en Paraíba, Brasil, tiene minas de monacita en las arenas de dunas de paleoplayas, a un kilómetro de la costa actual. Es probable que estos depósitos tengan una extensión marina. El gobierno indio otorgó licencias marítimas a lo largo de la costa de Kerala. Las arenas negras más accesibles se encuentran en playas y no se ha desplegado la minería marítima de arenas negras, con unas pocas excepciones. Sin embargo, la minería de arenas negras con draga es una actividad común, debido a la típica poca profundidad de agua de los depósitos cercanos a las costas.

Varios proyectos marítimos de fosfato en México, Namibia y Nueva Zelanda han sido

incluidos en procesos de evaluación ambiental, pero ninguno se encuentra activo por el momento. Cada uno de estos proyectos tiene que superar una combinación de desafíos económicos, regulatorios y técnicos.

En la actualidad, no hay operaciones mineras marinas activas para nódulos polimetálicos en aguas profundas (PMN, por sus siglas en inglés), de costras ricas en cobalto (CRC) o de sulfuros masivos del fondo marino (SMS), pero sí ha ocurrido una importante actividad de evaluación de recursos y desarrollo de tecnología. En cuanto a los nódulos, el primer levantamiento *in situ* de nódulos polimetálicos a una embarcación minera piloto, desde la década de los setenta, fue llevado a cabo en 2022 por The Metals Company, Allseas y Nauru Offshore Resources Inc. Los esfuerzos de investigación y desarrollo por parte de agencias nacionales de investigación marítima y de empresas privadas resultaron en varios conceptos y sistemas de exploración de SMS y costras de cobalto. Se están realizando estudios ambientales en paralelo con estas evaluaciones de recursos y pruebas tecnológicas.

Marcos regulatorios en zonas económicas exclusivas y aguas internacionales

Todo análisis de las aguas conocidas y con potencial para explotación mineral marina debe desarrollar brevemente los marcos normativos y regulatorios existentes de las zonas económicas exclusivas (ZEE), la plataforma continental extendida y la Zona.¹

¹ La Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar define a la Zona como los fondos

ZEE de jurisdicción nacional y plataforma continental extendida

En cierta medida, los marcos regulatorios de varios países están establecidos para los minerales marinos cercanos a la costa, por ejemplo, depósitos de placer y fosfatos. Los países con aguas profundas en sus ZEE o cerca de estas apenas han comenzado a considerar cómo construir un marco regulatorio responsable e informado que pueda proteger el ambiente o a otras partes interesadas. Ciertas naciones, como las Islas Cook y Noruega, cuentan con minerales de mar profundo en jurisdicción y han desarrollado marcos regulatorios para la exploración y la explotación de minerales marinos. En consecuencia, el gobierno noruego aprobó el marco regulatorio desarrollado en enero de 2024 (Norwegian Offshore Directorate, 2024). La Dirección Noruega de Petróleo (NPD, por sus siglas en inglés) también cambió su nombre a Dirección Costa Afuera de Noruega (NOD) para ampliar los cometidos y competencias de dicha agencia regulatoria. Las Islas Cook completaron algunas porciones de su marco regulatorio y comenzaron a emitir licencias de exploración para nódulos polimetálicos en 2022 (Seabed Minerals Authority, 2024; USGS, 2024).

Aguas internacionales o la Zona

Todas las áreas marítimas más allá de los límites de las jurisdicciones nacionales se conocen como la Zona (ver capítulo 1.4 de este libro). Normalmente, esta es el área fuera de la ZEE de 200 millas marinas o, de

marinos y oceánicos y su subsuelo fuera de los límites de la jurisdicción nacional; ver capítulos 1.2, 1.3 y 1.4 de este libro.

haberse aprobado, una plataforma continental extendida que puede ir más allá de la ZEE. La Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (ISA) es una organización internacional autónoma establecida por la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CONVEMAR) de 1982 y la implementación de la Sección XI del acuerdo de la CONVEMAR en 1994 (ISA, 2023).

La ISA fue establecida específicamente para abordar cómo regular, y eventualmente autorizar, la extracción de minerales de la Zona y cómo se deberían distribuir las utilidades y los superávits. Los Estados miembros de la CONVEMAR o empresas privadas patrocinadas por un Estado miembro pueden adquirir contratos de exploración por quince años. Los contratos de exploración se categorizan según el tipo de mineral de mar profundo: nódulos polimetálicos, sulfuros

polimetálicos o costras de ferromanganeso ricas en cobalto (ISA, s. f.).

La figura 1 muestra una distribución global generalizada de minerales de fondo marino de aguas profundas (Miller *et al.*, 2018). Las áreas más cercanas sujetas a contratos de exploración emitidos por la ISA son áreas contratadas para costras de ferromanganeso ricas en cobalto, aproximadamente a 1.400 km al noroeste de la ZEE uruguaya, en el Alto de Río Grande, fuera de la ZEE brasilera. Varias áreas contratadas para CFC estaban a cargo de la Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), una agencia pública brasilera dentro del Ministerio de Minería y Energía, pero renunciaron voluntariamente a ellas en 2022. Nótese la extensa área indicada como potencial para nódulos polimetálicos frente a las costas de Uruguay, del sudeste de Brasil y Argentina (figura 1).

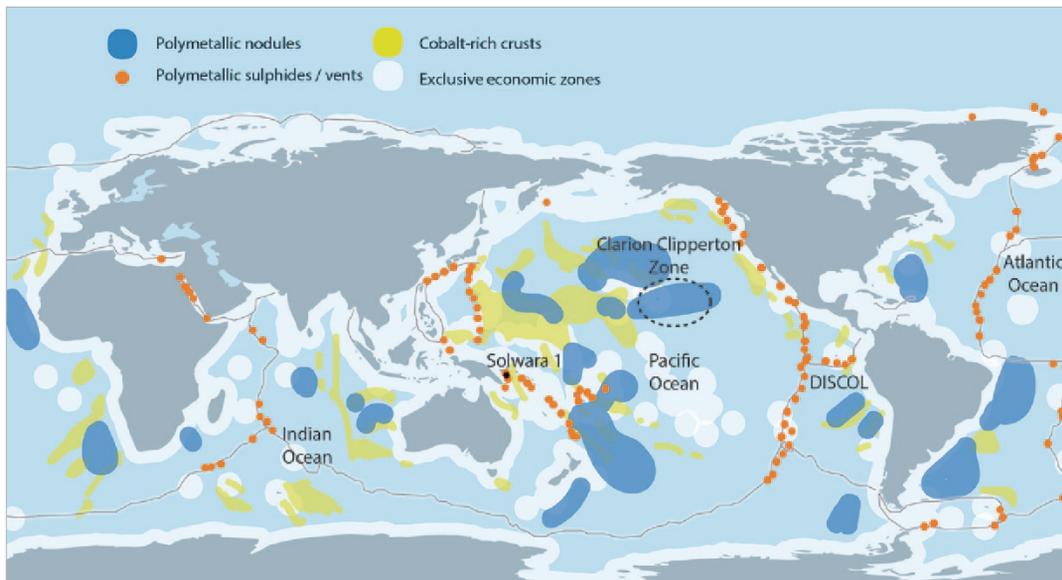


Figura 1: Distribución de los tres tipos de minerales de aguas profundas (Miller *et al.*, 2018). Nótese el amplio polígono que indica nódulos polimetálicos justo frente a la ZEE uruguaya.

Descripción y marco geológico de los depósitos de minerales marinos

Arenas negras

Las arenas negras (arenas que contienen minerales pesados o *heavy mineral sands*, por su denominación en inglés) son resistentes a la erosión química y física, y pueden ser separadas de arenas de cuarzo más ligeras naturalmente por la acción fluvial y el oleaje. Los minerales pesados se encuentran comúnmente asociados a depósitos de placeres que incluyen ilmenita, rutilo, cianita, magnetita, monacita y circón, y son fuentes de titanio, aluminio, hierro, tierras raras y circón, respectivamente. Los depósitos de placeres derivan de la erosión de rocas ígneas o metamórficas y corresponden a una concentración gravitacional de minerales pesados por fluidos en movimiento, generalmente por agua. De esta forma, las corrientes en los ríos causan la clasificación primaria de sus sedimentos y eventualmente también en los deltas costeros. Los depósitos de delta y placeres de playa son retrabajados, clasificados y transportados por acción de las olas y por corrientes litorales. Los placeres son usualmente de edad Holoceno y pueden incluir arenas de playa actuales y depósitos de dunas, así como paleodunas terrestres y depósitos marinos cercanos a la costa reflejando las variaciones del nivel de mar.

Las arenas de placer no tienen que tener concentraciones elevadas para ser económicas. En suelos ígneos cristalinos se puede requerir más de un 10% de mineral primario de ilmenita para que su explotación sea rentable,

mientras que arenas de placer de ilmenita con menos de 1% pueden ser explotadas debido al bajo costo de la minería y la facilidad de separación. Los otros usos de las playas actuales, tales como la recreación, el alojamiento temporal y el turismo, normalmente son los motivos por los que no se extraen arenas de placer. Dicho esto, los proyectos de infraestructura costera, como el drenaje y el reabastecimiento de playas, deberían considerar la viabilidad de agregar un ciclo de extracción de arenas negras para separar arenas negras valiosas.



Figura 2: Arenas negras en Folly Beach, Carolina del Sur (USGS, dominio público).

Depósitos de fosfatos

Los depósitos de fosfatos se encuentran en las plataformas y el talud continentales, donde existen procesos de surgencia. El océano está casi saturado con fosfato, pero las aguas de océano frío tienen más fosfato que el agua oceánica cálida. En zonas de surgencia, el fosfato precipita con los cambios de temperatura, pH y otras modificaciones. El

fitoplancton y otros organismos consumen el fosfato y ayudan a concentrarlo en los sedimentos. Además del fosfato, es sabido que las tierras raras de itrio (REY, por sus siglas

en inglés) son concentradas en fosforitas durante la diagénesis de carbonato a carbonato-fluorapatita (Hein *et al.*, 2016).

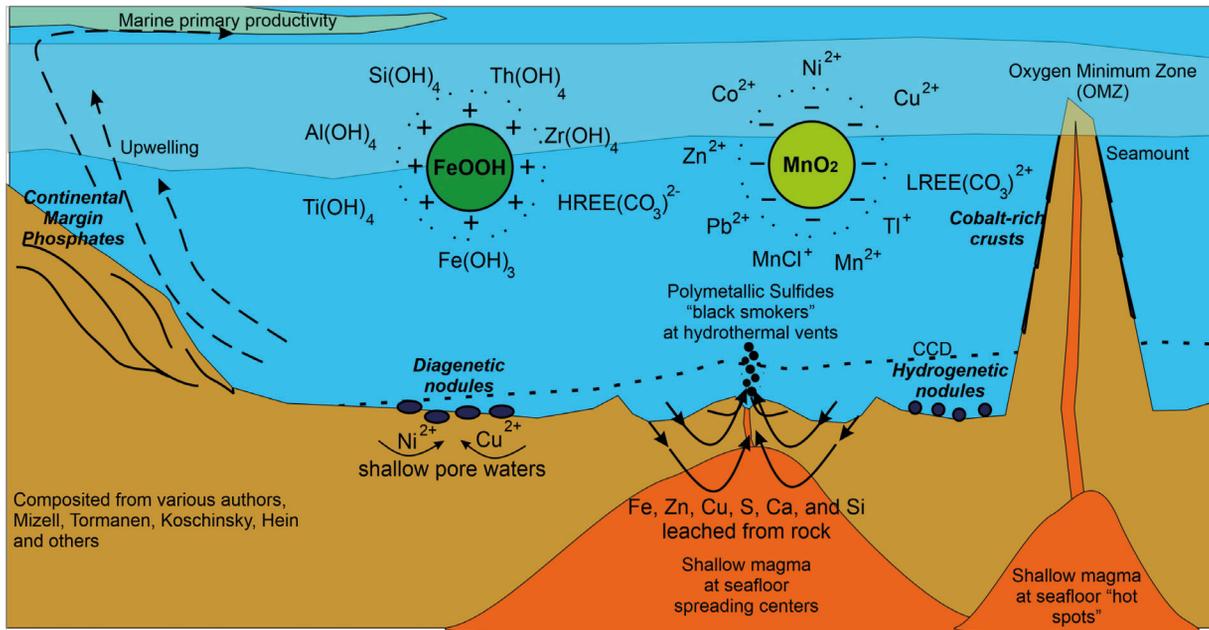


Figura 3: Ilustración que indica el marco geológico de fosforitas, nódulos polimetálicos, sulfuros masivos polimetálicos del fondo marino y costras de ferromanganeso ricas en cobalto polimetálico. Elaboración propia a partir de McKelvey (1986), Hein *et al.* (2000), Törmänen (2005), ISA (2010), Conrad *et al.* (2017), Koschinsky y Hein (2017) y otros.

Nódulos polimetálicos y costras

Nódulos polimetálicos

Los nódulos polimetálicos son concreciones con diámetros de 2 a 15 cm, que se encuentran en el fondo abisal profundo de los océanos globales. Son óxidos de manganeso y hierro que crecen alrededor de un núcleo, en la interfase agua-sedimento. De manera alternada, pueden enriquecerse en cobre, níquel, cobalto, titanio, aluminio, zinc, litio, circonio, magnesio y tierras raras. A pesar de

encontrarse en todos los océanos del planeta, los nódulos polimetálicos se concentran especialmente en el Pacífico norte-central en la Zona de Fractura Clarion-Clipperton (CCZ) y la Cuenca Penrhyn, y el Océano Índico central.

Los controles de formación de nódulos polimetálicos son los siguientes:

- Baja sedimentación pelágica, fuera del alcance de la sedimentación turbidítica terrígena.

- Cercanía a áreas de productividad marina, con profundidades de agua iguales o menores a la profundidad de compensación de carbonato (*carbonate compensation depth* o CCD, por sus siglas en inglés).
- Corrientes de fondo y microtopografía local.
- Condiciones semiconstantes a lo largo de millones de años, que permiten el crecimiento de los nódulos.

El principal control de la formación de nódulos polimetálicos es que se encuentran en áreas con cifras excepcionalmente bajas de sedimentación, ya que los nódulos aumentan en una velocidad de entre 2 y 10 mm por millón de años, y los nódulos hidrogénicos crecen de manera más lenta que los diagénicos (Verlaan y Cronan, 2022). La mayoría de los depósitos de nódulos se encuentran en el fondo marino o parcialmente enterrados a 5 cm. La datación de los nódulos y las cifras de sedimentación donde estos se encuentran sugieren que las velocidades de sedimentación inferiores a 10 cm cada 1000 años se acercan a la condición límite para la acumulación de nódulos. La sedimentación superior a 10 cm cada 1000 años enterraría el material con potencial de nucleación. Incluso las cifras altas de sedimentación *in situ* en áreas de alta productividad restringen la formación de nódulos polimetálicos. La sedimentación con cifras extremadamente bajas como condición para la formación de nódulos polimetálicos naturalmente impide que se generen en cualquier área que sea alcanzada por la sedimentación turbidítica desde los márgenes continentales. Incluso con

estas bajas cifras de sedimentación *in situ*, sin aporte de sedimentos terrígenos además del polvo eólico, los nódulos típicos deberían estar enterrados, ya que estas velocidades de sedimentación extremadamente bajas son, de igual manera, mucho más rápidas que la velocidad de crecimiento de los nódulos. Lo que no se explica por completo es por qué los nódulos no se entierran. Se cree que los nódulos polimetálicos sobreviven al entierro en estos contextos de baja sedimentación *in situ* debido a las corrientes de fondo, bioturbación, movimientos periódicos del suelo y a la interacción de la fauna bentónica, por sus acciones de natación, empuje o excavación.

Un nódulo polimetálico diagénico típico puede demorar 5 millones de años en alcanzar un diámetro de 4 cm. Los depósitos de PMN más concentrados se encuentran regionalmente cercanos a zonas de alta productividad marina, pero no directamente debajo de estas. La sedimentación pelágica *in situ* en áreas de alta productividad reduce la CCD. Si la CCD intersecta el fondo marino, el material orgánico calcáreo se puede acumular demasiado rápido e impedir el crecimiento de nódulos.

Los nódulos que no se forman en estas condiciones suelen ser más ricos en manganeso y pobres en níquel y cobre, debido a que se superan los procesos biogeoquímicos que fijan estos elementos. Hay dos procesos que forman PMN: los nódulos hidrogénicos acumulan metales directamente desde el agua del mar, y los nódulos diagénicos acumulan metales desde las aguas intersticiales enriquecidas (figura 3). Tanto los nódulos hidrogénicos como los diagénicos crecen alrededor de un núcleo duro, un fragmento

de roca o un material duro biológico, como dientes o huesos de tiburón. Los nódulos diagenéticos suelen estar enriquecidos en níquel y cobre, lo que es facilitado por materiales biológicos (gránulos fecales y biope-lículas) y se asocia a la productividad marina.

En general, los nódulos diagenéticos son más abundantes o más grandes a la CCD o por debajo de esta, en áreas de sedimentación moderada, tanto *in situ* como por procesos de transporte, asociados a la productividad marina (figura 3).

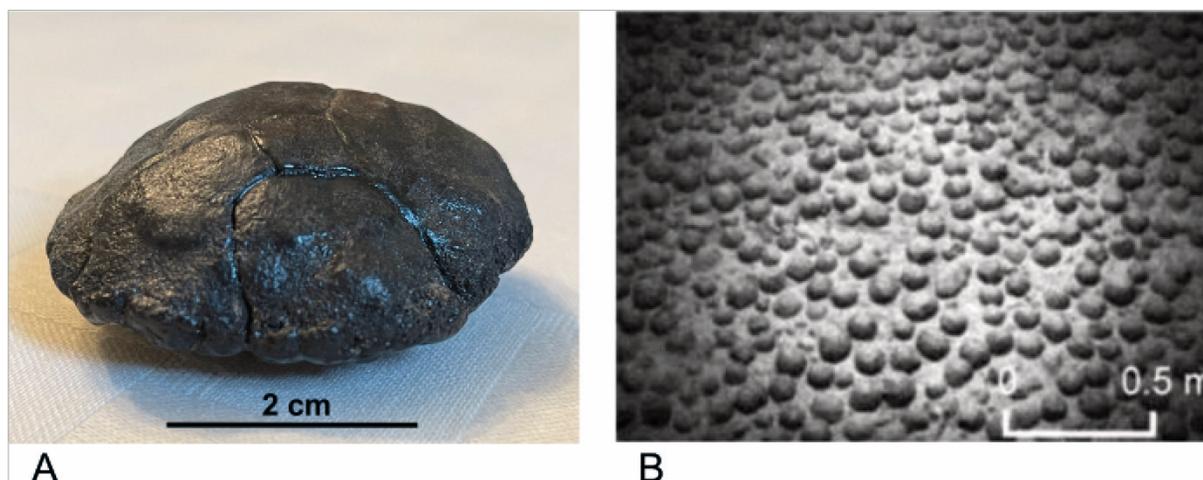


Figura 4: Nódulos polimetálicos típicos del este del Pacífico. a) Cortesía de D. McConnell. b) ISA (2008).

Los nódulos hidrogénicos que se forman a partir de coloides de manganeso en agua del mar, en general, se encuentran por debajo de la CCD en áreas cercanas a la productividad marina (figura 3). Los nódulos hidrogénicos suelen ser más ricos en cobalto y carentes de cobre y níquel. Los nódulos mixtos hidrogénicos y diagenéticos, típicos del este del Pacífico, se muestran en las figuras 4 y 5. Los nódulos polimetálicos son abundantes y, por ende, el tamaño del recurso es inmenso. La ISA estima 21.000 millones de toneladas (base seca) de nódulos polimetálicos en la CCZ. En 2018, The Metals Company, anteriormente conocida como DeepGreen Metals, usó un vehículo submarino autónomo (AUV) para el muestreo y la evaluación de recursos en el área del contrato NORI D, de 25.160 km², un sector pequeño del área

CCZ. Este estudio combinó mediciones acústicas del AUV, la determinación precisa de la profundidad y la captura de imágenes con cámara submarina, con la toma de muestras con *box core* en el área de contrato NORI D. La estimación de recursos, actualizada con un muestreo detallado con *box core*, arrojó un volumen medido de 4 millones de toneladas (base húmeda), 341 millones de toneladas indicadas y 11 millones de toneladas inferidas para el área contratada (usando un corte de 4 kg/m²). El recurso medido tenía una abundancia de 18,6 kg/m², con 1,40% de níquel, 1,16% de cobre, 37,9% de manganeso y 0,13% de cobalto (AMC Consultants, 2021), lo que lo posiciona como uno de los proyectos no desarrollados de níquel más grande, sólo considerando este mineral (Mining.com, 2023).

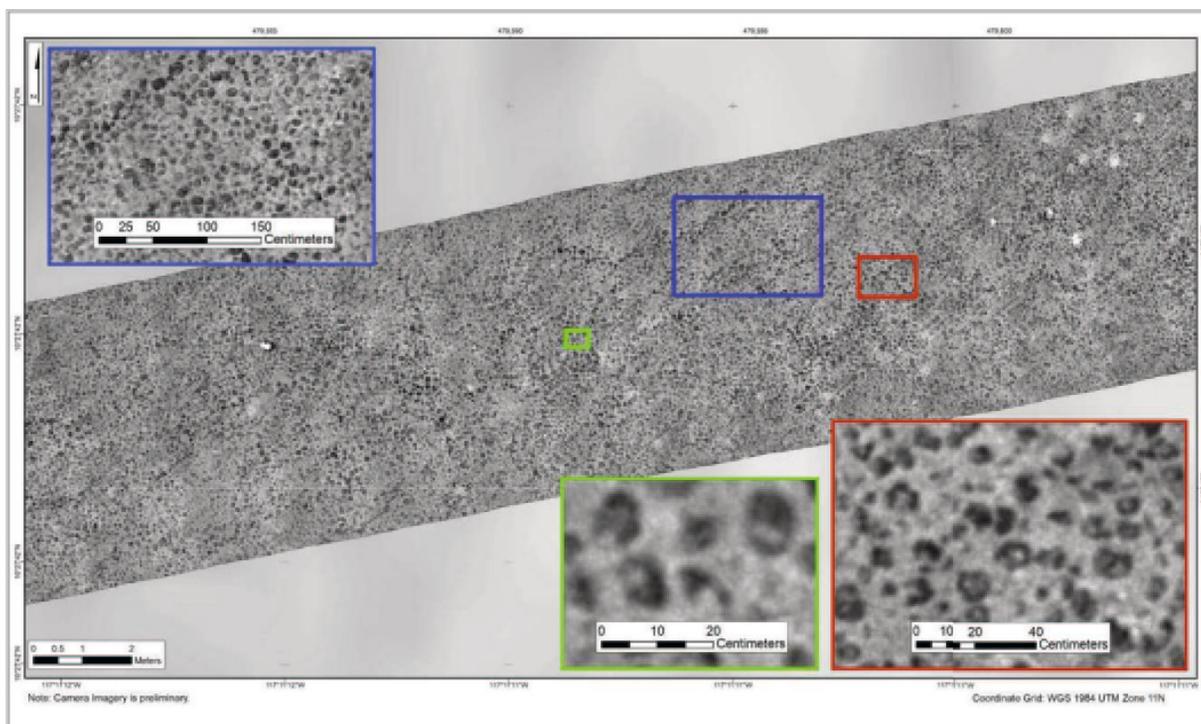


Figura 5: Transección fotográfica del fondo marino tomada desde un vehículo submarino autónomo (AUV, por sus siglas en inglés) en una altitud de 6 m sobre el lecho marino, a 4.100 m de profundidad acuática, que muestra depósitos densos de nódulos polimetálicos, típicos de esta zona en el este del Pacífico. (The Metals Company).

Costras polimetálicas de ferromanganeso

Las costras polimetálicas, también conocidas como costras de ferromanganeso ricas en cobalto (CFC), son similares a los nódulos polimetálicos hidrogenéticos, ya que ambos son oxihidróxido de hierro y manganeso que pueden concentrar cobalto, níquel, aluminio, titanio, además de manganeso dentro de las costras. Estas costras, igual que los nódulos hidrogénicos, se acumulan y crecen de manera extremadamente lenta, a partir del contacto con metales disueltos y coloides en agua marina (figura 3). Las costras son finas y oscilan entre una pátina y 80 mm. Las costras con espesor superior a 40 mm son de interés

para la potencial evaluación de recursos (figura 6). Las costras se forman en sustratos duros libres de sedimentos, tales como dorsales volcánicas, centros de expansión oceánica o, de mayor interés, montes submarinos, especialmente aquellos establecidos en suelo marino más antiguo, ya que hay más tiempo para que las costras, que tienen una velocidad de acumulación extremadamente baja, puedan alcanzar un espesor mínimo (figura 3).

Para que haya crecimiento en los largos períodos necesarios, también se necesitan velocidades muy bajas de sedimentación lejos del alcance del aporte terrestre y niveles aún más bajos de sedimentación pelágica. En

estos sistemas con regímenes de sedimentación extremadamente bajos, las corrientes de fondo pueden aportar metales fijados a los nutrientes y metales en solución que pueden favorecer la formación de costras.

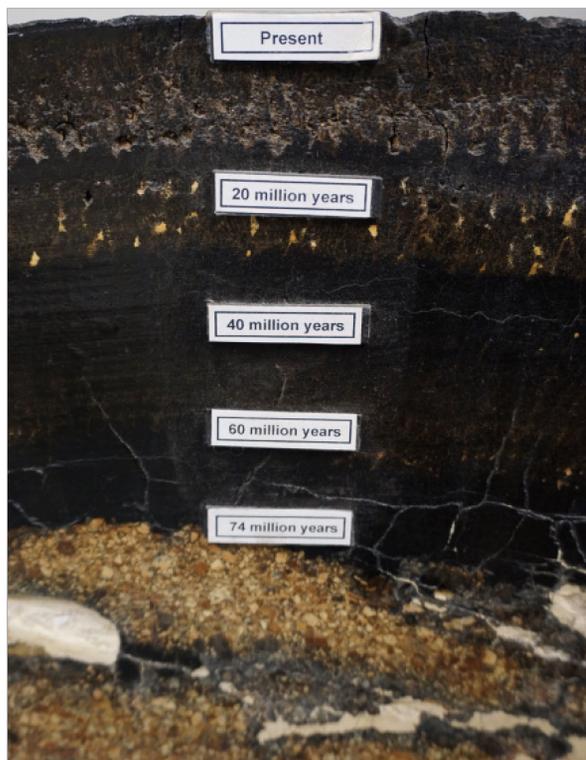


Figura 6: Corte transversal de costras de ferromanganeso ricas en cobalto de las Islas Marshall, extraído a casi 2.000 m de profundidad. (USGS, dominio público).

La formación de costras más gruesas a los lados de los montes marinos se correlaciona con las zonas con mínima concentración de oxígeno (OMZ, por sus siglas en inglés), ya que las aguas con bajo oxígeno contienen más manganeso disuelto (figura 3). Las aguas ricas en oxígeno son más frías y profundas, pero las aguas superficiales más templadas se oxigenan mediante el contacto con la atmósfera, lo que aumenta con la acción del viento y las olas. Las transectas a través de

las cuencas oceánicas muestran una posición OMZ a lo largo del océano de entre 800 y 1.200 m. Mientras que se muestran condiciones favorables al crecimiento de costras polimetálicas en áreas de baja productividad, la OMZ se amplía debido a los procesos bacterianos que consumen oxígeno en respuesta a los niveles de productividad primarias. Esta OMZ, que es controlada principalmente por las interfaces atmosféricas, por la temperatura del océano y, posteriormente, por la interacción de las corrientes oceánicas, también crea condiciones químicas favorables para que se acumulen costras de ferromanganeso ricas en cobalto (figura 3).

Las regiones donde se observa una cantidad importante de montes marinos en suelo marino antiguo, como sucede en el centro-oeste del Pacífico, se ven favorecidas para el desarrollo de costras, especialmente cuando los montes marinos son interceptados por las OMZ actuales y en el pasado.

Sulfuros masivos polimetálicos

La formación de sulfuros masivos polimetálicos está fuertemente asociada a los procesos de creación de nuevos suelos marinos en los centros de expansión que se ubican en los límites de las placas tectónicas y los procesos que generan fumarolas negras (*black smokers*).

En los centros de expansión, el magma caliente asciende a través de fracturas para generar nuevos suelos oceánicos a partir del magma enfriado. Los sulfuros que se forman en los centros de expansión pueden contener altas concentraciones de cobre, zinc y plomo, así como de oro y plata. La circulación hidrotermal de agua marina en los centros

de expansión es el fluido que forma los minerales. Cuando el magma fundido se enfría al entrar en contacto con el agua fría del mar y se convierte en basalto quebradizo, se forman grietas y fisuras en su estructura. El agua del mar penetra estas grietas de la corteza oceánica recién formada. En este proceso, el agua del mar alcanza temperaturas superiores a los 400 °C, se acidifica y tiene bajo potencial redox. El agua de mar ácida y caliente es corrosiva y puede lixiviar el

hierro, manganeso, bario, cobre, plomo, zinc, oro o plata contenido en la corteza oceánica. Este fluido extremadamente caliente con metales en solución tiene una menor densidad y asciende a través de las fisuras, entrando en contacto y enfriándose con el agua fría del mar. Esto lleva a la precipitación de los metales en solución y a la formación de sulfuros masivos en el suelo marino y entre la red de fisuras subyacente (figuras 3 y 7).

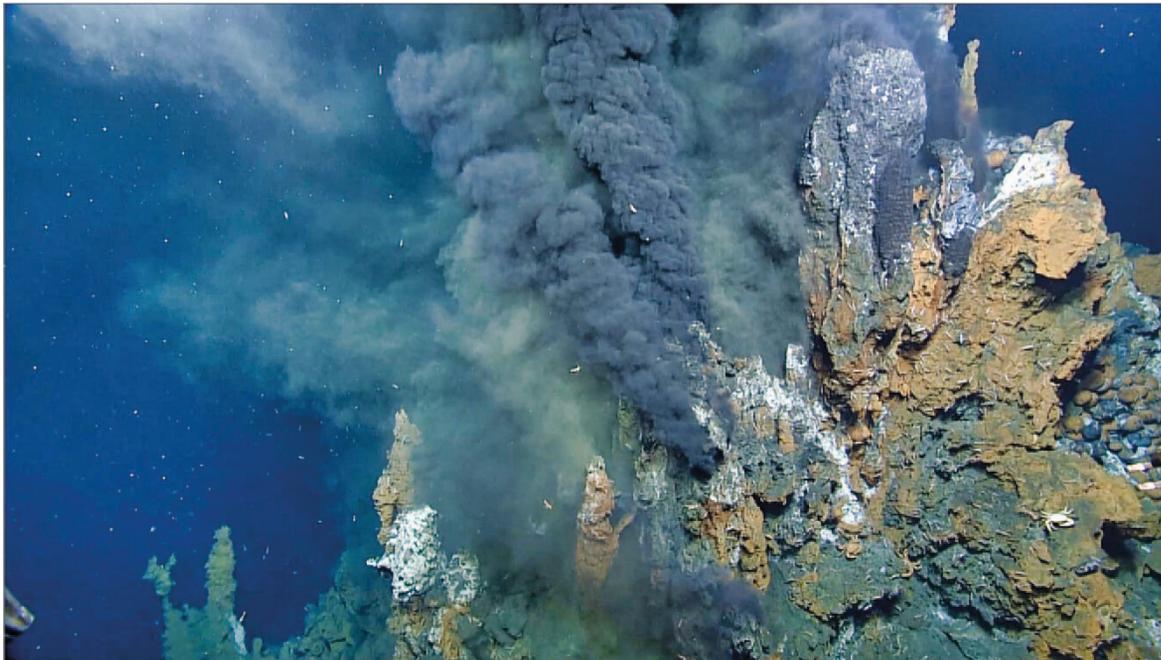


Figura 7: Agua cargada de minerales emergiendo de una chimenea hidrotermal en el volcán submarino Niua en la Cuenca Lau, al suroeste del Pacífico. Sulfuros masivos del fondo marino se precipitan y forman chimeneas. (USGS, dominio público).

Minerales marinos en la ZEE uruguaya y zonas adyacentes

Arenas negras dentro o cerca de la ZEE uruguaya

Contexto

Para la exploración y la posible explotación de las arenas negras se deberían considerar aspectos tales como el ambiente físico, la biodiversidad y los usos de la costa uruguaya, que están descritos por López Laborde *et al.* (2000) y Menafra *et al.* (2006). La geomorfología de las arenas de playa en la costa oceánica uruguaya está descrita en Gómez Pivel (2006) y Goso Aguilar y Muzio (2006); los depósitos de placeres de minerales pesados en la ZEE uruguaya provienen del basamento cristalino precámbrico que aflora en el suroeste de Uruguay y a partir del sistema de drenaje de la cuenca del Río de la Plata, tal como está descrito por Sánchez Bettucci *et al.* (2010).

Las arenas negras ricas en minerales pesados están presentes a lo largo de las playas de Villa Argentina, Atlántida, Aguas Dulces, Cabo Polonio, La Caronilla, La Paloma y la Barra del Chuy (Meyer y Alexandroff, 1963; Benedetti, 1967; DINAMIGE, 2002; Goso Aguilar y Muzio, 2006). Estas arenas son ricas en ilmenita, rutilo, monacita y zircón. El contenido de minerales pesados es en promedio de entre 2,5% y 3%. Hasta ahora, las arenas negras estudiadas se consideran subeconómicas (Goso Aguilar y Muzio, 2006) y cualquier desarrollo debería considerar otros intereses económicos, como el desarrollo costero y el turismo.

Potencial

Las arenas negras se encuentran en dunas paralelas a la playa entre Río Grande y Tramandai, en el estado de Río Grande del Sur, Brasil, al norte de la frontera con Uruguay. Las paleodunas eólicas de placer se desarrollaron a partir de sucesivas transgresiones y regresiones que formaron los sistemas de barras y lagunas costeras. Los placeres de Bujuru se asocian a depósitos de isla-barrera holocénicas. Los depósitos de arenas negras tienen menos de 10 m de espesor, con un 55% de ilmenita y un 9% de zircón. Se estiman reservas de 7 millones de toneladas de granos metálicos (Martins *et al.*, 2003). Aunque no se identifican barreras ni sistemas de lagunas análogas del lado uruguayo, es probable que existan barras de arena en el sector marino de Uruguay, que puedan ser ricas en arenas negras.

Depósitos de fosfatos dentro o cerca de la ZEE uruguaya

Contexto

No se conocen depósitos marinos de fosfatos en la jurisdicción uruguaya.

Potencial

Se tiene registro de depósitos de fosfatos en la plataforma continental exterior, justo al norte de la ZEE uruguaya, y también podrían existir dentro de la ZEE uruguaya. Se han dragado depósitos de fosfatos en la Elevación de Río Grande en la plataforma continental exterior del estado de Río Grande del Sur, Brasil. El dragado a profundidades de entre 350 y 500 metros muestra grandes cantidades

de concreciones de fosfato, con una concentración de 16% de óxido fosfórico (P_2O_5). El depósito contiene componentes biogénicos retrabajados y tiene composiciones químicas similares a los depósitos costa afuera de Namibia, al sudoeste africano (Martins *et al.*, 2003).

Nódulos polimetálicos dentro o cerca de la ZEE uruguaya

Contexto

No se han reportado nódulos en la ZEE uruguaya, pero hay una gran área mar adentro de la ZEE en aguas internacionales y, posiblemente, tan cerca como el reclamo de plataforma continental extendida de Uruguay, que se muestra en varios mapas de minerales de mar profundo como potencial para nódulos polimetálicos (figura 1).

Potencial

Dentro de la ZEE uruguaya, el contexto geológico no es favorable debido a que los niveles de sedimentación, el principal factor de control, son demasiado altos. La posibilidad de nódulos polimetálicos aumenta en la plataforma continental extendida uruguaya, pero una revisión de testigos de sedimento (*piston core*) indica un aporte terrígeno al área que probablemente evite el crecimiento de nódulos. Una serie de estudios sísmicos 2D y 3D realizados entre 1970 y 2017 para la exploración de hidrocarburos costa afuera de Uruguay confirma que la ZEE uruguaya no es favorable para la acumulación de nódulos polimetálicos. En algunas zonas de

aguas profundas de la ZEE uruguaya se realizaron estudios geofísicos de alta resolución, que complementados con datos geofísicos de menor resolución (reflector del fondo marino en sísmica 3D), proporcionan una buena comprensión de la morfología del fondo marino y los procesos en la mayor parte de la ZEE, más allá del límite de la plataforma continental. En áreas externas al sistema del Río de la Plata se observan cañones submarinos, deslizamientos, canales y escarpas que acumulan depósitos en el talud medio e inferior. La sísmica muestra una potente sedimentación, principalmente terrígena, desde mediados del Mioceno hasta el Plioceno, que se extienden hacia la zona de transición entre el talud inferior y la emersión continental y hasta el límite de la ZEE (Hernández-Molina *et al.*, 2016; capítulo 2.1 de este libro).

En este ambiente no se formarán nódulos polimetálicos. Rohais *et al.* (2021) estudiaron los pulsos de sedimentación en el Cenozoico en la Cuenca Pelotas y estimaron que la sedimentación *in situ* y la sedimentación pelágica contribuyó únicamente con entre un 0,3 % y un 0,5 % a los sedimentos acumulados en la cuenca. Esto significa que más del 99% del sedimento en estas áreas marinas es de origen continental.

La ZEE uruguaya no tiene potencial para nódulos polimetálicos. Sin embargo, como fue mencionado, una gran área muestra potencial para nódulos polimetálicos en los planos abisales de la Cuenca Argentina. Esta área con potencial se comenta en el apartado sobre el Atlántico Sudoccidental en el Cono Sur.

Costras de ferromanganeso ricas en cobalto dentro o cerca de la ZEE uruguaya

Contexto

No se han reportado costras de ferromagnesio (Fe-Mn) en la ZEE uruguaya. El crecimiento de costras de Fe-Mn comparte muchas características con el de los nódulos polimetálicos. Al igual que los nódulos polimetálicos, estas costras requieren condiciones de sedimentación *in situ* muy lenta. Las costras de ferromagnesio ricas en cobalto más cercanas se reconocen en el Alto de Río Grande, intersectando sectores de la plataforma continental extendida de Brasil.

Potencial

El gran aporte de sedimentos futuro y actual del Río de la Plata, que construyó el talud continental comprendido en la ZEE uruguaya, no es un ambiente favorable para el desarrollo de costras ricas en cobalto. Sin embargo, esto no elimina la posibilidad de que se desarrollen capas y lentes confinados a lo largo de afloramientos contorníticos erosionados y consolidados o en altos, donde las fuertes corrientes de fondo de la Antártida intersectan la OMZ con promotores biológicos provenientes de zonas de alta productividad marina local y cercana.

Sulfuros masivos del fondo marino dentro o cerca de la ZEE uruguaya

Contexto

No se han reportado sulfuros masivos en la ZEE uruguaya o en la plataforma continental

extendida. Tampoco se han identificado depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos (VMS); estos son depósitos que originalmente se encontraban en el fondo marino antiguo y posteriormente se incorporaron a los continentes (Franklin *et al.*, 2005).

Potencial

La ZEE uruguaya no tiene potencial para el desarrollo de sulfuros masivos, al menos con los medios utilizados en la actualidad para explorar estos depósitos, que están dirigidos a localizar campos hidrotermales activos en primer lugar. La corteza oceánica subyacente a la ZEE uruguaya no contiene un centro de expansión activo ni fallas de transformación activas asociadas. Sin embargo, en el momento de su formación, cada corteza oceánica estuvo asociada con procesos hidrotermales que podrían resultar en depósitos de minerales. Dentro de la ZEE uruguaya o la plataforma continental extendida se identifican montes submarinos asociados a procesos de fractura y vulcanismo de la corteza oceánica. Los montes submarinos de este tipo más cercanos están a 300 km del reclamo de plataforma continental extendida de Uruguay.

Atlántico Sudoccidental en el Cono Sur

Nódulos polimetálicos

Contexto

En la Cuenca Argentina se ha confirmado la presencia de nódulos polimetálicos a partir de perforaciones y fotografías del fondo marino. Por ejemplo, la cámara submarina

de la estación V18-K40, 730 km al sureste de la Península de Valdés, mostró un campo local de nódulos polimetálicos en diferentes etapas de soterramiento por la deriva (*drift*) sedimentaria (figura 8). Estos nódulos tienen un diámetro de entre 4 y 8 cm, con una abundancia estimada de 16 nódulos por metro cuadrado. La transecta 14 de la Expedición Vema en el año 1962, realizada 540 km al este de la Península de Valdés y a 4.100 m, en la cima de una terraza en el talud inferior, extrajo 16 rocas con draga, de las cuales 4 eran costras de ferromanganeso (Ewing y Lonardi, 1971; Ewing *et al.*, 1971a, 1971b).



Figura 8: Estación de cámara V19-K40 que muestra campo de nódulos local (Ewing *et al.*, 1971a).

Potencial

Basándose en estas muestras y otras, Miller *et al.* (2018) (figura 1), Koschinsky y Hein (2017) y otros mapearon ocurrencias de nódulos confirmadas entre y en el perímetro de la Cuenca Argentina, especialmente a lo largo de la Zona de Fractura de Malvinas.

La Cuenca Argentina tiene muchos elementos favorables para el desarrollo de PMN:

- Niveles bajos de sedimentación *in situ* a lo largo de una planicie abisal de suelo marino antiguo.

- Las corrientes de Agua de Fondo Antártico (AABW) enriquecida en metales.
- Cercanía a zonas de alta productividad marina.

Se deduce que los niveles de sedimentación en la planicie abisal de la Cuenca Argentina son muy bajos. La perforación de aguas profundas más cercana es la DSDP 26-311, la cual recuperó poco más de 8 m de testigo debido a condiciones climáticas adversas. Los sedimentos recuperados son del Pleistoceno inferior, con una edad mínima informada de 400.000 años, con base en la identificación de Radiolaria, y sugieren un nivel de sedimentación máximo de 2 a 4 cm cada 1.000 años, lo que cumple con la condición aceptada de menos de 10 cm cada 1.000 años para la formación de nódulos polimetálicos. Los sedimentos estaban bien clasificados, lo que indica que estuvieron sujetos a un proceso de selección por acción del viento (*winnowing*). La presencia de diatomeas Antárticas sugiere su origen y el transporte a larga distancia a través de la corriente de AABW.

La corriente de AABW condiciona el desarrollo de nódulos, debido a que arrastra sedimentos desde la Escarpa de Malvinas a la Cuenca Argentina al atravesar con fuerza el Mar de Weddell y, además, al contener más oxígeno y minerales disueltos que las masas de agua intermedias. Las ocurrencias conocidas de nódulos parecen acompañar la ruta principal de la corriente de AABW a lo largo de la plataforma de Malvinas y a lo largo del pie de talud oblicuo al sudoeste de la Cuenca Argentina (Kasten *et al.*, 1998).

Una condición adicional que promueve la acumulación de nódulos polimetálicos en

un área extensa de la Cuenca Argentina es su cercanía a zonas de alta productividad marina (figura 9). La productividad marina contribuye a los promotores biogeoquímicos esenciales que ayudan a la formación de nódulos polimetálicos. La plataforma continental argentina es excepcionalmente ancha y llana, y la confluencia de dos corrientes y varios frentes oceánicos promueve una de

las regiones de mayor productividad marina. Esta fuerte productividad primaria sostiene las pesquerías, los moluscos, las aves marinas y los mamíferos marinos de la actualidad. Vale la pena resaltar que los datos sugieren que las paleoproductividades primarias eran incluso superiores en la Cuenca Argentina (Acha *et al.*, 2004; Dogliotti *et al.*, 2014; Burone *et al.*, 2021).

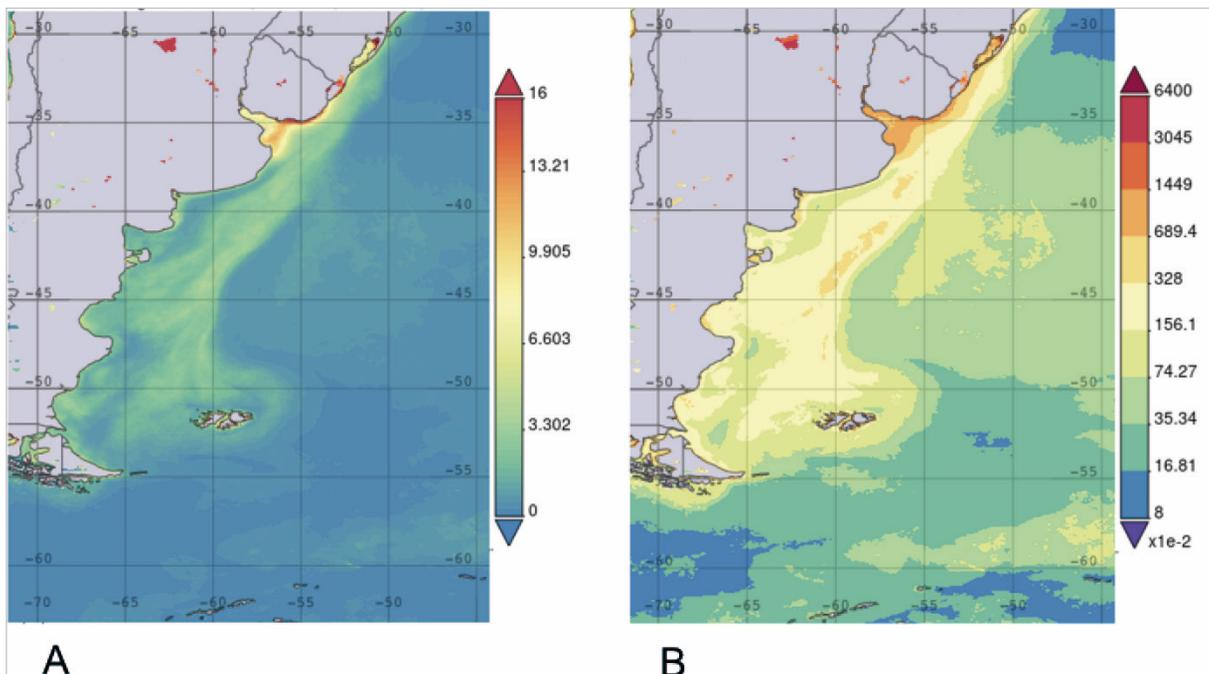


Figura 9: Brotes estacionales de fitoplancton en el sudoeste del Atlántico, capturados por el satélite espectrorradiómetro MODIS-AQUA, que muestran la concentración promedio de clorofila de septiembre a noviembre entre los años 2005 y 2015. Valores reales indicados en a). Valores logarítmicos indicados en b). (Cortesía de A. Trapp, Universidad de California Santa Cruz).

Sin embargo, una revisión de las características del lecho marino, publicada a partir de datos de las expediciones de los buques oceanográficos R/V Vema y R/V Robert Conrad, en la década de los sesenta e inicios de los setenta, sugiere que la Cuenca Argentina puede no tener tanto potencial para PMN como ha

sido publicado. El análisis de testigos de sedimentos (*piston core*) no respalda la presencia de un área favorable para la acumulación de nódulos. A partir de la revisión de más de 300 testigos tomados en la Cuenca Argentina, solamente 5 describieron nódulos superficiales o enterrados. Estos nódulos se encuentran

con preferencia en testigos tomados en el sector sur de la Cuenca Argentina, a lo largo de la plataforma de Malvinas. En 17 testigos se identificaron micronódulos de manganeso, que tienen un diámetro típicamente entre 1 a 2 mm, pero que no corresponden a los típicos nódulos polimetálicos con diámetros de más de 2 cm. Estas expediciones utilizaron un perforador de pistón de Kullenburg, con un diámetro interno de 5,2 cm. De esta manera, es posible que, si un área tuviera, por ejemplo, una cobertura de nódulos de 10% a 20%, un perforador de pistón no encontraría los nódulos en aproximadamente 8 de cada 10 testigos. Si la cobertura de nódulos fuera más densa, como normalmente se encuentra en áreas de gran abundancia, al menos 1 de 2 testigos encontraría nódulos. Los nódulos pueden ser abundantes a escala local, lo que también puede explicar su ausencia en un muestreo regional. Sin embargo, en muchos de estos 300 muestreos de fondo, o cerca de las estaciones de muestreo, se tomaron fotografías y las publicaciones que analizaron estas fotografías no identifican campos de nódulos, sino que describen grandes ondas sedimentarias. Flood y Shor (1988) revisaron los datos del perfilador de fondo de alta resolución de 3,5 kHz (*subbotom profiler*) y las fotografías del fondo marino que surgen de las mencionadas expediciones, y reportan grandes ondas sedimentarias en grandes áreas de la Cuenca Argentina, lo que los autores llamaron “ondas de lodo” (*mud waves*).

Se entiende que la migración de óndulas se origina por el efecto de las corrientes de fondo y remolinos (*eddies*) fuertes y persistentes a lo largo de largos períodos, así como por las tormentas bentónicas de corta duración.

La altura de las ondas sedimentarias oscila entre 5 y 85 m, y la separación entre ondas sedimentarias es de entre 2 y 10 km. Se desconoce el tiempo necesario para desarrollar estas ondas, pero se cree que es de entre decenas y cientos de miles de años (Flood y Shor, 1988). La removilización semicontinua de sedimentos de fondo podría ser el motivo por el que no se han desarrollado nódulos en la Cuenca Argentina y puede explicar por qué, en su lugar, es común encontrar micronódulos de manganeso en los testigos tomados en este sitio.

Sin embargo, se observa la presencia de nódulos entre América del Sur y la Antártida. Un mapa de minerales marinos del cuadrante sureste del Pacífico muestra más de 40 ubicaciones de fotografías del fondo que delinean grandes áreas, con coberturas de nódulos de más de 25% y de más del 50 % a lo largo del Pasaje de Drake, con una de las áreas abundantes al sur de las Islas Malvinas, aproximadamente a 55° W y 55° S (Consejo Circumpacífico para Energía y Recursos Minerales, 1996).

Sulfuros masivos del fondo marino

Contexto

Los sulfuros masivos del fondo marino más cercanos que fueron identificados están a más de 2.500 km de distancia, en el centro de expansión de retroarco, en la ZEE de la Isla Georgia del Sur, a lo largo del Dorsal de Scotia, donde se han ubicado fumarolas negras, y en el Pasaje de Drake, en un volcán de retroarco en la ZEE argentina y en la Dorsal de Phoenix, en el ámbito de la Zona.

Potencial

Es probable que los sulfuros masivos del fondo marino de la actualidad ocurran en la Zona a lo largo de la Dorsal Mesoatlántica, pero no han sido identificados aún.

Costras de ferromanganeso ricas en cobalto

Contexto

Se reportan costras de ferromanganeso ricas en cobalto en la Cuenca Argentina en la transecta 14, como se comentó anteriormente. También se observaron costras a lo largo de la plataforma de Malvinas. No se encontraron referencias a análisis geoquímicos para estas muestras y se asume su enriquecimiento en cobalto.

Potencial

La prospectividad de costras de ferromanganeso ricas en cobalto en la Cuenca Argentina es muy similar a la de nódulos polimetálicos. Las áreas con mayor potencial serán aquellas a lo largo de la plataforma de Malvinas y a lo

largo de las fuertes corrientes de AABW en la base del talud, con un potencial adicional para la formación de costras en los montes submarinos. Los cúmulos de montes marinos que podrían alojar costras de cobalto se ubican en el sector sudoeste de la Cuenca Argentina y a lo largo de la plataforma de Malvinas.

En síntesis, los minerales marinos con mayor potencial en la ZEE uruguaya son las arenas negras y, posiblemente, los fosfatos. Más allá de la ZEE, podrían existir nódulos polimetálicos y costras en zonas restringidas, pero es posible que no tengan tanto potencial como lo indican los mapas de distribución de minerales marinos. Los nódulos y costras tienen mayor potencial a lo largo del margen sudeste y sudoeste de la Cuenca Argentina. Uruguay podría ser un estado patrocinador de minerales marinos en la Zona, postulándose a través de la ISA. El área más cercana a Uruguay donde hubo áreas contratadas por la ISA es el Alto de Río Grande, con trabajo de exploración mineral y recientes tomas de muestras de costras de ferromanganeso ricas en cobalto.

Las referencias bibliográficas se encuentran en un único apartado ubicado al final del libro.

Cómo citar este capítulo: McConnell, D. R., 2024, Depósitos de minerales marinos en el Atlántico Sudoccidental, en P. Gristo, G. Veroslavsky y H. de Santa Ana, eds., Territorio marítimo uruguayo: soberanía, naturaleza y recursos: Montevideo, ANCAP, pp. 297-317, doi: 10.70952/a8827tmuc3-5

Traducción técnica realizada por Manuela Harretche del original en inglés, corregida por Gerardo Veroslavsky y Pablo Gristo.